

LA FOTOSÍNTESIS, BASE DE LA VIDA

Por MANUEL LOSADA

INTRODUCCIÓN

La vida actual en nuestro planeta depende de un proceso único y fundamental, que sólo las plantas verdes y algunas bacterias coloreadas son capaces de realizar: la Fotosíntesis o conversión de la energía del Sol en energía química fisiológicamente útil.

Hay pocos campos en las Ciencias Biológicas que demuestren, tan patentemente como la Fotosíntesis, la influencia que los avances de la Física y de la Química han ejercido en el conocimiento del mundo vivo. La Fotosíntesis, tal como la llevan a cabo las plantas, va acompañada de un intercambio de gases que no puede observarse a simple vista. Esto nos explica por qué, y a pesar de la íntima asociación del hombre con las plantas, la Fotosíntesis pasó inadvertida, incluso a los cerebros más observadores y sagaces, hasta finales del siglo XVIII.

Aristóteles, contemplando una viña en un caluroso día de verano, llegó a la conclusión de que la función de las hojas verdes era la de suministrar sombra a los delicados tallos de las plantas. Según él, las plantas, a diferencia de los animales, obtendrían todo su alimento del suelo, su estómago gigante, en una forma ya predigerida. ¡Cómo iba a pensar el genial filósofo griego que las hojas de las plantas, aparentemente tan indolentes, son factorías activísimas e ideales para la síntesis de materia orgánica a expensas de la energía de la luz!

La Historia de las Ciencias nos enseña que, en general, los métodos naturales de

observación, aplicados por los filósofos, no han permitido descubrir los procesos fundamentales de la Biología. En cambio, las técnicas más artificiales de experimentación, ideadas con intuición y curiosidad por investigadores quizás más incapaces, han hecho posible ir penetrando, paso a paso, en los secretos más sorprendentes de la vida.

Creemos que no ha perdido actualidad, como advertencia preciosa a los investigadores soñadores, el comentario que Priestley hizo, en 1777, al referirse a su descubrimiento de la Fotosíntesis: «He puesto especial cuidado en distinguir los *hechos* de las *hipótesis*... La especulación es una comodidad barata. Lo que más se necesita y, por consiguiente, lo que tiene más valor son hechos nuevos e importantes».

LA FOTOSÍNTESIS Y LA VENTILACIÓN DEL PLANETA.

El descubrimiento de la Fotosíntesis acaeció cuando ingeniosamente comenzaron a aplicarse métodos para medir y caracterizar los gases que durante este proceso se intercambian. Resulta, sin embargo, irónico que fuese el fundador de la Química Neumática, Van Helmont, quien, después de realizar un riguroso experimento cuantitativo sobre la nutrición de las plantas (seguramente el primero en la historia de la Biología), llegase «lógicamente» a la conclusión «errónea». Van Helmont, médico y químico flamenco del siglo XVII, inventor de la palabra gas (del

griego *chaos*, caos) no tuvo en cuenta, al realizar su experimento, el intercambio de gases que tiene lugar en la Fotosíntesis y concluyó inocentemente que los vegetales se alimentan y, en consecuencia, se componen, fundamentalmente de agua.

En 1772, Priestley, usando medios tan simples como un ratón y una vela, encontró que las plantas purifican la atmósfera viciada por la respiración de los animales. Los experimentos de Priestley fueron los primeros que, de una manera racional, explicaron por qué el aire de nuestro planeta permanece puro, a pesar de que continuamente el hombre y los animales tienden a hacerlo nocivo.

El impacto del descubrimiento de la Fotosíntesis no fue, pues, en la Física, la Química o la Botánica, sino en lo que hoy llamaríamos la Salud Pública. Que ésto fue así quedó reflejado en la siguiente comunicación de sir John Pringle, presidente de la Royal Society, con motivo de serle concedida a Priestley, en 1773, la medalla Copley: «Estamos ahora seguros de que ninguna planta crece en vano. Por el contrario, desde el roble del bosque hasta la hierba del campo, todas las plantas son útiles a la Humanidad; y no, necesariamente, porque posean una virtud particular, sino porque forman parte de un todo que limpia y purifica nuestra atmósfera.»

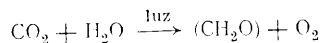
LA FOTOSÍNTESIS Y LA ASIMILACIÓN DEL ANHÍDRIDO CARBÓNICO.

En el verano de 1779, el médico holandés Ingenhousz, entonces en la cumbre de su fama en la corte de la emperatriz María Teresa, se retiró a una casita de campo cerca de Londres, y, después de verificar con paciencia y constancia admirables 500 experimentos rigurosos, descubrió que las plantas o, mejor dicho, los tallos y las hojas de las mismas, purifican el aire impuro sola-

mente cuando están expuestas a la luz del Sol. En la oscuridad se comportan de manera análoga a los animales, y lo vician de nuevo. Ingenhousz explicó más tarde en términos lógicos (siguiendo los nuevos conceptos químicos introducidos por Lavoisier) el significado de sus descubrimientos, al proponer que las plantas rompen, en la luz, el anhídrido carbónico que absorben, quedándose con el carbono como alimento, y desprendiendo el oxígeno.

Varios años más tarde, De Saussure demostró que el agua interviene también en el proceso fotosintético. Según él, las plantas asimilan el carbono procedente del anhídrido carbónico absorbido no como tal, sino combinándolo con el agua, la cual pierde de este modo su estado líquido.

Desde entonces, la Fotosíntesis se ha identificado con la asimilación del anhídrido carbónico, y se ha definido de acuerdo con la siguiente ecuación:



(CH_2O) representa el «hidrato de carbono» que la planta sintetiza al combinar el carbono del anhídrido carbónico con el agua.

A fines del siglo XIX, el famoso microbiólogo ruso Winogradsky encontró un grupo de bacterias desprovistas de pigmentos fotoactivos, que podían vivir en la oscuridad sintetizando materia orgánica a expensas del anhídrido carbónico.

El descubrimiento de las bacterias quimiosintéticas por Winogradsky demostraba, sin lugar a dudas, no sólo que la asimilación del anhídrido carbónico no era exclusiva de las plantas verdes, sino que además podía ocurrir en ausencia de la luz. Sin embargo, la excepcional importancia bioquímica de este decisivo hallazgo no fue apreciada hasta mucho más tarde, cuando, con el uso de los isótopos, se puso de manifiesto que la

asimilación del anhídrido carbónico es común a todas las células vivas, fotosintéticas y no fotosintéticas. Ya pertenecen a la Historia los tiempos en que Pasteur comentaba con sorpresa el descubrimiento de Claude Bernard sobre la formación de una especie de almidón en el hígado de los perros, síntesis que ocurría aunque se les alimentase con carne. Se creía entonces que la fabricación de azúcares era un privilegio exclusivo de las plantas, pues se tenía la convicción firme de que los vegetales eran los únicos seres vivos capaces de asimilar anhídrido carbónico.

LA FOTOSÍNTESIS Y LA FOTOLISIS DEL AGUA.

En 1931, van Niel, trabajando con bacterias fotosintéticas verdes y purpúreas; demostró que la liberación de oxígeno no es esencial en fotosíntesis, y lanzó una de las hipótesis más geniales y útiles en la moderna Biología. Según van Niel, la reacción básica y fundamental en Fotosíntesis no es la rotura de la molécula de anhídrido carbónico por la luz, como proponía Ingenhousz, sino la fotólisis de la molécula de agua en dos mitades: una reductora (H), y otra oxidante (OH). La mitad reductora reaccionaría, en la oscuridad, con el anhídrido carbónico reduciéndolo a azúcar, mientras que la mitad oxidante, también en la oscuridad, produciría oxígeno en las plantas verdes y sería neutralizada por un agente reductor externo en las bacterias fotosintéticas.

Los trabajos de Hill, en 1937, usando cloroplastos aislados, y los de Ruben y colaboradores, en 1943, empleando oxígeno isotópico, confirmaron experimentalmente la exactitud de la hipótesis de van Niel, al demostrar que el oxígeno liberado fotosintéticamente por las plantas procede del agua.

EL CICLO DE LA ASIMILACIÓN DEL ANHÍDRIDO CARBÓNICO.

Durante los últimos diez años, las investigaciones de Calvin, Horecker, Ochoa, Arnon, Racker y otros, trabajando principalmente con isótopos radiactivos de carbono y fósforo, a niveles celulares, subcelulares y enzimáticos, han puesto de manifiesto que la asimilación del anhídrido carbónico transcurre en los cloroplastos y en la oscuridad, a expensas de la energía que suministran las reacciones fotoquímicas de la Fotosíntesis. La ruta que sigue el anhídrido carbónico al asimilarse fotosintéticamente es inversa a la de degradación de hexosas vía pentosa-fosfatos, con algunos pasos glucolíticos y otros específicos intercalados. El ciclo de la asimilación del anhídrido carbónico no es exclusivo de los organismos fotosintéticos, pues ha sido encontrado íntegro por Aubert y Trudinger en bacterias quimiosintéticas.

LA FOTOSÍNTESIS COMO UN PROCESO DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA.

El problema de la Fotosíntesis parecería resuelto con lo antedicho si la Fotosíntesis fuera tan sólo, como hasta ahora se había venido admitiendo confusamente, la asimilación del anhídrido carbónico. Sin embargo, las investigaciones realizadas en época reciente, de manera especial las llevadas a cabo por el grupo que dirige el profesor Arnon, han demostrado que el proceso clave y típico de la Fotosíntesis es la conversión (en condiciones que excluyen la asimilación del anhídrido carbónico) de la energía luminosa en energía química, bajo la forma de derivados muy ricos en energía y de gran poder reductor.

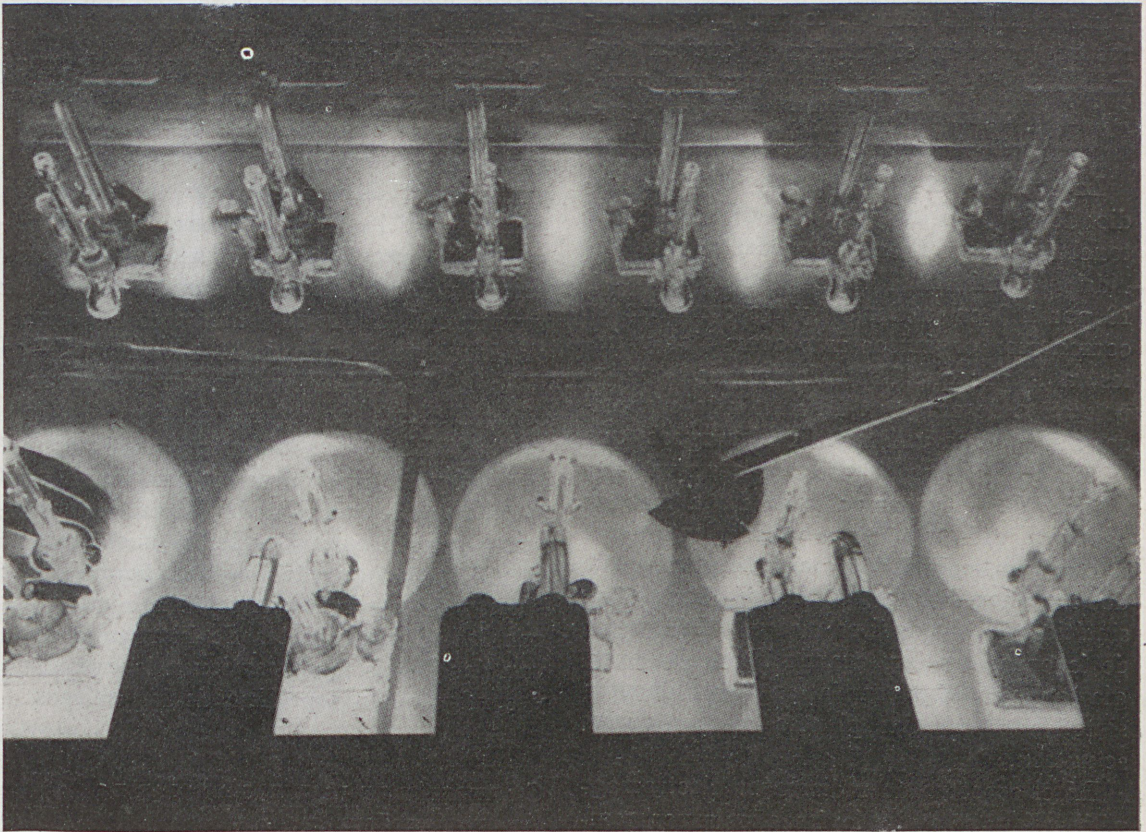
La energía química que la célula obtiene fotosintéticamente, puede ser utilizada más tarde, y en la oscuridad, en reacciones metabólicas endergónicas de muchos tipos. De he-

cho, se han descubierto últimamente en bacterias, algas y plantas superiores, ejemplos variadísimos de fotosíntesis, entre los que destacamos la asimilación, dependiente de la luz, de nitrato, nitrógeno gas, ácidos orgánicos, aminoácidos y monosacáridos. Por tanto, aunque la asimilación del anhídrido carbónico continúe siendo el tipo más importante, cuantitativamente, de fotosíntesis en nuestro planeta, no puede olvidarse que es un caso particular de Fotosíntesis, y que lo característico de todas las fotosíntesis es

la captación y transformación de la energía solar en energía química.

LA FOTOSÍNTESIS Y LA ENERGÍA SOLAR.

La Fotosíntesis, indudablemente uno de los procesos más trascendentales y fantásticos de la Historia de nuestro planeta, presenta aspectos innumerables, a cual más interesante, que no es posible discutir en este breve artículo (físico, químico, biológico,



Fotosíntesis con luz artificial, llevada a cabo en el aparato de Warburg, utilizando cloroplastos aislados de las células vivas de espinaca. (Según la técnica del profesor Arnon, en cuyo Departamento de Fisiología Celular de la Universidad de California, en Berkeley, ha trabajado varios años el autor de este artículo.)

económico, higiénico, geológico, filosófico, etcétera). Sin embargo, puesto que —como dijimos al comienzo de este artículo— la vida en la Tierra depende, en su aspecto energético, de la conversión de la energía luminosa del Sol en energía química, creemos oportuno y del máximo interés analizar la Fotosíntesis desde este punto de vista, quizás el más sobresaliente en la actualidad.

La energía que, procedente del Sol, cae a mediodía, por metro cuadrado, en una zona como la de Almería, es de 1.000 watios, y la que llega a la superficie de la Tierra alcanza la cifra fantástica de $1,8 \times 10^{17}$ watios. Tendremos una idea de lo que estos números representan, si calculamos que en cuarenta horas el Sol nos suministra una cantidad de energía equivalente a todas las reservas de gas y petróleo.

La energía del Sol fija cada año, por medio de la Fotosíntesis, 200.000 millones de toneladas de carbono procedentes del anhídrido carbónico (90 por 100 en los mares y 10 por 100 en la tierra), y las convierte en compuestos orgánicos más complejos y útiles, a la par que libera la cantidad correspondiente de oxígeno. El anhídrido carbónico, atmosférico y disuelto en las aguas, que se fija en la Fotosíntesis, se renueva, por respiración y descomposición de la materia orgánica, cada trescientos años, mientras que el oxígeno de la atmósfera tiene un ciclo de dos mil años. Todos los seres vivos no fotosintéticos viven indirectamente a expensas de la energía solar, cuando liberan la energía química almacenada en los alimentos sintetizados por las plantas, de los cuales se nutren.

En el espectro de radiaciones electromagnéticas (que se extiende desde los rayos gamma, de 0,001 a 1 Angstroms, hasta las ondas de la radio de hasta 1 kilómetro de longitud) la banda visible al hombre es una zona estrechísima de unas 300 a 1.000 milimicras, en la que se encuentra situada la

Fotobiología. De las radiaciones comprendidas entre estos límites dependen no sólo la visión humana, sino la visión de los otros animales, los movimientos inducidos por la luz de los organismos vivos y, sobre todo, la Fotosíntesis. Aunque existiese vida en otros planetas, la Fotosíntesis o la visión no podrían tener lugar en las zonas del ultravioleta o infrarrojo lejanos, porque las radiaciones de estas frecuencias no son apropiadas para las funciones fotosintéticas o visuales. Nosotros vivimos en un planeta afortunado, porque el 75 por 100 de la energía radiante del Sol cae dentro de los márgenes de la Fotobiología.

La luz, sea cual sea su longitud de onda (es decir, su color), se compone de unas partículas elementales, sin carga eléctrica y con muy poca masa, que se conocen con el nombre de fotones o quanta. La energía de una cierta radiación es tanto mayor cuanto menor es su longitud de onda. En Fotoquímica esta energía se expresa en kilocalorías referidas a un einstein o mol (6×10^{23}) de quanta. Así, la luz roja activa en Fotosíntesis tiene una energía de 40 kilocalorías. Las radiaciones de longitud de onda inferior a 300 milimicras (es decir, con energía superior a 95 kilocalorías) son incompatibles con la vida, y de consecuencias desastrosas para las células, porque desnaturalizan las proteínas y despolimerizan los ácidos nucleicos. Su acción sobre estas delicadas macromoléculas básicas del protoplasma se debe a que rompen los débiles enlaces de hidrógeno y de van der Waals, que mantienen la estructura y configuración específica de las mismas.

CONVERSIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR EN ENERGÍA ELÉCTRICA.

Hasta el año 1954, en que los «Bell Telephone Laboratories» anunciaron el descubrimiento de la batería solar de silicio, se conocían fundamentalmente tres procedimien-

tos para convertir las radiaciones solares en energía eléctrica: la termopila de Seebeck, la célula fotogalvánica de Becquerel, y la célula fotovoltaica de selenio; todas ellas trabajan con un rendimiento inferior al 1 por 100 cuando se exponen directamente a la luz del Sol.

Las células que fabrican los Bell Telephone Laboratories están constituidas por un cristal de silicio con una pequesísima cantidad de arsénico (cristal de tipo *n*), recubierto por una capa muy delgada de silicio con boro (cristal de tipo *p*). Cuando se iluminan estas células, los fotones que contienen energía superior a 1,1 electrón-voltio producen, al ser absorbidos en la zona de contacto entre las capas *n* y *p*, parejas de electrones y «holes». Las baterías se originan cuando estas partículas eléctricas son atraídas en direcciones opuestas por las fuerzas del campo que motiva el propio contacto de los dos tipos de cristales.

Las células de los Bell Telephone Laboratories suministran un voltaje de 0,6 voltios y alcanzan una eficiencia del 11 por 100. Las causas que tienden a disminuir este rendimiento son las siguientes: 1) parte de la energía radiante que cae sobre las células, se refleja; 2) aproximadamente el 30 por 100 de las parejas electrón-hole que se forman, se pierden por recombinación al neutralizarse; 3) parte de la energía eléctrica que se genera, se disipa dentro de las propias células, y 4) los fotones con energía superior a 1,1 electrón-voltio (energía que se precisa para producir una pareja electrón-hole en el silicio), es decir, los que corresponden a radiaciones por debajo del infrarrojo, son demasiado energéticos, y el exceso de energía se pierde como calor.

LA CLOROFILA Y EL PRIMER ACTO DE LA FOTOSÍNTESIS.

Durante los últimos años, los investigadores en Fotosíntesis han puesto todo su

añan en explicar las reacciones claves de este proceso, es decir, la conversión de la energía luminosa en energía química. Es evidente que la Fotosíntesis comienza con la absorción de los cuanta de luz por los pigmentos fotoactivos, y, aunque son varios los pigmentos que pueden tomar parte activa en ciertos tipos de fotosíntesis, es indudable que las clorofilas son los pigmentos fotosintéticos por excelencia.

El espectro de absorción de la clorofila presenta dos máximos hacia el rojo y el violeta, y un mínimo hacia el verde. La molécula de clorofila debe su capacidad para absorber la luz, es decir, su color, a que posee un sistema regular de enlaces conjugados (simples y dobles, alternando) con electrones particularmente móviles, llamados electrone π . Estos electrones no están asociados con ciertos átomos o enlaces, sino con el sistema conjugado como tal, y requieren una cantidad relativamente pequeña de energía para ser excitados a un nivel más alto de energía. El sistema de enlaces conjugados de la clorofila es de tipo anular (núcleo porfirínico), y los electrones π pueden no sólo oscilar, sino también circular. Al absorber un quantum de luz, la molécula de clorofila se excita, y puede conservar la energía absorbida un cierto tiempo o transferirla inmediatamente.

En 1942, Lewis y Lipkin encontraron que, al iluminar una sustancia colorante a la temperatura del aire líquido, se producía el mismo compuesto que al oxidarla a la temperatura ambiente, y concluyeron que uno de los procesos fotoquímicos más corrientes es la pérdida de un electrón por una molécula activada que, como consecuencia, se oxida. Apoyándose en estos hechos experimentales, Arnon postuló en 1959 una teoría para explicar el primer acto de la Fotosíntesis; acto que, según Livingston, era demasiado complicado para los físicos y, por tanto, *uninteresting*. La teoría de Arnon concluye

que el primer acto de la Fotosíntesis es de naturaleza electrónica. La molécula de clorofila (unida a una proteína) se excita al absorber un quantum de luz y expelle un electrón a un potencial muy reducido, por lo que ella queda oxidada. El potencial eléctrico de la molécula de clorofila, después de haber sido excitada por un fotón de luz roja, corresponde a 1,9 voltios por electrón (es decir, 40 kilocalorías por einstein). Los experimentos de Arnold y Clayton, en 1960, con cromatóforos de bacterias fotosintéticas, han demostrado la naturaleza electrónica del primer acto de la Fotosíntesis.

LA CORRIENTE DE ELECTRONES INDUCIDA POR LA LUZ EN LA FOTOSÍNTESIS.

Si el electrón expulsado de la molécula de clorofila, después de haber sido ésta excitada, cae directamente a su nivel inicial, hay emisión de luz y la clorofila fluoresce con su color rojo característico. En cambio, si vuelve dando un rodeo y pasando por ciertas estaciones enzimáticas transformadoras, la energía que se libera queda almacenada bajo la forma de enlaces de pirofosfato como ATP. La molécula excitada de clorofila es, pues, una especie de batería eléctrica y puede actuar, por tanto, simultáneamente de donadora y aceptora de electrones. Los electrones que cede la clorofila son los que de una manera más o menos directa reducen, según los tipos de fotosíntesis, el anhídrido carbónico, el nitrógeno gas, los iones de hidrógeno, etc. Los electrones que, a su vez, acepta la clorofila, tienen su origen en el agua (plantas verdes) o en ciertos compuestos inorgánicos u orgánicos (bacterias fotosintéticas). El desprendimiento de oxígeno que se observa en la fotosíntesis de las plantas se debe a que el agua (o sus iones hidroxilos) dona electrones a la clorofila, excitada por la luz, y al oxidarse libera oxíge-

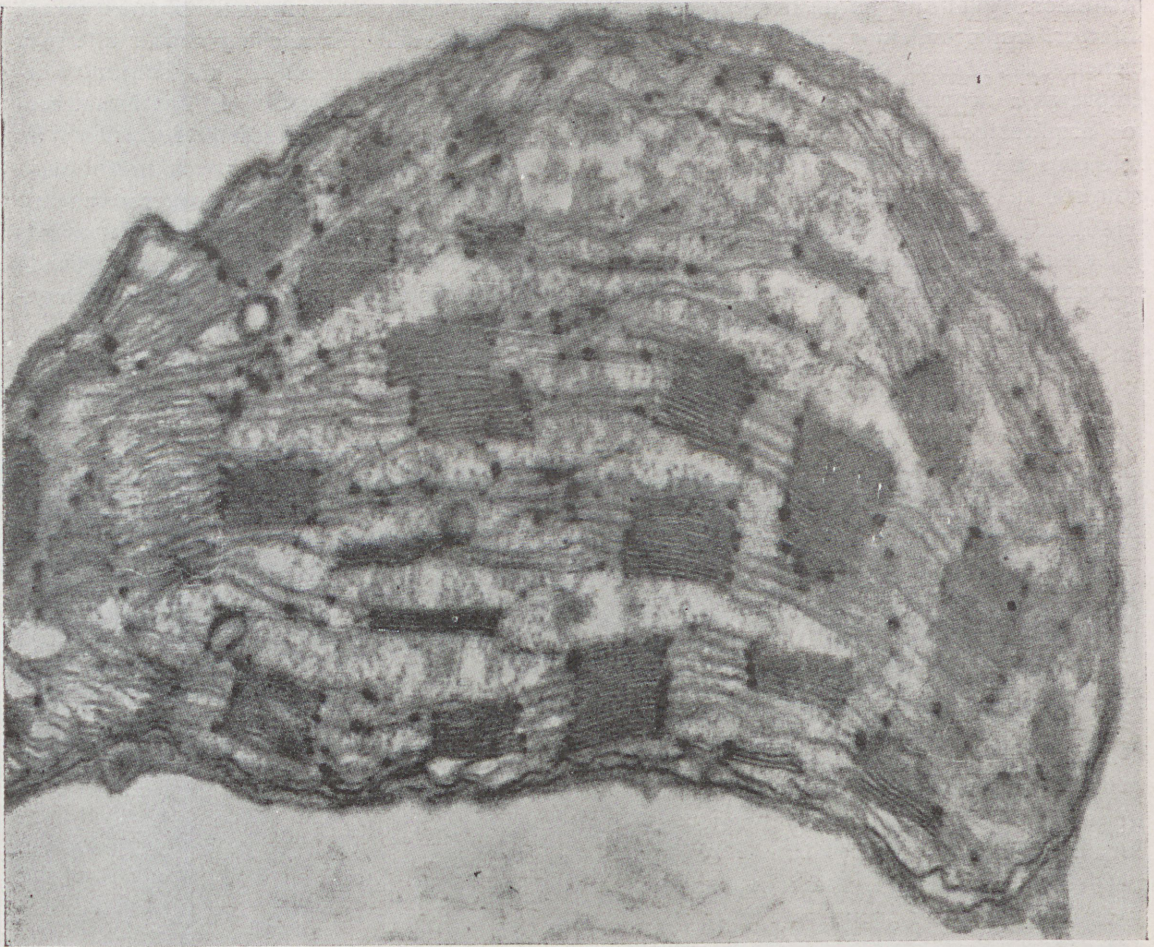
no. Es el mismo tipo de reacción que tiene lugar en la electrolisis del agua.

Según Arnon, la Fotosíntesis, como tal, termina con la conversión de la energía luminosa en los productos químicos característicos de las reacciones fotoquímicas de la Fotosíntesis, a saber: compuestos muy ricos en energía y compuestos de gran poder reductor. Los productos de oxidación de las fotosíntesis, como el oxígeno en las plantas o el azufre en las bacterias, son, simplemente, los productos de desecho (procedentes de los substratos que actúan de donadores de electrones) que los organismos fotosintéticos excretan.

ESTRUCTURA Y FUNCIÓN EN FOTOSÍNTESIS

Las hojas de las plantas no son macizas, sino que están constituidas por infinidad de células. De éstas, las especializadas en los procesos fotosintéticos contienen un elevado número de corpúsculos verdes o cloroplastos. Estos orgánulos están diferenciados, a su vez, en estroma y grana. La clorofila y los enzimas que toman parte en las reacciones fotoquímicas están localizados en los grana, que son por tanto de color verde, mientras que el estroma contiene los enzimas que efectúan la asimilación del anhídrido carbónico y las otras reacciones oscuras de la fotosíntesis. Los rayos X y, más recientemente, el microscopio electrónico, han revelado que, incluso los grana, no son homogéneos, sino que aparecen formados por una serie de discos, en los que la clorofila y ciertos lípidos y proteínas fundamentales están dispuestos ordenadamente en capas.

La organización y estructura de las plantas es tan perfecta que un árbol de una superficie de algunos metros cuadrados ocupa en realidad, desde un punto de vista funcional, el área de una extensa finca. Los espectaculares avances logrados en los últimos años



La Fotosíntesis la llevan a cabo los corpúsculos verdes de las células de las hojas, llamados cloroplastos. La fotografía muestra un *cloroplasto de maíz* al microscopio electrónico (aumentado unas 30.000 veces). La clorofila se localiza en los «grana» de color verde, que semejan, debido a su estructura, pilas de monedas. En los grana se transforma la luz en energía química. Entre ellos se encuentra el «estroma» incoloro, donde tienen lugar las reacciones «oscuras» de la Fotosíntesis. (Cortesía de A. E. Vatter.)

en Fotosíntesis han sido posibles gracias a los esfuerzos coordinados de físicos, químicos, fisiólogos y morfólogos. La Fisiología Vegetal o la Animal no pueden estudiarse sin base anatómica o histológica; tampoco la Fisiología celular sin base bioquímica, ni la Bioquímica sin base fisicoquímica.

Cuando estudiamos la Fisiología de la cé-

lula y de los orgánulos celulares, la Genética, la respiración, la Fotosíntesis o el metabolismo intermediario, comprendemos por qué existen las células, los cromosomas, las mitocondrias, los cloroplastos, los genes, los enzimas, los átomos, los electrones y los cuanta; por qué, como ha dicho Szent Gyorgi, Dios ha creado la vida basada en procesos

cuánticos. Igual que, en un nivel mucho más inferior, comprendemos, al estudiar otras ciencias, las razones que han impulsado a las empresas a organizar y dividir el trabajo, a los arquitectos a construir escaleras, a los relojeros a idear ruedas dentadas, a los economistas a utilizar monedas. Los procesos biológicos son perfectos porque están sabiamente y jerárquicamente coordinados, y porque las reacciones metabólicas transcurren a niveles electrónicos y moleculares, paso a paso, y sin brusquedades.

LUZ, ORDEN Y VIDA.

La organización y la estructura son fundamentales para la vida. Para que exista vida es necesario que se mantenga un equilibrio dinámico e inestable de reacciones físico-químicas organizadas, que se sucedan y concatenen en perfecto orden y armonía. La muerte, en sus niveles biológico y espiritual, sobreviene si se produce un estado de paro, inactividad o reposo.

Hace treinta y cinco años, el gran físico-químico Lewis, de la Universidad de California, en Berkeley, escribía: «Las criaturas hacen trampas en el juego de la Física y de la Química, porque sólo ellas parecen ser capaces de afrontar la corriente de procesos aparentemente irreversibles. Estos procesos destruyen; los seres vivos construyen. Mientras el resto del mundo parece moverse hacia un nivel muerto de uniformidad, los organismos vivos producen sustancias nuevas y formas más intrincadas».

lc Sin embargo, cuando examinamos cuidadosamente los hechos, vemos que los seres vivos no hacen trucos termodinámicos. Los organismos están de hecho transformándose de una manera espontánea y continua, y, en consecuencia, degradándose. Esto no es una característica peculiar suya, puesto que ~~existe~~ ^{que existen} fuera de la Biología: una persona que hay muchos ejemplos de procesos si-

que no cuida sus vestidos o su higiene, pronto se vuelve haraposa y sucia; una casa abandonada se derrumba; un conjunto ordenado de fichas, olvidado en una mesa, acaba en el suelo en completo desorden; un país que pierde el control y la moral pasa de un estado de orden y progreso a otro de caos y retroceso; y, en un plano más elevado, un hombre que no se preocupa de su conciencia ni de su vida espiritual degenera

La marcha hacia niveles más bajos, más uniformes y estables, es una consecuencia de la ley general del aumento de entropía. ¿Qué tienen, entonces, los organismos para poder mantenerse vivos, en un estado de equilibrio inestable, evitando un aumento de entropía que les conduciría inevitablemente a la inercia del equilibrio estable de la muerte? La respuesta a la incógnita de la vida nos la da Dios, que, con su infinita sabiduría, tanto más evidente cuanto más sabemos, ha dotado a los seres vivos de mecanismos inverosímiles para que puedan regenerarse continuamente, y, de este modo, mantenerse en un estado de equilibrio que, por ser inestable, tiende a deshacerse y derrumbarse. También Dios, con su infinita misericordia, nos ha dado gratuitamente a los hombres pecadores la facultad de arrepentirnos, para que podamos salir del estado miserable de confusión y de caos que supone el pecado, y vivir con orden en un estado de gracia.

Pero no basta con poseer ciertos mecanismos o facultades. Caer o pecar significa degenerarse malgastando energías, mientras que levantarse o arrepentirse supone regenerarse haciendo buen uso de ellas. Pasar de un estado inferior o desordenado a otro superior u ordenado, requiere un esfuerzo, una concentración, un consumo de energías que hay que sacar de algún lado. El atleta mantiene su excelente vigor gracias a su ascetismo, al continuo control y ejercicio físico que practica. El santo evita la muerte

del pecado porque sin cesar está haciendo ejercicios espirituales. Pero tanto el atleta como el santo necesitan, para mantenerse en forma, consumir continuamente alimentos materiales o espirituales.

Los organismos pueden, pues, captar y transformar energías, pero no crearlas. Las células vivas, que trabajan a temperatura y presión más o menos constantes, no pueden usar calor como fuente de energía; en esto se diferencian de las máquinas de vapor creadas por el hombre, las cuales requieren un salto de temperatura para transformar ca-

lor en trabajo. En cambio, las células disponen de mecanismos que les permiten utilizar isotérmicamente la energía luminosa del Sol o la contenida en ciertos compuestos químicos, inorgánicos u orgánicos, para mantenerse vivas a expensas de las energías que consumen.

Schrödinger, mundialmente famoso por los trabajos de mecánica cuántica que le valieron el premio Nobel de Física, escribió en 1944, desafiando el papel de especialista que la ciencia moderna impone, un precioso libro que tituló *What is life*. En el capítulo



Radioautografía de un cromatograma mostrando los productos radioactivos de la Fotosíntesis que efectúan los cloroplastos aislados cuando se les suministra anhídrido carbónico marcado con Carbono-14.
(Departamento de Fisiología Celular de la Universidad de California, en Berkeley.)

«Orden, Desorden y Entropía», dice: «los seres vivos se alimentan de entropía negativa».

Cuando un sistema bioquímico se transforma isotérmicamente de un modo espontáneo, experimenta una pérdida de energía libre, de acuerdo con la ecuación $\Delta F = \Delta H - T\Delta S$, donde ΔF , ΔH y ΔS son, respectivamente, los cambios de energía libre, entalpía y entropía del sistema que reacciona, y T la temperatura absoluta a la que la transformación se produce. En la célula viva, la energía ΔF que se libera es en parte atrapada inmediatamente y almacenada como energía química y el resto se pierde como calor. Cuando la transformación que se produce va acompañada de un aumento de entropía, el sistema se degrada y necesita, para volver a su estado inicial, una cantidad de energía igual a $T\Delta S$, que le permita liberarse del aumento de entropía que había sufrido. La energía que se precisa, durante este proceso regenerativo, para disminuir la entropía del sistema degradado, se transforma y elimina como calor.

En los organismos vivos se están produciendo efectivamente y de una manera continua, transformaciones que llevan consigo cambios de entropía, y que pueden deberse a iones que se concentran y diluyen; a moléculas que se pliegan y despliegan, que se rompen y sintetizan, que se ordenan y desordenan; a compuestos que se hidratan y deshidratan, que se disuelven y cristalizan; a estructuras que se derrumban y reconstruyen, etc. La vida puede también manifestarse de otras formas, y los seres vivos crecen, se multiplican, emiten luz, sonidos, etcétera. Sin embargo, estas manifestaciones son sólo una variedad, una extensión de los procesos vitales fundamentales. El orden que existe en los seres vivos se mantiene a expensas del orden que contienen los alimentos que ellos consumen y destruyen.

Boltzmann, uno de los fundadores de la

Termodinámica, comprendió ya en 1886, como indica en el siguiente párrafo, el significado que los cambios energéticos tienen en la vida de los organismos: «En el mundo vivo la lucha universal por la existencia no es una lucha por materias primas, ya que todos los organismos pueden encontrar éstas en abundancia en el aire, agua o suelo, sino una lucha por la entropía asequible en las transformaciones de energía del Sol caliente a la Tierra fría. Las plantas verdes extienden la enorme superficie de sus hojas para aprovechar al máximo este cambio, y convierten, por medio de procesos todavía desconocidos, la energía del Sol (antes de que se enfríe a la temperatura de la Tierra) en energía química. Las síntesis químicas que tienen lugar son todavía un misterio en nuestros laboratorios, y los productos de estas cocinas químicas constituyen el botín por el cual pelea el mundo animal».

Hoy podemos decir que los organismos luchan para adquirir sistemas bioquímicos con los adecuados saltos de potencial, porque, en último término, depende de ellos su existencia. Los organismos fotosintéticos generan ellos mismos estas diferencias de potencial a expensas de la luz absorbida, mientras que los demás las adquieren con las sustancias de que se alimentan. Los sistemas de óxido-reducción son fundamentales en Biología, porque sin ellos no hay posibilidad de obtener energía y, en consecuencia, no puede haber vida. Para que una reacción suministre energía, es decir, para que sea exergónica, es condición *sine qua non* que exista una diferencia de potencial mayor que cero entre los sistemas aceptor y donador de electrones que reaccionan. La energía libre, ΔF , que se libera cuando se oxida un mol de compuesto reductor, viene expresada en kilocalorías por la ecuación $\Delta F = -23 \cdot n \cdot \Delta E$, donde ΔE es la diferencia de potencial en voltios entre los sistemas reaccionantes, y n el número de electrones que la sustan-

cia reductora cede cuando se oxida. Tenía razón el gran microbiólogo van Kluyver cuando afirmó que el carácter más esencial del estado viviente es la corriente continua y dirigida de electrones que tiene lugar en las células vivas.

La vida descansa, pues, en sistemas que están transformando continuamente energía electrónica en energía química. Esta energía, que los electrones liberan cuando saltan de niveles más altos o reducidos a otros más bajos u oxidados, queda almacenada, bajo la forma de enlaces de pirofosfato, en el «dólar» de la Bioquímica, el ATP.

Los estudios de Bioquímica comparada, iniciados en época relativamente reciente por van Kluyver y Donker, han puesto de manifiesto la sorprendente unidad bioquímica que existe entre los seres vivos. Como dice ingeniosamente Szent Gyorgyi, no hay realmente diferencias entre un rey y una col. Los organismos no se diferencian esencialmente en los procesos metabólicos que realizan, sino en cómo adquieren y transforman las energías (físicas o químicas) que necesitan para llevar a cabo tales procesos.

Si el mundo fuese una despensa bien nutrida que no se agotase, un excelente servicio de Intendencia que nutriese indefinidamente a todos los seres vivos que en él se alojan, es casi seguro que (como ocurrió cuando aparecieron las primeras formas vivas rudimentarias) la importancia de la Fotosíntesis sería, caso de existir, mucho menor; si no en el campo científico, al menos en el práctico.

En la actualidad, si excluimos un pequeño grupo de bacterias quimiosintéticas, que viven a expensas de la energía contenida en ciertos compuestos minerales, casi todos los organismos obtienen directa o indirectamente del Sol la energía que precisan para vivir. La existencia del mundo vivo depende por tanto de las plantas verdes, que captan, transforman y distribuyen la energía solar. Este

concepto fué expresado por Mayer, en 1886, tres años después de enunciar el principio de la conservación de la energía, diciendo: «Las plantas son capaces de absorber y convertir la energía, pero no de crearla».

El orden y la organización en que descansa la vida de todos los seres vivos se mantiene, pues, a expensas de la luz del Sol.

EVOLUCIÓN Y FOTOSÍNTESIS.

Es difícil concebir la génesis de las primeras formas vivas a partir de compuestos inorgánicos exclusivamente. Una hipótesis mucho más racional sobre el origen de la vida es la propuesta por Haldane, Oparin y Horowitz. Ellos suponen que, mucho antes de que aparecieran los primeros tipos celulares en la Tierra, la materia orgánica estaba presente en cantidad y variedad con potencialidad suficiente para originar, por condensaciones y sustituciones, moléculas de complejidad creciente. Esta «sopa» diluida de compuestos orgánicos se originó, probablemente, al reaccionar los carburos y nitruros de la corteza terrestre con el vapor de agua sobrecalentado de la atmósfera. Es posible que algunas de las radiaciones solares de onda corta desempeñaran también un papel importante en los primeros estadios de la vida, al activar las interacciones de las moléculas orgánicas en las capas superficiales de los mares, y dar lugar a la formación de moléculas más complicadas.

Los primeros organismos vivos no aparecieron de pronto ni por accidente, sino de acuerdo con un plan divino, muy lenta y gradualmente, al ir integrándose las moléculas más complejas en otras de organización y estructura superior.

Se cree hoy, con fundamento, que, en un principio, la atmósfera no contenía oxígeno ni nitrógeno, y que estaba prácticamente desprovista de anhídrido carbónico. El tipo de metabolismo de las formas primitivas fué

vo, pues, que ser completamente anaeróbico, pero, más pronto o más tarde, esta vida fermentativa tenía que terminar, al agotarse las sustancias orgánicas asequibles. Sólo había una posibilidad para que la vida continuase sobre la Tierra: que los organismos aprendiesen a captar y utilizar la luz del Sol. Esta posibilidad estaba ya prevista por el Creador, y la Fotosíntesis hizo su aparición cuando las células aprendieron a sintetizar las porfirinas que habían de dar lugar a las clorofilas. Al principio las células fotosintéticas estaban sólo interesadas en convertir la energía luminosa en energía química. Como el medio era entonces anaeróbico y reductor, y no contenía todavía anhídrido carbónico, el tipo primitivo de Fotosíntesis no debió estar ligado a la asimilación del anhídrido carbónico y a la liberación de oxígeno. Es decir, al comienzo la Fotosíntesis no fue del tipo de la que hoy llevan a cabo las plantas verdes, sino otra mucho más simple, idéntica o parecida a la que podemos observar en las bacterias fotosintéticas, reliquias vivientes de tiempos muy remotos.

Poco a poco, sin embargo, la atmósfera se fue cargando de anhídrido carbónico procedente de las moléculas orgánicas, que componían el «caldo» en que la vida se desenvolvía, y las reservas de compuestos reductores (hidrógeno, compuestos reducidos de azufre, ácidos orgánicos, etc.), se fueron agotando. La única manera de recuperar el carbono, que se escapaba como anhídrido carbónico, era fijarlo, y para ésto hacía falta hidrogenarlo con un compuesto natural que no se acabase. El agua, el substrato biológico por excelencia, era muy abundante, pero no podía suministrar hidrógenos (o electrones) para reducir el anhídrido carbónico, puesto que de por sí es muy mal reductor. Había una posibilidad sin embargo; que los electrones del agua pasasen a un nivel mucho más alto, al ser excitados con la ayuda de la energía solar absorbida por la clorofila. También este paso estaba ya previsto, y el salto

evolutivo, decisivo en la Historia de la Biología y de la Humanidad, ocurrió cuando las algas adquirieron una nueva y adicional reacción fotosintética que las bacterias no podían efectuar: la fotooxidación del agua por la clorofila con desprendimiento de oxígeno.

Al liberarse el oxígeno del agua, y acumularse en la atmósfera, se formó en los altos estratos de la misma, por la acción (¡también fotoquímica!) de la luz solar, una capa de ozono. Esta capa, situada a una altura de 22 a 25 kilómetros, absorbe fuertemente a 320 milimicras y es prácticamente opaca por debajo de 290 milimicras. De este modo, al filtrarse los rayos solares y quedar privados de las radiaciones de onda corta, las capas bajas de la atmósfera quedaron libres de radiaciones antibióticas, y los organismos vivos emergieron de las aguas e invadieron la Tierra.

La presencia de oxígeno, por un lado, y la de sustancias orgánicas sintetizadas por las plantas fotosintéticamente, por otro, hicieron posible la respiración aerobia, que soportó la vida de muchos tipos de nuevos organismos, entre ellos el hombre. Un hecho interesante en la evolución bioquímica de los organismos es, de acuerdo con las recientes investigaciones de Mühlenthaler y Frey-Wissling, la relación filogenética común de los orgánulos celulares que llevan a cabo la Fotosíntesis y la respiración. Según estos investigadores, los cloroplastos precedieron a las mitocondrias en las funciones energéticas de la célula. Actualmente, la respiración y la Fotosíntesis se mantienen en equilibrio, al destruir una lo que la otra construye.

Todas las maravillas naturales expuestas en este artículo se pueden resumir, como dijo Boltzmann, del siguiente modo: «la energía del Sol, antes de enfriarse a la temperatura de la Tierra, pasa por unos estados inestables de transición, de los que depende la existencia del mundo vivo».