

Justo encima de la superficie isostática se sitúa el gran concentro designado como *corteza terrestre* en virtud de antiguas hipótesis geológicas, que pretendían hallar en la faz terrestre, estudiada desde sus premisas, indicios y vestigios de la corteza resultante de la consolidación del planeta otrora líquido. Esta noción enlazaba con las versiones cosmogónicas alusivas al pasado de la Tierra, entre las cuales destaca, a título de exponente, la hipótesis de Laplace. Dicha hipótesis gozaba de gran predicamento entre los estudiosos, quienes, en un momento dado, habían hipotrofiado su valor científico. Progresivamente fue comprobándose que en ninguna capa geológica accesible se descubría la huella de semejante corteza primaria de consolidación y que el hipotético pasado incandescente-líquido del planeta nunca se hacía patente en los fenómenos geológicos.

Así se debilitó la premisa del planeta otrora líquido e incandescente, la hipótesis de una pretérita ignición líquida, pero el término «corteza terrestre» —que se introdujo por esta vía en la ciencia— subsistió, aunque con un sentido diferente.

78. En la corteza terrestre se distinguen varias envolturas o geosferas concéntricamente dispuestas, aun cuando las correspondientes superficies de demarcación disten, por lo general, de ser esféricas. En cada una rigen unos sistemas de equilibrio (dinámicos, físicos y químicos) en gran medida independientes y aislados. En ciertos casos —probablemente por la imperfección de nuestros conocimientos—, no conseguimos delimitar las distintas geosferas.

En lo que atañe a las regiones superiores en estado sólido, estamos acostumbrados para señalar unos límites más exactos; lo mismo cabe afirmar de las regiones gaseosas inferiores. Desde los 16-20 kilómetros de profundidad bajo el nivel oceánico y desde una altitud entre los 10 y los 20 kilómetros han penetrado, o penetran, en la superficie terrestre compuestos químicos en abundancia. El estudio de la estructura geológica de la Tierra demuestra que las rocas compactas más profundas conocidas no traspasan las medidas indicadas. El espesor de 16 kilómetros viene a coincidir con la presencia de las rocas sedimentarias y metamórficas. Probablemente la composición química de estos 16-20 kilómetros superiores de la corteza esté condicionada por los mismos procesos geológicos actualmente en curso. Los rasgos generales de esta composición nos resultan muy familiares.

Más allá de los límites señalados, tanto superior como inferior, nuestros conocimientos se debilitan: no somos capaces de dilucidar qué materia alcanza la corteza terrestre ni son claros, bajo múltiples aspectos —por mucho que hayan progresado las ciencias experimentales—, los estados de la materia en estas regiones de altas y bajas presiones.

No obstante, el terreno que pisamos en nuestra disciplina es inequívocamente sólido: los conocimientos avanzan de manera pausada, pero siste-

mática. Las concepciones anteriores sobre la corteza terrestre están sufriendo una revisión exhaustiva, todavía en ciernes.

79. Hemos de llamar la atención sobre algunos fenómenos generales, relevantes para comprender la estructura de la corteza terrestre.

En primer lugar, en las zonas superiores de la atmósfera, la materia se encuentra en un estado claramente diferente de aquel que estamos acostumbrados a detectar en torno nuestro. Quizá hablemos de una región del planeta —por encima de los 80 a 100 kilómetros de altitud— que ya no pertenece a la corteza terrestre, sino a *un nuevo concentro*. Bajo la forma de electrones y de iones se acumulan, en un medio material enrarecido, inmensas reservas de energía libre; su función en la historia planetaria está aún pendiente de descubrirse.

En segundo lugar, parece verosímil que las capas interiores de la Tierra no se hallen, en toda su extensión, en estado incandescente, líquido, a pesar de que antiguamente se considerara como una prueba de ello la eyección de las rocas volcánicas. Nos vemos abocados a admitir, en tales capas, la existencia de grandes o pequeñas bolsas de magma, masas de silicatos viscosos en estado de fusión, sometidos a una temperatura entre 600 y 1.200 grados centígrados, diseminados en una envoltura sólida o sólida-viscosa. Nada prueba que los centros magnéticos penetren toda la corteza terrestre, que no se concentren en las regiones superiores y que la temperatura de toda la corteza sea tan elevada como la de estas masas incandescentes, ricas en gases.

80. Aun cuando la estructura de las geosferas más profundas encierra todavía muchos enigmas, desde hace unos años abundan los progresos científicos en este ámbito.

La corteza terrestre estaría formada, en su totalidad, por las rocas ácidas y básicas que hay en la superficie. Las rocas ácidas, granitos o granodioritas, se aglomeran bajo los continentes, donde representan un espesor del orden de 15 kilómetros. Las rocas básicas predominan en las profundidades. Bajo la hidrosfera se acercan más a la superficie terrestre. Estas rocas contienen menos energía libre y menos elementos químicos radioactivos.

Como mínimo cabe admitir la existencia de tres geosferas bajo la superficie terrestre. La primera, la envoltura superior, corresponde a las rocas ácidas (*capa granítica*). Finaliza a unos 15 kilómetros de profundidad y es comparativamente rica en elementos radioactivos.

A unos 34 kilómetros de profundidad se aprecia un nuevo cambio brusco en las propiedades de la materia (H. Jeffreys, S. Mohorovicic), lo cual presumiblemente implica el límite inferior para la existencia de los cuerpos cristalinos. Se trataría de la frontera superior de la capa vítrea de R. Daly (1923). Por debajo de este límite las rocas básicas, parcialmente

ácidas, se encontrarán en el estado vítreo y, por tanto, no guardan parentesco con las rocas conocidas.

Se detecta otro cambio brusco a unos 59-60 kilómetros, de promedio, de la superficie; aparentemente obedece a la aparición, en los fenómenos sísmicos, de unas rocas pesadas, quizá eclogitas², cuya densidad no es inferior a 3,3-3,4.

Penetramos aquí en la región del Sima; la densidad de las rocas va haciéndose cada vez mayor, alcanzando un valor de 4,3-4,4 en su límite inferior (L. Adams y E. Williamson, 1925).

Tales nociones, excesivamente simplistas, se limitan a dar una idea somera de la complejidad del fenómeno.

81. La existencia de las capas terrestres se ha ido estableciendo de un modo empírico a lo largo de muchos años. Algunas de ellas, como la atmósfera, llevan siglos determinadas y su existencia se ha convertido en un concepto del dominio público.

Hasta finales del siglo XIX y comienzos del siglo XX, sin embargo, no han empezado a estudiarse los principios de la génesis de estas capas; todavía no está universalmente reconocida su función en la estructura de la corteza terrestre. La génesis está íntimamente ligada a la química de la corteza y su existencia obedece a que todos los procesos químicos superficiales se rigen por idénticas *leyes mecánicas del equilibrio*.

A partir de ahí, las líneas maestras de la estructura química y física de la corteza terrestre, pese a la enorme complejidad de dicha estructura, se perfilan nítidamente; permiten apreciar empíricamente los estados fundamentales de los fenómenos naturales complejos y clasificar los sistemas complejos de los equilibrios dinámicos estables con los que se corresponden, en esta construcción simplificada, las capas terrestres.

Las leyes del equilibrio, en su formulación matemática general, fueron expuestas por J. W. Gibbs (1884-1887), quien las relaciona con la interacción que puede originarse entre las variables independientes características de los procesos físico-químicos: temperatura, presión, estado físico y composición química de los cuerpos que intervienen en los procesos.

Todas las geosferas (capas terrestres) introducidas en la ciencia por una vía estrictamente empírica pueden delimitarse en función de las distintas variables que, según Gibbs, definen los equilibrios que él estudió. De esta suerte cabe discernir las *capas termodinámicas* determinadas por los valores de la temperatura y la presión, las *capas de los estados de la materia*, caracterizadas por las fases (es decir, por el estado físico: sólido, líquido, etc., de

² Las eclogitas no son ciertamente las mismas a las que aluden los petrógrafos debido a su estructura, que no se supone cristalina; se corresponden con ellas por su peso específico. Las eclogitas de dicha zona superior de la corteza terrestre se localizan en las partes más profundas que pueden ser estudiadas *de viva*.

los cuerpos que integran su composición) y, por último, las *capas químicas*, que se definen por su composición química.

Sólo la envoltura destacada por Suess, la *biosfera*, permanece al margen. Todas sus reacciones se someten a las leyes de los equilibrios, pero se singularizan por una nueva propiedad, una nueva variable independiente, que Gibbs no había contemplado.

82. Las variables independientes de los equilibrios heterogéneos investigados comúnmente en los laboratorios químicos y que suelen tomarse en consideración: temperatura, presión, estado y composición de la materia, no incluyen todas las formas teóricamente posibles. Gibbs estudió matemáticamente los equilibrios electrodinámicos. Diversas fuerzas superficiales —fuerzas de contacto— revisten gran importancia en los equilibrios terrestres naturales. Los fenómenos de la fotosíntesis han sido objeto de una atención permanente en el campo químico: la energía radiante luminosa es la que constituye la variable independiente. En los fenómenos de cristalización intervienen además las energías vectoriales del cristal, la energía interna, por ejemplo en la formación de maclas, la energía superficial en todas las cristalizaciones.

Los organismos vivos se diferencian claramente de todas las restantes variables independientes en la biosfera no sólo por agregar la energía luminosa del Sol a los procesos físico-químicos de la corteza terrestre, sino también por su propia esencia. Al igual que aquéllas, modifican el curso de sus equilibrios; ahora bien, en contraposición con las mismas son, como tales, específicamente independientes; es decir, constituyen unas clases de sistemas de equilibrios dinámicos secundarios en el campo termodinámico primario de la biosfera.

La autonomía de los organismos vivos expresa el hecho de que los parámetros del campo termodinámico que les son propios divergen sustancialmente de los parámetros observados en la biosfera. Con respecto a semejante fenómeno, los organismos —algunos, de forma inequívoca— mantienen una temperatura con independencia de la del entorno y poseen una presión interna específica. Están aislados en la biosfera, y el campo termodinámico de la misma reviste importancia para ellos en la medida en que delimita la región donde pueden desarrollarse sus sistemas autónomos, pero no determina su campo interno.

Desde un enfoque químico, su autonomía se revela ciertamente en el dato de que sus compuestos no pueden formarse fuera de los organismos, en las condiciones normales del medio inorgánico inerte de la biosfera; al penetrar en las condiciones de dicho medio, se tornan irremisiblemente inestables, se descomponen, migran a otros cuerpos y se convierten así en desestabilizadores de su equilibrio y en fuente de energía libre para tal medio inanimado.

Estos compuestos químicos se originan en la materia viviente en respuesta a unas condiciones a menudo muy dispares de las que se observan en la biosfera. En ella jamás se detecta la desagregación de las moléculas de ácido carbónico y de agua, uno de los procesos bioquímicos fundamentales. Tal proceso sólo podría acontecer en las regiones profundas de nuestro planeta que son asiento del magma, al margen de la biosfera. En nuestros laboratorios no lo reproducimos más que a unas temperaturas muy elevadas, extrañas a la biosfera. El campo termodinámico de la materia orgánica difiere claramente del de la biosfera, aun cuando no estemos facultados para explicar su existencia autónoma. Es un dato fundamental que los organismos vivos pueden ser descritos empíricamente como campos termodinámicos particulares, ajenos a la biosfera, aislados en ésta, de unas proporciones comparativamente insignificantes, portadores de la energía solar radiante y creados por tales rayos en su seno. Sus dimensiones oscilan entre $n \times 10^{-12}$ y $n \times 10^8$ centímetros cuadrados.

Sea cual fuere la teoría elegida a la hora de explicar la existencia y la formación de los organismos vivos en la biosfera, se verifica el hecho de que se modifican todos los equilibrios químicos en este medio ante su presencia. Las leyes generales de los equilibrios permanecen inmutables y la acción de los seres vivos y de su conjunto, la materia orgánica, presenta una analogía perfecta con la acción de las restantes variables independientes. Las grandes categorías de los seres vivos pueden considerarse como una forma particular de las variables independientes del campo energético del planeta.

83. Una acción de los seres vivos como la descrita se corresponde directamente con su nutrición, su respiración, su descomposición y su muerte; es decir, con los procesos vitales durante los cuales asimilan y liberan elementos químicos.

Desde un planteamiento empírico, los elementos químicos que incorporan el organismo vivo acceden a un medio sin parangón posible con ningún otro en el planeta. Cabe considerar que, una vez que penetran en la materia orgánica, se produce una *mutación en el modo en que se aparecen los elementos químicos*.

En su nueva disposición, la historia de los elementos químicos pierde toda relación con la que les afecta en las restantes partes del planeta. Tal divergencia se vincula, evidentemente, con el cambio profundo de los sistemas atómicos en la materia orgánica. Quizá no acontezcan, en su seno, las mezclas ordinarias de isótopos. La experiencia dirá la última palabra.

Antes se pensaba —y es una opinión que todavía cuenta con partidarios— que la historia especial y específica de los elementos químicos en los seres vivos obedece al predominio de los coloides en la composición de és-

tos. Ahora bien, en los múltiples casos en que se detectan sistemas coloidales en la biosfera al margen de la vida, la historia de los elementos químicos se atiene a pautas diferentes.

Las propiedades de los sistemas de la materia en forma dispersa (los coloides) están reguladas por las moléculas, no por los átomos. Dicho rasgo es suficiente para no buscar, en los fenómenos coloidales, la explicación de cómo se disponen los elementos químicos, pues sus modalidades vienen siempre determinadas por el estado de los átomos.

84. Hemos establecido el concepto de *modalidad de presentación en el caso de los elementos químicos* (1921) con el rango de una generalización estrictamente empírica.

Los elementos químicos, en función de cómo se aparecen y de su historia consecutiva, pueden ser clasificados en distintas *modalidades*, en virtud del estado de sus átomos en los diversos campos termodinámicos o en sus zonas concretas. En teoría pueden combinarse múltiples disposiciones de los elementos químicos, pero en la práctica, en los campos termodinámicos de nuestro planeta, observamos sólo algunas de tales combinaciones.

Por tanto, los átomos de los sistemas estelares deberán ser analizados en unos estados particulares, sin parangón posible en la Tierra. De hecho, se les atribuyen unos estados particulares, por ejemplo para explicar su espectro (átomos ionizados de N. Saha); así sucede con los átomos dotados de una masa enorme, característicos de ciertas estrellas. Para explicarlas, es menester admitir la concentración de miles, incluso de decenas de miles de gramos de su materia en un centímetro cúbico (A. Eddington)³. Los estados de los átomos estelares implican sin duda unas disposiciones desconocidas en la corteza terrestre. Otras formas de combinarse que tampoco existen en la superficie de nuestro planeta pueden observarse —y sin duda se observarán— en el Sol, en su corona (gases de los electrones), en las nebulosas, los cometas y el núcleo terrestre.

85. Dado que los organismos vivos poseen un campo termodinámico autónomo en el campo de la biosfera y que la historia de los elementos químicos, en el seno de la materia orgánica, se transmuta haciéndose totalmente específica y singular, conviene estimar que el hecho de hallarse inte-

³ Así, la densidad de la materia en la estrella Sirius B debe ser igual a 53.000. Hay razones para creer, según las tesis dinámicas de N. Bohr-E. Rutherford (sabemos que los modelos que nos proponen se limitan a ser una aproximación de la realidad), que las órbitas de los electrones pueden situarse más cerca del núcleo de lo que sucede con los átomos ordinarios (M. Tjallingii, 1925). El desplazamiento observado de la zona roja del espectro en Sirius B confirma esta enorme densidad: los desplazamientos de las líneas espectrales para unos cuerpos de una densidad análoga, basados en la teoría de la relatividad, se corresponden con los hechos observados (M. Adams, 1925).

grados en las *materias vivas*, en el ámbito de la Vida, implica, para los elementos químicos, su *forma peculiar de estar*. No conocemos con exactitud cómo cambia el estado de los átomos en tal situación. No obstante, la certeza de que su disposición armoniza con otras modalidades existentes en la corteza terrestre, invariablemente caracterizadas por estados definidos de los átomos, nos induce a suponer que las investigaciones futuras evidenciarán las modificaciones sufridas por los sistemas atómicos una vez que han penetrado en la materia viva.

Cabe establecer, con un criterio empírico, las distintas formas en que se ordenan los átomos existentes en la corteza terrestre en virtud de la concurrencia de cuatro factores: 1.º un campo termodinámico propio para cada modalidad; 2.º una manifestación atómica particular; 3.º una historia geológica de cada elemento específico y particular (migraciones individuales); 4.º unas relaciones fijas, a menudo impuestas por la modalidad de la que se trata, de los átomos de los distintos elementos químicos (paragénesis).

86. Según lo expuesto, distinguiremos cuatro maneras diferentes de aparecerse los elementos químicos en la corteza terrestre, por las que van pasando en el curso de los tiempos y que pueden caracterizar su historia.

Las cuatro fases en cuestión son las siguientes: 1.ª *rocas compactas y minerales*, donde predominan las moléculas y los cristales de combinaciones de elementos estables e inmóviles; 2.ª *magnas*: mezclas viscosas de gases y líquidos, en el estado de mezcla móvil de los sistemas atómicos desagregados, donde no hay cristales ni moléculas, lo cual significa un distanciamiento de la química ordinaria⁴; 3.ª *dispersión* de los elementos, que se encuentran en el estado libre, separados los unos de los otros. Muy probablemente los elementos o están ionizados, o han perdido parte de sus electrones⁵. Nos referimos a un estado particular de los átomos que corresponde al de la materia radiante de M. Faraday y W. Crookes; 4.ª *materia orgánica*, cuyo estado atómico no sabemos precisar. Nos inclinamos a atribuirle un estado molecular, de sistemas disociados de iones, de formas diversas. Unas representaciones de esta clase no bastan para explicar los hechos empíricos. Quizá, además de los isótopos (cf. 83), la simetría de los átomos cumpla un papel en el que no se había reparado en el caso del organismo vivo (simetría de los campos atómicos).

87. La forma en que se presentan los átomos (los elementos químicos) desempeña, en los equilibrios heterogéneos, la misma función que otras

⁴ Los vidrios, a una temperatura y presión altas (cf. 80), pueden considerarse magnas especiales; quizá se correspondan con una nueva forma de disponerse los elementos químicos.

⁵ Cabe suponer que estos dos estados de los elementos químicos constituyen modalidades distintas.

variables independientes: temperatura, presión, composición química, estados físicos de la materia.

Todas ellas caracterizan a las geosferas, envolturas concéntricas de la corteza terrestre respecto del núcleo del planeta.

En virtud de lo anterior, a las capas indicadas (cf. 81): termodinámicas, de los estados de la materia y químicas, debemos agregarles las capas determinadas por las distintas formas en que se aparecen los elementos químicos. Las designaremos con el término de *capas paragéneticas*, ya que definen ante todo los grandes rasgos de la paragénesis de los elementos; es decir, las leyes de su presencia simultánea.

La biosfera es la más accesible y la mejor estudiada de tales capas paragéneticas.

88. Concebir la estructura de la corteza terrestre como si estuviera constituida de capas termodinámicas, de los estados de la materia, químicas y paragéneticas equivale a una generalización empírica típica.

Se trata de una concepción que todavía no ha sido explicada; es decir, permanece desligada de cualquier teoría de la geogénesis, de cualquier otro tipo de concepciones referentes al universo.

De ello se infiere que una estructura semejante se origina por la interacción de las fuerzas cósmicas, por un lado, y de la materia y la energía de nuestro planeta, por otro; el carácter de la materia, las relaciones cuantitativas de los elementos, por ejemplo, ni son fortuitas, ni se deben a causas meramente geológicas.

Esta generalización empírica, plasmada de modo esquemático en el Cuadro I, servirá de base para el desarrollo ulterior de nuestro estudio.

El Cuadro —y ello es aplicable a cualquier generalización empírica— supone un primer intento de abordar la realidad; su contenido es pues susceptible de ir corrigiéndose y completándose. Su valor depende de los datos empíricos donde se asienta, lo cual significa que se acusarán desniveles en dicho valor.

En lo que concierne a la mayor parte de la primera capa termodinámica y a las restantes primeras capas caracterizadas por sus respectivas variables independientes, así como a la quinta capa termodinámica y a las regiones subyacentes, los conocimientos se apoyan en un número de hechos relativamente escaso y en conjeturas y extrapolaciones, ajenas por esencia a la generalización empírica.

Dadas las circunstancias apuntadas, los conocimientos en este ámbito resultan poco fiables, viéndose abocados a sufrir modificaciones repentinas a tenor del progreso científico. Como consecuencia de los intensos avances actuales en el campo de las ciencias físicas, cabe esperar que en un futuro inmediato sobrevendrán unos descubrimientos espectaculares, con lo cual experimentarán un giro radical las opiniones vigentes.

CAPAS DE LA CORTEZA TERRESTRE

I. Capas termodinámicas	1. Capa superior. Presión inapreciable. Temperatura baja 15-600 kilómetros (posiblemente la región comunes. Por encima de 80-100 kilómetros de altitud. 2. <i>Estratosfera</i>. Gases enrarecidos (moléculas). En la zona superior, tranción imperceptible. 3. <i>Troposfera</i>. Gas ordinario, 0-10-13 kilómetros. 4. <i>Hidrosfera, envoltura líquida</i>. De 0 a 3,800 kilómetros. 5. <i>Litosfera</i>, capa sólida. Su estado característico es el estado cristalino de la materia. a) <i>Litosfera superior</i>: pueden existir coloides. b) <i>Litosfera inferior</i>: cristalina.	50° tera. Temperatura de +50° a
II. Capas de los estados de la materia	1. <i>Atmósfera libre</i>. 2. <i>¿Hidrógeno?</i> 3. <i>Nitrógeno</i>. A una altitud superior a los 70 kilómetros. 4. <i>Nitrógeno y oxígeno</i>. (Aire respirable) 5. <i>Hidrosfera</i>. De 0 a 3,800 kilómetros. 6. <i>Coraza de alteración superficial</i>. Presencia característica de agua, oxígeno libre y ácido carbónico.	Presencia característica de agua, oxígeno libre y ácido carbónico.
III. Capas químicas	1. <i>Capa atómica</i>. Región de elementos dispersos. Los átomos libres son estables. 2. <i>Capa ultravioleta</i>. Radiación de las ondas cortas y de los rayos penetrantes (cósmicos?). 3. <i>Capa luminosa</i>. Emanaciones radioactivas.	1. <i>Capa electrónica?</i>
IV. Capas paragenéticas	1. <i>Capa atómica</i>. Región de elementos dispersos. Los átomos libres son estables. 2. <i>Capa ultravioleta</i>. Radiación de las ondas cortas y de los rayos penetrantes (cósmicos?). 3. <i>Capa luminosa</i>. Emanaciones radioactivas.	1. <i>Capa electrónica?</i>
V. Capas radiantes	1. <i>Capa atómica</i>. Región de elementos dispersos. Los átomos libres son estables. 2. <i>Capa ultravioleta</i>. Radiación de las ondas cortas y de los rayos penetrantes (cósmicos?). 3. <i>Capa luminosa</i>. Emanaciones radioactivas.	1. <i>Capa electrónica?</i>

3. <i>Capa metamórfica superior.</i> (Región de cementación) La temperatura es inferior a la temperatura crítica del agua. La presión no altera por completo el estado sólido.	4. <i>Capa metamórfica inferior.</i> (Región del anamorfismo) Temperatura que sobrepasa la región más profunda se alcanza el estado semi-líquido, acuosos, saturado de gases.	5. <i>Esfera magnética.</i> Profundidad que rebasa los 20-30 kilómetros.
7. <i>Capa sedimentaria.</i> Antigua capa de alteración superficial. 5 kilómetros de profundidad, o más.	8. <i>Capa granítica.</i> (Para y ortogneis) Gradualmente se transforman, en la zona inferior, en masas vítreas o viscosas.	9. <i>Capa basáltica</i> y quizá, por debajo, <i>de dunas</i> (¿o «eclogitas»?).
4. <i>Región de las moléculas y de los cristales.</i> Compuestos químicos.	5. <i>Magnética.</i> Sin compuestos; ocupada por los gases.	5. <i>Radiaciones térmicas.</i> Sin procesos radioactivos.
4. <i>Capa térmica y radioactiva.</i> En la zona inferior, las ondas radioactivas desaparecen gradualmente.		

En la mayoría de los casos es imposible demarcar, de forma precisa, los límites entre las capas. Todo parece indicar que las superficies de separación entre las mismas se modifican en el curso del tiempo, a veces con rapidez.

Su forma es muy compleja e inestable⁶. La penuria de conocimientos disponibles, en lo que se refiere al sector comentado del Cuadro, no invalida el tratamiento de las cuestiones que nos ocupan, pues la biosfera, por lo demás, se sustenta en un enorme cuerpo de hechos, libres de hipótesis, adivinaciones, conjeturas y extrapolaciones.

89. De entre todos los factores que determinan los equilibrios químicos, la temperatura y la presión —así como las *capas termodinámicas* en función de ambas variables— revisten una importancia particular, ya que intervienen en todas las modalidades que adopta la materia, en todos sus estados y combinaciones químicas. La construcción del Cosmos, su modelo, siempre es termodinámico.

Debido a tal motivo, la procedencia de los elementos y los fenómenos de su historia geológica deben ser objeto de clasificación conforme a las distintas capas (geosferas) termodinámicas. A partir de ahora, designaremos con el término de *vadosos* a los fenómenos y a los cuerpos ligados a la segunda geosfera termodinámica superficial; *fréuticos*, a los que están ligados a la tercera y a la cuarta geosferas (metamórficas) y *juveniles* a los que están ligados a la quinta.

La materia que se inscribe en la primera y la sexta capas termodinámicas no alcanza la biosfera, o no se tiene constancia de ello.

La materia viva de primer y segundo orden en la Biosfera

90. Los límites de la biosfera están determinados, en primera instancia, por el *campo de la existencia vital*. La vida únicamente se desarrolla en un medio determinado, bajo unas condiciones físicas y químicas dadas.

Es el medio el que responde a la biosfera. El campo de la estabilidad vital, sin embargo, supera inequívocamente los límites del medio. Descubrimos en qué medida puede rebasarlos, ya que resulta imposible evaluar cuantitativamente la *fuerza adaptativa* de los organismos en el flujo de los tiempos geológicos. La adaptación depende, a todas luces, de la duración

⁶ La capa (básica) de basalto se eleva por debajo de los Océanos y probablemente se sitúa (con relación al nivel marino) en torno a una profundidad de 10 kilómetros en el caso del Océano Pacífico. Esta medida es bastante más considerable en el caso del Océano Atlántico. A veces se estima que la capa granítica subcontinental alcanza un gran espesor. (En opinión de Gutenberg, supera los 50 kilómetros por debajo de Europa y Asia.)

temporal, es una función del tiempo, y se manifiesta en la biosfera en estrecha correspondencia con los millones de años que ésta lleva existiendo. No disponemos de millones de años, por lo cual no es factible reemplazarlos por otro factor en nuestros experimentos.

Hemos llevado a cabo nuestras investigaciones sobre los organismos vivos a base de unos cuerpos que, desde tiempos incommensurables⁷, se han adecuado a las condiciones ambientales, a la biosfera, y que han elaborado en su seno las materias y la estructura necesarias para vivir. Tales materias se modifican con los ciclos de los tiempos geológicos; ignoramos el alcance de tales cambios y a día de hoy somos incapaces de inferirlo a partir de las investigaciones centradas en su carácter químico⁸.

La deducción fundamental susceptible de extraerse de los hechos expuestos es que la vida, en la corteza terrestre, abarca una parte de las geosferas menor que el campo de su potencial expansión, aun cuando el estudio de la Naturaleza demuestre fehacientemente la adaptación vital a unas condiciones nuevas, así como la evolución de distintas especies de organismos, en la sucesión de los siglos, con el fin de existir en la biosfera.

La mejor formulación para sintetizar el estudio diacrónico de la Naturaleza, la generalización empírica inconsciente sobre la que se cimienta todo nuestro saber y todo nuestro trabajo científico, consiste en afirmar que la vida ha abrazado la biosfera merced a una lenta y gradual adaptación y que tal proceso aún no ha llegado a término (cf. 112, 122). Acusamos constantemente la presión vital circundante (cf. 27, 52) dado que el campo de la vida desborda los límites actuales de la biosfera.

El campo de la estabilidad vital, por tanto, no es sino el producto de la adaptación lograda en el curso de los tiempos. No constituye un resultado permanente ni inmutable: sus fronteras actuales no bastan para ofrecernos una idea clara y completa de los límites posibles para las manifestaciones vitales.

Este campo, tal cual lo confirma el estudio de la paleontología y la ecología, se amplía paulatina y gradualmente en el curso de la existencia del planeta.

91. El campo existencial para los organismos vivos no está determinado exclusivamente por las propiedades físico-químicas de la materia orgánica

⁷ El concepto de «tiempo incommensurable» es antropocéntrico. De hecho existen, para el tiempo, unas leyes pendientes de ser enunciadas, así como una duración determinada de la materia orgánica en la biosfera (¿más allá de 10⁹ años?).

⁸ Frecuentemente buscamos los límites de la vida en las propiedades físicas y químicas de los compuestos químicos que integran el organismo, por ejemplo en las albúminas que se coagulan a una temperatura de 60°-70°. Ahora bien, no se toman en consideración los complejos dispositivos de adaptabilidad del organismo. Algunas albúminas en estado de deshidratación no cambian a una temperatura de 100° (M. E. Chevreul).

nica, ni por el carácter y las propiedades del entorno, ni por la adaptación del organismo a tales condiciones.

Las condiciones de la respiración y de la nutrición del organismo (es decir, su selección activa de los elementos que requiere para vivir) desempeñan un papel importante y característico.

Hemos destacado ya cuán crucial resulta el intercambio gaseoso de los organismos, su respiración, tanto en el establecimiento de su propio régimen energético como a efectos del régimen gaseoso general del planeta —en particular, de la biosfera.

Tal intercambio y la nutrición (esto es, el transporte de materias sólidas y líquidas que los organismos realizan desde el entorno hasta su campo autónomo, cf. 82) deslindan prioritariamente la región de su hábitat.

Hemos abordado este fenómeno cuando subrayamos la absorción y la transformación de la energía solar por parte de la flora verde (cf. 42).

Es menester que volvamos ahora sobre el tema de manera más detallada.

La fuente de donde los organismos extraen los elementos necesarios para vivir cumple un papel decisivo respecto de los fenómenos de la nutrición y la respiración.

Bajo dicha óptica, los organismos se clasifican en dos categorías claramente distintas, *la materia viva de primer orden*, los organismos *autótrofos* —independientes, a la hora de alimentarse, de los restantes organismos— y *la materia viva de segundo orden*, los organismos *heterótrofos* y *mixótrofos*. La distribución de los organismos en tres grupos en virtud de su nutrición, propuesta por el fisiólogo alemán W. Pfeffer en la década de 1880-1890, constituye una generalización empírica importante, pródiga en consecuencias diversas. Reviste mayor trascendencia en el estudio de la Naturaleza que la que suele atribuírsele.

Los organismos autótrofos construyen sus cuerpos a expensas de la materia inorgánica «muerta» exclusivamente; todos los compuestos orgánicos que contienen nitrógeno, oxígeno, carbono e hidrógeno —constituyentes esenciales de su masa corporal— los obtienen del reino mineral. Ellos mismos transforman los elementos de la Naturaleza inerte en compuestos orgánicos complejos imprescindibles para la vida. Los organismos heterótrofos utilizan como nutrientes los compuestos orgánicos preexistentes, creados por otros organismos vivos. El trabajo preliminar de los organismos autótrofos es necesario, a fin de cuentas, para que existan los heterótrofos. El carbono y el nitrógeno, en particular, los extraen éstos fundamentalmente de la materia viva.

El origen del carbono y del nitrógeno, en el caso de los organismos mixótrofos, es doble: en parte proceden de la materia viva, en parte de los minerales, productos inertes de la Naturaleza.

92. Sin duda la cuestión de la fuente de la cual extraen los organismos los elementos necesarios para subsistir es más compleja de lo que cabría pensar en un principio, pero la clasificación propuesta por W. Pfeffer corresponde, según todos los indicios, a un rasgo fundamental de la Naturaleza viva.

No hay organismo que no esté ligado, siquiera parcialmente, a la materia inorgánica por la respiración y la nutrición. La separación de los organismos autótrofos de las restantes materias vivas se apoya en su independencia de éstas en lo que atañe a *los elementos químicos* que pueden obtener, sin excepción, del medio inorgánico, inerte.

Extraen los elementos necesarios para la vida de determinadas moléculas, de compuestos.

Un gran número de moléculas confinadas en la biosfera y necesarias para la vida no dejan de ser a su vez un producto vital, de suerte que, si no hubiera vida, no se hallarían en el mundo inerte. Así ocurre, por ejemplo, con el oxígeno libre (O_2) en su totalidad, y mayoritariamente con casi todos los gases, como el anhídrido carbónico (CO_2), el amoníaco (NH_3), el ácido sulfhídrico (H_2S), etc. El papel de la vida en la génesis de las *soluciones acuosas naturales* no es menor. Los fenómenos de la nutrición y de la respiración están íntimamente ligados a tales soluciones. El agua natural, no el agua químicamente pura, es la que precisa la vida tanto como el intercambio gaseoso.

En lo que se refiere a que la vida transforma profundamente el carácter de los cuerpos químicos de la materia inerte en el medio donde se manifiesta, conviene señalar los límites de la autonomía de los organismos autótrofos con relación a aquélla. No es procedente sacar la conclusión lógica, muy difundida, de que los organismos autótrofos actuales podrían subsistir solos en el planeta. No se trata, sin más, de que hayan sido engendrados invariablemente por otros seres autótrofos, de su misma clase, sino que hay que ponderar que han obtenido los elementos necesarios para existir en formas de la materia inerte creadas con anterioridad por los organismos.

93. Así, el oxígeno libre es un requisito para que vivan los organismos autótrofos verdes. Ellos mismos lo crean con el agua y el ácido carbónico. Siempre es un producto bioquímico extraño a la materia inerte de la biosfera.

Por lo demás, no podríamos asegurar si nos estamos refiriendo al único elemento vitalmente necesario que está ligado en su génesis a la propia vida. J. Bottomley, por ejemplo, ha planteado el problema de la importancia de los compuestos orgánicos complejos disueltos en agua para la existencia de las plantas verdes acuáticas, que él llama auxónomas. Aun cuando su hipótesis especial sea objeto de controversia y no se haya establecido la existencia

de los seres auxónomos, J. Bottomley ha abordado en sus investigaciones un hecho de mayor alcance que el de la mera existencia de tal clase de organismos. En el cuadro científico de la Naturaleza, la importancia de las huellas imperceptibles, frecuentemente desestimadas, de los compuestos orgánicos omnipresentes en el agua natural—dulce o salada—crece sin cesar. Todas estas materias orgánicas, cuya masa subsistente en cada momento y renovada en la biosfera equivale a varios cuatrillones de toneladas, son un producto de la vida; no sabríamos decir si están ligadas, por su origen, a los organismos autótrofos exclusivamente. Más bien comprobamos por doquier, desde la perspectiva de la nutrición de los organismos y la génesis de los minerales bituminosos, la enorme importancia de los compuestos de este tipo, ricos en nitrógeno, creados por los organismos heterótrofos y mixótrofos.

El cuadro de la Naturaleza desvela permanentemente la presencia de estos cuerpos sin tener que recurrir al análisis químico. Se les debe la formación de la espuma en los mares o en cualquier otra agua natural; las péculas irisadas que recubren millares, millones de kilómetros cuadrados de superficies acuáticas. Tales compuestos tiñen los ríos y los humedales, los lagos de las tundras, los ríos negros y pardos de las regiones tropicales y subtropicales. Además de en los habitantes acuáticos, están en todos los restantes organismos, porque pululan en la propia capa verde de tierra firme, donde van infiltrándose sin cesar con la lluvia, el rocío y, especialmente, con las soluciones del suelo.

La cantidad de microorganismos parcialmente disueltos en las aguas naturales, en dispersión coloidal, fluctúa entre 10^{-6} y 10^{-2} %. Porcentualmente, su masa media dentro del mar se le asemeja mucho; es decir, equivale a 10^{18} - 10^{20} toneladas. Tamaña magnitud supera, al parecer, la masa de la materia viva. Su importancia va conquistando paulatinamente el pensamiento científico contemporáneo. Entre los antiguos naturalistas, con frecuencia encontramos ya interpretado (a veces, desde un enfoque sorprendente) este fenómeno grandioso.

En la década de 1870-1880, R. Mayer, un fisiólogo genial, subrayó en una breve comunicación el papel crucial de estos organismos en la composición de las aguas medicinales y en la economía general de la Naturaleza. El estudio posterior de la génesis de los minerales vadosos y freáticos refuerza aún más su protagonismo.

94. La génesis bioquímica de los cuerpos de la materia inerte, vitalmente indispensable para los organismos autótrofos, no reduce la enorme distancia que los separa de los heterótrofos y los mixótrofos. Conviene simplemente que interpretemos de modo más restrictivo el autotrofismo, sin excedernos a la hora de valorarlo.

Llamaremos autótrofos a los organismos de la biosfera actual que obtienen todos los elementos químicos necesarios para subsistir de la materia inerte del

medio, en los minerales, y que no han de recurrir a los compuestos orgánicos preparados por otros organismos vivos para construir sus cuerpos.

En una definición que verse sobre un fenómeno natural es imposible sintetizar el fenómeno con todas sus facetas. Forzosamente existen estados transitorios o casos ambiguos, como por ejemplo ocurre con los *saprofitos*, que se nutren de organismos muertos y en fase de putrefacción. No obstante, la alimentación esencial de los saprofitos se compone casi siempre (quizá siempre) de microorganismos vivos que se instalan en los cadáveres y en los restos orgánicos.

Al limitar el concepto de «autótrofos» al ámbito de la biosfera actual, excluimos la posibilidad de sacar conclusiones sobre el particular con referencia al pasado de la Tierra, especialmente en lo que atañe a la hipótesis de una biogénesis bajo la forma de cualesquiera organismos autótrofos. Pues nos cabe la certeza de que, para todos los organismos autótrofos existentes, resulta indispensable la presencia previa de productos vitales en la biosfera (cf. 92).

95. La distinción entre materias vivas de primer y segundo orden cristaliza, con nitidez, en la distribución de unas y otras en la biosfera. La región accesible a la materia viva de segundo orden, vinculada a los organismos autótrofos para subsistir y alimentarse, siempre es más amplia que el hábitat de éstos últimos.

Los organismos autótrofos se clasifican en dos grupos muy definidos: por un lado, los organismos verdes con clorofila, las plantas verdes, y por otro lado, el mundo de las bacterias, caracterizado por sus dimensiones exiguas y su reproducción muy intensa.

Sabemos que los organismos verdes con clorofila componen el mecanismo esencial de la biosfera, un mecanismo que capta los rayos solares luminosos y que, mediante la fotosíntesis, crea los cuerpos químicos cuya energía, posteriormente, se convierte en fuente de la energía química activa de la biosfera y, en un sentido amplio, de toda la corteza terrestre.

El campo de existencia de estos organismos verdes autótrofos viene impuesto, en primera instancia, por el campo de penetración de los rayos solares (cf. 23).

Su masa es muy grande comparada con la de la materia animal (cf. 46); quizá equivalga a la mitad de toda la materia viva. Poseen unos dispositivos gracias a los cuales captan los rayos luminosos débiles y los utilizan íntegramente.

Es muy posible que, en épocas diferentes, la formación de materia verde haya sido más o menos intensa, pero esta opinión tan divulgada no puede considerarse como un hecho establecido.

La inmensa cantidad de materia que abarcan los organismos verdes, su ubicuidad, su propagación allá donde llegan los rayos solares, suscita en

ocasiones la creencia de que constituyen el pilar de la vida. Se admite asimismo que, en el curso de los ciclos geológicos, se han transmutado evolutivamente en múltiples organismos, los organismos que configuran la materia viva de segundo orden. Actualmente determinan la existencia del mundo animal, así como de una ingente cantidad de organismos vegetales sin clorofila: hongos, bacterias.

En la superficie de la corteza terrestre llevan a cabo el trabajo químico fundamental: crean el oxígeno libre al destruir, mediante la fotosíntesis, unos cuerpos oxidados tan estables, tan universales, como el agua y el ácido carbónico. Indudablemente vienen realizando idéntico cometido desde los períodos geológicos pretéritos. Los fenómenos de alteración superficial prueban consistentemente que, en la era arqueozoica, el oxígeno libre desempeñaba a todas luces el papel sobresaliente que desempeña en la biosfera actual. La composición de los productos de alteración superficial, sus relaciones cuantitativas eran, según puede afirmarse, las mismas en la era arqueozoica que lo son ahora. El mundo vegetal verde significó, en aquellos tiempos primitivos, la fuente del oxígeno libre, cuya masa era del mismo orden que la actual. Las cantidades de materia orgánica verde y de la energía radiante del Sol que la hizo brotar (cf. 57) no debían variar sensiblemente, en aquella época misteriosa y remota, respecto de su medida actual.

Ahora bien, carecemos de restos de organismos verdes que daten de la era arqueozoica. Tales vestigios comienzan a concatenarse sólo a partir de la era paleozoica. Prueban la evolución ininterrumpida e intensa de innumerables formas de estos organismos, cuya magnitud alcanza actualmente un valor de 200.000 especies. La cifra total de las que han existido y siguen existiendo en nuestro planeta —una cantidad que no es fortuita— es aún incalculable, puesto que el número relativamente bajo de sus especies fósiles (varios miles) es meramente imputable a la imperfección de nuestros conocimientos. Este número se incrementa cada década, por no decir de año en año.

96. Las bacterias autótrofas representan una cantidad notablemente menor de materia viva; mientras que la existencia y el alcance geográfico de los organismos autótrofos verdes fueron descubiertos y explicados a finales del siglo XVIII y comienzos del siglo XIX —los trabajos de J. Boussingault, J. B. Dumas, J. Liebig les dieron el espaldarazo científico en la década de 1840-1850—, el concepto de bacterias autótrofas desvinculadas de los rayos solares y exentas de clorofila, descubiertas por S. N. Winogradsky, data de finales del siglo XIX, pero no ejerció de entrada, en el pensamiento científico, la influencia que cabía esperar. El papel de estos organismos en la historia geoquímica del azufre, del hierro, del nitrógeno, del carbono, es sumamente importante. No discernimos muchas especies, las

situamos en torno a las cien, y no cabe compararlas por su masa con las plantas verdes.

Es cierto que están distribuidas por doquier: las encontramos en el suelo, en el cieno de las cuencas hídricas, en los mares; pero nunca en cantidades análogas a las que reúnen las plantas verdes autótrofas de tierra firme, sin mencionar las del plancton verde en la hidrosfera. No obstante, la energía geoquímica de las bacterias es de un orden mucho más elevado que el de las plantas verdes; la supera en decenas, centenares de veces y representa la energía máxima para la materia viva. Con todo, la energía geoquímica cinética por hectárea termina siendo del mismo orden para las algas verdes unicelulares y las bacterias. Ahora bien, mientras que las algas son capaces de rozar el número estacionario en cuestión de diez días, las bacterias requieren para ello una sola jornada en condiciones propicias.

97. Disponemos de escasas observaciones sobre la multiplicación de las bacterias autótrofas. Según J. Reinke, se reproducen más despacio que las heterótrofas. Las observaciones sobre las bacterias del hierro (N. G. Chodnyn) no contradicen este hecho. Así, se escinden una o dos veces en 24 horas ($\Delta = 1-2$), cuando una escisión del mismo orden, para las bacterias ordinarias, se observaría sólo en condiciones hostiles; tal sería el caso del *Bacillus ramosus*, que habita en los ríos y que, creando en condiciones propicias 48 generaciones como mínimo en 24 horas, crea únicamente 4 si las temperaturas son bajas (M. Ward).

Incluso en el supuesto de que una multiplicación lenta fuera un rasgo vital característico de todas las bacterias autótrofas en general, su multiplicación seguiría siendo mucho más intensa que la de las plantas unicelulares verdes.

La velocidad a la que se transmite su energía geoquímica en la biosfera (velocidad v) sería, por tanto, considerablemente mayor que la de las plantas verdes sin excepción; deberíamos pues esperar que las masas bacterianas en la biosfera sobrepasaran, en un amplio margen, a las masas de organismos verdes y que el fenómeno observado en el mar, en el caso de las algas unicelulares (cf. 51), su prevalencia sobre los metafitos verdes, se repitiera con las bacterias; es decir, que éstas predominaran sobre las protistas verdes del mismo modo que las protistas predominan sobre los metafitos.

98. No acontece así en la práctica. El hecho de que esté restringida la acumulación de materia orgánica bajo la modalidad bacteriana obedece a causas como las que explican la hegemonía de los metafitos verdes sobre las protistas verdes en tierra firme (cf. 49).

Su ubicuidad es portentosa; por ejemplo, penetran en todas las capas oceánicas, en regiones fuera del alcance de los rayos solares, de lo cual inferimos que su presencia en unas cantidades relativamente exiguas en la

biosfera, detectadas en el caso de variedades tan dispares como las bacterias reductoras de nitratos y sulfatos o las bacterias del hierro, no podría atribuirse a causas específicas, sino que implica el efecto de un fenómeno general.

Este rasgo se confirma cuando atendemos a las condiciones tan peculiares de su nutrición, que limitan su campo existencial. Reciben toda la energía necesaria al culminar la oxidación de los compuestos naturales del nitrógeno, del azufre, del hierro, del manganeso, del carbono, apenas oxidados o sin oxidar. Ahora bien, los cuerpos primarios y pobres en oxígeno que les resultan indispensables, los minerales vadosos de dichos elementos nunca pueden ser almacenados en la biosfera en cantidades suficientes. *El ámbito de la biosfera equivale, en definitiva, al territorio químico de la oxidación*, saturada como está de oxígeno libre producido por los organismos verdes. En nuestro medio rico en oxígeno, los compuestos más oxidados, los que contienen más oxígeno, representan las formas más estables.

Las bacterias autótrofas deben pues buscar activamente su medio vital idóneo. Se organizan con el fin de acomodarse a los factores que determinan su nutrición.

Son capaces (al parecer, las bacterias del nitrógeno lo tienen como pauta) de oxidar los compuestos que ya están oxidados, de obtener la energía necesaria para existir transformando los cuerpos menos oxidados en cuerpos totalmente oxidados; no obstante, no abundan los elementos químicos susceptibles de reaccionar así en la biosfera. Por otra parte, los mismos compuestos estables finales, ricos en oxígeno, se originan con independencia de las bacterias a través de procesos estrictamente químicos, ya que la biosfera es, por antonomasia, el medio donde tales estructuras moleculares son estables.

99. *Las bacterias autótrofas se encuentran en un estado crónico de escasez de nutrientes.* Por ello se adaptan de múltiples formas a la vida. Por doquier se aprecian —en las ciénagas, en las fuentes termales, en los mares, en los suelos húmedos— unos equilibrios secundarios llamativos entre las bacterias reductoras de sulfatos y los organismos autótrofos que los oxidan. Las primeras marcan las condiciones de existencia para los segundos.

La repetición infinita y constante de tales equilibrios secundarios indica que el fenómeno se integra en un mecanismo regular. La materia orgánica ha elaborado estas estructuras debido a la enorme presión vital de las bacterias autótrofas (cf. 29), que no hallan en la biosfera, en cantidad suficiente, compuestos a su medida, pobres en oxígeno, necesarios para su existencia. La materia viva los crea en tal caso, ella misma, en el medio inerte —donde no se encuentran.

En el Océano se observan equilibrios idénticos entre las bacterias autótrofas que oxidan el nitrógeno y los organismos heterótrofos que liberan el

oxígeno de los nitratos. Estamos ante uno de los prodigiosos equilibrios químicos de la hidrosfera.

La ubicuidad de estos organismos constituye la prueba tanto de su inmensa energía geoquímica como de la gran velocidad a la que se multiplican; el hecho de que no se presenten en condensaciones apreciables se explica por la escasez de compuestos pobres en oxígeno en la biosfera, un medio donde las plantas verdes lo liberan de continuo. Si las bacterias no representan masas considerables de materia viva, ello obedece al imperativo físico de que en la biosfera faltan los compuestos que precisan para existir.

Necesariamente han de regir unas relaciones cuantitativas determinadas, aun cuando las ignoremos, entre la cantidad de materia que abarcan en la biosfera los organismos autótrofos verdes y la que abarcan las bacterias autótrofas.

100. Ha cundido la opinión de que estos curiosos organismos, tan singulares, eran los representantes de los organismos más primitivos, precursores de las plantas verdes. Un naturalista y pensador eminente de nuestros días, el americano F. Osborn (1918), ha defendido todavía recientemente esta tesis.

La observación del papel que cumplen en la biosfera contradice tal opinión. El estrecho vínculo que une la existencia de las bacterias a la presencia de oxígeno libre prueba que dependen de los organismos verdes, de la energía radiante del Sol —una dependencia que, en un grado igualmente acusado, afecta a los animales y a las plantas sin clorofila que se nutren de materias elaboradas por las plantas verdes—. Pues en la Naturaleza, en la biosfera, todo el oxígeno libre, alimento de estos cuerpos, es obra de la flora verde.

El carácter de las funciones bacterianas en la economía general de la Naturaleza viva revela también su importancia por analogía con la que tienen las plantas verdes. Su relevancia es enorme en la historia biogeoquímica del azufre y del nitrógeno, los dos elementos indispensables para la construcción de la materia básica del protoplasma, las moléculas de albúmina. Ahora bien, si la actividad de estos organismos autótrofos se paralizara, quizá la vida sufriría una merma cuantitativa, pero continuaría siendo un mecanismo potente de la biosfera, ya que los mismos compuestos vadosos, nitratos, sulfatos, y las formas gaseosas del nitrógeno y del azufre, el amoníaco y el ácido sulfhídrico, se crean en su seno en abundancia al margen de la vida.

Sin que pretendamos pronunciarnos sobre el tema del autotrofismo (cf. 94), ni sobre la génesis de la vida terrestre, asumiremos con un alto grado de probabilidad la dependencia de las bacterias autótrofas de los organismos verdes, así como los rasgos que podemos deducir sobre su formación comparándola con la de las plantas.

Todo indica que las bacterias autótrofas son unas formas vitales que utilizan al máximo la energía solar, perfeccionando el mecanismo «rayos solares-organismo verde», lejos de constituir una modalidad de vida terrestre independiente de las radiaciones cósmicas.

El mundo heterótrofo sin excepción, de un polimorfismo sorprendente —animales y hongos, un sinfín de especies orgánicas—, equivale a una manifestación del mismo proceso.

101. La distribución de la materia orgánica en la biosfera, tal cual se efectúa, viene a corroborar la validez de nuestro enfoque.

Tal distribución está totalmente determinada por el campo de estabilidad de la flora verde; en otras palabras, por el ámbito planetario donde inciden los rayos solares.

La masa principal de materia viva se concentra entre sus límites; por lo demás, las condensaciones de vida, en presencia de agua, se intensifican en razón directa con la luminosidad.

También en tales condiciones se acumulan los organismos heterótrofos y las bacterias autótrofas, íntimamente vinculados para subsistir, ora con los productos vitales de las plantas verdes (el oxígeno libre, en primera instancia), ora con los compuestos orgánicos complejos que éstas elaboran.

Los organismos heterótrofos y las bacterias autótrofas migran desde la región alumbrada por el Sol hasta el ámbito de la biosfera donde no hay luz ni flora verde. Un gran número de los mismos habitan zonas tenebrosas exclusivamente. Suele convenirse en que son originarios de la superficie terrestre iluminada y que se han ido adaptando progresivamente a las nuevas condiciones ambientales. Cabe admitirlo, ya que el estudio morfológico del mundo animal que puebla las cuevas terrestres y los abismos marinos evidencia —en ocasiones, inequívocamente— que esta fauna cuenta con unos antepasados en su momento colonizadores de las regiones alumbradas del planeta.

Las condensaciones de vida sin organismos verdes adquieren una importancia singular desde el punto de vista geológico. Nos referimos a la película vital que recubre el fondo de la hidrosfera (cf. 130), a las zonas inferiores de las *concentraciones litorales* oceánicas, a los *lechos* de las cuencas hídricas en tierra firme (cf. 158). Más adelante se nos hará evidente la relevancia del papel que juegan en la historia química del planeta. Nos cabe la certeza, sin embargo, de que la existencia de los organismos que pueblan estas áreas está ligada, de manera directa o indirecta, a los organismos de las regiones vitales verdes. No sólo porque a través del estudio de su morfología o de las investigaciones paleontológicas resulte a menudo factible establecer la génesis de estas materias vivas de segundo orden a partir de aquellas que habitan la superficie iluminada del planeta, sino porque la energía solar luminosa constituye la base inmutable de su sustento cotidiano.

La propia existencia de la película vital que tapiza el lecho oceánico se relaciona estrechamente con los restos orgánicos de las aguas superficiales, unos restos que caen hasta el fondo sin haber llegado a descomponerse por completo o sin haber sido devorados por otros organismos. Por consiguiente, es en la región de la biosfera alumbrada por el Sol, en la luz solar, donde es menester buscar la fuente última de la energía de esta película vital. El oxígeno libre, producto del trabajo de las plantas verdes, penetra dentro del agua de mar desde la atmósfera, infiltrándose en las profundidades. El oxígeno libre es la única fuente bioquímica de la que tenemos constancia. Los organismos anaerobios, característicos de las zonas subyacentes a la película vital del suelo oceánico, están existencialmente supeditados a los organismos aerobios y sus productos, de los cuales se alimentan.

Todo indica que estas manifestaciones de la vida se sitúan en las regiones tenebrosas en estado de evolución permanente y que su campo se amplía sin cesar.

Una penetración lenta e ininterrumpida de la materia viva en las dos direcciones a partir de la capa verde en las regiones azoicas del planeta va aconteciendo, al parecer, en el curso de los tiempos geológicos, incluso en nuestros días.

En esta etapa de extensión del campo de la vida vital es en la que ahora nos encontramos.

102. La creación bioquímica de nuevas modalidades de energía luminosa, en el caso de la materia viva heterótrofa, puede significar una manifestación, entre otras posibles, de la ampliación del campo de la vida.

La fosforescencia de los organismos, la radiación biógena de ondas luminosas con una longitud idéntica a la de las emanaciones cósmicas del Sol en la superficie terrestre, gana intensidad en los abismos oceánicos; crea la energía vital y modifica químicamente el planeta.

Sabemos que la manifestación de tales radiaciones luminosas secundarias, la luminiscencia de la superficie marina, ininterrumpida en áreas de cientos de miles de kilómetros cuadrados, permite al plancton verde proseguir con su trabajo químico a las horas en que no recibe luz solar.

¿Supone la fosforescencia de los seres que pueblan los abismos oceánicos la manifestación nueva del mismo mecanismo? ¿Se origina un resurgimiento de la vida en virtud de la transmisión de la energía solar cósmica del Sol hasta unas profundidades de varios kilómetros por debajo de la superficie del mar, adonde la energía cósmica no podría llegar sin la ayuda de dicho mecanismo? Lo ignoramos. No obstante, es preciso recordar que las expediciones oceanográficas han hallado organismos vivos verdes a unas profundidades que rebasan, con mucho, el alcance de los rayos solares. El

vapor «Valdivia» descubrió el alga *Halionella* viva, a unos dos kilómetros de profundidad, en el Océano Pacífico.

Si la materia orgánica fuera capaz de transferir a nuevos territorios la energía luminosa del Sol no sólo bajo la forma de compuestos químicos inestables en la envoltura termodinámica que corresponde a la biosfera (cf. 82) —es decir, bajo la forma de energía química—, sino también en la modalidad de energía luminosa de formación secundaria, estaríamos ante la señal en la historia de la biosfera, provisional quizá, de que se extiende el dominio principal de la fotosíntesis en una cuantía reducida, de un orden análogo al de la energía luminosa creada por la civilización humana.

Esta nueva energía luminosa que introduce el hombre en la biosfera es utilizada por las plantas verdes, pero por ahora repercute sólo en una proporción insignificante en la fotosíntesis cósmica general del planeta.

En definitiva, la materia viva verde, que delimita en la Tierra el campo de existencia vital, es función de la luz solar.

En las páginas que siguen destacaremos esta parte fundamental de la materia viva a fin de abordar todas las restantes manifestaciones de la vida atendiendo a sus relaciones con aquélla.

Los límites de la vida

103. El campo de la estabilidad vital traspasa los límites de la biosfera; las variables independientes que lo determinan: temperatura, composición química, etc., actúan más allá de sus fronteras características.

Este campo prefigura en qué regiones puede la vida expandirse plenamente; no parece estar definido con rigor ni ser inmutable.

El rasgo sobresaliente de los seres vivos es su mutabilidad, su adaptabilidad a las condiciones ambientales. Debido a ello, los organismos son capaces de acomodarse, al cabo de unas generaciones, a un hábitat en un principio adverso.

Actualmente no estamos facultados para determinar un potencial semejante siquiera por medio de experimentos intensos: no disponemos, a escala geológica, del tiempo requerido para que la adaptación se haga patente. La materia viva, el mundo orgánico, no es una materia inerte: se rige por un equilibrio dinámico que ejerce una presión sobre el entorno, una presión que se coaliga con el tiempo, aunque no sepamos cómo.

Un campo de estabilidad vital con las características apuntadas, apoyado en la adaptación de los organismos, es además *heterogéneo*. Se distinguen dos niveles: el *campo de gravitación*, en el caso de los organismos vo-

luminosos, y el *campo de fuerzas moleculares* ocupado por los organismos que no llegan a medir ni 10^{-4} centímetros (microbios, etc.), cuya vida y cuyos movimientos, sobre todo, se rigen principalmente por las radiaciones luminosas y de otra índole, en vez de por la gravitación.

La extensión de cada campo depende de la adaptabilidad de los organismos: no podemos demarcar con exactitud ninguna de las dos áreas.

Tomaremos en consideración: 1.º la temperatura; 2.º la presión; 3.º el estado de la materia en el medio; 4.º su quimismo; 5.º la energía luminosa. He aquí los factores capitales que dirimen uno y otro campo de estabilidad.

104. Por otra parte, debemos distinguir dos tipos de condiciones: 1.º las que traban el desarrollo de la vida, pero sin bloquear el ejercicio de todas sus funciones; es decir, las condiciones que, aunque hacen sufrir al organismo, no conllevan su muerte; 2.º las condiciones que favorecen su multiplicación; es decir, que le permiten incrementar la masa viva y la energía activa del planeta.

En virtud del parentesco genético que engloba a toda la materia viva, cabe suponer que tales condiciones vienen a ser prácticamente las mismas para la totalidad de los organismos. Para el mundo vegetal verde comparado con el mundo de los seres heterótrofos, sin embargo, el ámbito queda reducido a menores límites.

En última instancia, esta frontera la trazan las propiedades físico-químicas de los *compuestos* que constituyen el organismo; viene impuesta por su estabilidad en las condiciones específicas del medio. Ahora bien, hay casos donde se aprecia que, antes de la desagregación de los compuestos, se destruyen los mecanismos que éstos han creado y que determinan las funciones vitales.

Los propios compuestos, así como los mecanismos que construyen, van modificándose permanentemente en el curso de los tiempos geológicos, pues se ajustan a los cambios en la biosfera.

Podemos ilustrar la extensión máxima del campo de la vida actual valiéndonos de algunos ejemplos extremos de supervivencia a cargo de determinados organismos.

105. La temperatura más elevada que puede soportar un organismo sin perecer se aproxima, entre ciertos seres heterótrofos —sobre todo en estado de latencia, como por ejemplo las esporas de los hongos—, a 140 grados centígrados. Este umbral varía según la sequedad o humedad del hábitat del organismo.

Los experimentos de L. Pasteur sobre la generación espontánea dejaron establecido el hecho de que un aumento de la temperatura hasta 120 grados centígrados, en un medio húmedo, no destruía todas las esporas de los

microbios. Esta destrucción exigiría rebasar al menos los 180 grados centígrados (M. Duclaux)⁹. En los experimentos de M. Christen, las bacterias del suelo sobreviven durante cinco minutos a una temperatura de 130 grados y, durante un minuto, a 140 grados. Las esporas de una bacteria descrita por M. Zettnow, sometidas durante 24 horas (B. L. Omeliansky) a la acción de un chorro de vapor de agua, no fueron aniquiladas.

El campo de estabilidad se amplía con temperaturas bajas. Las experiencias del Instituto Jenner, en Londres, han verificado la estabilidad, en el hidrógeno líquido, de esporas bacterianas durante 20 horas a -252 grados centígrados. M. Mackfaydan ha aportado datos sobre microorganismos que se han conservado intactos en el aire líquido durante varios meses, a una temperatura de -200 grados centígrados. En las investigaciones de P. Becquerel, las esporas de mucoríneas permanecieron 72 horas en el vacío, a una temperatura de -253 grados centígrados, sin perder su capacidad vital; asimismo, semillas de distintas plantas han soportado 10 horas y media de permanencia en el vacío a una temperatura aún más baja, a -269 grados centígrados.

Cabe pues considerar el intervalo de 450 grados centígrados como el campo térmico límite donde determinadas formas de vida de nuestros días pueden subsistir incólumes. Tal intervalo se restringe considerablemente en el caso de las plantas verdes. No contamos con experimentos fidedignos al respecto, pero es dudoso que ese intervalo supere los 160° - 150° (de +80° a -60°).

106. Los límites de la presión -del campo vital dinámico- pueden dilatarse mucho. Los experimentos de G. Chlopine y de G. Tammann han demostrado que las mucoríneas, las bacterias, las levaduras, pueden soportar una presión de 3.000 atmósferas sin que, en apariencia, se alteren sus propiedades. La vida de las levaduras se mantiene a una presión de 8.000 atmósferas. Por otra parte, las formas de vida latente, semillas o esporas, se conservan largo tiempo en el vacío; es decir, a una presión de millonésimas de atmósfera. No parece que haya diferencias entre los organismos heterótrofos y los organismos verdes (esporas, simientes).

107. Se ha insistido a menudo en la importancia que revisten las ondas de energía luminosa de una longitud determinada para las plantas verdes. En ellas radica la base de toda la estructura de la biosfera. Los organismos

⁹ Esta opinión de los colaboradores de Pasteur, en el marco de su célebre discusión con G. Pouchet, parece revestir mayor importancia para determinar la temperatura máxima del campo térmico vital que las investigaciones basadas en los cultivos de laboratorio. Se fundamenta en el estudio de las propiedades de las infusiones de heno, más próximas al medio complejo de la vida en la corteza terrestre que nuestros cultivos experimentales.

verdes mueren antes o después en función de la luz. Los organismos heterótrofos y las bacterias autótrofas, por lo menos algunos de entre ellos, pueden vivir en la oscuridad, pero el carácter del medio «oscuro» (de ondas largas infrarrojas) aún no ha sido estudiado.

Por otra parte, nos consta que las ondas cortas de una longitud concreta resultan mortíferas.

El medio característico de las ondas muy cortas (cf. 114) de los rayos ultravioletas es inanimado. Los experimentos de P. Becquerel han demostrado que tales rayos, dotados de una vibración intensa, aniquilaban cualquier forma viviente en un lapso brevísimo. El medio donde están presentes, el espacio interplanetario, no es apto para las formas de vida que se han desarrollado en la biosfera, a pesar de que ni la temperatura, ni la presión, ni la esencia química de dicho espacio las excluyen. Es menester investigar, con la mayor precisión y minuciosidad posibles, los confines de la vida en las diversas regiones de la energía radiante en vista de la interdependencia, a todas luces innegable, entre el desarrollo vital en la biosfera y la radiación solar.

108. La vida puede experimentar cambios químicos a gran escala. Los organismos anaerobios descubiertos por L. Pasteur evidenciaban que la vida existía en un medio carente de oxígeno libre. Se ensanchó notablemente el campo vital admitido con anterioridad merced a este hallazgo.

Los organismos autótrofos descubiertos por S. Winogradsky han dejado patente que un medio exclusivamente mineral, sin compuestos orgánicos previamente elaborados, podía albergar vida.

Las esporas y las simientes -formas de vida en estado latente- al parecer podían resistir intactas, indefinidamente, en un medio exento de gas y agua, totalmente seco.

Al mismo tiempo, diversas formas de vida subsisten sin menoscabo en los medios químicos más variados, en los umbrales del campo termodinámico existencial. El *Bacillus boracicola*, que puebla las fuentes termales de la Toscana, es capaz de vivir en una solución saturada de ácido bórico. Soporta fácilmente la solución de ácido sulfúrico al 10% con una temperatura ambiente ordinaria (Bargagli Petrucci, 1914). Tenemos constancia de que organismos como las mucoríneas resisten en soluciones concentradas de sales diversas, funestas para otros seres. Algunos de estos organismos viven en soluciones saturadas de vitriolo, de nitrato, de niobato de potasio. El *Bacillus boracicola* ya mencionado tolera las soluciones sublimadas al 0,3%, mientras que otras bacterias e infusorios soportan incluso soluciones saturadas (M. Besredka, 1925). Las levaduras viven en soluciones de hidrófluoruro de sodio. Las larvas de algunas moscas no perecen en solución de formol al 10%. Hay bacterias que se multiplican en una atmósfera de oxígeno libre (V. Henri, 1914).

Los fenómenos descritos están relativamente poco estudiados, pero la adaptación de las formas de vida que los ilustran parece infinita.

No obstante, únicamente se trata de organismos heterótrofos. El desarrollo de los organismos verdes exige la presencia de oxígeno libre, siquiera en solución acuosa. Las soluciones salinas saturadas, sin ir más lejos, impiden que las plantas verdes germinen.

109. Aun cuando algunas formas de vida estén facultadas para conservarse en estado latente, sin perecer en un medio completamente deshidratado, *el agua* en el estado fluido y gaseoso supone un requisito ineludible para el crecimiento y la reproducción de los organismos, para que se expandan en la biosfera.

La energía geoquímica de los organismos, bajo la modalidad de su multiplicación, pasa de la forma potencial a la forma libre sólo en presencia de un agua que contenga disueltos los gases necesarios para la respiración.

La importancia del agua es obvia en el caso de las plantas verdes y así se reconoce, por lo general, desde antaño. El pilar de la vida por antonomasia, la vida verde, no puede prescindir del agua.

En tiempos recientes, sin embargo, hemos tenido ocasión de profundizar en el mecanismo de la acción del agua. La importancia, a efectos vitales, de la reacción alcalina o ácida de las soluciones acuosas donde habitan los organismos, así como el grado y el carácter de su ionización, se ha tornado más evidente.

El papel de tales fenómenos es esencial, pues la masa principal de la materia viva, formulada mediante su peso, se concentra en el agua natural de la biosfera, y las condiciones de vida para cualquier organismo están en estrecha correspondencia con las soluciones acuosas naturales. La materia de todos estos organismos está básicamente compuesta de soluciones acuosas o lechos acuosos¹⁰. El protoplasma puede considerarse como un lecho acuoso donde las coagulaciones y los cambios coloidales se producen en los líquidos internos de los organismos. Los fenómenos de ionización se suceden por doquier. Gracias a la incesante acción recíproca que ejercen entre sí, por un lado, las soluciones acuosas del medio y, por otro, los líquidos internos de los organismos que anidan en estas aguas naturales, las relaciones de ionización de los dos medios adquieren una gran trascendencia.

Merced a unos sutiles procedimientos de investigación, cabe establecer la variación exacta de la ionización que se origina. Es un recurso excelente para analizar el cambio del medio principal, la concentración de vida.

¹⁰ Los organismos contienen, con relación a su peso, de un 60 a un 99% de agua (quizá más); es decir, se componen, en un 80-100%, de soluciones acuosas y lechos acuosos.

El agua marina contiene en torno a un 10^{-9} % de iones H^+ , es ligeramente alcalina, y este pequeño predominio de los iones OH^- sobre los iones H^+ persiste por lo general, ya que se restablece constantemente, por muy frecuentes que sean los procesos químicos que se efectúan en el mar (ionización $pH = 8$).

La ionización favorece enormemente la vida de los organismos marinos; las más débiles oscilaciones repercuten siempre en la Naturaleza viva, positiva o negativamente según las especies.

Sabemos que la vida existe sólo entre determinados límites de ionización, 10^{-5} % para H^+ y 10^{-10} % para H^+ (es decir, $pH = 5 - 10$). La vida es impracticable fuera de tal intervalo.

110. El estado de la materia del entorno cumple un papel primordial para la manifestación de la vida.

Aparentemente, la vida persiste en estado latente en el entorno de todos los estados de la materia: líquido, sólido y gaseoso, así como en el vacío absoluto. Las experiencias demuestran, por lo menos, que las simientes son capaces de conservarse temporalmente sin intercambio gaseoso —es decir, en todas las fases de la materia— en los límites del campo térmico vital. No obstante, cuando sus funciones han alcanzado su pleno desarrollo, el organismo está supeditado, para seguir vivo, a la posibilidad de un intercambio gaseoso (la respiración), así como a la estabilidad de los sistemas coloidales que componen su cuerpo.

Por ello los organismos únicamente pueden habitar donde tal intercambio —líquido, gaseoso o coloidal— resulta viable. No se localizan en un medio sólido; en efecto, únicamente son detectables en cuerpos porosos, donde es posible el intercambio gaseoso. Ahora bien, como consecuencia de sus exiguas dimensiones, un gran número de organismos hallan un hábitat en cuerpos bastante compactos.

En cambio, un medio líquido, una solución o un coloide *exento de gas* no sirven como ámbito para la vida.

Volvemos a incidir en la importancia excepcional del estado gaseoso de la materia, que hemos subrayado tantas veces en el presente volumen.

Los límites de la vida en la Biosfera

111. De lo expuesto se deduce que la biosfera, por su estructura, su composición y sus condiciones físicas, se inscribe entera en el campo vital. La vida se ha ajustado a sus parámetros y no hay lugar donde no le quepa manifestarse de un modo u otro.

Este hecho se verifica con plena certeza en las condiciones habituales y normales de la biosfera, pero surgen excepciones en el caso de perturbaciones

pasajeras, nocivas para la vida, que no consideraremos pues como características. Así, los cráteres de los volcanes en fase de erupción y las superficies incandescentes de lava son inaccesibles para la vida en las condiciones de la biosfera.

Las emanaciones tóxicas (los gases clorhídricos y fluorhídricos, por ejemplo) y las fuentes termales calientes que acompañan a los procesos volcánicos se reducen a fenómenos episódicos, al igual que la falta de vida concomitante. Fenómenos análogos, de índole más duradera, como las fuentes termales permanentes cuya temperatura se aproxima a los 90 grados centígrados, no son óbice para la vida de determinados organismos que se han adaptado a sus condiciones.

Ignoramos si las soluciones salinas naturales, con una concentración de sal superior al 5%, son siempre azoicas. El Mar Muerto, en Palestina, presenta la mayor cuenca de agua salada de tal clase. No obstante, se ha comprobado que algunas de las aguas ácidas naturales hidrosulfurosas o clorhídricas, cuya ionización supera 10^{-11} % H^+ , son necesariamente azoicas (cf. 109). De hecho equivalen a un área apenas significativa.

112. Podemos considerar que la geosfera terrestre donde se asienta la materia viva responde, por entero, al campo de la existencia vital. Tal capa es continua, lo mismo que la atmósfera, y se distingue por ello de capas discontinuas, como la hidrosfera.

No obstante, el campo terrestre accesible a la vida no está totalmente ocupado por la materia viva. Se observa una lenta expansión en nuevas regiones, como si se tratara de una colonización territorial en el curso de los tiempos geológicos.

Conviene distinguir en el campo terrestre vital: 1.º la región de penetración temporal de la vida, donde los organismos no están sometidos a un aniquilamiento súbito; 2.º la región de su existencia estable, necesariamente ligada a las manifestaciones de la multiplicación.

Los confines vitales extremos en la biosfera probablemente entrañen unas condiciones absolutas para todos los organismos. Basta con que una sola de tales condiciones (variables independientes del equilibrio) alcance un valor infranqueable para la materia viva, ya fuere la temperatura, la composición química, la ionización del medio o, finalmente, la longitud de onda de las radiaciones.

Las definiciones de esta clase no se formulan en términos absolutos. La llamada adaptación del organismo, su aptitud para defenderse de las condiciones nocivas del medio, es enorme; los límites de la misma no sólo son un misterio, sino que se van ampliando en el curso de los ciclos planetarios, que equivalen a los tiempos en que existen generaciones inintermitentes de seres organizados nacidos los unos de los otros.

Al establecer estos límites a partir de la adaptación de la vida que hoy observamos, nos aventuramos forzosamente en el terreno de las extrapolaciones.

ciones, siempre azaroso y poco firme. El hombre particularmente, dotado de raciocinio y capacitado para dirigir su voluntad, está facultado para llegar, de manera directa o indirecta, a regiones inasequibles para el resto de los organismos vivos.

Dada la unidad indisoluble de todos los seres vivos —una certeza que se impone por su propio peso—, cuando se enfoca la vida como un fenómeno planetario, tal facultad del *Homo sapiens* no puede entenderse como un fenómeno accidental. De ello se deduce que la cuestión de la inmutabilidad de los límites vitales en la biosfera requiere ser abordada con prudencia.

113. Un carácter semejante de los confines vitales, basado en la presencia o en la existencia estable de organismos bajo sus formas y su amplitud actual de adaptación, prueba a todas luces que la biosfera es una *capa* terrestre, ya que las condiciones que imposibilitan la vida se manifiestan simultáneamente en todo el planeta. Por tanto procede determinar únicamente los límites superior e inferior del campo vital. *El límite superior* viene impuesto por la *energía de radiación* cuya presencia excluye la vida. *El límite inferior* lo determinan unas *temperaturas tan elevadas* que la vida está forzosamente proscrita. Dentro de los límites así establecidos, la vida abarca, pero no íntegramente, una capa termodinámica, tres capas químicas y tres capas del estado de la materia (cf. 88). La importancia de estas últimas: troposfera, hidrosfera y litosfera superficial, se refleja con la máxima contundencia en estos fenómenos y las tomaremos como base para el desarrollo de nuestro texto.

114. Según todos los indicios, la vida no puede traspasar las fronteras de las regiones superiores de la estratosfera en ninguna de sus manifestaciones naturales. Tal como lo demuestra el Cuadro I (cf. 88), por encima de la estratosfera se alza otra capa paragenética donde es muy incierta la existencia de moléculas químicas o de sus compuestos más complejos. Aludimos a la región de máxima rarefacción de la materia; sigue conservando tal carácter aun cuando admitamos la exactitud de los recientes cálculos del profesor B. Fessenkov (1923-1924), que le atribuyen mayores cantidades de materia que las anteriormente previstas. B. Fessenkov sostiene que la estratosfera, a una altitud de 150 a 200 kilómetros, presenta una tonelada de materia por kilómetro cúbico¹¹. El nuevo modo de aparecerse los elementos químicos de esta materia enrarecida no es el fruto exclusivo de la rarefacción, de la disminución de las colisiones de las partículas gaseosas, de un campo más amplio para sus trayectorias libres, sino que se relaciona con la acción potente de los rayos solares, ultravioletas y otros, que

¹¹ Según otros cálculos, las cifras son más de mil veces menores: una tonelada por 100 kilómetros cúbicos, un kilogramo por 200 kilómetros cúbicos.

quizá procedan también de los espacios cósmicos, accediendo sin obstáculos a los límites extremos de nuestro planeta (cf. 8). Sabemos que los rayos ultravioletas son unos agentes químicos enormemente activos. En particular, los rayos con una longitud de onda muy corta, por debajo de 200 milonésimas de milímetro (160-180 picómetros), aniquilan cualquier expresión de vida, las esporas más estables en un medio deshidratado o vacío. Parece, no obstante, que dichos rayos alumbran estas regiones remotas del planeta.

115. No consiguen llegar hasta nosotros gracias a su total absorción por el ozono, permanentemente creado, en cantidades relativamente considerables, a partir del oxígeno libre y quizá del agua, mediante la acción de esos mismos rayos ultravioletas, aniquiladores de la vida y filtrados por el ozono.

Si reuniéramos la totalidad del ozono en estado puro, compondría una capa de 5 milímetros de espesor conforme a las teorías de C. Fabry y Buisson. Pero estas pequeñas masas de ozono, incluso bajo la forma de moléculas dispersas en los gases atmosféricos, son lo suficientemente importantes como para detener el paso de las radiaciones vitalmente nocivas.

Si el ozono se destruye, se reconstituye también continuamente, ya que las radiaciones de una longitud inferior a 200 picómetros encuentran siempre en la estratosfera, por lo menos en sus zonas bajas, una cantidad sobreabundante de átomos de oxígeno.

De tal suerte la vida está protegida en su existencia por *la pantalla de ozono, de un espesor de 5 milímetros*, que actúa como límite natural superior de la biosfera.

Es característico que el oxígeno libre, necesario para la creación de ozono, se forme en la biosfera exclusivamente a través de procesos bioquímicos; desaparece forzosamente de su seno si la vida se extingue. *La vida, que crea el oxígeno libre en la corteza terrestre, crea así el ozono y protege a la biosfera de las radiaciones nocivas de las ondas cortas de los astros celestes.*

La manifestación postrera de la vida, el hombre civilizado, puede evidentemente protegerse de otro modo y traspasar impunemente la pantalla de ozono.

116. La pantalla de ozono determina el techo de la vida virtual. La vida real finaliza mucho antes en la atmósfera. Las plantas autótrofas verdes no se desarrollan por encima de los bosques, los campos, las praderas, las hierbas de tierra firme. No existen células verdes en el medio aéreo. Sólo de modo accidental, y a escasa altura, las salpicaduras del mar proyectan células verdes del plancton.

Únicamente por la vía mecánica, o por medio de unos dispositivos específicos para volar, pueden los organismos elevarse sobre la vegetación

verde. Los organismos verdes no están facultados para penetrar en la atmósfera, por tal procedimiento, ni a gran distancia ni durante largo tiempo. Por ejemplo, las esporas más diminutas —de coníferas y criptógamas, pobres en clorofila o sin ella—, son probablemente las masas más considerables de organismos verdes diseminadas y levantadas por el viento a veces hasta una gran altura, pero por cortos lapsos temporales.

La masa principal de materia verde que penetra en la atmósfera pertenece al segundo orden. En la misma están incluidos todos los seres voladores. El manto vegetal, límite superior de la transformación de las radiaciones solares en energía química terrestre, se sitúa a ras de tierra firme y a flor de las aguas del Océano. Esta capa apenas roza la atmósfera. Su campo de existencia, no obstante, se ensancha en el transcurso de los tiempos geológicos.

Merced a que las plantas verdes están orientadas a captar el máximo de energía solar, han colonizado las capas inferiores de la troposfera, hasta una altura de más de 100 metros sobre el nivel del suelo, bajo la forma de grandes árboles (50 metros y más). Tales especies surgieron, al parecer, en la época paleozoica.

117. La vida se infiltra en la atmósfera, y se instala durante largo tiempo en su seno, principalmente bajo la forma de minúsculas bacterias y esporas que anidan en los animales voladores. Sus concentraciones relativamente considerables, sobre todo en estado latente (esporas, organismos microscópicos), se detectan en las regiones de la capa aérea donde circula el polvo de la superficie terrestre. Esta atmósfera polvorienta se relaciona fundamentalmente con tierra firme. Según A. Klossowsky (1910), el polvo llega a una altura promedio de 5 kilómetros; según M. Mengel (1922), las nubes de polvo no superan los 2,800 kilómetros. Están esencialmente constituidas, sin embargo, de materia inerte.

Sobre la cima de las montañas, el aire es muy pobre en organismos, pero los hay en cualquier caso. Según L. Pasteur, en medios con nutrientes sólo existen 4-5 microbios patógenos por centímetro cúbico. W. Fleming no detectó más que uno, por cada tres litros, a una altitud de 4 kilómetros. Al parecer, en la microflora de las capas superiores del aire escasean las bacterias, siendo más abundantes las levaduras y las mucoríneas (B. Omeliansky).

Sin duda esta microflora traspasa los límites medios de la atmósfera polvorienta (5 kilómetros), pero lamentablemente carecemos de las suficientes observaciones precisas. Esta flora puede ser transportada hasta los confines de la troposfera (9 a 13 kilómetros), puesto que los movimientos de los gases, vientos y corrientes de aire, observados en la superficie terrestre, ascienden hasta dicha frontera.

No creemos que estas ascensiones hayan desempeñado algún papel en la historia terrestre, dados el estado latente de la masa principal de tales or-

ganismos y su proporción inapreciable en la masa, aun enrarecida, del gas bruto donde están dispersas.

118. No está zanjada la controversia sobre la existencia de vida animal más allá de los confines de la troposfera. Sin duda se detecta a veces por encima de las cumbres más altas, pero las montañas jamás rebasan el ámbito de la troposfera.

Así, según refiere A. Humboldt, el cóndor vuela hasta 7 kilómetros sobre el nivel del suelo; también ha observado que en la cima del Chimborazo (5.882 metros) hay moscas.

Tales observaciones de A. Humboldt y de algunos antiguos naturalistas han sido refutadas por ornitólogos posteriores que han estudiado las migraciones de las aves en las estaciones de paso. Pero las más recientes comprobaciones de M. Wollstone (1923) y del resto del equipo expedicionario inglés al Everest confirman que ciertas aves de presa vuelan o planean en torno a las cimas señeras, a más de 7 kilómetros (7.450 metros). Las cornejas del Himalaya alcanzan los 8,2 kilómetros.

No obstante, se trata de especies contadísimas. La mayoría de las aves, incluso especies de montaña, no vuelan por encima de los 5 kilómetros. Los aviadores no han descubierto aves a más de 3 kilómetros de altura (águila).

Se han encontrado mariposas a 6,4 kilómetros de altura; arañas, hasta los 6,7 kilómetros; pulgones, hasta los 8,2 kilómetros. Algunas plantas (*Arenaria muscosa* y *Delphinium glaciale*) viven a 6,2 kilómetros de altura (M. Hingston, 1925).

119. El hombre es quien más asciende en la estratosfera llevando consigo, sin ser consciente de ello y por necesidad, formas de vida de las que es corporalmente portador o bajo la modalidad de productos.

La región accesible al hombre se va ampliando con el progreso de la navegación aérea y ya trasciende los límites de la región vital para la que sirve de frontera la pantalla de ozono.

Los globos-sonda logran la máxima cota. Sus materiales encierran siempre compuestos orgánicos. Un globo-sonda de tales características, lanzado el 17 de diciembre de 1913 en Pavía, voló a una altitud de 37,7 kilómetros.

El propio hombre rebasa en sus máquinas las cumbres más elevadas. G. Tissandier (1875) y J. Glaisher (1868) habían rozado tales medidas con globos acrotásticos: el primero se elevó hasta los 8,6 kilómetros y el segundo, hasta los 8,3 kilómetros.

Las ascensiones, con el desarrollo de los aeroplanos, han bordeado los límites de la troposfera.

El francés M. Cailliot y el americano M. MacRady (1925) subieron a 12 kilómetros y 12,1 kilómetros, respectivamente; esta marca será muy prontamente superada.

En cuanto a las concentraciones humanas, las poblaciones se sitúan a 5,1 y 5,2 kilómetros de altura (Perú, Tibet); los ferrocarriles, a 4,7 kilómetros (Perú); los campos de centeno, hasta 4,65 kilómetros.

120. En resumen, cabe afirmar que la vida que se manifiesta en la biosfera no toca su techo, la pantalla de ozono, sino a título extraordinario y excepcional. En sus masas principales, no sólo la estratosfera, también las capas superiores de la troposfera son inanimadas.

No existe organismo alguno que viva perennemente en el medio aéreo. Una delgada epidermis atmosférica, por lo general muy por debajo de los 100 metros, es la que cabe considerar como animada de vida.

Ciertamente la conquista del aire es un fenómeno reciente en la historia geológica del planeta: ha podido lograrse gracias a la adaptación de los organismos terrestres subaéreos, las plantas en primera instancia (¿precámbrico?), los insectos, los vertebrados voladores (¿paleozoico?), las aves desde la era mesozoica. Contamos ya con datos sobre el transporte mecánico de la microflora y de las esporas desde los períodos geológicos pretéritos. Pero es a partir de que aparece la humanidad civilizada cuando la materia viva da un paso de gigante hacia la conquista de toda la atmósfera.

La atmósfera no es una región vital independiente. Sus delgadas capas, desde un punto de vista biológico, sólo constituyen una parte de las capas adyacentes de la hidrosfera y la litosfera. Es en la litosfera donde las capas atmosféricas empiezan a participar en las aglomeraciones y películas vitales (cf. 150).

La enorme influencia que ejerce la materia viva en la historia atmosférica depende no ya de su presencia inmediata en el medio gaseoso, sino de la creación biógena de nuevos gases y de su migración en la atmósfera; también está en relación con la liberación y absorción de los mismos en dicho medio gaseoso.

El impacto de la materia orgánica en la historia atmosférica se refleja ora en la modificación de la delgada capa gaseosa colindante con la superficie terrestre, ora en la modificación de los gases disueltos en las aguas naturales.

El grandioso efecto final, el abrazo de toda la envoltura gaseosa del planeta por la energía vital, dada la penetración por doquier de los productos gaseosos de la vida (el oxígeno libre, en primer término), supone la consecuencia de las propiedades del estado gaseoso de la materia, no ya de las propiedades de las materias vivas.

121. En teoría, el límite inferior de la vida sobre la Tierra debería ser tan evidente y tan nítido como su límite superior, materializado en la pantalla de ozono.

No obstante, es menester determinarlo por medio de la temperatura, indagando en qué punto máximo de su escala se tornan inviables la existencia del organismo y su desarrollo, dadas las propiedades de los compuestos que lo conforman.

La temperatura de 100° C marca evidentemente tal barrera. Es la temperatura que reina a una profundidad de 3-3,5 kilómetros bajo el nivel del suelo; en ciertos lugares, a una distancia menor, en torno a los 2,5 kilómetros. Cabe considerar que los seres vivos, de promedio, no pueden existir en sus formas actuales a una profundidad superior a 3 kilómetros bajo el nivel terrestre.

El nivel de esta región profunda, donde la temperatura ronda los 100° C, desciende más en el caso del Océano, cuyo espesor medio es de 3,8 kilómetros y donde la temperatura abisal es fría, pues a veces alcanza pocos grados sobre cero. La temperatura límite para la vida se situará, en las aguas, en torno a una profundidad media de 6 kilómetros; entre 5 y 7 kilómetros, en el supuesto de que el grado térmico sea análogo al de tierra firme. De hecho, el aumento de la temperatura parece producirse más rápidamente y es improbable que la capa accesible para la materia viva rebasase los 6 kilómetros de profundidad por debajo del nivel marino.

La barrera de 100° C sin duda es convencional, pues tenemos noticia de que, en tierra firme, algunos organismos se multiplican con temperaturas superiores a 70°-80° C, aunque no sabemos de ninguno que se haya adaptado a una existencia permanente con 100° C.

Por todo lo cual es improbable que el límite inferior de la biosfera tras-pase la media de 2,5-2,7 kilómetros de profundidad en tierra firme y de 5-5,5 kilómetros en los mares.

Dicho límite viene probablemente impuesto por la temperatura, no por la composición química del medio a tales profundidades (sin oxígeno), pues la falta de este gas no puede constituir un obstáculo para la vida. Ya no queda oxígeno libre a escasa profundidad subcontinental; raramente es detectable a unos centenares de metros bajo el suelo. Es seguro, sin embargo, que la vida anaerobia se infiltra hasta profundidades mucho mayores. Las investigaciones independientes de J. Bastin en los Estados Unidos y de N. Uchinsky en Rusia (1926-1927) han corroborado la antigua observación de F. Stapff (1891): la existencia de una flora anaerobia por más de un kilómetro bajo el suelo terrestre.

122. La elevada temperatura supone un obstáculo infranqueable, aunque teórico, en la biosfera. Otros factores, en su conjunto, ejercen una influencia más decisiva en la propagación de la vida, impidiéndole ocupar regiones que, desde un punto de vista térmico, le resultarían accesibles.

Incluso podemos constatar, como ya lo hicimos en el caso de los animales microscópicos, la existencia de un curioso proceso geológico. Estos

organismos, en el curso de los tiempos geológicos, colonizan paulatinamente las profundidades. Regiones del planeta carentes de luz van siendo así pobladas por organismos específicos, jóvenes desde la óptica geológica, y tal proceso no ha llegado a término todavía.

Aquí se produce un fenómeno análogo al que reseñamos para el límite superior de la biosfera. En el transcurso de los tiempos geológicos, la vida desciende lenta, pero irremisiblemente, aproximándose a su límite inferior. No obstante, se halla más lejos de este último que de su límite superior.

Los organismos verdes que demandan luz para desarrollarse no tienen la opción, obviamente, de abandonar la franja de corteza terrestre alumbrada por el Sol.

Los organismos heterótrofos y las bacterias autótrofas son los que pueden aventurarse en las profundidades. La vida no penetra del mismo modo en las entrañas de tierra firme que en los abismos oceánicos.

La vida animal, muy dispersa, penetra a mayor profundidad en los Océanos; este proceso depende del relieve del fondo. No obstante, se ha podido constatar su presencia hasta algo más de 6 kilómetros: se ha descubierto un erizo—*Hyphalaster* perfecto— a una profundidad de 6.035 metros.

Las formas acuáticas abisales están facultadas para adentrarse en las fosas oceánicas, pero hasta ahora no se han encontrado organismos vivos a más de 6,5 kilómetros¹².

Todo el volumen de agua está poblado de bacterias en dispersión, halladas a más de 5,5 kilómetros de profundidad y que se concentran en el fondo marino. Su presencia en el lecho de las grandes fosas oceánicas aún no se ha confirmado.

123. La vida en tierra firme se reduce a unos niveles relativamente superficiales, en primera instancia porque el oxígeno libre nunca se infiltra profundamente en la corteza. En el Océano, el oxígeno libre en solución gaseosa (donde su cuantía, en relación con el nitrógeno, siempre es proporcionalmente más importante que en la atmósfera) se mantiene en contacto con el aire externo. El oxígeno atmosférico llega a las grandes fosas oceánicas, hasta una profundidad de 10 kilómetros, y toda pérdida resulta compensada por un nuevo aporte de oxígeno atmosférico, con cierto desfase, gracias a procedimientos de disolución y difusión. El límite de su penetración, la superficie del oxígeno libre, lo representa la capa superior, muy fina, del lecho oceánico (cf. 141).

El oxígeno libre desaparece rápidamente en cuanto se profundiza en tierra firme; lo absorben organismos o compuestos ávidos del mismo,

¹² Las profundidades oceánicas miden casi 10 kilómetros. Recientemente se ha descubierto una fosa de 9,95 kilómetros cerca de las Islas Kuriles. Previamente, la mayor profundidad conocida era de 9,79 kilómetros en las proximidades de las Islas Filipinas.

principalmente orgánicos. La investigación sobre las aguas de los manantiales subterráneos, que brotan desde un punto situado a uno o dos kilómetros de profundidad, refleja que no cuentan generalmente con oxígeno libre entre sus gases. Se observa un corte brusco entre el agua vadosa, que contiene oxígeno libre del aire, y el agua freática sin éste, un cambio que hasta la fecha no se ha esclarecido de modo fiable¹³. El oxígeno libre atraviesa la superficie del suelo y parte del subsuelo. La frontera del oxígeno libre permanece más cerca de la superficie en los suelos pantanosos y en las marismas. Según M. Hasselmann, en nuestras latitudes los primeros carecen de oxígeno libre si atravesamos una capa de 30 centímetros. Se constata su presencia en distintos subsuelos a una profundidad de varios metros, a veces diez o más, en el supuesto de que no halle ningún obstáculo para propagarse —como rocas compactas, sólidas, siempre exentas de oxígeno libre, pero cuyas huellas pueden revelarse en su cara superior, en contacto permanente con el agua del entorno—. Las cavidades y grietas libres, accesibles a la filtración de aire, alcanzan excepcionalmente profundidades de algunos centenares de metros. Nos referimos a los pozos de prospección y a las minas, obra de la humanidad civilizada, que marcan la profundidad máxima al superar los 2 kilómetros, aunque su relevancia es insignificante a escala de la biosfera.

Por otra parte, si las transferimos a nivel oceánico, tales medidas pierden valor. Las zonas bajas y profundas de los continentes suelen ser menos hondas. La máxima depresión continental implica poco más de un kilómetro; el lecho del lago Baikal, auténtico mar de agua dulce en Siberia, rico en vida, se sitúa a 1.050 metros bajo el nivel oceánico.

Sin duda la vida en tierra firme —contemplando incluso la vida anaerobia— jamás rebasa las profundidades del planeta que le resultan accesibles en la hidrosfera. Parece que la vida en las capas subcontinentales nunca alcanza la profundidad media (3,8 kilómetros) de la hidrosfera. No obstante, las perforaciones recientes para estudiar la génesis de los petróleos y del hidrógeno sulfhídrico rebajan considerablemente el límite inferior para la vida anaerobia. La génesis de estos minerales freáticos parece deberse a la vida y acontecer a unas temperaturas mucho más elevadas que las de la superficie terrestre. Ahora bien, incluso si los organismos bacterianos que intervienen en dichos procesos fueran especialmente termófilos (factor que no se ha comprobado), vivirían a temperaturas en torno a 70° C. Es decir, a bastante distancia todavía de la isogeoterma de 100° C.

124. Comprobamos así que la supremacía de la vida en la hidrosfera depende no sólo de su mayor volumen, sino de que en toda la extensión

¹³ En la mayoría de los casos, las indicaciones alusivas al oxígeno libre provienen de errores de observación.

marina se confirma la existencia de vida, a razón de una potente capa de 10 kilómetros de profundidad álgida y 3,8 kilómetros de profundidad media; en suelo firme (21% de la superficie terrestre), en cambio, la región de las manifestaciones vitales ni siquiera alcanza un espesor de 2,5 kilómetros, configurando una cubierta de algunos centenares de metros de promedio. En esta delgada epidermis de tierra firme, poblada por organismos vivos, la vida no se adentra más allá del nivel marino salvo en raras ocasiones.

A escala planetaria, la vida concluye en tierra firme a nivel del Océano; en la hidrosfera, por el contrario, se infiltra hasta una zona de un grosor medio de 3,8 kilómetros.

La vida en la Hidrosfera

125. Pese a una apariencia caótica, los fenómenos de la vida en la hidrosfera poseen, de hecho, características inmutables en el transcurso de toda la historia geológica y desde la era arqueozoica. Es menester enfocarnos como unos rasgos permanentes y estables del mecanismo de la corteza global, no ya exclusivamente de la biosfera. En el flujo de todas las eras geológicas, tales fenómenos persisten en determinadas regiones de la hidrosfera, por mucho que varíen constantemente la vida y el Océano.

Este mecanismo de la biosfera subsiste, inalterado, en los ciclos geológicos.

La densidad de la vida, la manifestación de regiones vitalmente prolíficas, deben servirnos de base a la hora de estudiar el mecanismo en cuestión. En la estructura del Océano, a dichas regiones las denominaremos *películas y concentraciones vitales*. Cabe considerarlas como subdivisiones secundarias del área de la corteza terrestre representada por la hidrosfera, puesto que son realmente regiones concéntricas en situación de continuidad, o pueden convertirse en tales en ciertos períodos de su historia geológica. Por tanto, las películas y concentraciones vitales suponen, en el Océano, *las regiones de transformación máxima de la energía solar*. Conviene empezar por tomar en consideración este hecho cuando se estudian todos los fenómenos vitales oceánicos, si pretendemos abarcarlos desde la perspectiva de su expresión en la historia planetaria. Sólo bajo esta condición seremos capaces de discernir el impacto gequímico de la vida en la hidrosfera.

Además de la densidad vital, es preciso determinar las propiedades de las películas y las concentraciones vitales:

1.º Desde el punto de vista del carácter de su materia verde viva, así como de su localización. De esta suerte dilucidamos en qué regiones de la hidrosfera se efectúa la formación de la masa principal de oxígeno libre del planeta.

2.º Desde el punto de vista de la distribución, en el espacio y en el tiempo, de la creación de nuevas generaciones; es decir, desde la óptica del fenómeno de la multiplicación en las películas y concentraciones vitales. Tal proceso puede depararnos una idea cuantitativa de las leyes del cambio regular al que está supeditada la energía química, así como de la intensidad de la misma.

3.º Desde el punto de vista de los procesos químicos que se desarrollan en las películas y concentraciones vitales en relación con la historia de determinados elementos químicos de la corteza terrestre. Por esta vía se manifiesta el impacto de la materia viva del Océano en la geoquímica planetaria. Veremos cómo las funciones de las diversas películas y concentraciones vitales son inmutables, específicas y distintas en el curso de los períodos geológicos.

126. Como ya sabemos (cf. 55), la superficie del Océano está cubierta de una lámina continua de vida verde. Representa el campo donde se elabora el oxígeno libre, del que está penetrado el volumen total de las aguas, hasta el mismo fondo, gracias a los procesos de difusión y convección.

Los organismos autótrofos verdes del Océano, tomados en conjunto, se acumulan particularmente en la franja superior, sin descender de 100 metros. Más allá de los 400 metros suelen situarse únicamente los animales heterótrofos y las bacterias.

Por un lado, la superficie oceánica entera es el territorio del fitoplancton clorofílico; por otro lado, las grandes plantas —algas y hierbas marinas— ocupan el primer rango por posiciones. Constituyen dos tipos de formaciones muy distintas, aunque no suelen establecerse diferencias. Las algas y las hierbas verdes se desarrollan profusamente en las regiones costeras, poco profundas (*concentraciones litorales*); no obstante, de modo puntual, las hierbas configuran masas flotantes en alta mar: a título de ejemplo llamativo recordaremos el mar de los Sargazos, cuya superficie supera 100.000 kilómetros cuadrados (*concentraciones sargácicas*).

Los organismos unicelulares microscópicos, que se aglomeran fundamentalmente en la superficie del Océano, en el plancton, representan la masa esencial de vida verde.

Ello obedece a la mayor intensidad de su multiplicación. La multiplicación planctónica corresponde a la magnitud v , igual a 250-275 centímetros por segundo. Esta magnitud puede convertirse en miles de centímetros por segundo, mientras que en el caso de las algas litorales normalmente fluctúa entre 1,5 y 2,5 centímetros por segundo (como mucho, algunas decenas de centímetros). Si la conquista de la superficie oceánica (correspondiente a la energía radiante captada por ella) dependiera sólo de la velocidad v , el plancton debería ocupar un área en el mar 100 veces mayor que al de las grandes algas. La distribución de estos distintos

dispositivos para crear oxígeno libre se relaciona, efectivamente, con el orden de tal magnitud. Las algas litorales se hallan en regiones poco profundas del Océano¹⁴. La extensión de los mares¹⁵, según J. Schokalsky, no excede el 8% de la superficie oceánica, pero una mínima parte de los mares está revestida por un manto de grandes algas y hierbas. Ocho centésimas significan el límite máximo de ocupación superficial por las plantas litorales —un límite inaccesible, en la práctica, para éstas—. Las concentraciones flotantes de sargazos desempeñan un papel todavía más irrelevante. Su mayor concentración, el mar de los Sargazos, equivale a un 0,02% de la superficie oceánica.

127. La vida verde, que con frecuencia pasa desapercibida a simple vista en el Océano, no abarca, ni remotamente, toda la manifestación vital de la hidrosfera. El potente desarrollo de la vida heterótrofa, tan característica en este ámbito, no suele observarse en tierra firme. La impresión general producida por la vida en el Océano —probablemente acertada— es que los animales, no las plantas, ocupan la posición hegemónica y troquelan, con su impronta, la totalidad de las manifestaciones de la Naturaleza viva que se concentra en su seno.

Ahora bien, esta vida animal no podría expandirse sin coexistir con la vida vegetal verde. Su distribución depende de ella, es el efecto de su presencia.

Precisamente, en la íntima conexión entre las condiciones de nutrición y de respiración de los reinos animal y vegetal, radica la formación de acumulaciones de organismos, películas y condensaciones vitales en el Océano.

128. En el volumen global del Océano, la materia orgánica supone una modesta cuantía. En términos generales procede afirmar que el agua del mar es inanimada. Incluso las bacterias, tanto autótrofas (cf. 94) como heterótrofas, apenas representan unas centésimas de su peso; desde esta perspectiva, se equiparan con los escasos iones químicos de las soluciones marinas. Únicamente se detectan importantes cantidades de organismos vivos en las películas y concentraciones vitales. Ambas no suelen abarcar más de una centésima, en ocasiones algunas centésimas de materias vivas. Sólo puntual y transitoriamente los organismos vivos suman varias centésimas de la masa de agua marina.

Todas las concentraciones y películas vitales son regiones con una intensa actividad química. En su seno la vida se halla en perpetuo movimiento. Con todo, estas formaciones permanecen inmóviles, o cuasi inmóviles; a pesar de que en la estructura de la hidrosfera hay cambios

¹⁴ Cuando la plataforma litoral es profunda, la capa de algas ocupa un área insignificante.

¹⁵ Es decir, en las profundidades inferiores a 1.000-1.200 metros, incluidos los bajos.

innumerables y continuos, configuran equilibrios estables. Se muestran constantes, tan definidoras del Océano como las corrientes marinas.

Al basarnos en rasgos primordiales, en las líneas maestras de la distribución de la vida en el Océano, deslindamos *cuatro condensaciones vitales estáticas: dos películas*, el plancton y el limo del fondo; *dos concentraciones*, las litorales (marinas) y las de sargazos.

129. La modalidad esencial y más representativa de tales aglomeraciones vitales es la *finca película superior, abundante en vida verde: el plancton*. Cabe estimar que recubre toda la superficie oceánica.

El mundo vegetal verde descuella a veces en el plancton, pero el papel de los organismos animales heterótrofos, cuya existencia depende del fitoplancton, quizá sea igualmente decisivo por su manifestación global en la química planctónica. El fitoplancton siempre es unicelular, pero los metazoos cumplen una función importante en el zooplancton. Pueden proliferar, en su seno, en cantidades jamás detectadas en tierra firme. Así, se observan esporádicamente en el plancton oceánico huevos y lechaza de peces, crustáceos, larvas, estrellas de mar, etc., en una proporción ingente, que supera la de los restantes seres vivos. Según M. Hjort, el número de individuos por centímetro cúbico varía de promedio, para el fitoplancton microscópico verde, entre 3 y 15; este número se eleva, para todo el microplancton, hasta un cupo de 100 individuos microscópicos (M. Allen, 1919). El número de células del fitoplancton no suele igualar al de los individuos animales heterótrofos. No incluimos las bacterias, ni el nonio-plancton. De esta suerte, fuerza es que admitamos que la película del plancton comporta centenares, miles de individuos microscópicos, centros independientes de transmisión de energía geoquímica por centímetro cúbico (cf. 48). Formulada en peso, la materia viva así diseminada significará, como mínimo y de promedio, un $10^{-3} - 10^{-4} \%$ de la masa total de agua oceánica; probablemente supere dichas cantidades.

El espesor de esta capa, generalmente localizada a una profundidad entre 20 y 50 metros, no excede algunas decenas de metros. A veces el plancton asciende hasta la superficie marina o desciende por debajo de la línea indicada. El número de individuos disminuye rápidamente a partir de esa fina película, por encima y sobre todo por debajo. A más de 400 metros, los individuos del plancton suelen estar muy dispersos.

Los organismos vivos, en el volumen global del agua oceánica, cuya capa media tiene un grosor de 3,8 kilómetros y cuya profundidad máxima ronda los 10 kilómetros, componen pues una membrana delgadísima: representa de promedio la $n \times 10^{-2}$ parte del espesor total de la hidrosfera. Desde el punto de vista del *quimismo oceánico*, tal fracción se *considerará activa*, y el resto de la masa acuática *bioquímicamente poco representativa*.

Es evidente que la película planctónica, pese a su delgadez, constituye un componente importante del mecanismo de la biosfera, similar al de la capa de ozono con su proporción insignificante de este gas.

Su área equivale a centenares de millones de kilómetros cuadrados y su peso debe expresarse en un número del orden de $10^{15} - 10^{16}$ toneladas.

130. Otra concentración vital, *el limo del fondo*, se observa en el lecho marino y en la fina capa de agua colindante que lo empapa.

Esta membrana, por sus dimensiones y su volumen, se asemeja a la película planctónica, aunque la supera notablemente por su peso.

Se distribuye en dos zonas: la primera, la franja *superior o asiento del pelon¹⁶*, se sitúa en la región del *oxígeno libre*; en superficie bulle la vida animal, desempeñando los metazoos un papel destacado. Se entablan relaciones muy complejas entre los organismos de esta biocenosis bentónica, que apenas estamos empezando a investigar desde un enfoque cuantitativo.

Esta fauna consigue localmente un desarrollo enorme. Como ya hemos resñado, en el caso de los metazoos bentónicos se originan concentraciones de materia orgánica de un orden análogo, por hectárea, al de las aglomeraciones de metafitos en tierra firme en situación de rendimiento óptimo (cf. 58).

Estos lodos animados de vida y el bentos en contacto con ellos componen, sin duda, grandes condensaciones de materia orgánica hasta una profundidad quizá superior a los 5 kilómetros.

Los individuos de animales bentónicos disminuyen numéricamente, de modo sensible, desde los 4-6 kilómetros; en las fosas más hondas, a partir de 7 kilómetros, los animales macroscópicos posiblemente desaparezcan.

Debajo del bentos se encuentra el *cieno del fondo*, que forma la parte inferior de la primera franja. Las protistas predominan allá en una enorme proporción, desempeñando las bacterias un papel protagonista en virtud de su desbordante energía geoquímica. Únicamente la delgada lámina superior, de un espesor de algunos centímetros —la región del pelon—, contiene oxígeno libre; por debajo yace una gruesa capa de lodo saturada de bacterias anaerobias, perforada quizá por un sinnúmero de seres excavadores.

Todas las reacciones químicas se producen en un medio claramente oxidante. La función de esta capa, relativamente fina, en la química de la biosfera es enorme (cf. 141). El grosor de la película del fondo, incluyendo la capa de lodo, excede en ocasiones los 100 metros. No obstante, puede que sea más espesa, por ejemplo en las regiones abisales del Océano, donde viven organismos como los crinoides, cuya importancia en los procesos

¹⁶ Utilizamos este término, adoptado por los limnólogos rusos, que fue propuesto por M. Soloviev.

químicos del planeta parece ser notable. En la actualidad, lamentablemente, no estamos en condiciones de determinar el espesor de la concentración dotada de vida existente sino de manera provisional; estimamos al efecto una magnitud media de 10 a 60 metros.

131. El plancton y la película vital del fondo penetran toda la biosfera. Si la superficie del plancton viene a resultar, en suma, similar a la del Océano —cuantificada en $3,6 \times 10^8$ kilómetros cuadrados—, la superficie de la película del fondo debe superarla considerablemente, dado que se acomoda a la complejidad y a las irregularidades del relieve submarino.

A ambas películas que envuelven a la hidrosfera se agregan otras dos concentraciones vitales, íntimamente vinculadas en su existencia con la superficie planetaria rica en oxígeno libre: nos referimos a las concentraciones saturadas de vida verde, muy ligadas al plancton: *las concentraciones litorales y de sargazos*.

Las concentraciones litorales abarcan a veces todo el volumen del agua hasta el lecho oceánico, pues se adaptan a las regiones menos profundas de la hidrosfera.

Su área no excede, en caso alguno, la décima parte de la superficie oceánica. En cuanto al grosor, abarca de promedio unos centenares de metros, puntualmente 500 metros, llegando excepcionalmente al kilómetro. Tienen a acumularse en masas conjuntas con la película planctónica y el limo del fondo.

Las concentraciones vitales litorales van siempre unidas a las regiones más accesibles, a los mares y a las zonas del Océano próximas a las costas. Se relacionan con la infiltración en las aguas de los rayos solares luminosos, así como con los rayos térmicos, con la erosión continental y con el aporte de soluciones acuosas, ricas en detritos orgánicos y en polvo terrestre, en suspensión, por parte de los ríos. La cantidad general de esta vida será forzosamente inferior a la que está ligada a las películas planctónica y del fondo, puesto que las profundidades que no exceden del kilómetro no suponen más allá de la décima parte de la superficie oceánica. En parte, son bosques de algas y hierbas marinas; en parte, aglomeraciones de moluscos, construcciones de corales, de algas calcáreas y briozoos.

132. *Las concentraciones de sargazos* aparentemente ocupan una posición especial que, antiguamente, llamaba poco la atención y que ha merecido distintas explicaciones. Se diferencian de las películas planctónicas por el carácter de su fauna y de su flora; de las concentraciones litorales, por su autonomía respecto de la erosión continental y del aporte de productos orgánicos por los ríos. En contraste con las litorales, son acumulaciones oceánicas, observadas en la superficie de las regiones profundas del Océano, sin ninguna relación con el bentos ni con el limo del fondo.

Durante mucho tiempo se las ha considerado como formaciones secundarias, restos flotantes de concentraciones litorales arrastrados por los vientos y las corrientes marinas. Su presencia en zonas concretas del Océano era así la resultante de la distribución de los vientos y las corrientes, tratándose de zonas en bonanza.

Opiniones como las anteriores todavía son tópicos en la literatura científica, pero los hechos las invalidan, por lo menos en lo que concierne al «mar de los Sargazos» en el Océano Atlántico, la mayor y la mejor estudiada de cuantas concentraciones de esta clase existen.

Encontramos una fauna y una flora peculiares, con algunos representantes que proceden, indudablemente, del bentos de las regiones litorales.

Probablemente esté en lo cierto L. Germain cuando refiere su origen a la lenta adaptación de esta fauna y de esta flora a las nuevas condiciones, a la evolución de la materia litoral viva afectada por el lento hundimiento continental en el curso de los tiempos geológicos, o por la inmersión de grupos de islas, hoy desaparecidas, que se encontraban antaño en el lugar donde está el mar de los Sargazos.

El futuro demostrará si es viable o no aplicar esta explicación a las demás concentraciones de la misma clase. No obstante, la existencia de un tipo de concentraciones vitales con abundancia de grandes organismos vegetales, poblado de especies animales singulares, supone un hecho irrefutable, implicando unas formaciones que se diferencian claramente de las películas planctónica y del fondo oceánico. No se ha procedido a evaluarlas con exactitud, pero ocupan un área reducida en la hidrosfera, muy inferior a la que cubren las concentraciones litorales.

133. De los hechos expuestos se infiere que apenas el 2% de la masa total del Océano está ocupado por las concentraciones vitales. El 98% restante alberga vida en estado de dispersión.

El impacto de tales concentraciones y películas en el Océano es considerable, particularmente en lo que atañe a su composición química, a sus procesos químicos y a su régimen gaseoso, aunque los organismos que se sitúan al margen de películas y concentraciones, en las capas medias del Océano, no provocan cambios esenciales, por lo menos desde la óptica de la evaluación cuantitativa del fenómeno.

Así pues será lícito ignorar, en nuestra posterior estimación cuantitativa de la vida en la biosfera, la masa principal de las aguas oceánicas; tendremos exclusivamente presentes las cuatro grandes regiones de sus aglomeraciones: las correspondientes a las películas planctónica y del fondo, a las concentraciones litoral y de sargazos.

134. En todas las biocenosis destacadas, *la multiplicación* se efectúa a intervalos temporales, según un ritmo determinado. La cadencia de la

multiplicación se-corresponde con el trabajo geológico de la materia viva. El ritmo con que se multiplican células y concentraciones vitales determina, a su vez, la intensidad del desarrollo del trabajo geológico a escala planetaria.

Como ya sabemos, el rasgo más característico, para las dos células vitales oceánicas, lo constituye la supremacía en su seno de protistas, organismos exiguos dotados de la máxima velocidad de multiplicación. Es improbable que la velocidad a la que se transmite la vida, la magnitud v , en condiciones favorables y normales de su existencia, sea inferior a 1.000 centímetros por segundo (cf. 40). Por tanto, serán los cuerpos dotados de la mayor intensidad de intercambio gaseoso, siempre proporcional a su superficie, los cuerpos que manifesten por hectárea la energía geológica cinética máxima (cf. 41) —es decir, capaces de generar, en la unidad de tiempo, la mayor masa de materia viva por hectárea—, los que alcancen antes el límite de fecundidad.

Las protistas parecen poseer una gran rapidez para multiplicarse; no son idénticas en la célula planctónica y en la del fondo. En esta última prevalecen las bacterias que penetran las masas ingentes de residuos de organismos más grandes, en descomposición, que allí se aglomeran. En la célula planctónica, desde la perspectiva de la masa material implicada, las bacterias están en segunda línea, mientras que en primer término figuran las protistas verdes y los protozoos.

135. Los protozoos no representan el componente principal de la vida animal en el plancton; los metazoos desuellan entre los animales: crustáceos, larvas, peces jóvenes, etc.

El ritmo de multiplicación de los metazoos suele ser más lento que el de los protozoos. En el caso de los seres superiores, la velocidad a la que se transmite la vida se calcula en fracciones de centímetro por segundo. En cuanto a los peces y a los crustáceos del plancton, la magnitud v no parece ser inferior a algunas decenas de centímetros.

Una enorme cantidad de metazoos, a menudo bajo la forma de individuos voluminosos, constituye el rasgo característico de la célula vital del fondo en el bentos oceánico. La multiplicación de los mismos se realiza, en determinadas épocas, a menor velocidad que la de los pequeños organismos del plancton. Pueden observarse organismos dotados de una baja intensidad de multiplicación.

Los metazoos y los metafitos son representativos de las concentraciones litorales y de sargazos, ocupando las protistas de diferentes especies una posición a fin de cuentas secundaria, no siendo las que determinan la intensidad de los procesos geológicos en el seno de tales biocenosis.

En dichas regiones, sobre todo en las concentraciones litorales, los metazoos empiezan a predominar en razón directa con la profundidad, termi-

nando por convertirse en los principales indicadores vitales. La importancia que pueden llegar a tener es evidente; por ejemplo, en las aglomeraciones de corales, los hidroideos, crinoides o briozoos.

136. La cadencia de la multiplicación, la regularidad de su ritmo destacan de ser un hecho claro para el pensamiento científico. Únicamente nos consta que la multiplicación se efectúa con pausas y que existe, en el universo circundante, una sucesión secuenciada de tal proceso, cuyo orden se relaciona íntimamente con los fenómenos astronómicos. La multiplicación depende de la intensidad de la luz y el calor del Sol, de la cantidad de vida, del carácter del medio.

La intensidad de la multiplicación orgánica, singular para cada especie, se relaciona con la migración de los átomos, que son más necesarios a la vida del organismo cuanto más abundantemente intervengan en su composición. En la actualidad, la célula planctónica nos brinda el cuadro menos oscuro de este fenómeno.

137. La alteración provocada por la multiplicación siempre se efectúa rítmicamente. La alteración corresponde a las oscilaciones del medio vital que se repite cada año. Está en función de los movimientos cíclicos del Océano. Los movimientos oceánicos —mareas, cambios térmicos, salinidad de la evaporación, intensidad de la luz solar— son todos de origen cósmico.

A tenor de tales fenómenos, una ola que crea materia orgánica, bajo la forma de nuevos individuos, se propaga por todo el Océano en la estación primaveral. La amplitud de la misma se reduce en verano. Se manifiesta por el rendimiento anual de casi todos los seres superiores e influye en la composición del plancton. «Con una inmutabilidad comparable a la del advenimiento del equinoccio de primavera y al alza de las temperaturas, con idéntica precisión, la masa animal y vegetal del plancton, que puebla un volumen determinado de aguas marinas, alcanza su clímax anual para disminuir luego nuevamente» (J. Johnstone, 1911).

El panorama trazado por Johnstone alude a nuestras latitudes, pero *mutatis mutandis* podría aplicarse a la totalidad del Océano. El plancton representa una biocenosis; todos los organismos que lo integran se vinculan estrechamente, en su existencia, los unos a los otros. Hay un predominio de crustáceos copépodos, que se alimentan de diatomeas, y de éstas mismas en el Océano Atlántico septentrional.

Cabe observar un ritmo regular que se repite anualmente en los mares bien estudiados del Noreste de Europa. Entre febrero y junio (para la mayoría de los peces, entre marzo y abril), el plancton rebosa de huevos de peces. En primavera, desde el mes de marzo pululan las diatomeas silíceas —*Biddulphia*, *Coscinodiscus*, más tardíamente algunas especies de *Dinoflagellates*—. El número de diatomeas y piridíneas retrocede rápidamente ha-

cia el verano y las reemplazan los copépodos y otros representantes del zooplankton. En otoño -septiembre, octubre-, resalta una nueva eclosión del fitoplancton, de menor intensidad. Diciembre y, sobre todo, enero y febrero se caracterizan por un letargo vital, por la reducción del proceso de la multiplicación.

Esta alternancia del ritmo reproductor es específica, constante y distinta para cada organismo; se repite cada año con la precisión inmutable que caracteriza a todos los fenómenos con un origen cósmico.

Ciclos geoquímicos de las concentraciones y películas vitales de la Hidrosfera

138. La cadencia geoquímica de la multiplicación se expresa por medio del ritmo de los procesos químicos terrestres. Cada película y cada concentración vital es la región donde se crean compuestos químicos determinados.

Hay que señalar, para el conjunto de la materia viva, que los elementos químicos, una vez que se han incorporado a los circuitos vitales, no emigrarán ya; permanecerán en su seno a perpetuidad. Siempre hay una pequeña porción que se separa bajo la forma de minerales vadosos; esta parte es la que precisamente aparece como creación de la química oceánica. La intensidad con que se multiplican los organismos repercute en la intensidad con que se forman los cuerpos vadosos.

La película planctónica es el campo principal del que se desprende el *oxígeno libre*, producto vital de los organismos verdes. En ella se concentran los compuestos del nitrógeno, que juegan un papel crucial en la química terrestre de dicho elemento. Esta película representa el centro donde se elaboran los compuestos *orgánicos* del agua oceánica. Varias veces al año, el *calcio* se acumula bajo la forma de carbonatos; el *silicio*, bajo la forma de ópalos. Terminan por depositarse en la película del fondo. Los resultados de dicho trabajo, acumulados geológicamente, pueden observarse en las gruesas capas de *rocas sedimentarias*, en la parte orgánica de las *rocas calcáreas* (algas microscópicas, foraminíferos) y en los *yacimientos silíceos* (diatomeas, esponjas, radiolarios).

139. Las concentraciones de sargazos y, en cierto modo, las litorales son análogas, por sus productos químicos, a la película planctónica. También participan activamente en la creación de *oxígeno libre*, de compuestos oxidados del *nitrógeno*, de compuestos oxidados y nitrogenados del *carbón*, de compuestos del *calcio*.

Al parecer, en tales regiones habría concentraciones de *magnesio*, un elemento que interviene en la composición de las partes sólidas de los or-

ganismos en cantidades menores que el calcio, pero, con todo, en proporciones reseñables e importantes; un porcentaje de magnesio pasaría directamente, por esta vía, a integrarse en la composición de los minerales vadosos.

Las concentraciones vitales no ocupan un lugar tan señalado en la historia del *silicio* como la película planctónica, aun cuando la migración cíclica en la materia viva de este elemento sea muy intensa.

140. La historia de todos los elementos químicos en las concentraciones y películas vitales se caracteriza por dos procesos divergentes: en primer término, por la migración de elementos (distinta y determinada para cada uno) a través de la materia viva; en segundo término, por su liberación bajo la forma de compuestos vadosos, escapando así de los circuitos vitales.

Una separación semejante es inapreciable en un ciclo vital corto, por ejemplo de un año, ya que la cantidad de elementos que, en tal intervalo de tiempo, abandonan el ciclo vital resulta insignificante. La emigración sólo será perceptible después de largos períodos, no ya históricos, sino geológicos. Así se crean en la corteza terrestre masas de materia inerte en estado sólido que multiplican varias veces el peso de la materia orgánica existente, en un momento dado, en el planeta.

Desde esta perspectiva, la película del plancton se distingue claramente de las concentraciones litorales¹⁷. El ciclo vital de las últimas libera cantidades infinitamente mayores de elementos químicos que el planctónico, por lo cual tienen una mayor impronta en la estructura de la corteza terrestre.

En las zonas inferiores de las concentraciones litorales, cerca de la película del lecho marino, así como en las franjas colindantes con tierra firme, es donde se observan preferentemente estos fenómenos. En la segunda localización, es típica la creación de compuestos orgánicos sólidos del *carbón* y del *nitrógeno*, al igual que la evaporación de *ácido sulfhídrico*, ligado a la liberación de *azufre* de la región de la corteza terrestre estudiada. Es por este procedimiento bioquímico como los sulfatos abandonan los lagos y lagunas saladas que se forman en los bordes de las cuencas marinas.

141. No existe límite definido, en el caso de las concentraciones litorales, que separe las reacciones químicas del fondo y las superficiales; la frontera, en cambio, es muy clara en pleno Océano, donde ambas películas vitales, químicamente activas, están distanciadas entre sí por un volumen de agua, químicamente inerte, de un espesor de varios kilómetros.

¹⁷ No se conocen con precisión los fenómenos que acontecen en las concentraciones de sargazos.

Por lo general, en las concentraciones litorales se aproximan los límites entre las películas de la hidrosfera, mientras que ni siquiera existen en los mares poco profundos, ni cerca de las orillas. En el último caso, se confunde la acción de todas estas aglomeraciones vitales. Se configuran regiones de un trabajo bioquímico particularmente intenso.

La película del fondo continúa siendo el ámbito donde se manifiesta un trabajo químico extraordinario. Las concentraciones de organismos dotados de energía geoquímica máxima —las bacterias— destacan en primera línea. Las condiciones químicas del medio habitual soportan, al mismo tiempo, un cambio brusco, puesto que, debido a la abundancia de compuestos, mayormente de productos orgánicos que absorben con avidez el oxígeno libre suministrado por la superficie, se establece un *medio reductor* en la película del fondo, en el lodo marino. Son los dominios de las bacterias anaerobias. Únicamente una fina membrana de limo, de algunos milímetros —la *región del pelon*—, constituye el campo de procesos bioquímicos de oxidación intensos, en los que se forman *nitratos y sulfatos*. Esta lámina separa la población superior de las concentraciones vitales del fondo (análogas a las litorales por sus manifestaciones químicas) de la del medio reductor, del cieno inferior, un medio prácticamente desconocido en otros lugares de la biosfera.

En realidad, el equilibrio que se instaure entre el medio oxidante y el medio reductor se ve continuamente perturbado por el celo infatigable de los animales excavadores; las reacciones bioquímicas y químicas se suceden en ambos sentidos, fomentando la creación de cuerpos inestables ricos en energía química libre. No obstante, es imposible actualmente evaluar el alcance geoquímico de dicho fenómeno. Por otro lado, la particularidad característica de las películas del fondo es que se depositan, sin cesar, restos orgánicos en putrefacción que caen desde las películas planctónicas, de sarrazos y litorales. Estos detritos orgánicos están poblados de bacterias, fundamentalmente anaerobias; contribuyen a reforzar el carácter químico reductor del medio constituido por las películas del fondo.

142. Las concentraciones vitales del fondo, en relación con el carácter de su materia viva, cumplen un papel singular en la biosfera; participan, de manera esencial, en la creación de su materia inerte. En efecto, los productos básicos de sus procesos bioquímicos, en condiciones anaerobias, sin oxígeno libre, no son gases, sino cuerpos sólidos o coloidales que, en el desarrollo del tiempo, se convierten principalmente en cuerpos sólidos. Estas regiones reúnen todas las condiciones propicias para la conservación de los organismos, ya que éstos, una vez muertos, lo mismo que sus restos, escapan prontamente de las condiciones bioquímicas habituales en las que se descomponen y pudren; para que tales procesos sobrevengan, el medio ha de contener oxígeno libre, transformándose gran parte de la materia orgánica

en productos gaseosos: no se consumen. No sólo la vida aerobia, también la anaerobia se extingue en el lodo marino a escasa profundidad de su cara superficial. A medida que van depositándose los detritos vitales y las partículas de materia inorgánica en suspensión, las capas inferiores del cieno marino se tornan inanimadas y los cuerpos químicos creados por la vida no tienen ocasión de transformarse en gases o de integrarse en nuevas materias vivas. La capa vital de lodo jamás supera algunos metros, mientras que crece sin cesar en superficie. En las zonas inferiores, la vida se apaga inexorablemente.

La «desaparición» de los detritos orgánicos, su gasificación, es siempre un proceso bioquímico. En las capas azoicas, los restos orgánicos se modifican de otra manera, paulatinamente; con los ciclos geológicos van mutándose en minerales vadosos sólidos y coloidales.

Los productos de una génesis semejante nos rodean por doquier; modificados por los procesos químicos, con el paso del tiempo configuran, bajo el aspecto de rocas sedimentarias, las capas superiores del planeta, alcanzando un espesor medio de varios kilómetros. Estas rocas se transforman gradualmente en metamórficas, sufren más alteraciones y, penetrando en regiones donde reinan temperaturas elevadas, en la capa magnética de la Tierra, pasan a integrarse en la composición de rocas compactas, hipobasales, de cuerpos freáticos o juveniles, que con el tiempo se reincorporan a la biosfera por efecto de la energía de la que es un exponente la elevada temperatura de estas capas (cf. 77, 78).

Estos productos llevan hasta las entrañas del planeta la energía libre, transmutada por la vida en energía química, originariamente captada por el organismo verde, en la biosfera, bajo la forma de radiaciones cósmicas, de rayos solares.

143. Las películas vitales del fondo, así como las concentraciones litorales que se les superponen, merecen pues una atención especial a la hora de evaluar el trabajo químico de la materia viva en nuestro planeta.

Configuran regiones de la corteza terrestre químicamente activas y potentes, que operan pausada pero, a fin de cuentas, uniformemente en el transcurso de todas las eras geológicas.

La distribución muy variada, en la sucesión de dichas eras, de mares y continentes en la superficie terrestre nos ilustra sobre el desplazamiento planetario de las películas y concentraciones vitales en el tiempo y en el espacio.

La importancia geoquímica de las películas vitales del fondo es muy considerable para su zona de oxidación superior (especialmente, el bentos), así como para las capas reductoras inferiores. Esta importancia aumenta en las regiones donde se confunden con las concentraciones litorales y donde el oxígeno libre, y los productos geoquímicos ligados a él y al trabajo de la

vida verde, se agregan a los productos habituales; esto es, por encima de los 400 metros (cf. 55).

El medio oxidante de la película del fondo se manifiesta con claridad en la historia de otros muchos elementos químicos además del *oxígeno*, el *nitrógeno* o el *carbón*.

En primer lugar, este medio altera profundamente la historia terrestre del *calcio*. Es muy característico que éste sea el metal predominante en la materia viva. Su proporción supera probablemente, en peso, una centésima de la composición media de la materia viva; en múltiples organismos, ante todo marinos, la proporción de calcio excede el 10, incluso el 20%. Por esta vía, por la acción de la materia viva, el calcio se disocia en la biosfera del sodio, del magnesio, del potasio y del hierro, con los que cabe compararlos en términos cuantitativos y con los cuales se combina, en moléculas comunes, en toda la materia inerte de la corteza. El calcio se disocia merced a los procesos vitales de los organismos bajo la forma de carbonatos y de fosfatos complejos, más raramente de oxalatos; persiste también, bajo esta misma forma ligeramente alterada, en los minerales vadados de origen bioquímico.

El Océano, principalmente en sus regiones vitales —tanto litorales como profundas—, constituye el mecanismo mediante el cual se originan las concentraciones de compuestos cálcicos del planeta, ausentes en las zonas más recientes de su corteza —ricas en silicio— y en las regiones freáticas profundas.

Se generan anualmente en el Océano, como mínimo, 6×10^{14} gramos de calcio en la modalidad de carbonatos. Hay entre 10^{18} y 10^{19} gramos de calcio en estado de migración permanente en el ciclo vital de la materia orgánica, lo cual implica una porción bastante considerable del calcio total que existe en la corteza terrestre (en torno a 7×10^{24} gramos) y una porción muy considerable del calcio de la biosfera. El calcio se concentra no sólo por la acción de los organismos bentónicos que poseen una gran velocidad de transmisión vital —moluscos, crinoideos, estrellas de mar, algas, corales, hidroideos y otros—; también lo fijan las protistas del lodo marino y sobre todo el plancton, incluido el nonioplancton, así como las bacterias dotadas de la energía geoquímica cinética máxima de la materia viva.

Al liberar los compuestos cálcicos que forman montañas enteras, macizos con un volumen de algunos millones de kilómetros cúbicos, la energía solar regula la actividad de los organismos y determina la química de la corteza terrestre, como ocurre por medio de la descomposición del ácido carbónico y del agua, creándose, por esta vía, compuestos orgánicos y oxígeno libre.

El calcio se desprende fundamentalmente bajo la forma de carbonatos, pero también de fosfatos. Los ríos lo transportan hasta los Océanos; en tie-

rra firme, su parte principal ha pasado ya por otra forma debido a la acción de la materia viva terrestre (cf. 156).

144. Tales regiones donde se concentra la vida ejercen una impronta análoga en la historia de otros elementos habituales de la corteza terrestre: sin duda, en la del *silicio*, el *aluminio*, el *hierro*, el *manganeso*, el *magnesio*, el *fosforo*.

Siguen persistiendo muchos enigmas en estos fenómenos naturales complejos, pero el resultado final, la enorme importancia de esta película vital en la historia geoquímica de los elementos enumerados, no deja lugar a dudas.

En la historia del *silicio*, la influencia de la película del fondo se manifiesta a través de la formación de sedimentos de restos de organismos silíceos que proceden ora del plancton, ora del fondo —radiolarios, diatomeas, esponjas de mar—. En suma, se originan las mayores concentraciones conocidas de sílice libre, alcanzando un volumen de millones de kilómetros cúbicos. Esta sílice libre, inerte y poco proclive a modificarse en la biosfera, supone un factor químico potente en su calidad de portadora de energía química libre en las capas metamórficas y magmáticas de la Tierra, dado su carácter químico ácido de anhídrido libre.

No caben dudas acerca de la segunda reacción bioquímica que se produce, cuya importancia todavía no somos capaces de dilucidar. Nos referimos a la descomposición, por obra de las diatomeas y quizá de las bacterias, de los aluminosilicatos de estructura caolínica que, por un lado, causa la formación de los depósitos de sílice libre de los que ya hablamos y, por otro lado, la creación de hidróxidos de aluminio. Este proceso, al parecer, no es patrimonio exclusivo de los lodos marinos; según las investigaciones de J. Murray y R. Irvin, acontecería asimismo en las partículas arcillosas en suspensión en el agua marina, que son a su vez el fruto de procesos bioquímicos de la alteración superficial de la materia inerte de los continentes y las islas.

145. La importancia de tales regiones y de sus reacciones bioquímicas se repite en la historia del *hierro* y del *manganeso*. El resultado de dichas reacciones tampoco se cuestiona: nos referimos a la génesis de las mayores concentraciones de estos elementos conocidas en la corteza terrestre; por ejemplo, los minerales de hierro de la Era Terciaria —mesozoicos— de Kertch, en Lorena. Todo indica que esas limonitas y cloritas ricas en hierro se han formado con la intervención directa de manifestaciones vitales. Aun cuando el fenómeno, a nivel químico, no esté perfectamente dilucidado, el hecho fundamental, su carácter bioquímico, bacteriano, es indiscutible. Los trabajos recientes de los investigadores rusos B. Perfiljev, P. Burkevitch y B. Issatshenko (1926-1927) así lo han confirmado.

Los mismos procesos se repiten en la extensión total de la historia geológica desde la era precámbrica (arcaica). De esta suerte se han formado, por ejemplo, las más grandes y antiguas concentraciones de hierro en Minnesota (M. Gruner, 1924).

Los numerosos minerales de manganeso y sus máximas concentraciones en Transcaucasia presentan un carácter similar. Se producen transiciones entre los minerales de hierro y manganeso; actualmente acontecen, en espacios considerables del fondo del mar, síntesis análogas, cuyo origen bioquímico bacteriano es prácticamente seguro.

146. La génesis de los compuestos del fósforo que, todavía hoy, se depositan en el fondo marino en unas condiciones que desconocemos, ofrece similitudes. No se discute su vinculación con fenómenos de la vida, con los procesos bioquímicos, pero hay que seguir indagando sobre el mecanismo exacto del proceso.

Es un hecho comprobado que el fósforo de los yacimientos de fosforitas de esta clase, bajo forma de concreciones, conocidas en la extensión de toda la historia geológica —por lo menos, desde el cámbrico—, tiene un origen orgánico. Por doquier está ligado a las concentraciones vitales del fondo marino. Todavía hoy se están formando, en tales regiones, aunque a menor escala, concentraciones de fosforitas en las proximidades del Sur de África, por ejemplo.

Sin duda una parte de este fósforo ya había sido acumulada por los organismos, durante su existencia, bajo la forma de fosfatos complejos, concentrados en diversas zonas de los cuerpos, ricos en fósforo.

No obstante, el fósforo de los organismos, tan imprescindible vitalmente, no suele abandonar el ciclo de la vida. Las condiciones en que puede emigrar no están claras; todo parece indicar, sin embargo, que, juntamente con el fósforo de los esqueletos —compuestos sólidos de calcio—, el fósforo de los compuestos orgánicos coloidales, así como los fosfatos de los humores orgánicos, se transforman en concreciones y participan, de este modo, en la emigración del ciclo vital.

La emigración del fósforo se efectúa cuando perecen organismos con esqueletos que lo contienen en abundancia y se dan las condiciones que imposibilitan los procesos habituales de alteración de sus cuerpos, depositando un medio favorable a la actividad vital de bacterias específicas. Sea como fuere, queda establecido el origen biogénico de tales concentraciones de fósforo, su vinculación estrecha y permanente con el limo del fondo, así como la reproducción incesante de fenómenos análogos en el curso de todos los tiempos geológicos.

Así se acumulan las mayores concentraciones de fósforo conocidas, tales como los yacimientos terciarios del Norte de África o de los estados surenorientales en Norteamérica.

147. Los conocimientos sobre el trabajo químico de la materia viva en la película del fondo marino son muy imperfectos. No se cuestiona su importancia en la historia del *magnesio*, del *bario*; podría afectar a la de otros elementos como el *vanadio*, el *estroncio* o el *uranio*. Nos hallamos ante un vasto campo de fenómenos apenas explorado por las ciencias experimentales.

Otra zona de la *película del fondo*, la inferior carente de oxígeno, es todavía más insondable y enigmática. Es la región de la vida bacteriana anaerobia y de los fenómenos físico-químicos relacionados con los compuestos orgánicos que acceden hasta ella. Tales compuestos han sido creados en un nuevo medio rico en oxígeno por organismos vivos singulares, diferentes de los que pueblan nuestro contexto vital ordinario.

A pesar de que ignoremos mayormente los procesos que se desarrollan en el fondo marino y de que nos veamos abocados a recurrir a conjeturas a fin de responder a las múltiples cuestiones que se relacionan con aquéllos, no procede prescindir de tales procesos; conviene tomarlos en consideración a la hora de evaluar el papel de la vida en el mecanismo de la corteza terrestre.

Dos generalizaciones empíricas se salvan de cualquier incertidumbre: 1.^a la importancia de estos yacimientos en el lodo marino —que abundan en detritos orgánicos— en la historia del *azufre*, el *fósforo*, el *hierro*, el *cobre*, el *plomo*, la *plata*, el *níquel*, el *vanadio*, presumiblemente del *cobalto*, amén de otros metales más escasos; 2.^a la reproducción de este fenómeno en diversos períodos geológicos a una escala importante, destacando el vínculo que lo liga a las condiciones físico-geográficas específicas de la desecación secular de las cuencas marinas y al carácter biológico de dichas condiciones.

148. También está fuera de dudas la acción inmediata que ejercen algunos organismos vivos en la liberación del *azufre*. Nos referimos a las bacterias, que desprenden el ácido sulfhídrico, descomponiendo los sulfatos, politionatos o los compuestos orgánicos complejos que contengan tal elemento.

El ácido sulfhídrico que se desprende interviene en múltiples reacciones químicas y produce metales sulfurosos. La liberación bioquímica de este compuesto es un fenómeno característico de toda esta región y se repite continuamente en cualquier punto del lecho marino: enseguida se oxida de nuevo bioquímicamente en las zonas superiores originando sulfatos, que recomenzarán el mismo ciclo de transformaciones.

La génesis bioquímica de los compuestos de los restantes metales no resulta tan clara. No obstante, todo apunta a que el hierro, el cobre, el vanadio y quizá otros metales que se asocian con el azufre, han sido creados por la alteración de organismos ricos en tales elementos. Por otro lado,

muy probablemente las materias orgánicas del lodo marino posean la propiedad de fijar los metales, de concentrarlos a partir de soluciones diluidas; los átomos de los propios metales, sin embargo, a veces no guardan relación alguna con la materia viva.

Ahora bien, sea como fuere, la liberación de metales no tendría lugar si no hubiera restos orgánicos; es decir, si el lodo marino no consistiera, en su parte orgánica integrante, en un producto de la materia viva.

Semejantes procesos se observan hoy a gran escala en el Mar Negro (génesis de sulfuro de hierro) y, a menor escala, en otros muchos casos. Por lo demás es posible establecer su potente desarrollo en diferentes períodos geológicos. Así se han liberado en la biosfera cantidades ingentes de cobre, procedente de soluciones ricas en materias orgánicas y en organismos de una composición química específica, en diversas localidades de Eurasia en los períodos pérmico y triásico.

149. De lo expuesto se deduce que, a través de todos los períodos geológicos, persiste la misma distribución de la vida; también que se repite su manifestación en la química planetaria. Las mismas películas vitales —plancónica y del fondo—, las mismas concentraciones vitales¹⁸ han existido en el curso de todos los tiempos, siendo un componente del mismo mecanismo bioquímico que no ha cesado de funcionar en cientos de millones de años.

Los continuos desplazamientos de tierra firme y del mar han determinado que se trasladen a la superficie del planeta las mismas regiones químicamente activas, formadas por la materia viva, las películas y las concentraciones vitales de la biosfera. Dichas concentraciones y películas se han transplantado así de un lugar a otro, como manchas en la faz terrestre.

Al estudiar los primitivos yacimientos geológicos, ningún dato sugiere que se haya producido algún tipo de cambio en la estructura de la hidrosfera o en sus manifestaciones químicas.

Desde el punto de vista morfológico, sin embargo, el mundo vivo se ha transmutado radicalmente durante los mismos ciclos. Su evolución no ha ejercido pues influencia destacable alguna ni sobre la cantidad de materia viva, ni sobre su composición química media: la evolución morfológica ha debido afectar a unos ámbitos determinados, sin interferir en las manifestaciones vitales dentro del marco químico del planeta.

No obstante, la evolución morfológica ha estado indudablemente ligada a procesos complejos de carácter químico, a alteraciones químicas, las cuales, contempladas a escala individual e incluso a escala de la especie, revestían importancia. Así se creaban compuestos químicos nuevos, otros desaparecían al extinguirse determinadas especies, pero el fenómeno no re-

¹⁸ Por lo menos en el caso de las concentraciones litóricas.

percutía de modo sensible en las líneas maestras del impacto geoquímico de la vida, ni en su expresión planetaria. Incluso un fenómeno bioquímico de enorme alcance, la creación del esqueleto de los metazoos rico en calcio, en fósforo, a veces en magnesio, no ha dejado huella en la historia geológica de estos elementos. Es muy probable, sin embargo, que en una época anterior, en la era paleozoica, los organismos hayan carecido de un esqueleto similar: esta hipótesis, frecuentemente considerada como una generalización empírica, explica, efectivamente, muchos rasgos importantes en la historia paleontológica del mundo orgánico.

Aunque tal fenómeno no haya incidido en la historia geoquímica del fósforo, del calcio ni del magnesio, conviene admitir que, en la etapa previa a la creación de los metazoos provistos de esqueletos, había tenido lugar la formación, a idéntica escala, de los compuestos de estos elementos por efecto de la actividad de las protistas, además de las bacterias; un proceso semejante acontece todavía en nuestros días, pero su funcionalidad, antaño, debió ser infinitamente más relevante y universal.

Si ambos fenómenos, distintos desde la óptica de la cronología geológica y de sus mecanismos, provocaron la migración biógena de los mismos átomos en masas idénticas, el cambio morfológico, por drástico que fuere, no habrá tenido repercusión en la historia geoquímica del calcio, del magnesio ni del fósforo. Todo induce a pensar que un hecho de tal orden se ha producido realmente en la historia geológica de la Vida.

La materia viva en tierra firme

150. La tierra firme ofrece un panorama absolutamente distinto al de la hidrosfera. En última instancia, *no existe más que una película vital, formada por el suelo con la flora y la fauna que lo habitan.*

Ahora bien, en la superficie de esta única película animada de vida, hay que separar las concentraciones acuosas de la materia viva, las cuencas hídricas, que desde un punto de vista bioquímico, e incluso meramente biológico, así como en lo que atañe a su impacto geológico, divergen claramente de tierra firme.

La vida recubre la tierra firme de una película prácticamente ininterumpida; hallamos vestigios de su presencia en los glaciares y las nieves perpetuas, en los desiertos, en las cumbres montañosas. No podría hablarse de ausencia de vida en la superficie de tierra firme: sólo cabría hablar de ausencia temporal, de baja intensidad. Asumiendo una u otra forma, la vida se manifiesta por doquier. Los espacios terrestres donde escasea, los espacios vitalmente pobres —desiertos, glaciares, nieves perpetuas, cumbres nevadas— apenas suponen un 10% de su superficie. El resto es, por antonomasia, una película animada de vida.

151. No se trata de una cubierta gruesa, pues apenas mide algunas decenas de metros sobre el nivel del suelo en las áreas pobladas de bosques, limitándose a algunos metros en los campos y estepas.

Las selvas de los países equinocciales, donde los árboles consiguen un mayor desarrollo vertical, configuran capas vitales con un espesor medio entre los 40 y 50 metros. Los especímenes más altos llegan hasta los 100 metros, pero se pierden entre la masa arbórea total, por lo que cabe desestimarlos a causa de su impacto mínimo.

La vida no desciende al mundo subterráneo más allá de unos cuantos metros; la vida aerobia se extingue a más de 5 metros de promedio, penetrando la anaerobia hasta unas decenas de metros.

Por tanto, la película vital recubre la superficie de los continentes con un manto cuyo espesor se eleva a varias decenas de metros (masas arbóreas) y se limita a unos pocos metros (hierbas y arbustos).

La actividad de la civilización humana ha introducido cambios en la estructura de esta cubierta sin parangón posible en parte alguna de la hidrosfera.

Tales alteraciones comportan, en la historia geológica del planeta, un fenómeno nuevo cuyo efecto geoquímico no ha sido evaluado aún. Uno de sus máximos exponentes consiste en la destrucción sistemática de los bosques en el curso de la historia de la humanidad; es decir, en la supresión de las zonas más activas de la cubierta.

152. Nosotros también somos parte integrante de esta capa; las alteraciones que se han efectuado en su composición y en su manifestación en el curso del ciclo solar anual son patentes.

Los organismos que descuellan por la cantidad de materia abarcada por la vida son las plantas verdes y, en este grupo, hierbas y árboles; entre la población animal destacan los insectos, los parásitos y quizá los artrópodos.

Por lo general, en contraposición manifiesta con la vida en los Océanos, la materia viva de segundo orden —animales, organismos heterótrofos— desempeña una función secundaria en la composición de la epidermis continental. Las áreas más activas —grandes selvas de los países tropicales, como el Hileo de África, o los bosques septentrionales, la Taiga— a veces equivalen a desiertos desde la óptica de los animales superiores (mamíferos, aves, vertebrados diversos). Los artrópodos, cuya presencia es para nosotros prácticamente irrelevante, constituyen la población muy enrarecida de estas potentes concentraciones de organismos verdes.

No obstante, en dicha *película continental* no se enmascaran las oscilaciones estacionales de la vida, que obedecen a fases de latencia y eclosión en la reproducción, en la manifestación de la energía vital geoquímica. Constatar tal hecho no nos ha exigido esfuerzos comparables a los exigidos

por la película plancónica. En nuestras latitudes, la vida se lentifica en invierno, se despreziza y florece en primavera. El mismo fenómeno se refleja por doquier bajo formas múltiples e infinitas, con mayor o menor contundencia, desde los polos a los trópicos.

No se trata de un fenómeno que se exprese únicamente, a todas luces, en el caso de la flora verde y la fauna asociada con ella; estas fases afectan también a los suelos, a su vida invisible. Lamentablemente, es un fenómeno poco estudiado, aunque su papel en la historia del planeta, como veremos, sea mucho más relevante de lo que hasta ahora se ha solido admitir.

En definitiva, para todas las capas vitales de la hidrosfera y de tierra firme, existen unas fases, reguladas por el Sol, de intensidad de la multiplicación, de activación de la energía geoquímica, de expansión de la materia viva, de «agitación» de los elementos químicos que ésta abarca. *Los procesos geoquímicos se ven sometidos a unas pulsaciones que van creciendo y menguando sucesivamente.* Las leyes numéricas que sin duda los rigen aún no se han descubierto.

153. Los fenómenos geoquímicos relacionados con la epidermis de tierra firme son muy característicos y permiten diferenciar claramente esta capa de las películas oceánicas.

Los procesos de emigración de los elementos químicos fuera del ciclo vital nunca conducen a la configuración, en la cubierta viva de tierra firme, de concentraciones de minerales vadosos similares a los yacimientos marinos. Se depositan allí anualmente millones de toneladas de carbonatos de calcio y magnesio (calizas y calizas dolomíticas), de sílice (ópalos, etc.), de hidratos de óxido de hierro (limonitas), de compuestos hidratados de manganeso (pirolusitas y psilomelanos), de fosfatos complejos de calcio (fosforitas), etc. (cf. 143 y ss.). Todos estos cuerpos son de origen marino, en cualquier caso acuoso. Los elementos químicos de la materia viva de tierra firme emigran del ciclo vital con menos frecuencia aún que los de la hidrosfera (cf. 142). Una vez que el organismo ha perecido, o que se han destruido algunas partes de su cuerpo, los componentes materiales o bien son absorbidos de inmediato por organismos nuevos, o bien se difunden en la atmósfera bajo la forma de *productos gaseosos*. Dichos gases biogénicos — O_2 , CO_2 , H_2O , N_2 , NH_3 — son instantáneamente captados en el intercambio gaseoso de la materia viva.

Así se establece un equilibrio dinámico completo, en virtud del cual el ingente trabajo geoquímico desplegado por la materia terrestre viva, en el curso de millones de años de existencia, apenas deja huellas visibles en los cuerpos sólidos que construyen la corteza. Los elementos químicos de la materia terrestre viva se encuentran en continuo movimiento bajo la forma de gases y organismos vivos.

154. Una proporción insignificante del peso de los restos sólidos —que, no obstante, equivalen probablemente a varios millones de toneladas— abandona anualmente el equilibrio dinámico del ciclo vital de tierra firme. Esta masa se segrega bajo la forma de un polvo muy fino, «huellas» de «materia orgánica», principalmente constituida por compuestos del carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno, en menor cuantía de fósforo, azufre, hierro, silicio, etc. La biosfera, toda ella, está impregnada de esta fina polvareda de la que una pequeña parte, todavía sin determinar, emigra del ciclo vital, a veces por un paréntesis de millones de años.

Tales restos orgánicos atraviesan toda la materia de la biosfera, viva e inerte, se acumulan en todos los minerales vadosos, en todas las aguas superficiales, y son acarreados hasta el mar por los ríos y los meteoros. Su influencia en el desarrollo de las reacciones químicas de la biosfera es enorme y análoga a la de las materias orgánicas disueltas en las aguas naturales, de las que ya hemos tratado (cf. 93). Los detritos orgánicos vitales están penetrados de energía química libre en el campo termodinámico de la biosfera; en virtud de sus exiguas dimensiones, originan fácilmente sistemas acuosos en dispersión y soluciones coloidales.

155. Estos restos se concentran en los suelos de tierra firme, que no cabe considerar, sin embargo, como materia inerte sin más. La materia viva alcanza a menudo en ellos decenas de centésimas en peso. Es la región donde se concentra la energía geoquímica máxima de la materia orgánica, su laboratorio más importante desde el punto de vista de los resultados geoquímicos, del desarrollo de los procesos químicos y bioquímicos que allí acontecen.

Por su relevancia, tal región se equipara con la de los lodos de la pellicula oceánica del fondo (cf. 141), pero se diferencia de ella por la prevalencia del medio oxidante. En lugar de medir algunos milímetros o centímetros de espesor como en el limo del fondo, este medio puede exceder el metro en los suelos. Los animales excavadores representan también aquí factores potentes en su homogeneización.

El suelo es la región de la alteración superficial resolutive en un medio rico oxígeno libre y en ácido carbónico, parcialmente formados por la materia viva que reside en su seno.

Por contraposición con el bioquimismo subaéreo de tierra firme, las formaciones químicas del suelo no intervienen en su totalidad en los torbellinos vitales de los elementos que, según el símil de G. Cuvier, constituyen la esencia de la vida; no se convierten en modalidades gaseosas de los cuerpos naturales. Abandonan transitoriamente el ciclo vital e inciden en otro fenómeno planetario grandioso, la composición del agua natural y del agua salada del Océano.

El suelo está vivo en la medida en que está húmedo. Sus procesos se efectúan en un medio acuoso, soluciones o sistemas de dispersión (coloides).

A partir de ahí se determina la diferencia entre el carácter que distingue la manifestación de la materia viva del suelo, desde el punto de vista de la química planetaria, de la de los organismos vivos que residen en él, donde el mecanismo del agua sobre tierra firme desempeña el papel protagonista.

156. El agua de tierra firme se halla en perpetuo movimiento, formando parte de un proceso cíclico geoquímico. Este ciclo viene suscitado por la energía del Sol, por sus rayos térmicos. La energía cósmica se expresa por esta vía sobre nuestro planeta en la misma medida que por medio del trabajo geoquímico de la vida. La acción del agua, en el mecanismo de toda la corteza terrestre, es absolutamente decisiva y este hecho se manifiesta con la máxima contundencia en la biosfera. El agua no sólo participa, en más de dos tercios de su peso de promedio, en la composición de la materia viva (cf. 109); su presencia supone una condición imprescindible para la multiplicación de los organismos, para la manifestación de su energía geoquímica. Gracias al agua la vida es parte integrante del mecanismo planetario.

En la biosfera, no sólo el agua es inseparable de la vida; la vida tampoco es separable del agua. Es difícil establecer dónde termina la influencia de la primera y dónde empieza la influencia de la segunda, la materia viva heterogénea.

El suelo resulta instantáneamente incluido por el ciclo geoquímico del agua; lo saturan íntegramente los meteoros. Siempre lo penetra, en la totalidad de su masa, la acción disolvente y mecánica de las aguas superficiales. Tales aguas disueltas se apoderan sin cesar de sus zonas ricas en residuos orgánicos bajo la forma de solución y suspensión. La composición del agua dulce, ligada así al suelo, viene inmediatamente dictada por el mismo de éste; es una manifestación de su bioquimismo. El suelo determina pues claramente la composición esencial del agua de los ríos, donde se vierten, en definitiva, todas estas aguas superficiales.

Los ríos desembocan en los mares, y la composición del agua oceánica, por lo menos de su parte salina, es obra, en última instancia y principalmente, del trabajo químico del suelo, debiéndose a su biocenosis todavía mal conocida.

El carácter oxidante del suelo juega un papel importante: se manifiesta por los productos finales de su materia orgánica. En las aguas fluviales predominan los sulfatos y carbonatos; el sodio va ligado al cloro. En relación estrecha con el bioquimismo de estos elementos en el suelo, su carácter en el agua fluvial se diferencia claramente del de los compuestos sólidos que producen en las capas terrestres exentas de vida.

157. Se observa asimismo, con respecto a la circulación del agua en tierra firme, otras manifestaciones químicas regulares de la materia viva que puebla esta región.

La vida que colma las *cuenas hídras* se distingue claramente, por sus efectos, de la que puebla las regiones subaéreas.

En las cuencas hídras se aprecian fenómenos en gran medida análogos a los de las *películas* y concentraciones vitales de la hidrosfera; cabe observar, a menor escala, la película planctónica, la del lecho y las concentraciones litorales. No sólo se aprecian los procesos propios del medio con oxígeno, sino también las reacciones químicas que se producen en el medio *reductor*. Por último, la emigración de los elementos químicos fuera del ciclo vital juega allí un papel importante, así como la formación de productos sólidos, que entrarán después en la composición de las rocas sedimentarias de la corteza terrestre. Parece que el proceso de liberación de los cuerpos sólidos en la biosfera está ligado, lo mismo que en la hidrosfera, a los fenómenos del medio reductor, a la rápida combinación del oxígeno libre y, en última instancia, a la desaparición de la vida aerobia de las protistas, además de a la desaparición de su vida anaerobia.

Aunque exista una semejanza a grandes rasgos, el impacto geológico de este fenómeno de tierra firme se diferencia básicamente del de la hidrosfera.

158. La disimilitud estriba en la clara diferencia que existe entre la hidrosfera y las cuencas hídras de tierra firme. La distinción química fundamental consiste en la cualidad dulce de su masa principal de agua; la distinción física, en la escasa profundidad de estas cuencas. La mayor parte del agua, en tierra firme, no está confinada en los ríos, sino en charcas, lagos y ciénagas. Dado su bajo nivel, sólo configura una *concentración vital, dulce o salobre*. En los mares de agua exclusivamente dulce —por ejemplo, en el Baikal—, se observan películas vitales segregadas, análogas a las oceánicas. Pero los lagos profundos constituyen una excepción.

El papel bioquímico de los lagos no concuerda con el de las masas de agua oceánicas; la divergencia se expresa, en primer término, en el hecho de que son otros los productos que se liberan en las extensiones de agua dulce. El primer puesto lo ocupan los compuestos del *carbón*. Aun cuando la sílice, los carbonatos de calcio y los hidróxidos de hierro se forman en las películas del fondo y en las concentraciones vitales de las cuencas en tierra firme, su importancia es secundaria con respecto a la liberación de cuerpos carbonados. En esta región es donde únicamente se crean, en un grado destacable, cuerpos sólidos vadosos estables del *carbón*, del *hidrógeno* y del *nitrógeno*, pobres en oxígeno; es decir, todos los carbonos y los productos bituminosos de la Tierra. Representan las formas estables de los minerales vadosos que, al abandonar la biosfera, pasan a integrarse en otros compuestos orgánicos del carbono. El carbono se desprende bajo la forma libre de grafito cuando aquéllos terminan de transformarse en las regiones metamórficas.

La causa de que se originen cuerpos carbonitrogenados sólidos en las cuencas hídras (salobres o de agua dulce) no está dilucidada, pero siempre ha ocurrido así en la historia geológica. No existen concentraciones de estos cuerpos, siquiera de poca entidad, en el agua marina y nunca los crea la química oceánica. No sabríamos precisar si es un efecto del carácter químico del medio o de la estructura de la Naturaleza viva, pero, ya fuere debido a la acción de uno u otra, lo que no se cuestiona es la relación de tal fenómeno con el carácter de la vida.

Las concentraciones de estas materias orgánicas implican unos centros poderosos de energía potencial —«rayos de sol fósiles», en la metáfora de R. Mayer—, cuya importancia en la historia de la humanidad es enorme, sin ser tampoco un hecho indiferente para la economía de la Naturaleza. Cabe hacerse una idea sobre la escala de las manifestaciones de este proceso al evaluar las reservas de hulla conocidas.

Parece verosímil que, en estas mismas concentraciones de agua dulce o salobre, sea donde procede buscar las fuentes principales de formación de los grandes yacimientos de hidrocarburos líquidos, del petróleo.

Paralelamente a lo que se observa en el caso de los carbonos de tierra firme, estas cuencas se situarían cerca de los mares. La génesis del petróleo no constituye un proceso de superficie: es un fenómeno de descomposición de detritos orgánicos, aparentemente bioquímico, que tiene lugar al margen del oxígeno libre, junto a los límites inferiores de la biosfera. La génesis vital de las grandes bolsas de petróleo parece estar confirmada gracias a un conjunto de hechos bien establecidos por medio de la observación exacta.

Conexión entre las películas y las concentraciones vitales de la Hidrosfera con las de la tierra firme

159. De lo anteriormente expuesto se infiere que la vida, en su totalidad, compone un conjunto indivisible e indisoluble cuyas partes, además de entre sí, se relacionan con el medio inerte de la biosfera.

No obstante, la insuficiencia de nuestros conocimientos actuales no nos permite ofrecer un panorama global muy nítido.

Se trata de una tarea pendiente para años venideros, de forma que puedan interpretarse también las condiciones numéricas, cuantitativas, que habrán de servir de fundamento.

Por ahora sólo estamos facultados para captar los perfiles cuantitativos generales. Las bases de nuestras representaciones, sin embargo, aparentan ser muy firmes. El hecho fundamental es *la existencia de la biosfera durante todos los tiempos geológicos*, desde sus indicios más remotos, desde la era arqueoica.

La biosfera ha sido siempre idéntica a sí misma en sus rasgos esenciales. Así, un aparato químico único e inmutable ha funcionado sin cesar en la biosfera en el transcurso de todas las eras, propulsado por la corriente ininterrumpida de la misma energía radiante del Sol; un aparato creado, y permanentemente activado, por la materia viva. Este aparato se compone de *centros vitales determinados* que, pese a transformarse continuamente, ocupan idénticas posiciones en las capas terrestres que corresponden a la biosfera. Estas condensaciones de vida, *películas y concentraciones vitales*, conforman unas subdivisiones secundarias específicas de las capas terrestres. A fin de cuentas, su concentricidad se mantiene, aunque jamás recubran, como una sola capa ininterrumpida, toda la superficie del planeta. Conforman sus regiones químicamente activas, donde se acumulan sistemas estáticos muy diversos de equilibrios dinámicos de los elementos químicos terrestres.

Son las regiones donde la energía radiante del Sol, que incide en todo el Globo, se transforma en energía química terrestre libre. El grado de transformación depende de qué elementos químicos se trate. La existencia de estas regiones del planeta está ligada a la energía que éste recibe del Sol, por un lado, y a las propiedades de la materia viva, que acumula y transforma dicha energía en energía química terrestre, por otro. Las propiedades y la distribución de los elementos químicos, a su vez, también desempeñan un papel importante.

160. *Todos los centros vitales interactúan.* No pueden existir de manera independiente. El vínculo entre las distintas películas y concentraciones vitales, así como su carácter inmodificable a lo largo de la historia planetaria, constituyen el rasgo permanente del mecanismo de la historia terrestre.

Lo mismo que nunca ha existido período geológico alguno independiente de la tierra firme, tampoco ha existido período alguno donde ésta existiera por sí sola. Únicamente la pura fantasía científica abstracta ha podido concebir nuestro planeta como un esferoide bañado por el Océano —el «Mar Universal», de E. Suess— o como la penillanura inanimada, nivelada, árida, que en su momento había concebido E. Kant y, más recientemente, P. Lowell.

La tierra firme y el Océano han coexistido desde las eras geológicas más preterritas. Esta coexistencia se corresponde con la historia geoquímica de la biosfera, es un rasgo definidor de su mecanismo. Desde este punto de vista, las discusiones sobre el origen marino de la vida continental parecen fútiles e ilusorias. *La vida subaérea ha de ser tan antigua como la vida marina* en la sucesión de los tiempos geológicos; sus formas evolucionan y cambian, pero tal modificación se produce siempre en la superficie terrestre, no ya en los parajes oceánicos. Si ocurriera de otra suerte, debería haber

existido una etapa de revolución, un salto brusco en el mecanismo de la biosfera, que el estudio de los procesos geoquímicos habría desvelado. *Desde la era arqueozoica hasta hoy, sin embargo, el mecanismo del planeta y de su biosfera permanece inmutable en sus grandes rasgos fundamentales.*

Los últimos descubrimientos en paleofitología parecen modificar las opiniones al uso en el sentido indicado. Las plantas verdes más antiguas, de los albores de la era arqueozoica, son de una complejidad sorprendente y denotan una larga evolución sobre tierra firme.

La vida, en sus rasgos esenciales, se mantiene inalterable; únicamente muda de forma en el curso de la historia geológica. En realidad, *todas las películas vitales —planctónica, del lecho oceánico, del suelo— y todas las concentraciones vitales —litoral, sargática, dulce o salobre— siempre han existido en su seno.* Sus relaciones mutuas, la cantidad de materia implicada, son las que se han alterado, las que han ido variando en el curso de los tiempos. No obstante, *estos cambios no han debido ser muy considerables* ya que, al ser inalterable o cuasi inalterable el aporte de energía, la radiación solar, en el curso de las eras geológicas, la distribución de la misma en las películas y concentraciones vitales habrá venido necesariamente determinada por la materia viva, la única y principal parte variable en el campo termodinámico de la biosfera.

Ahora bien, ni siquiera *la materia viva es una creación accidental.* La energía solar incide en ella como en todas sus concentraciones terrestres.

Podríamos llevar el análisis más lejos, profundizar en el mecanismo complejo constituido por las películas y concentraciones vitales. Tendríamos que reconsiderar entonces, con mayor detenimiento, las formas no ya de los organismos, sino de sus asociaciones, de las materias vivas homogéneas que configuran películas y concentraciones vitales, así como las relaciones químicas que las ligan recíprocamente. Confiamos en que volveremos a abordar más adelante este doble problema: el de las materias vivas homogéneas y el de la estructura de la materia viva en la biosfera.

APÉNDICE

LA EVOLUCIÓN DE LAS ESPECIES Y LA MATERIA VIVA¹

¹ Conferencia pronunciada en la Sociedad de Naturalistas de Leningrado el 5 de febrero de 1928.

La vida constituye una parte integrante del mecanismo de la biosfera. Es un rasgo que se infiere con claridad del estudio de la historia geológica de los elementos químicos, de los procesos biogeoquímicos —tan cruciales— que exigen siempre la intervención de la vida.

Las manifestaciones biogeoquímicas de la vida configuran un conjunto de procesos que, en una primera aproximación, en nada se asemejan a los que estudia la biología.

Incluso parece existir cierta incompatibilidad entre ambos aspectos de la vida, el biológico y el geoquímico; únicamente un análisis más detallado permite afinar el carácter de tal divergencia.

El análisis, en efecto, desvela que se trata, por un lado, de fenómenos idénticos con una traducción distinta y, por otro lado, de fenómenos vitales realmente diferentes y considerados de forma distinta, ya desde el punto de vista de la geoquímica o, por el contrario, desde la biología.

La comparación entre los dos enfoques modifica, confiriéndole mayor penetración, la concepción científica de los fenómenos de la vida.

La discrepancia entre una y otra representación de la vida se expresa de un modo especialmente significativo en el hecho de que la teoría de la evolución, que impregna toda la concepción biológica actual del universo, apenas desempeña un papel reseñable en geoquímica.

Nos esforzaremos en dilucidar, al hilo de nuestra exposición, la importancia de los fenómenos relativos a la evolución de las especies en el mecanismo de la biosfera.

Fácilmente llegamos a la conclusión de que, en una visión planetaria, las nociones fundamentales de la biología experimentan cambios radicales.

La especie suele considerarse, en la ciencia biológica, desde un planteamiento *geométrico*; la forma, los caracteres *morfológicos*, son el factor más representativo. En los fenómenos biogeoquímicos, por el contrario, el número ocupa el papel protagonista y se valora la especie desde un planteamiento *aritmético*. A semejanza de los fenómenos químicos y físicos, de los compuestos químicos y de los sistemas físico-químicos, las diversas especies de animales y plantas deben ser caracterizadas y definidas, en geológica, por unas *constantes numéricas*.

Los índices morfológicos que utilizan los biólogos, necesarios para determinar cada especie, son pues sustituidos por las constantes numéricas.

En los procesos biogeoquímicos resulta ineludible tomar en consideración las siguientes constantes: el *peso* medio del organismo, su *composición química elemental media* y la *energía geoquímica media* que posee; es decir, su facultad de producir desplazamientos o, en otras palabras, «la migración» de los elementos químicos en el campo de la vida.

En los procesos biogeoquímicos, por tanto, la materia y la energía asumen el protagonismo en vez de la forma inherente a la especie. Bajo dicha óptica, la especie se contemplará como una *materia* análoga a las restantes materias de la corteza terrestre: las aguas, los minerales, las rocas, junto con los organismos, representan el objeto de los procesos biogeoquímicos.

Considerada de este modo, la especie del biólogo puede ser enfocada como una *materia viva homogénea*, caracterizada por la masa, la composición química de sus elementos y la energía geoquímica.

Por lo general, los rasgos de las especies se expresan mediante unas cifras que informan sobre el peso, sobre la composición química y sobre la velocidad a la que se transmite la energía geoquímica, pero únicamente ofrecen una idea muy abstracta, poco explícita, acerca de la realidad.

Resulta factible sustituirla por otra idea que se ajuste mejor al carácter del proceso natural que crea al organismo. En este ámbito consideramos, desde la química física, a los organismos como unos campos autónomos donde se agrupan determinados átomos en una cantidad dada.

Tal cantidad constituye precisamente la propiedad definidora de cada individuo, de cada especie. Indica el número de átomos que el organismo de una especie concreta puede retener en función de la fuerza que le es propia fuera del campo de la biosfera, gracias a la cual los separa del entorno. El volumen del organismo y el número de átomos que comporta, expresados en magnitudes, brindan la fórmula más abstracta y, al mismo tiempo, la más efectiva de la especie en la medida en que halla su correspondencia en los procesos geológicos del planeta. Se obtiene tal fórmula midiendo las dimensiones, el peso, la composición química del organismo. El *número de átomos* y el *volumen* expresados de esta suerte equivalen, sin duda, a caracteres de la especie. La presencia de la vida en una esfera de un volumen dado y la concentración de una determinada cantidad de átomos implican un fenómeno real en la Naturaleza, tan definidor para un organismo como su forma o sus funciones fisiológicas.

En última instancia, esta valoración probablemente expresa los rasgos esenciales de su existencia con la máxima consistencia posible.

Las magnitudes obtenidas son muy considerables: por ejemplo, en lo que se refiere a la Lemna minor, el número de átomos para un organismo supera $3,7 \times 10^{20}$, alcanzando centenares de quintillones.

Unos valores de este orden corresponden a la realidad y permiten realizar comparaciones estadísticas entre especies diferentes.

La determinación de las especies según el número de átomos incluidos en el volumen ocupado por el organismo completa la característica biológica habitual de la especie, que sólo toma en consideración la forma y la estructura.

La materia homogénea viva del geoquímico y la especie del biólogo son idénticas, pero el modo de reflejarlas varía.

II

El estudio de los fenómenos de la vida en el mecanismo de la biosfera desvela discrepancias aún más básicas con respecto a las nociones biológicas ordinarias.

La biosfera, en sus rasgos fundamentales, no se ha modificado en el curso de su historia desde la era arqueozoica; así pues, desde hace dos mil millones de años por lo menos.

Su estructura se nos muestra mediante un gran número de fenómenos correspondientes, entre los cuales se cuentan los fenómenos biogeoquímicos.

Así, los ciclos geoquímicos de los elementos químicos habrían permanecido inmutables en el curso de los tiempos geológicos. En el período cámbrico debieron asumir el mismo carácter que en la era cuaternaria o que en nuestros días.

Las condiciones climáticas, las erupciones volcánicas, los fenómenos físico-químicos de la erosión han persistido, durante la totalidad de los tiempos geológicos, tal como los observamos actualmente. En el transcurso de la existencia de la Tierra hasta la aparición de la humanidad civilizada, no se ha creado ningún mineral nuevo. Las especies minerales en nuestro planeta no han cambiado o se alteran de manera idéntica con el paso del tiempo. Siempre han terminado por formarse los compuestos que conocemos. En ningún caso cabría relacionar una especie mineral con una época geológica determinada. En ello se diferencian claramente las especies minerales de las materias vivas homogéneas, de las especies de los organismos vivos. Estas últimas sufren mutaciones en el curso de los períodos geológicos; van apareciendo continuamente especies nuevas, frente a la permanencia de las especies minerales. Contemplada desde el aspecto geoquímico (en calidad de componente de la biosfera, sometido a meras oscilaciones), la vida, tomada en su conjunto, se presenta como estable e inmutable.

La vida constituye una parte integrante de los ciclos geoquímicos que se renuevan constantemente, aun cuando se mantengan siempre idénticos; no experimenta grandes alteraciones en el curso de los fenómenos estudiados por la geoquímica. La masa de materia viva —es decir, la cantidad de átomos captados por los innumerables campos autónomos de los organis-

mos—y la composición química media de la materia viva —la composición química de los átomos de los campos de la vida— deben permanecer, en definitiva, invariables a lo largo de los períodos geológicos. Por lo demás, en el decurso de los siglos, las formas de energía con las cuales se vincula la vida, la radiación solar, tampoco se han modificado substancialmente en lo que se refiere a las magnitudes.

Simplemente se registran oscilaciones en todos estos fenómenos, ora en un sentido, ora en otro, en torno a un valor medio que se nos manifiesta constante.

III

La inmutabilidad que es propia de todos los procesos cósmicos en el curso de los períodos geológicos contrasta significativamente con las modificaciones profundas que han experimentado, en el mismo tiempo, las formas de vida estudiadas por la biología.

Concretamente, existe la certeza de que todos los caracteres de la especie, establecidos por los fenómenos geoquímicos, se han alterado radicalmente, en frecuentes ocasiones, a lo largo de las fases geológicas. Múltiples especies, animales y vegetales, han desaparecido, formándose otras nuevas con un peso diferente, una composición química y una energía geoquímica distintas de sus predecesoras. No cabe duda de que la composición química de unos cuerpos morfológicamente dispares varía. Las especies desaparecidas correspondían, necesariamente, a otras formas de materia viva homogénea actualmente extinguidas. Sus constantes numéricas eran diferentes.

Aunque la acción general de la vida permanece idéntica, incluso en los detalles —como en los fenómenos de la erosión, por ejemplo—, ello indica la posibilidad de que se originen nuevas agrupaciones en el seno de los elementos químicos, pero en caso alguno la posibilidad de una modificación radical de su composición ni de su cantidad. Estas nuevas agrupaciones no repercuten en la constancia ni en la inmutabilidad de los procesos geológicos (geoquímicos, en tal caso).

Es un hecho novedoso de gran trascendencia científica, cuya introducción en el ámbito de la biología es menester atribuirla al estudio geoquímico de la vida.

Mientras que el aspecto morfológico, geométrico de la vida —considerada globalmente—, experimenta grandes cambios y se manifiesta constantemente mediante la espectacular evolución de las formas vivas desde la era arqueozoica, la fórmula numérica, cuantitativa de la vida, siempre tomada en su conjunto, permanece inmutable en sus proporciones básicas y, según todos los indicios, en sus funciones esenciales.

Indudablemente el estudio minucioso de los fenómenos de la evolución, en el campo de la biología, desvela la extrema irregularidad del proceso. No cabe hablar de cambio constante de todas las especies, de todas las formas de vida. Muy al contrario, algunas especies han subsistido inalteradas durante centenares de millones de años, como las especies de radiolarios de la época precámbrica que no pueden diferenciarse de las actuales, por ejemplo; igual cabe afirmar de las especies de la *Lingula*, que desde el cámbrico hasta hoy no se han transformado; siguen siendo idénticas en el curso de centenares de millones de años, a través de las innumerables generaciones que se han sucedido. Podríamos citar muchísimos ejemplos análogos para períodos quizá menos largos, durante los cuales, si se han producido cambios, éstos han sido, en cualquier caso, poco considerables. Por tanto, no sólo resulta posible observar y estudiar la *variabilidad* en las formas vivas, sino también su extraordinaria *estabilidad*. Presumiblemente tal estabilidad morfológica de las especies en el curso de millones de años, de millones de generaciones, supone el rasgo más característico de los seres vivos, mereciendo la máxima atención del biólogo.

Estos fenómenos puramente biológicos son probablemente la manifestación de la inmutabilidad de la vida, considerada en su esencia, en el curso de toda la historia geológica; una inmutabilidad que desvela su papel en el mecanismo de la biosfera bajo una modalidad distinta.

La estabilidad de las especies merecería pues atraer la atención de los biólogos más de lo que ocurre en nuestros días.

El pensamiento de los biólogos actuales se ha orientado en una dirección distinta. La evolución morfológica en el curso de los tiempos geológicos parece ser el rasgo sobresaliente de la historia de la vida, abarcando en apariencia toda la Naturaleza viva.

Este fenómeno se comprobó empíricamente, y conforme a unos procedimientos rigurosos, hace un siglo: G. Cuvier, un naturalista eminentemente profundo y preciso, demostró la existencia de un universo distinto, que desconocíamos, en una época geológica anterior. Dicha constatación provocó en vida de A. Wallace y de C. Darwin, así como posteriormente, un giro radical en la concepción del universo científico de los naturalistas. La evolución de las especies ocupa la posición central en la visión de éstos y polariza la atención hasta el punto de que se desestiman otros fenómenos biológicos tanto o más importantes, si cabe.

La noción de la evolución de las especies se apropia del pensamiento científico hasta tales extremos que cualquier fenómeno o explicación nuevos, en el ámbito de la biología, deben relacionarse, para ser aceptados, con tal noción de una manera más o menos explícita.

Es menester dilucidar las manifestaciones de esta evolución en los procesos biogeoquímicos, ya que el desarrollo ulterior de los estudios geoquímicos se halla actualmente paralizado por falta de datos, que sólo pueden

suministrar los biólogos. Los fenómenos biogeoquímicos deben incorporarse a la esfera de los intereses de la biología.

Por otra parte, investigar la relación que sin duda existe entre la evolución de las especies y los fenómenos biogeoquímicos entraña, como tarea, un gran significado.

La conexión entre la evolución de las especies y el mecanismo de la biosfera —el desarrollo de los procesos biogeoquímicos— no se presta a controversia. Para demostrarla bastaría esgrimir el hecho de que los estadísticos básicos que caracterizan tales procesos son propiedades de la especie que se modifican en el curso de la evolución; gracias, precisamente, al estudio de ese vínculo, cabe determinar los lazos que existen entre la inmutabilidad de las leyes de la vida, considerada en su conjunto en geología, y su evolución, siempre considerada globalmente en biología.

Nos hallamos ante uno de los problemas científicos más importantes de nuestros días.

IV

Abordaremos el problema en cuestión a partir del estudio de la *migración biógena de los elementos químicos de la biosfera*, caracterizada por la regularidad de formas que reviste.

Denominaremos *migración de los elementos químicos* a cualquier desplazamiento de los mismos, independientemente de la causa originaria. La migración en la biosfera puede deberse a procesos químicos, como en el caso de las erupciones volcánicas; la provoca el traslado de masas líquidas, sólidas, gaseosas, en las evaporaciones y en la formación de sedimentos; se tiene constancia de ella a través del movimiento de los ríos, de las corrientes marinas, de los vientos, del deslizamiento de capas terrestres, etc.

La *migración biógena* originada por la intervención de la vida, contemplada en su conjunto, figura entre los procesos más grandiosos y típicos de la biosfera, constituyendo el rasgo esencial de su mecanismo.

Cantidades innumerables de átomos se ven sometidos a la acción de una migración biógena ininterrumpida.

Huelga que insistamos sobre el impacto producido en la biosfera por una migración biógena a tal escala. Hemos tratado ya la cuestión repetidamente.

No obstante, conviene subrayar ciertos rasgos esenciales de la migración biógena, ya que es indispensable conocerlos para comprender el desarrollo de nuestros argumentos.

En primer lugar, *existen varias modalidades, absolutamente distintas, de migración biógena. Por un lado, ésta se liga del modo más íntimo, genéticamente, a la materia del organismo vivo, a su existencia.* Cuvier nos ofreció

una definición exacta y acertada del organismo vivo en su existencia, equi-parándolo a una corriente incesante, a un torbellino de átomos que fluyen desde el exterior, adonde luego retornan. El organismo vive en tanto subsiste el flujo de átomos. La corriente abarca toda la materia del organismo. Cada organismo individual, o todos los organismos juntos, crean sin cesar por medio de la respiración, la nutrición, el metabolismo interno, la reproducción, una corriente biógena de átomos, que construye y mantiene a la materia viva. En suma, se trata de la modalidad esencial y principal de la migración biógena, cuya importancia numérica viene determinada por la masa de materia viva existente en un momento dado en nuestro planeta. Pero con ello no abarcamos toda la migración biógena.

Evidentemente, el efecto de toda la migración biógena no depende directamente de la masa de materia viva. Depende de la cantidad de átomos tanto como de la intensidad de sus desplazamientos en relación estrecha con la vida. La migración biógena se hará más intensa en la medida en que los átomos circulen más deprisa; esta migración puede ser muy diversa, por más que sea idéntica la cantidad de átomos abarcados por la vida.

Llegamos a la *segunda modalidad de migración biógena, que está en función directa de la intensidad de la corriente biógena de los átomos.*

Aún existe una tercera forma, que empieza a adquirir en nuestra época —una época psicozoica— una importancia extraordinaria en la historia de nuestro planeta. Aludimos a la migración de los átomos suscitada también por los organismos, pero que no se relaciona genética, ni directamente, con la penetración o el paso de los átomos a través de sus cuerpos. *Esta migración biógena está ocasionada por el desarrollo de la actividad técnica.* Viene determinada, por ejemplo, por el trabajo de los animales excavadores, cuyas huellas se nos aparecen desde las épocas geológicas más remotas; por la repercusión de la vida social de los animales constructores —termites, hormigas, castores—. Ahora bien, tal forma de migración biógena de los elementos químicos ha logrado un desarrollo extraordinario desde que surgió la *humanidad civilizada*, hará unos diez mil años. Por esta vía se han creado cuerpos totalmente nuevos, como los metales en estado libre, por ejemplo. La faz de la Tierra se transforma y desaparece la Naturaleza virgen.

Tal migración biógena no parece relacionarse directamente con la masa de materia viva; está condicionada, en sus rasgos esenciales, por el razonamiento del hombre.

Por último debemos añadir, en cuarto lugar, los cambios en la distribución de los átomos provocados por la aparición, en la biosfera, de nuevos compuestos de origen orgánico. *En lo que atañe a sus efectos, probablemente sea la forma más potente de migración biógena.* No obstante, no puede ser evaluada cuantitativamente y no habré de ocuparme aquí de la misma.

Es el caso, por ejemplo, de la migración que determina la liberación de oxígeno en estado libre por los organismos con clorofila, o la que está causada por la transformación de combinaciones químicas, desconocidas hasta ahora en la biosfera y creadas por el genio humano.

Sin duda este tipo de migración química no siempre resulta fácilmente discernible de los dos primeros. Por ejemplo, la potente migración química provocada por la destrucción de los cuerpos de los organismos muertos se vincula estrechamente con los procesos de putrefacción y fermentación, originados por la existencia de organismos específicos.

No obstante, los procesos bioquímicos no la explican íntegramente.

V

Las diferentes formas de migración química reseñadas constituyen una particularidad sobre la que será preciso volver en nuestra exposición siguiente.

Las leyes físicas que la rigen agregan un segundo rasgo característico.

La migración biógena es un elemento de otro proceso de la biosfera todavía más potente; nos referimos a *la migración general de sus elementos*. Tal migración viene en parte determinada por la influencia de la energía solar, por la fuerza gravitatoria y por la acción de las capas internas de la corteza terrestre sobre la biosfera.

Cualquiera que sea su causa, todos estos desplazamientos de elementos responden a diversos sistemas de equilibrios mecánicos específicos; concretamente, en la historia de los distintos elementos químicos configuran ciclos geoquímicos cerrados, torbellinos de átomos.

Pueden relacionarse, sin excepción, con las leyes de los equilibrios heterogéneos y con los principios formulados por W. Gibbs.

Los procesos cíclicos en los que participa la migración biógena están alimentados por una fuerza externa, cuya permanente afluencia los renueva. Las fuerzas de la energía radiante del Sol y de la energía atómica cumplen un papel destacado en la repetición de dichos procesos.

Estos equilibrios, estudiados al margen del aporte de energía externa, son unos sistemas mecánicos que desembocan indefectiblemente en un estado estable. Su energía libre será cero, o cuasi cero, cuando finaliza el proceso, ya que todo el trabajo susceptible de efectuarse en este sistema se efectuará por definición, en último término. En los equilibrios de esta clase, el trabajo siempre alcanza un máximo, mientras que la energía en estado libre tiende a un mínimo.

La migración biógena es una de las principales formas de trabajo en estos sistemas de equilibrios naturales y, por ello, debe tender a una manifestación máxima.

Cabe considerar dicha propiedad de la migración biógena como un principio geoquímico esencial que rige de manera automática los fenómenos biogeoquímicos.

Este primer principio biogeoquímico —así lo designaremos— puede ser formulado como sigue:

La migración biógena de los elementos químicos en la biosfera tiende a su manifestación más completa.

VI

Examinemos ahora cómo se expresan ambas propiedades de la migración biógena en la biosfera: el primer principio biogeoquímico y la existencia de sus dos formas de manifestarse, la que se relaciona con la masa de materia viva y la que se relaciona con la técnica de la vida.

La masa de materia viva, una vez culminada la migración biógena máxima en la biosfera, alcanzará pues sus límites postreros, en el supuesto de que existan.

La invariabilidad de tal masa parece indicar que la migración biógena, bajo esta modalidad, ha llegado prácticamente a alcanzar dichos límites desde las épocas geológicas pretéritas.

No sucede así con la migración biógena de los elementos que se refiere a la técnica de la vida. Detectamos un salto brusco en nuestra época geológica psicozoica.

Presenciamos el desarrollo de esta modalidad biógena de migración y, conforme al primer principio biogeoquímico, debemos admitir que tal forma de migración de los elementos forzosamente llegará, con el tiempo, a su límite máximo —siempre en el supuesto de que éste exista—, o tenderá inevitablemente a culminar su desarrollo máximo.

VII

Evaluaremos fácilmente cuán certero es el primer principio biogeoquímico estudiando la migración biógena. La tendencia de la misma a lograr su máximo desarrollo en la biosfera puede observarse en la Naturaleza con ocasión de dos fenómenos: en primer lugar, la migración biógena ocupará el mayor espacio posible, el máximo espacio que le resulte accesible dadas la masa de materia viva y la técnica de la vida que le es inherente. Este fenómeno se refleja en la ubicación de la vida en la biosfera, como comprobamos por doquier.

Ahora bien, en lo que concierne a su acción geoquímica, la migración biógena no sólo depende de la cantidad de átomos que capta en todo

momento en la biosfera, sino también de la rapidez con que los mismos se mueven y del número de los que atraviesan la materia viva en la unidad de tiempo, así como del desplazamiento, en dicha unidad de tiempo, provocado por una intervención de orden técnico de esta materia viva en el seno del entorno.

El primer principio biogeoquímico se manifiesta entonces por la presión de la vida, que observamos efectivamente en la biosfera, y por la aceleración creciente de la actividad técnica del hombre civilizado.

Conviene tomar también en consideración —particularmente en el fenómeno de la ubicuidad, además de en la presión de la vida— la existencia en la biosfera de formas de vida que evolucionan en unos medios con un carácter físico completamente distinto.

Se nos impone la necesidad de aceptar que la vida se manifiesta en dos espacios físicamente diferentes.

En primer lugar, en el campo de la gravitación donde vivimos. Como es lógico, es el que nos resulta más familiar.

Ahora bien, este campo, donde todo se rige por su correspondiente ley, no abarca la totalidad del ámbito vital.

Los organismos más pequeños poseen unas dimensiones prácticamente moleculares, aun cuando pertenezcan a otra década². Dichos organismos, cuyo diámetro no supera la cienmillonésima parte de un centímetro, se inscriben en el campo de fuerzas moleculares; su vida, así como los fenómenos que se relacionan con ella, no se rige meramente por la gravitación universal, sino que se someten a la acción de las radiaciones que nos circundan por doquier: en el caso de dichos organismos, éstas pueden anular las condiciones de existencia que se derivan de la gravitación.

Nos consta que estos seres tan exigüos están asimismo dotados de ubicuidad, que ocupan el espacio máximo, y que su presión vital, la intensidad del flujo de átomos que originan, son extremas.

VIII

De esta suerte podemos considerar la ubicuidad de la vida y su presión como la expresión del principio de la Naturaleza circundante, que rige la migración biógena de los elementos químicos.

El estudio de los fenómenos naturales y los hechos empíricos relacionados con ellos nos permiten concluir rápidamente que la propia ubicuidad, así como la pujanza de la vida, no son explicables en razón de la inmutabilidad de la vida actual de los organismos.

² V. VERNADSKI, *Revue génér. des Sciences*, 1928, p. 136.

Estos fenómenos van modificándose en el curso de los tiempos geológicos y mayoritariamente se desarrollan por efecto de la evolución.

La creación, como consecuencia de la misma, de nuevas formas de vida que se adaptan a las nuevas condiciones de existencia incrementa la ubicuidad de la vida y amplía su campo. La vida penetra así en regiones de la biosfera adonde previamente no había tenido acceso.

Al mismo tiempo vemos cómo, en el transcurso de las épocas geológicas, van surgiendo nuevas formas de vida. Su aparición impulsa una aceleración de la corriente de átomos a través de la materia viva, provocando también en el seno de éstos nuevas manifestaciones, desconocidas hasta el momento, así como la aparición de nuevas formas de desplazamiento.

La atención que tres generaciones ya de naturalistas han prestado a los fenómenos de la evolución de las especies ha permitido analizar la Naturaleza viva y asegurar que la ubicuidad y la presión de la vida, observadas por doquier, se han alterado substancialmente y se han incrementado en el curso de las épocas geológicas, lo cual es un resultado de la evolución y de la adaptación de los organismos al medio.

Un par de ejemplos bastarán para ilustrar con nitidez mis argumentos. El análisis de la fauna cavernícola prueba que se compone de organismos que, en el pasado, vivieron bajo la luz del día. Se han adaptado a condiciones distintas, extendiendo así el campo de la vida. Lo mismo cabe afirmar de una parte, al menos, del bentos oceánico. Se ha adaptado a condiciones de alta presión, frío y tinieblas, aun cuando provenga de organismos que antaño disfrutaron de condiciones distintas.

Se trata de un nuevo fenómeno que amplía el campo de la vida en la biosfera. El análisis de tales fenómenos parece indicar que el campo de la vida sigue ensanchándose en nuestra época geológica mediante la colonización de las profundidades del Océano.

En lo que concierne a otros fenómenos, continúan apreciándose sin cesar procesos idénticos. La flora y la fauna de las fuentes termales, la de las cumbres o de los desiertos y las de los glaciares y las de las nieves perpetuas se han desarrollado conforme a las leyes de la evolución. La vida, al adecuarse así al medio, se ha anexionado lentamente nuevos territorios y ha reforzado la migración biógena de los átomos de la biosfera.

Los procesos evolutivos no sólo han extendido el campo de la vida, sino que han intensificado y acelerado la migración biógena. La formación del esqueleto de los vertebrados ha alterado y aumentado, al concentrarla, la migración de los átomos de fluor y, sin duda, de fósforo; también, en el caso de los invertebrados acuáticos, la migración de los átomos de calcio.

Huelga insistir sobre el incremento superlativo de la presión de la vida en la biosfera ocasionado por la aparición del *Homo sapiens* evolucionado al que cabe designar, al parecer, mediante la combinación de la terminología de Linneo y de Bergson, utilizando la triple característica de la especie

Homo sapiens faber. La inteligencia del *Homo sapiens faber* entraña un nuevo factor que conmociona la estructura de la biosfera después de miles de siglos.

IX

Así, el análisis empírico de la Naturaleza viva circundante confirma, clara y definitivamente, que la ubicuidad y la presión de la vida en la biosfera son el resultado de la evolución. En otras palabras, *la evolución de las formas vivas en el transcurso de los tiempos geológicos sobre nuestro planeta incrementa la migración biógena de los elementos químicos en la biosfera*.

Evidentemente, la condición mecánica que determina la necesidad de la migración atómica ha persistido sin interrupciones en el curso de toda la historia geológica y la evolución de las formas de vida siempre ha tenido que ajustarse a ella.

Esta condición mecánica, que provoca tal migración biógena de los elementos, obedece al hecho de que la vida constituye una parte integrante del mecanismo de la biosfera y que, en última instancia, es la fuerza que determina su existencia.

Es indudable que la evolución de las especies se halla en correlación con la estructura de la biosfera. Ni la vida, ni la evolución de sus formas podrían existir con independencia de la biosfera, ni oponérsele como entidades naturales separadas.

A partir de este principio fundamental y del dato de que la evolución participa en el desarrollo de la ubicuidad y de la presión de la vida en la biosfera actual, nos resulta lícito establecer, en lo que atañe a la evolución de las formas vivas, un nuevo *principio biogeoquímico*.

Dicho principio, designado como *segundo principio biogeoquímico*, puede formularse como sigue:

La evolución de las especies, al cristalizar en la creación de nuevas formas de vida estables, tenderá necesariamente a incrementar la migración biógena de los átomos en la biosfera.

X

Es evidente que este nuevo principio no sirve para explicar la evolución de las especies; no interviene en los intentos de explicación, en las diferentes teorías sobre la evolución que sopesan actualmente los científicos. Tal principio admite la evolución como un hecho empírico, o más bien como una generalización empírica, relacionándola con otra de la misma clase, la generalización del mecanismo de la biosfera.

No obstante, cumple un papel específico desde el punto de vista de las teorías evolucionistas; a mi juicio, señala con una lógica infalible la vigencia de una *dirección* necesariamente unívoca para el proceso de la evolución. Tal dirección coincide perfectamente en su terminología (científica precisa) con los principios de la mecánica, con todo nuestro saber acerca de los procesos físico-químicos terrestres donde se inscribe la migración biógena de los átomos.

Cualquier teoría de la evolución debe tener presente la existencia de esa *dirección* determinada del proceso de la evolución que, con el desarrollo ulterior de la ciencia, llegará a ser evaluado cuantitativamente.

Por varias razones, entiendo que no procede hablar de teorías evolucionistas sin tomar también en consideración la cuestión fundamental de *la existencia de una dirección determinada, en el proceso de la evolución invariable, en el curso de todas las épocas geológicas*.

Contemplados en su conjunto, los anales de la paleontología no reflejan alteraciones caóticas, unas veces en un sentido, otras en el contrario, sino un fenómeno cuyo desarrollo se efectúa de una manera determinada, siempre en la misma dirección, en la del crecimiento de la consciencia, del pensamiento y de la creación de formas que incrementan el impacto de la vida en el entorno.

La vigencia de una dirección semejante en la evolución de las especies puede establecerse en términos precisos gracias a la observación.

Me limitaré a aportar un pequeño número de ejemplos, de un alcance general, alusivos al desenvolvimiento del proceso evolutivo, a las indicaciones de la paleontología consideradas desde el punto de vista de la transformación de la migración biógena en el curso de las épocas geológicas.

XI

En el período cámbrico, en los albores del mundo vivo pretérito que nosotros estudiamos, aparecieron los invertebrados superiores. Tal hecho aún no se ha establecido plenamente, pero es menester admitirlo a fin de explicar, con argumentos muy sencillos, la brusca alteración que aconteció poco después de comenzar el período cámbrico en lo que respecta a la conservación de los organismos. La absoluta inmutabilidad, en el curso de la era precámbrica, de los procesos de erosión, su total identidad —si consideramos sus rasgos esenciales— con los procesos análogos actuales, nos impide buscar la explicación para la ausencia de vestigios en la diversidad de las condiciones del medio externo.

Al mismo tiempo, tampoco hay razones para suponer que el metamorfismo de las capas terrestres provocado por una duración determinada de sus procesos haya acarreado, en aquel momento concreto, una ausencia de

vestigios orgánicos. Habría que admitir entonces que sufrieron una completa transformación todas las capas más antiguas.

Actualmente nos consta que abundan los casos de capas precámbricas sometidas a una metamorfización menor que las del período cámbrico y que las capas más recientes.

Probablemente aciertan los geólogos que defienden aquí un cambio brusco de la *migración biógena de los átomos de calcio*. Es el primer fenómeno de esta clase que hayamos podido constatar.

Podemos estimar la importancia de tal acontecimiento recordando el papel desempeñado en la biosfera por los organismos muy ricos en calcio (los organismos lo contienen con preferencia a todos los demás metales) en la formación de los sedimentos calizos. El mecanismo de la migración biógena del calcio ha estado sujeto a grandes modificaciones en la era señalada y la migración se hizo, al punto, más intensa. A juzgar por lo que sabemos a propósito de la migración del calcio, suscitada por la creación del esqueleto de los invertebrados superiores —de moluscos o de corales, por ejemplo—, comparada con la del calcio previamente liberado por los organismos microscópicos, es menester admitir un incremento repentino y radical de la intensidad de su migración cuando fueron creadas estas nuevas formas de vida.

Posiblemente una modificación semejante de la migración biógena del calcio, originada por la formación de nuevas especies provistas de esqueleto, ricas en carbonato cálcico, corresponda a la invasión concomitante de la vida en nuevos ámbitos de la biosfera. Esta modificación hubo de repetirse igualmente en la historia del ácido carbónico.

En los inicios de la vida paleozoica, quizá en el período cámbrico, destaca otro suceso importantísimo relacionado con la migración biógena de los átomos: está vinculado con la transformación radical de la vegetación silvestre de los continentes. El proceso del perfeccionamiento gradual de tales organismos, cuyo apogeo alcanzó, al parecer, su punto culminante en la era terciaria, se prolongaría todavía en varias épocas geológicas. Este proceso corresponde a la conquista, por parte de la vida, de un campo nuevo e inmenso. La aparición de los bosques, exuberantes de vida, implicó un gran cambio en la migración de los átomos de oxígeno, carbono e hidrógeno y, al mismo tiempo, en la de todos los átomos de la vida cuyo movimiento cíclico hubo de tornarse más intenso, puesto que los bosques de las nuevas fases geológicas, en particular los que tienen árboles con hojas perennes, concentran la vida, tanto animal como vegetal, en unas proporciones inusitadas hasta entonces. Si comparamos, desde este enfoque, los bosques de criptógamas de las épocas remotas con nuestros bosques o con los bosques terciarios de fanerógamas, nos parecerá enorme la diferencia en intensidad de la migración biógena.

En la era mesozoica, un nuevo hecho, la aparición de las aves, aumentó la intensidad de la migración biógena y la vida extendió aún

más su campo. Los seres voladores, por otra parte, lograron su pleno desarrollo como aves en la época mesozoica y en la era terciaria. A estas dos nuevas formas de vida van unidas dos funciones biogeoquímicas muy notables. No estamos en situación de concluir que exista una relación entre estas formas y los invertebrados voladores que se remontan muy atrás en la historia, hasta los albores de la era paleozoica, aun cuando los invertebrados voladores hayan cumplido, de forma especial, estas funciones y las sigan cumpliendo en nuestros días. En cualquier caso, la creación de las aves impulsó el mecanismo de la migración biógena en una gran medida.

En el mecanismo de la biosfera, en la migración biógena de los átomos, destaca el cometido de las aves, así como de los restantes seres voladores, para el intercambio de materia entre tierra firme y el agua, sobre todo entre el continente y el Océano. A tales efectos, el papel de las aves se contrapone con el de los ríos, pero se asemejan en cuanto a la cantidad de masas transportadas. Las migraciones de las aves refuerzan todavía más su papel respecto de la circulación biógena de átomos. La aparición de estas especies de vertebrados voladores no solamente creó nuevas modalidades de migración biógena, repercutiendo en el equilibrio químico del mar y del continente, sino que también ha provocado un incremento de la migración biógena en el curso de la historia de los elementos individuales, en particular del fósforo. Los invertebrados alados, los insectos, no han desempeñado una función tan relevante. Es cierto que los saurios voladores precedieron a las aves, pero todo indica que no ejercieron una acción comparable. La aparición de las aves parece guardar una conexión con la de nuevos tipos de bosques; o, en cualquier caso, habría coincidido con la misma.

El papel del hombre civilizado, desde el ángulo de la migración biógena, ha sido infinitamente más trascendental que el de los restantes vertebrados. Por primera vez en la historia de la Tierra, la migración biógena causada por el desarrollo de la acción de la técnica, ha podido cobrar un significado mayor que la migración biógena determinada por la masa de materia viva. Al mismo tiempo, las migraciones biógenas han variado para todos los elementos. Este proceso se ha efectuado con mucha celeridad en un lapso temporal insignificante. La faz de la Tierra se ha transformado hasta el punto de metamorfosearse y, no obstante, es evidente que la era de tal mutación apenas está iniciándose.

Estas mutaciones se ajustan a los datos del segundo principio biogeoquímico; el cambio conlleva una aceleración enorme de la migración atómica en la biosfera.

Es menester que señalemos aquí dos fenómenos: en primer lugar que el hombre ha surgido, a todas luces, de una evolución; en segundo lugar que, al observar los cambios que ocasiona en la migración biógena, verifi-

camos que son de un nuevo tipo —con el tiempo, se aceleran con una rapidez extraordinaria.

Por tanto, admitiremos sin dificultad que las alteraciones en la migración biógena se efectuaban en el curso de los períodos paleontológicos, bajo la influencia de la creación de nuevas especies animales y vegetales, con una rapidez análoga.

La nueva forma cuantitativa de migración biógena que corresponde a la civilización ha sido preparada a lo largo de toda la historia paleontológica. Habríamos podido encontrar sus primeras huellas, en el supuesto de conocer las leyes naturales desde las primeras páginas de los anales de la paleontología.

Me he detenido aquí en algunos fenómenos típicos de la evolución de las especies, alusivos a la migración biógena de los elementos químicos. En todos los casos, la correspondencia de la evolución con el segundo principio biogeoquímico resulta evidente —como se comprueba continuamente, al parecer, a partir del análisis de los anales paleontológicos.

¿Cómo se ha producido tal convergencia? ¿Es el fruto de un cúmulo fortuito de circunstancias, o se trata de un proceso más profundo, determinado por las propiedades de la vida, un proceso incesante, siempre idéntico a sí mismo en sus manifestaciones a lo largo de la historia geológica del planeta? El futuro nos brindará la respuesta.

La influencia reguladora del segundo principio biogeoquímico se manifestará en dos casos.

Incluso si la creación de las especies hubiera acontecido como fruto del azar, por accidente, al margen de la influencia del entorno —es decir, del mecanismo de la biosfera—, una especie cualquiera, creada de manera fortuita, no habría podido sobrevivir ni incorporarse al torbellino del planeta. Sólo la especie suficientemente estable, susceptible de aumentar la migración biógena de la biosfera, habría sobrevivido en tal época.

No obstante, no es factible contraponer actualmente, de una manera tan elemental, el organismo con el entorno —esto es, con la biosfera— como se hacía anteriormente. Sabemos que el organismo no es un huésped accidental en el entorno, que está integrado en su mecanismo complejo y sometido a leyes fijas. La propia evolución forma parte de tal mecanismo.

El naturalista ha de excluir de su concepción del universo todas las nociones filosóficas o religiosas que se han infiltrado en la ciencia desde campos foráneos. La aceptación, en los problemas de la evolución, de la independencia del organismo con respecto al medio, así como de una oposición entre ambos factores, equivaldría a un error de esta clase.

Desde tal perspectiva, probablemente exista un lazo íntimo entre la concordancia de la evolución y el principio que la rige; sin duda no se trata de un mero cúmulo de circunstancias.

Sin indagar sus causas, sino únicamente haciendo valer el dato de que la evolución requiere una dirección determinada, el estudio de los fenómenos biogeoquímicos circunscribe el ámbito de las teorías evolucionistas científicamente admisibles.

Parece que este estudio entreabre, en nuestro horizonte, un campo adicional de fenómenos para la actividad científica que ha sido, hasta la fecha, patrimonio exclusivo de la especulación filosófica o religiosa.

La nueva forma de migración biógena, novedosa al menos a tal escala, ha sido provocada, como vemos, por la intervención de la razón humana.

No se diferencia en nada, sin embargo, de las restantes manifestaciones de la migración biógena, que se corresponden con otras funciones vitales.

Al mismo tiempo podemos establecer, en términos precisos, que la inteligencia humana modifica de manera brusca y radical la marcha de los procesos naturales, alterando lo que llamamos leyes de la Naturaleza.

La consciencia y el pensamiento, pese a los esfuerzos de generaciones de pensadores y sabios, son irreductibles a la energía y a la materia, sea cual fuere el modo de definir estos pilares de nuestro edificio científico.

¿Cómo ha podido actuar la consciencia sobre el desarrollo de unos procesos que parecen totalmente reductibles a la materia y a la energía?

Dicha cuestión ha sido recientemente planteada por el matemático americano J. Lotka³ precisamente a propósito de los fenómenos biogeoquímicos. Dudamos de que su respuesta sea satisfactoria. Con todo, ha señalado la importancia del problema y la posibilidad de abordarlo.

Probablemente no estaremos en condiciones de resolverlo hasta después de haber renovado radicalmente nuestras nociones físicas fundamentales, unas nociones que acaban de experimentar, y experimentan todavía, unas transformaciones cuya celeridad carece de precedentes en la historia del pensamiento. Las teorías físicas habrán de preocuparse necesariamente de los fenómenos fundamentales de la vida.

En tal sentido trabaja en la actualidad la investigación. Resulta inverosímil prescindir de estos descubrimientos nuevos y profundos. Entre los mismos, merecen un análisis las especulaciones del matemático y pensador inglés A. Whitehead⁴ —en realidad, más filosóficas que científicas—. Muy posiblemente otro pensador inglés, F. Haldane⁵, se halle en lo cierto cuando prevé, para un futuro inmediato, una renovación substancial de la física y de sus principios, dada la introducción, en su esfera, del estudio de los fenómenos de la vida.

³ J. LOTKA, *Elements of physical biology*, Balt., 1925.

⁴ A. WHITEHEAD, *Science and modern world*, Cambr., 1926.

⁵ F. HALDANE, *Daedalus*, L. 1926.

El estudio de los fenómenos biogeoquímicos, impulsado al máximo, nos permite precisamente penetrar en este ámbito de las manifestaciones enlazadas de la vida y la estructura física del universo, así como en el terreno de las futuras teorías científicas.

Es muy comprensible el profundo interés filosófico que entrañan actualmente los problemas biogeoquímicos.

LA BIOSFERA Y LA NOOSFERA*

* Artículo de V. I. Vernadsky publicado en la revista *American Scientist*, vol. 33, n.º 1, enero de 1945.

La Biosfera

La materia viva está constituida por todos los organismos presentes en la Tierra en un momento dado. Normalmente, esa totalidad es la que tiene importancia, si bien al considerar el efecto del hombre sobre los procesos del planeta puede tener relevancia un individuo por sí solo. Puede considerarse que la materia viva de la Tierra es la suma de la materia viva media de todos los grupos taxonómicamente reconocibles. Así, se dice que cada uno de tales grupos se compone de materia viva *homogénea*.

La materia viva existe únicamente en la *biosfera*¹, que incluye la totalidad de la troposfera atmosférica, los océanos y una delgada capa de las zonas continentales, de un espesor de tres o más kilómetros. El hombre tiende a aumentar el tamaño de la biosfera.

La biosfera se caracteriza por ser el campo de la vida, pero también, y más esencialmente, por ser la zona en la que pueden tener lugar cambios debidos a la radiación de entrada.

Dentro de la biosfera, la materia es sensiblemente heterogénea y puede diferenciarse en materia inerte y materia viva. La materia inerte predomina en gran medida en forma de masa o volumen. Se produce una migración continua de átomos desde la materia inerte hacia la viva, y viceversa. Todos los objetos de estudio de la biosfera tienen que contemplarse como *corpos naturales* de la biosfera y pueden ser de diferente complejidad, inertes, vivos, o bioinertes, como sucede en el caso de la tierra o del agua de los lagos. El estudio de todos los fenómenos posee una unidad que lleva a la elaboración de un cuerpo de conocimiento sistematizado, el *corpus scientiarum*, que tiende a crecer como una bola de nieve; este *corpus* incluye todo el conocimiento sistematizado y contrasta con los resultados de la filosofía, la religión y el arte allí donde la verdad puede revelarse de forma intuitiva; la historia sistematizada de tales actividades pertenece al *corpus*.

¹ El concepto de «biosfera», es decir, de «área de la vida», fue introducido en la biología por Lamarck (1744-1829), en París a comienzos del siglo XIX, y en la geología por Suess (1831-1914), en Viena a finales del mismo siglo. Sobre la biosfera, véase V. VERNADSKY, *Ocherki geobiotii*, 4.^a edición, Moscú-Leningrado. Índice; *Biosfera* (La Biosfera), Leningrado, 1926; edición francesa, París, 1929.

En el pasado, dos conceptos se han subrayado de forma inadecuada: (a) Pasteur tenía razón al considerar la preponderancia de los compuestos ópticamente activos como propiedad general más característica de la materia viva y sus productos; esa idea es de inmensa importancia; (b) se han desatendido gravemente las funciones de los organismos vivos en la energética de la biosfera. La energía biogeoquímica puede expresarse como la velocidad a la que la biosfera puede colonizarse por una especie dada. Para determinadas bacterias, la velocidad restrictiva de extensión de una cadena divisora de células que propenden a abarcar toda la circunferencia de la Tierra tendería a aproximarse a la velocidad del sonido.

Si se tiene en cuenta estos principios iniciales, la diferencia entre la materia viva y la inerte de la biosfera puede expresarse en una tabla, que se ofrece aquí en forma resumida. Las diferencias expuestas en esta tabla no son meramente diferencias relativas a la energética y a las propiedades químicas, sino que implican también una diferencia fundamental en las manifestaciones espacio-temporales de la materia viva y de la inerte. Sugieren que la geometría apropiada para los cuerpos de los organismos vivos puede diferir de la apropiada para los cuerpos inertes.

I

A. Los cuerpos vivos naturales existen únicamente en la biosfera y sólo como cuerpos discretos. No se ha observado nunca su aparición si no es a partir de otros cuerpos vivos. Su ingreso en la biosfera procedentes del espacio cósmico es hipotética y jamás ha sido demostrada.

B. Las formas inertes discretas se concentran en la biosfera, pero se encuentran también mucho más profundamente en la corteza terrestre. Se crean en la biosfera, pero también ingresan en ella desde abajo, por los fenómenos volcánicos, y desde el espacio cósmico, en forma de meteoritos y polvo.

II

A. Desde el punto de vista de su morfología celular, su naturaleza protoplasmática y su capacidad reproductora, los cuerpos vivos naturales poseen

una unidad, que debe relacionarse con la conexión genética que mantienen entre sí a lo largo del tiempo geológico.

B. Los cuerpos inertes naturales son extraordinariamente variados y no poseen conexiones estructurales o genéticas comunes.

III

A. Las diferencias químicas entre enantiomorfos levógiros y dextrógiros caracterizan el estado del espacio físico ocupado por los organismos vivos. Predominan bien los enantiomorfos levógiros, bien los dextrógiros.

B. Los enantiomorfos levógiros y dextrógiros de los mismos compuestos químicos poseen las mismas propiedades químicas en los cuerpos inertes. Los cristales dextrorrotatorios y levorrotatorios formados en un medio inerte son los mismos.

IV

A. Los nuevos cuerpos vivos naturales nacen únicamente a partir de los preexistentes. De vez en cuando, aparecen nuevas generaciones diferentes de las anteriores. El surgimiento del sistema nervioso central ha aumentado el papel geológico de la materia viva, especialmente desde finales del Plioceno.

B. Los nuevos cuerpos inertes se crean en la biosfera con independencia de los cuerpos naturales previamente existentes. En general, los procesos inertes configuran el mismo tipo de cuerpos naturales que los que formaban hace dos mil millones de años. Los nuevos tipos de cuerpos inertes aparecen solamente por influencia de la materia viva, especialmente el hombre.

V

A. No existen cuerpos vivos líquidos o gaseosos, si bien los líquidos y los gases se encuentran presentes en los cuerpos vivos mesomórficos o sólidos. Los cuerpos vivos se caracterizan por el movimiento espontáneo, autorregulado en gran medida. Lo anterior puede ser pasivo, como en la reproducción, pero el efecto de ésta consiste en la colonización de la biosfera a través de un proceso comparable a la expansión de un gas.

B. Los cuerpos inertes líquidos y gaseosos adoptan la forma de los recipientes en los que están contenidos. Por regla general, los cuerpos inertes sólidos o mesomórficos no muestran movimiento alguno propio del cuerpo en su conjunto.

VI

A. Existe una corriente continua de átomos que pasan de los organismos vivos a la biosfera, y viceversa. Dentro de los organismos, procesos no conocidos de otro modo en la biosfera produ-

cen un número inmenso y cambiante de moléculas.

B. Los cuerpos naturales inertes cambian únicamente debido a causas externas, con la excepción de los materiales radioactivos.

VII

A. El número de cuerpos vivos naturales se encuentra cuantitativamente relacionado con el tamaño de la biosfera.

B. El número de cuerpos inertes naturales viene definido por las propiedades generales de la materia y la energía, y es independiente del tamaño del planeta.

VIII

A. La masa de la materia viva ha permanecido relativamente constante, al estar determinada por la energía solar radiante y por la energía de colonización biogeoquímica, pero aparentemente la masa aumenta hacia un límite, no encontrándose todavía completo el proceso.

B. El área en que los cuerpos inertes naturales se manifiestan en la biosfera se encuentra limitada por el tamaño de la última y solamente aumenta en la medida en que la biosfera se expande como consecuencia del movimiento de la materia viva.

IX

A. El tamaño mínimo de un cuerpo vivo natural se encuentra determinado por la respiración, y es del orden de 10^{-6} cm. El tamaño máximo no ha superado nunca $n \cdot 10^4$. La amplitud, 10^{10} , no es grande.

B. El tamaño mínimo de un cuerpo inerte natural en la biosfera está determinado por el grado de dispersión de la materia y la energía, es decir, por el tamaño de las últimas partículas físicas. El tamaño

máximo viene dado por el de la biosfera. La amplitud es 10^{40} o superior.

X

A. La composición química de los cuerpos vivos es una función de sus propiedades.

B. La composición química de los cuerpos inertes es una función de las propiedades del medio en que se forman.

XI

A. El número de clases de compuestos químicos en los cuerpos vivos está relacionado con los tipos de organismos individuales y alcanza probablemente varios millones.

B. El número de clases diferentes de compuestos químicos en los cuerpos inertes se limita a unos pocos miles.

XII

A. Los procesos en la materia viva tienden a elevar la energía libre de la biosfera.

B. Todos los procesos inertes, salvo la desintegración radioactiva, reducen la energía libre de la biosfera.

XIII

A. Los cuerpos vivos naturales son siempre mesomórficos y, excepto en condiciones latentes en las que, como en el agua, predominan H y O, tienen una mezcla sumamente complicada de otros compuestos. La composición química de cualquier clase de materia viva, aunque no muestra relaciones esteoico-

métricas, está definitivamente determinada y es más constante que las mezclas isomórficas que constituyen los minerales naturales.

B. La composición química de los cuerpos inertes naturales puede equipararse a la de compuestos químicos casi puros, con relaciones esteoimétricas exactas entre los elementos. En los minerales, predominan las soluciones sólidas.

XIV

A. Las relaciones isotópicas pueden estar sensiblemente modificadas por los procesos en la materia viva.

B. Las relaciones isotópicas no varían de forma apreciable en los cuerpos inertes naturales de la biosfera, si bien tales cambios pueden tener lugar fuera de la biosfera, en la profundidad de la corteza terrestre.

XV

A. La inmensa mayoría de los cuerpos vivos naturales modifican sus formas a lo largo del proceso evolutivo. Sin embargo, las tasas a que tienen lugar tales cambios son muy divergentes.

B. La mayor parte de los cuerpos inertes de la biosfera son estables y, por tanto, carecen de variedad.

XVI

A. Los procesos de los cuerpos vivos naturales no son temporalmente reversibles.

B. Todos los procesos fisicoquímicos en los cuerpos inertes naturales son temporalmente reversibles.

En la vida cotidiana, es habitual hablar del hombre como individuo que vive y se mueve libremente sobre nuestro planeta y que construye libremente su historia. Hasta época muy reciente, los historiadores y los estudiosos de las humanidades —y, hasta cierto punto, incluso los biólogos— no eran conscientemente capaces de reconocer las leyes naturales de la biosfera, única envoltura terrestre en la que puede existir la vida. Funda-

mentalmente, no puede separarse de ella al hombre, y es solamente ahora cuando tal indisolubilidad se nos empieza a aparecer claramente y en términos precisos. El hombre se halla geológicamente ligado a su estructura material y energética. En realidad, no existe en la Tierra ningún organismo vivo en estado libre². Todos los organismos están ligados de forma indisoluble e ininterrumpida, a través sobre todo de la nutrición y la respiración, con el entorno material y energético ambiental. Fuera de aquí, no pueden existir en condiciones naturales.

En nuestro siglo, la biosfera ha adquirido un significado totalmente nuevo; ha demostrado ser un fenómeno planetario de carácter cósmico. En la biogeoquímica, hay que tener en cuenta el hecho de que los organismos vivos existen realmente no sólo en nuestro planeta y no exclusivamente en la biosfera terrestre. Me parece que hasta ahora tal cosa se ha demostrado sin duda alguna únicamente en el caso de los denominados «planetas terrestres», es decir, en el caso de Venus, la Tierra y Marte³.

La idea de la vida como fenómeno cósmico viene de muy antiguo, como se pone de manifiesto en los archivos científicos, incluyendo aquí la ciencia rusa. A finales del siglo XVII, el científico holandés Christian Huygens (1629-1895) planteó este problema en su última obra, *Cosmotheoros*, publicada póstumamente. Por iniciativa de Pedro el Grande, ese libro fue publicado dos veces en ruso en el primer cuarto del siglo XVIII, con el título *El Libro de la Contemplación del Mundo*⁴. En su obra, Huygens sentó la generalización científica de que «la vida es un fenómeno cósmico en

² Caspar Wolf (1733-1794), el notable científico, miembro de la Academia de Ciencias de San Petersburgo, quien, a pesar de no ser ruso de nacimiento, dedicó toda su vida a Rusia, expresó claramente la relación existente entre los organismos y su medio en un libro publicado en alemán en San Petersburgo, en 1789, el año de la gran Revolución Francesa, con el título *Von d. eigenthüml. Kraft d. Vegetabl. sowohl auch d. animal. Substanz als Erläuterung zu zwei Preisschriften über d. Nutritionskraft* (Sobre la Fuerza Específica y Activa propia de la Sustancia Vegetal y Animal). A diferencia de la gran mayoría de los biólogos de su época, tendía hacia las ideas de Newton antes que hacia las de Descartes. Hay que lamentar que hasta ahora no se hayan estudiado ni publicado los manuscritos descubiertos a la muerte de Wolf. En 1927, la Comisión sobre la Historia del Conocimiento de la Academia de Ciencias decidió llevar a cabo esta tarea, pero no pudo realizarse debido a los constantes cambios en el enfoque dado por la Academia al estudio de la historia de la ciencia. En la actualidad, esa tarea se ha reducido en la Academia a un mínimo, lo que es muy perjudicial para ese objetivo.

³ Véase mi artículo «The Geological Envelopes of the Earth as a Planet», *Investia of the Academy of Sciences, Geographical and Geophysical Series*, 1942, p. 251. Cf. H. SPENSER JONES, *Life on Other Worlds*, Nueva York, 1940; R. WILDT, en *Proc. Amer. Philos. Soc.* 81 (1939), p. 135. Una traducción rusa del trabajo de Wildt, por desgracia no completa (lo que no se indica en la misma) apareció en *Astronomicheskii Zhurnal*, vol. XVII (1940), n.º 5 pp. 81 y ss. En la actualidad, ha aparecido un nuevo trabajo de Wildt, *Geochemistry and the Atmosphere of Planets* (1941), pero, por desgracia, no nos ha llegado copia alguna.

En colaboración con el Instituto de Microbiología de la Academia de Ciencias de Moscú (miembro correspondiente, B. L. Isachenko), el Laboratorio Biogeoquímico de la misma Academia, rebautizado actualmente como Laboratorio de Problemas Geoquímicos, planteó ya en 1940 la cuestión de la vida cósmica como problema científico de actualidad. Este trabajo se vio detenido por la guerra, pero se reanuda en la primera oportunidad.

⁴ Esta obra se merecería una nueva edición en ruso moderno, con comentarios.

cierto modo claramente distinto de la materia inerte». Recientemente, he denominado a esa generalización «principio de Huygens»⁵.

En términos relativos, la materia viva constituye una parte insignificante de nuestro planeta. Es de suponer que tal cosa se ha cumplido a todo lo largo del tiempo geológico; en otras palabras, esa relación es *geológicamente eterna*⁶. La materia viva se encuentra concentrada en una delgada, aunque más o menos continua, capa de la superficie terrestre en la troposfera, en los bosques y campos, e impregna todo el océano. Se estima que su cantidad es del orden de 0,25% del peso de la biosfera. En la tierra firme, desciende bajo la superficie en acumulaciones discontinuas, probablemente hasta una profundidad media de menos de 3 kilómetros.

La Noosfera⁷

Nos estamos acercando al punto culminante de la Segunda Guerra Mundial. En Europa, la guerra se reanudó en 1939 tras una tregua de veintidós años; ha durado cinco años en Europa Occidental y se encuentra en su tercer año en nuestra zona, en Europa Oriental. En lo que respecta al Lejano Oriente, la guerra se reanudó mucho antes, en 1931, y se encuentra ya en su decimosegundo año. Una guerra de tal intensidad, duración y fuerza constituye un fenómeno sin parangón alguno en la historia de la humanidad y de la biosfera en general. Además, estuvo precedida por la Primera Guerra Mundial, que, aunque de menor intensidad, muestra una relación causal con la presente.

En nuestro país, la Primera Guerra Mundial dio como resultado una forma de estado nueva e históricamente sin precedente alguno, no sólo en el ámbito de la economía, sino probablemente también en el de las aspiraciones de las nacionalidades. Desde la perspectiva del naturalista (y creo que igualmente desde la del historiador), un fenómeno histórico de tal intensidad podría y tendría que ser examinado como parte de un único gran proceso *geológico* terrestre, y no meramente como proceso *histórico*.

La Primera Guerra Mundial influyó de forma decisiva en mi propia obra científica, en el sentido de que modificó radicalmente mi *noción geológica del mundo*. Fue en la atmósfera creada por esa guerra cuando me planteé una concepción de Naturaleza, idea olvidada en aquella época y,

⁵ Véase *Ocherki geokhimii*, pp. 9 y 288, y mi obra *Problemy biogeokhimii* (Problemas de Biogeoquímica), III (en prensa).

⁶ *Problemy biogeokhimii*, III.

⁷ La palabra «noosfera» se compone de los términos griegos *noos* (noos), inteligencia, y de *esfera*, empleado este último en el sentido de envoltura de la Tierra. Considero con más detalle el problema de la noosfera en mi obra, actualmente en prensa, sobre *La Estructura Química de la Biosfera de la Tierra como Planeta, y de su entorno*.

por tanto, nueva para mí mismo y para otros, una concepción geoquímica y biogeoquímica que abarca desde la misma perspectiva tanto la Naturaleza viva como la inerte⁸. Pasé los años de la Primera Guerra Mundial dedicado sin interrupción a mi labor científica creativa, actividad que he proseguido constantemente en la misma dirección.

Hace veintiocho años, en 1915, se constituyó en la Academia de Ciencias una «Comisión para el Estudio de las Fuerzas Productivas» de nuestro país, la llamada CEFP. Esa comisión, de la que fui elegido presidente, desempeñó un papel destacado en el período crítico de la Primera Guerra Mundial. En medio de la guerra, y de forma totalmente inesperada, la Academia de Ciencias constató que en la Rusia zarista no existían datos exactos de las actualmente denominadas materias primas estratégicas, y tuvo que reunir y compendiar rápidamente datos dispersos para poder cubrir las lagunas de nuestros conocimientos⁹. Por desgracia, en la época en que se inició la Segunda Guerra Mundial sólo se conservaba la parte más burocrática de esa comisión, el llamado Consejo de las Fuerzas Productivas, por lo que se hizo necesario restablecer a toda prisa las restantes secciones.

Al enfocar el estudio de los fenómenos geológicos desde una perspectiva geoquímica y biogeoquímica, podemos abarcar toda la Naturaleza ambiente en el mismo aspecto atómico. De modo inconsciente, semejante enfoque me parece coincidente con el que caracteriza a la ciencia del siglo XX y la distingue de la imperante en anteriores centurias. *El siglo XX es el siglo del atomismo científico*.

En aquella época, 1917-1918, y de modo completamente fortuito, me encontraba en Ucrania¹⁰, no regresando a Petrogrado hasta 1921. A lo largo de todos esos años, allí donde me hallara, mis pensamientos iban siempre dirigidos hacia las manifestaciones geoquímicas y biogeoquímicas en la Naturaleza ambiente, es decir, en la biosfera. Al mismo tiempo que las observaba, dirigía mis lecturas y mis reflexiones hacia esa cuestión de forma intensiva y sistemática. De forma gradual, según se iban configurando, fui exponiendo las conclusiones a las que llegaba en conferencias e informes presentados en las ciudades en que me encontraba, como Yalta, Poltava, Kiev, Sinferopol, Novorossiisk, Rostov, etc. Al mismo tiempo, en casi todas las ciudades en que estuve solía leer todo lo existente sobre el

⁸ Hay que resaltar aquí que en este contexto me encontré con los olvidados pensamientos de C. Schoenbein (1799-1868), original químico bávaro, y de su amigo, el genial físico inglés M. Faraday (1791-1867). Ya a comienzos de los años ochenta del pasado siglo, Schoenbein intentó demostrar que debería crearse una nueva sección de geología-geoquímica, como la llamaba. Véase V. VERNADSKY, *Ocherki geokhimii* (Estudios de Geoquímica), 4.ª edición, Moscú-Leningrado, 1934, pp. 14 y 290.

⁹ En lo que se refiere a la importancia de la CEFP, véase A. E. FERSMAN, *Voyna i strategicheskoe syrie* (La Guerra y las Materias Primas Estratégicas), Krasnoufimsk, 1941, p. 48.

¹⁰ Véase mi artículo *Out of my Recollections: The First Year of the Ukrainian Academy of Sciences*, que va a aparecer en el volumen conmemorativo del vigésimoquinto aniversario de la Academia Ucraniana de Ciencias.

problema en su más amplio sentido. En la medida en que me fue posible, dejé de lado cualquier aspiración filosófica e intenté basarme únicamente en generalizaciones y hechos científicos y empíricos firmemente establecidos, permitiéndome en ocasiones recurrir por mí mismo a hipótesis de trabajo científicas. Así, en lugar del concepto de «vida», introduje el de «materia viva», que parece en la actualidad hallarse firmemente establecido en la ciencia. «Materia viva» es la totalidad de los organismos vivos, pero se trata de una generalización científica de carácter empírico de hechos empíricamente indiscutibles conocidos por todos y fácilmente observables con precisión. El concepto de «vida» excede siempre los límites del de «materia viva»; pertenece al reino de la filosofía, el folklore, la religión y las artes. Todo esto se encuentra excluido de la noción de «materia viva».

En el transcurso del tiempo geológico, la materia viva cambia morfológicamente de acuerdo con las leyes de la Naturaleza. Su historia se expresa como lenta modificación de las formas de los organismos vivos que genéticamente se encuentran conectados entre sí de forma ininterrumpida generación tras generación. Esa idea fue fermentando en la investigación científica a través de las diversas épocas hasta que, en 1859, logró una sólida base gracias a los grandes logros de Charles Darwin (1809-1882) y Wallace (1822-1913). Se encontraba encastrada en la doctrina de la evolución de las especies, del mundo vegetal y animal, incluido el hombre. El proceso evolutivo es solamente característico de la materia viva, no existiendo manifestación alguna de él en la materia inerte de nuestro planeta. En la era criptozoica, se formaron los mismos minerales y rocas que se forman en la actualidad¹¹; las únicas excepciones son los cuerpos naturales bioinertes relacionados de uno u otro modo con la materia viva¹².

El cambio en la estructura morfológica de la materia viva observado en el proceso evolutivo conduce inevitablemente a un cambio en su composición química¹³.

Mientras que la cantidad de materia viva es insignificante con respecto a la masa inerte y bioinerte de la biosfera, las rocas biogénicas constituyen una parte importante de su masa, y sobrepasan con mucho los límites de la biosfera. Sometidas a fenómenos de metamorfismo, se convierte, per-

¹¹ De acuerdo con algunos geólogos americanos modernos, como, por ejemplo, Charles Schuchert (SCHUCHERT Y DUNBAR, *A Textbook of Geology*, II, Nueva York, 1941, pp. 88 y ss.), llamo era criptozoica al período antiguamente denominado era azoica o arqueozoica. En la era criptozoica, la conservación morfológica de los restos orgánicos se reduce casi hasta la nada, pero la existencia de vida se pone de manifiesto en las rocas organogénicas, cuyo origen no suscita duda alguna.

¹² En lo que se refiere a los cuerpos bioinertes, véase V. I. VERNADSKY, *Problems of Biogeochemistry*, II, traducc. Conn. Acad. Arts Sci., vol. 35 (1944), pp. 493-494. Se trata, por ejemplo, de la tierra, el océano, la inmensa mayoría de las aguas terrestres, la troposfera, etc.

¹³ Está problema necesita con urgencia comprobación experimental, tarea que se ha emprendido por el Laboratorio de Problemas Geoquímicos en colaboración con el Instituto Paleontológico de la Academia de Ciencias, dentro de nuestro programa de trabajo para 1944.

dido todo rastro de vida, en la envoltura granítica, no formando ya parte de la biosfera. La envoltura granítica de la Tierra es la zona de antiguas biosferas¹⁴. En la obra de Lamarck, *Hydrogéologie* (1802), en la que se contienen ideas muy sobresalientes, la materia viva, tal como la entiendo, se revelaba como la creadora de las principales rocas de nuestro planeta. Lamarck nunca aceptó el descubrimiento de Lavoisier (1743-1794). Sin embargo, otro gran químico, J. B. Dumas (1800-1884), que era contemporáneo más joven de Lamarck, que sí aceptó el descubrimiento de Lavoisier y que estudió intensamente la química de la materia viva, se adhirió también durante mucho tiempo a la idea de la importancia cuantitativa de la materia viva en la estructura de las rocas de la biosfera.

J. D. Dana (1813-1895) y J. Le Conte (1823-1901), ambos jóvenes contemporáneos de Darwin y grandes geólogos americanos (y Dana también mineralogista y biólogo), expusieron, incluso antes de 1859, la generalización empírica de que *la evolución de la materia viva avanza en una dirección categórica*. A ese fenómeno lo llamó Dana «cefalización» y Le Conte «era psicozoica». Al igual que Darwin, Dana adoptó esta idea durante su viaje alrededor del mundo, viaje que inició en 1838, dos años después del regreso de Darwin a Londres, y que duró hasta 1842¹⁵.

La noción empírica de una dirección categórica del proceso evolutivo, sin intento alguno, empero, de fundamentarla teóricamente, se remonta incluso hasta el siglo XVIII. En efecto, Buffon (1707-1788) habló del «reino del hombre», en base a la importancia geológica del hombre, pero le era ajena la idea de evolución, idea que era asimismo ajena a Agassiz

¹⁴ Véase mi obra básica mencionada en la nota 7.

¹⁵ No se puede dejar de subrayar aquí que la expedición durante la que Dana llegó a sus conclusiones sobre la cefalización, los islotes coralinos, etc., se encontraba real e históricamente relacionada muy íntimamente con la exploración del Pacífico por parte de los navegantes rusos, en especial Krusenstern (1770-1846). Véase D. GILMAN, *The Life of J. D. Dana*, Nueva York, 1899. El capítulo de ese libro relativo a la expedición oceánica fue escrito por Le Conte. No he podido acceder a la obra de Le Conte, *Evolution* (1888). Su autobiografía se publicó en 1903: W. ARMES, ed., *The Auto Biography of Joseph Le Conte*. En lo que se refiere a su biografía y bibliografía, véase H. FAIRCHILD, en Bull. Geol. Soc. Amer. 26 (1915), p. 53. Fue el informe sobre los viajeros rusos, publicado en alemán en 1827, el que espoleó al abogado americano, John Reynolds, a insistir en la organización de una expedición oceánica científica americana semejante. Gracias a la insistencia de Reynolds, la expedición se llevó por último a cabo, pero sólo once años después, en 1838. Se trató de la expedición de Wilkes, que finalmente demostró la existencia del Océano Antártico.

En lo que respecta a Reynolds, véase el Índice en *Centenary Celebration: Wilkes Exploring Expedition of the U. S. Navy, 1838-1842*, Proc. Amer. Philos. Soc., 82, n.º 5 (1940). Hay que lamentar que nuestras expediciones al Pacífico, tan activas en la primera mitad del siglo XIX, se suspendieran después durante largo tiempo (casi hasta la Revolución), como consecuencia de la muerte del Emperador Alejandro I (1777-1825) y del Conde N. P. Rumiantsov (1754-1826), este último notable líder de la cultura rusa, que equipó la expedición «Rurik» (1815-1818) con sus propios recursos.

En la época soviética, hay que mencionar la expedición de K. M. Deriugin (1878-1936); sus valiosísimos y científicamente importantes materiales sólo se han estudiado de forma parcial y siguen sin publicarse. Semejante actitud hacia una obra científica es inadmisibles. El Museo Zoológico de la Academia de Ciencias debe llevar a cabo esta tarea científica y cívica.

(1807-1873), quien introdujo en la ciencia la idea de período glacial. Agassiz vivió en una época de impetuoso florecimiento de la geología. Admitió que desde el punto de vista geológico había llegado el reino del hombre, pero, debido a sus principios teológicos, se opuso a la teoría de la evolución. Le Conte señala que Dana, si bien en un principio mantenía puntos de vista cercanos al de Agassiz, en los últimos años de su vida aceptó la idea de la evolución en su habitual interpretación darwiniana¹⁶, con lo que desapareció así la diferencia existente entre la «era psicozoica» de Le Conte y la «cefalización» de Dana. Hay que lamentar que, especialmente en nuestro país, esa importante generalización empírica sigue estando fuera del horizonte contemplado por nuestros biólogos.

La solidez del principio de Dana, que parece encontrarse fuera del horizonte de nuestros paleontólogos, puede contrastarse fácilmente por todo aquel que desee hacerlo en base a cualquier tratado moderno de paleontología. El principio no solamente abarca la totalidad del reino animal, sino que también se pone claramente de manifiesto en tipos individuales de animales. Dana subrayó que, en el transcurso del tiempo geológico, durante al menos dos mil millones de años y probablemente mucho más, tiene lugar un proceso irregular de crecimiento y perfeccionamiento del sistema nervioso central, empezando por los crustáceos (cuyo estudio utilizó Dana para demostrar su principio), siguiendo por los moluscos (cefalópodos) y terminando por el hombre. A este fenómeno es al que denominó cefalización. Una vez que llega a cierto nivel en el proceso evolutivo, el cerebro no está sometido a retroceso alguno, sino que únicamente puede seguir progresando.

A partir del concepto del papel geológico del hombre, el geólogo A. P. Pavlov (1854-1929) solía hablar en los últimos años de su vida de la *era antropogénica* en la que vivimos hoy en día. Aunque no tuvo en cuenta la posibilidad de la destrucción de los valores espirituales y materiales a que asistimos actualmente con la bárbara invasión de los alemanes y sus aliados poco más de diez años tras su muerte, resaltó con razón que el hombre se está convirtiendo ante nuestros propios ojos en una fuerza geológica poderosa y en permanente crecimiento. Tal fuerza geológica se configuró casi imperceptiblemente a través de un largo período de tiempo, coincidiendo con ella un cambio en la posición del hombre sobre nuestro planeta (en especial, su posición material). En el siglo XX, el hombre, por vez primera en la historia de la Tierra, ha conocido y abarcado la biosfera en su totalidad, ha completado el mapa geográfico del planeta Tierra y ha colonizado toda su superficie. *La humanidad se ha convertido en una sola totalidad en la vida de la Tierra.* No hay lugar alguno en la Tierra en que el hombre no

¹⁶ D. Gilman, *op.cit.*, p. 255.

pueda vivir si así lo desea, como lo demuestra la estancia de nuestro pueblo en los hielos flotantes del Polo Norte en 1937-1938. Al mismo tiempo, gracias a las poderosas técnicas y a los éxitos del pensamiento científico, de la radio y la televisión, el hombre es capaz de dirigirse de forma instantánea a todo aquel a quien desee en cualquier punto de nuestro planeta. El transporte aéreo se realiza a una velocidad de varios cientos de kilómetros por hora, y todavía no ha alcanzado su límite máximo. Todo ello es el resultado de la «cefalización», del crecimiento del cerebro humano y del trabajo dirigido por ese cerebro.

El economista L. Brentano iluminó la importancia planetaria de este fenómeno con el siguiente cálculo sorprendente: si se asignase a cada hombre un metro cuadrado y si se colocase a todos los hombres uno junto a otro, no ocuparían ni siquiera el área del pequeño lago de Constanza, entre las fronteras de Baviera y Suiza, permaneciendo vacío de hombres el resto de la superficie terrestre. Así, toda la humanidad junta representa una masa insignificante en relación con la materia del planeta. Su fuerza se deriva no de su materia, sino de su cerebro. Si el hombre comprende todo esto y no usa su cerebro y su trabajo para autodestruirse, se abre delante de él un inmenso futuro en la historia geológica de la biosfera.

El proceso geológico evolutivo pone de manifiesto la unidad biológica y la igualdad de todos los hombres, del *Homo sapiens* y de sus antepasados, los *sinántropos* y otros; su progenie en la mezcla de razas blanca, roja, amarilla y negra evoluciona sin cesar a través de innumerables generaciones¹⁷. Se trata de una *ley de la Naturaleza*. En un determinado contexto histórico, como sucede por ejemplo en una guerra de la magnitud de la actual, gana en último término quien sigue esa ley. No puede hacerse frente impunemente al principio de la unidad de todos los hombres en su calidad de ley de la Naturaleza. Empleo aquí la expresión «ley de la Naturaleza» tal como se usa cada vez más en las ciencias físicas y químicas, en el sentido de una generalización empírica determinada con precisión.

El proceso histórico se ha modificado radicalmente ante nuestros propios ojos. Por vez primera en la historia de la humanidad, los intereses de las masas, por un lado, y el libre albedrío de los individuos, por otro, determinan el curso vital de la humanidad y proporcionan estándares para las ideas humanas de justicia. Tomada en su conjunto, la humanidad se está convirtiendo en una poderosa fuerza geológica. Se plantea entonces el

¹⁷ Mis contemporáneos y yo mismo hemos vivido de forma imperceptible un cambio drástico en la comprensión del mundo circundante. En la época de mi juventud, nos parecía que el hombre había vivido únicamente a través de un tiempo histórico, dentro de un período de unos pocos miles de años, como mucho unas decenas de miles de años. Ahora sabemos ya que el hombre ha existido de forma consciente a lo largo de decenas de millones de años. Ha existido conscientemente a través del período glacial, tanto en Eurasia como en América del Norte, a través de la formación del Himalaya Oriental, etc. Se ha eliminado así la división entre tiempo histórico y geológico.

problema de la *reconstrucción de la biosfera en interés de la humanidad libre-pensadora como totalidad*. Este nuevo estado de la biosfera, al que nos aproximamos sin darnos cuenta, es la *noosfera*.

En la conferencia que pronuncié en la Sorbona de París en 1922-23, reconocí los fenómenos geoquímicos como la base de la biosfera. El contenido de parte de esas conferencias se publicó en mi libro «Estudios de Geoquímica», obra que apareció primero en francés, en 1924, y después en traducción rusa, en 1927¹⁸. El matemático francés Le Roy, filósofo bergsoniano, aceptó como punto de partida el fundamento biogeoquímico de la biosfera, y en sus conferencias pronunciadas en el Collège de France en París introdujo en 1927 el concepto de la noosfera como fase por la que se encuentra pasando actualmente la biosfera desde el punto de vista geológico¹⁹. Subrayó que había llegado a tal idea en colaboración con su amigo Teilhard de Chardin, gran geólogo y paleontólogo que actualmente está trabajando en China.

La noosfera constituye un nuevo fenómeno geológico en nuestro planeta. En él, y por vez primera, el hombre deviene una *fuera geológica de enorme magnitud*. Puede y debe reconstruir su campo vital por medio de su trabajo y de su inteligencia, debe reconstruirlo de forma radical en comparación con el pasado. Ante él se abren posibilidades creativas cada vez más amplias. Podría ser que la generación de nuestros nietos se acercase a la plenitud.

Ahora bien, aquí se nos plantea un nuevo enigma. *La inteligencia no es una forma de energía*. ¿Cómo puede modificar entonces los procesos materiales? Este problema no se ha resuelto todavía. Por lo que conozco, fue planteado por vez primera por un científico americano nacido en Lvov, el matemático y biofísico Alfred Lotka²⁰, pero fue incapaz de resolverlo. Como Goethe (1740-1832) —no solamente un gran poeta, sino también un gran científico— lo subrayó apropiadamente en una ocasión, en la ciencia únicamente podemos saber *cómo* ocurrió algo, mas no podemos saber *por qué* sucedió.

Por lo que se refiere al advenimiento de la noosfera, vemos en torno a nosotros y en cada una de las etapas los resultados empíricos de ese proceso «incomprensible». Así, por ejemplo, esa rareza mineralógica

¹⁸ La última edición revisada de mis *Oчерки Геохимии* (Problemas de Geoquímica) apareció en 1934. En 1926, vio la luz la edición rusa de *Бiosфера* (La Biosfera), y en 1929 la edición francesa. Mis *Биогеохимические Очерки* (Estudios de Biogeoquímica) se publicaron en 1940. La edición de *Проблемы Биогеохимии* (Problemas de Biogeoquímica) se inició en 1940 (Una traducción resumida al inglés de la Parte II apareció, editada por G. E. Hutchinson, en *Trans. Conn. Acad. Arts Sci.*, vol. 35, 1944). La Parte III se encuentra en imprenta. *Oчерки геохимии* se ha traducido al alemán y al japonés.

¹⁹ Las conferencias de Le Roy han sido publicadas solamente en francés: *L'exigence idéaliste et le fait d'évolution*, París, 1927, p. 196.

²⁰ A. LOTKA, *Elements of Physical Biology*, Baltimore, 1925, pp. 405 y s.

que es el hierro nativo se produce actualmente por miles de millones de toneladas. El aluminio nativo, que nunca existió antes en nuestro planeta, se produce ahora en cualquier cantidad que se desee. Lo mismo es cierto en lo que se refiere a las innumerables combinaciones químicas artificiales (minerales «culturales» biogénicos) recientemente creadas en nuestro planeta. El número de tales minerales artificiales se encuentra en constante crecimiento. Se incluyen aquí todas las *materias primas estratégicas*. Desde el punto de vista químico, la faz de nuestro planeta, la biosfera, está siendo profundamente transformada por el hombre, tanto de forma consciente como, aun en mayor medida, inconscientemente. La envoltura aérea de la tierra y todas sus aguas naturales están siendo modificadas por el hombre física y químicamente. En el siglo XX, y como resultado del crecimiento de la civilización humana, los mares y las partes de los océanos más cercanas a la tierra firme se han ido transformando de forma cada vez más notoria. Como resultado de todo ello, el hombre debe tomar más y más medidas con el fin de preservar para las generaciones futuras la riqueza de los mares, hasta ahora sin pertenencia a nadie. Junto a ello, el hombre ha ido creando nuevas especies y razas de animales y plantas. Parece que será posible realizar en el futuro los bellos sueños contenidos en los cuentos: el hombre está intentando transformar los límites de este planeta para entrar en el espacio cósmico, y probablemente lo logrará.

En este momento no podemos permitirnos pasar por alto el hecho de que, en la gran tragedia histórica en que nos encontramos, hemos escogido de forma primaria la senda correcta que lleva a la noosfera. Digo de forma correcta, en la medida en que toda la historia de la humanidad va en esta dirección. Los historiadores y los líderes políticos no hacen sino comenzar a aproximarse a tener cierta comprensión de los fenómenos de la Naturaleza desde este punto de vista. En este sentido, es muy interesante el enfoque del problema que muestra Winston Churchill (1932), desde su perspectiva de historiador y dirigente político²¹.

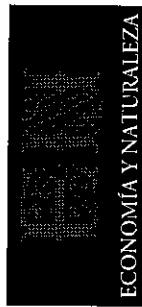
La noosfera es la última de las muchas etapas habidas en la evolución de la biosfera en la historia geológica. El curso seguido por esa evolución sólo empieza a sernos evidente gracias al estudio de algunos de los aspectos del pasado geológico de la biosfera. Voy a permitirme citar unos pocos ejemplos. Hace quinientos millones de años, en la era geológica cámbrica, aparecieron por vez primera en la biosfera formaciones de esqueletos de animales, ricos en calcio; las correspondientes a las plantas aparecieron más de dos mil millones de años antes. Ese fundamento de calcio de la materia viva, totalmente desarrollado en la actualidad, fue uno de los más impor-

²¹ W. S. CHURCHILL, *Amid These Storms: Thoughts and Adventures*, Nueva York, 1932, pp. 274 y ss. Tengo la intención de volver a tratar este problema en otra ocasión.

tantes factores evolutivos dentro del cambio geológico de la biosfera²². Otro cambio de no menor importancia en la biosfera tuvo lugar hace entre setenta y ciento diez millones de años, en la época del sistema cretácico, y especialmente durante la era terciaria. Fue en esta época cuando se formaron por vez primera los bosques a los que tanto valoramos. Se trata de otro gran estadio evolutivo, análogo al de la noosfera. Probablemente fue en estos bosques en los que apareció el hombre, aproximadamente hace quince o veinte millones de años.

Ahora vivimos en el período de un nuevo cambio geológico evolutivo en la biosfera. Nos encontramos entrando en la noosfera. Este nuevo proceso geológico fundamental se está desarrollando a un ritmo imperioso, y es que nuestros ideales democráticos estén sintonizados con los procesos geológicos fundamentales, con las leyes de la Naturaleza y con la noosfera. De ese modo, podremos encarar el futuro con confianza. Está en nuestras manos. No podemos dejarlo escapar.

²² En la segunda parte de mi obra *The Chemical Structure of the Biosphere* (véase la nota 7), considero el problema de las funciones biogeoquímicas de los diferentes organismos.



1. *Los principios de la economía ecológica*
Joan Martínez Alier (ed.)
2. *Economía de los recursos naturales: un enfoque institucional*
Federico Aguilera Klink (ed.)
3. *La Ley de la Entropía y el proceso económico*
Nicholas Georgescu-Roegen
4. *La fertilización en los sistemas agrarios. Una perspectiva histórica*
Ramón Garrabou y José Manuel Naredo (eds.)
5. *Principios de bioeconomía*
René Passet
6. *Sistemas de producción e incidencia ambiental del cultivo en suelo enarenado y en sustratos*
J. López-Gálvez y J. M. Naredo
7. *Economía del agua en España*
Varios autores
8. *La gestión del agua de riego*
J. López-Gálvez y J. M. Naredo (eds.)
9. *La Biosfera*
V. I. Vernadsky



1. *Mecenazgo y conservación del patrimonio artístico: reflexiones sobre el caso español*
Varios autores
 2. *Palacios Reales en España. Historia y arquitectura de la magnificencia*
Varios autores
 3. *Arte y Música en el Museo del Prado*
A. Benito, T. Fernández y M. Pascual
- En preparación**
- Pintura española de vanguardia (1950-1990)*
Varios autores



1. *Hacia una estrategia española de competitividad*
Álvaro Espina Montero
2. *La economía española en un escenario abierto*
Varios autores
3. *El empleo en España y Europa.*
Un análisis comparado por sectores
Centro de Estudios Económicos Fundación Tomillo
4. *Las cuentas de la educación en España*
y sus comunidades autónomas: 1980-1992
Varios autores
5. *Ética y empresa: una visión multidisciplinar*
Varios autores
6. *Rentabilidad de la ética para la empresa*
A. Cortina (dir.), A. Castiñeira, J. Conill, A. Domingo,
D. García, F. Lozano y J. M. Lozano



1. *Desigualdad y clases sociales.*
Un seminario en torno a Erik O. Wright
Varios autores
 2. *Pensar la igualdad y la diferencia. Una reflexión filosófica*
Manuel-Reyes Mate (ed.)
 3. *Las desigualdades en España. Síntesis estadística*
Varios autores
 4. *Perspectivas teóricas y comparadas de la igualdad*
Varios autores
 5. *Pobreza, necesidad y discriminación*
Varios autores
 6. *La desigualdad de recursos*
Varios autores
 7. *Las políticas redistributivas*
Varios autores
 8. *Dilemas del Estado de Bienestar*
Varios autores
 9. *Reformas sanitarias y equidad*
Varios autores
- En preparación**
- Educación, vivienda e igualdad de oportunidades*
Varios autores