

# CONVERSION Y ABSORCION DE LA ENERGIA SOLAR POR LAS PLANTAS

La transducción biológica de la energía  
por los sistemas reducción-oxidación (redox)

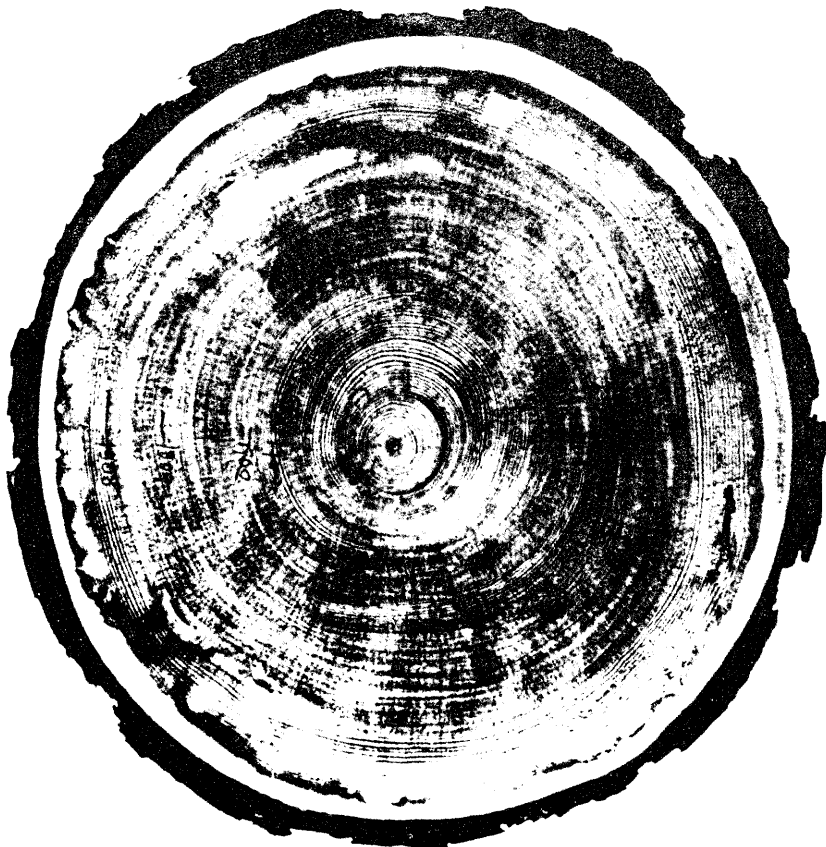
MANUEL LOSADA VILLASANTE

Miembro de la Real Academia  
de Medicina de Sevilla  
Catedrático de la Facultad de Biología,  
Univ. de Sevilla

La vida, y más concretamente la vida humana, es el milagro más grande y admirable de nuestro mundo. En ella ha culminado, tras el lento y penoso caminar iniciado hace varios miles de millones de años, la complejidad natural de composición, estructura y función con una capacidad tan prodigiosa y unos horizontes tan vastos que sobrepasa todas las conquistas y fantasías de la moderna tecnología. Y gran milagro es también el que en este ya pequeño planeta convivan en estrecha apretura y se toleren y se ayuden y se amen — aunque, a veces, se odien e incluso se maten — miles de millones de hombres de razas e ideologías distintas.

La materia existe en una jerarquía de estados de organización creciente: partículas elementales, núcleos, átomos, sillares moleculares, macromoléculas, agregados supramoleculares, orgánulos celulares, células, tejidos, sistemas, órganos, aparatos, organismos, sociedades vegetales y animales. Cada paso — espontáneo o dirigido, en la más amplia y profunda acepción de la palabra — en esta escala evolutiva ascendente introduce nuevos grados de cooperatividad y complejidad, y, en consecuencia, nuevas cualidades y leyes que no son observables a niveles más inferiores. La aparición de genes capaces de replicarse y transcribirse, y la traducción del mensaje genético y

El autor ha desarrollado el presente tema en más de un centenar de publicaciones (libros y artículos). La última es su *Discurso de Recepción en la Real Academia de Medicina de Sevilla: «Reflexiones en torno a la transducción biológica de la energía»*, Sevilla, 1979, 164 páginas, editada por la Real Academia. En ella expone, además de la fotosíntesis, los dos tipos de sistemas redox transductores, el fotosistema no redox de transducción, la transducción por los sistemas biológicos ácido-base, los cambios de energía libre (entalpía y entropía) durante la biosíntesis, y la degradación de la materia viva.



El grosor variable de los anillos de crecimiento anual del árbol muestra la variable intensidad de radiación electromagnética absorbida. Este efecto ha servido para estudiar el ciclo undecenal de actividad solar.

su expresión en proteínas — macromoléculas especialmente dotadas de actividad catalítica, que en último término determinan lo que son y lo que hacen los organismos vivos — son, por citar sólo una muestra, realidades patentes de la perfección y objetivos que ha alcanzado la materia viva. Ciertamente resulta inefable que una célula humana contenga y transmita información equivalente a la que puede almacenar en sus páginas una enciclopedia de centenares de volúmenes. ¿Y qué diríamos del cerebro humano, capaz de pensar y de crear, de buscar con fe y sinceridad la verdad y el bien, de gozar y de sufrir, de amar a Dios y al prójimo? Tal vez la Ciencia — que está tocando ya fondo en muchas cuestiones fundamentales — no pueda nunca resolver satisfactoria y definitivamente las trascendentales y lógicas dudas de creyentes y escépticos, dando respuesta inequívoca, con la exactitud y rigurosidad que la caracterizan, a los cómo y, sobre todo, a los porqués de las grandes verdades y misterios de la vida y de la muerte. Ello no obsta, sin embargo, para que el científico se afane día a día por tratar de llegar a saber con certeza si hay o no un propósito detrás de la vida, un principio y un fin que la justifiquen y ennoblezcan.

De momento podemos sólo especular prudentemente y concluir que, en principio, parece obvio que la probabilidad de que surja de golpe o por accidente una obra de arte o de ingeniería es casi inimaginable y que si, de hecho, el fenómeno ocurriera una vez al azar — sin el impulso creador del artífice — carecería de capacidad regenerativa para repetirse nuevamente y, aún más, de poder selectivo para evolucionar y perfeccionarse a sí mismo. Aunque parezca paradójico resulta, sin embargo, más plausible, dadas las propiedades fisicoquímicas de que aparece dotada la materia, que ésta — obdeditando a causas últimas, cuya razón todavía ignoramos científicamente — haya tendido a organizarse gradual y progresivamente en estructuras cada vez más com-

plejas, eficientes y nobles, capaces de perpetuarse, renovarse y mudar. De hecho, los seres vivos no nacen de pronto o por accidente — aunque sí mueran — sino que vienen naciendo de manera continuada y transmitiéndose gerontológicamente sus caracteres hereditarios desde los tiempos más remotos.

Hoy sabemos, empero, sin ninguna duda, que la luz solar es, en último término, la fuente primaria de energía que, a través de la fotosíntesis que realizan las plantas clorofílicas, mantiene e impulsa bioquímicamente a todo el mundo vivo desde casi sus comienzos. Igualmente sabemos que los seres vivos, y sobre todo el hombre, no sólo se benefician del sol bioquímicamente sino que también lo hacen físicamente, ya que, como ellos, la tierra en que habitan es de por sí un sistema termodinámicamente abierto, que utiliza la energía solar para su calentamiento y para mantener en fecunda y perpetua circulación el ciclo de las aguas. Las nubes nacen del mar por destilación, riegan con fruición los campos y renuevan sin cesar los ríos y embalses que alimentan nuestras viviendas, industrias y centrales hidroeléctricas. No es, pues, exageración ni rebuscada imagen poética afirmar que la energía solar radiante ha sido y es fuente universal de vida, orden y progreso.

Desde tiempos inmemoriales, la teología, la filosofía, la ciencia, el arte y la literatura han contemplado y escrutado, según sus criterios y métodos, las maravillas del mundo y su creación, tratando de esclarecer sus misterios, ofreciendo sabia y profunda meditación al alma humana, ansiosa de conocimiento y perfección, y guiándola en su peregrinar en busca de la fuente última de luz, que para muchos es

más remota que el sol y no sólo fuente de vida, sino de verdad, justicia y amor. Conviene al espíritu y lo reconforta tener fe y esperanza y sacrificar su egoísmo y abulia, luchando con decisión y altruismo por el triunfo del bien sobre el mal, de la luz sobre las tinieblas, y de la razón sobre la pasión. A fin de cuentas, éstos son los objetivos que más sinceramente unen a moralistas, pensadores, científicos y, en general, a los hombres de buena voluntad.

Ahora sólo unas palabras para explicar la elección de un tema que a muchos puede parecer extraño: *La Transducción Biológica de la Energía*. Aunque sin duda en la elección de este tema haya influido decisivamente mi historia particular, quizás la razón principal del porqué estribe más que nada en su actualidad y relevancia, porque toca a fondo y con originalidad uno de los más difíciles y trascendentales campos de la moderna Bioenergética, en el que siempre se han movido con osadía y precaución los grandes pioneros de la Física que se acercaban a la Biología y los grandes biólogos que buscaban en la Física los fundamentos en que se asienta la Vida. Terreno movedizo y difícil, pero lleno de posibilidades y compensaciones.

Desde mi estancia en Berkeley, en que empecé a darle vueltas a estos problemas, todavía no he cesado en mi empeño, cada vez con más conocimiento y experiencia. Recientemente, mi interés se ha visto además incrementado por la potencialidad que ofrece el sol, como fuente inagotable e inocua de energía, para resolver la actual crisis energética del mundo moderno.

Otro aspecto que estimuló enormemente mi interés por la Bioenergética fue mi convencimiento de que las grandes figuras de la Biología y de la Física patinaban con frecuencia al abordar teórica o prácticamente sus más fascinantes misterios. En tierra de nadie siempre hay facetas inasequibles para el explorador, que habitualmente domina sólo un sector, y no es fácil, adentrándose por éste, abarcar el todo.

El profesor Schrodinger, famoso por sus trabajos en mecánica de ondas en el campo de la teoría cuántica, que le valieron el Premio Nobel de Física en 1933, publicó diez años más tarde, como compendio de las conferencias que pronunció en su Instituto de la Universidad de Dublín, un hermoso libro que dio la vuelta al mundo titulado *¿Qué es la Vida?*, en el que entre otras cuestiones planteó el problema de para qué y de qué se alimentan los organismos vivos. El genial físico comentó asombrado: Es absurdo imaginar que lo esencial es el intercambio de materia. No hay que decir que igualmente absurdo es pensar que lo importante es el intercambio de energía, a pesar de que en algunos países muy avanzados se soliera indicar por entonces en la carta de los restaurantes, junto al precio del menú, el contenido energético de cada plato. Schrodinger resumió tajante sus consideraciones al respecto con la siguiente conclusión desconcertante: «Los organismos se alimentan de entropía negativa, o expresado de manera menos paradójica, lo esencial de toda la entropía que no puede menos de producir mientras está vivo».



*La planta va acumulando la energía electromagnética solar en forma de materia orgánica, que no es otra cosa que un depósito de energía química. En la foto un baobab joven (Adansonia Digitata), de Sudáfrica. El follaje es escaso siempre, pero en los baobabs viejos el tronco alcanza diámetros casi increíbles, 9 metros, según algunos exploradores, que merecen confianza en sus descripciones.*

Estimulado por las ideas de Schrodinger, el profesor Julio Palacios escribió unos años después, y tuvo la deferencia de dedicarme un ejemplar al conocer mi interés por estos temas, otro librito con el título *De la Física a la Biología*, en el que criticó a Schrodinger diciendo que si lo esencial del metabolismo fuera que permite expulsar la entropía se lograría el mismo efecto con una buena ducha que con una suculenta comida. Como resultado de sus divagaciones, Palacios se planteó algunas curiosas

preguntas, como la de «¿quién da calor a quien: la gallina a los huevos o los huevos a la gallina?» y la de «si los animales de sangre fría, como los caracoles, desprenden calor al medio», e incluso ingenió algunos elementales experimentos para satisfacer sus dudas, pues aparentemente el comportamiento biológico energético resultaba, en cierto modo, chocante a su mentalidad de físico.

Hace sólo unos años, un mecánico sevillano sorprendió a la opinión pública y a muchos



Las plantas usan fotones de una longitud de onda entre 300 y 1100 nm, es decir, una banda muy estrecha de radiaciones. Y les sirven no sólo para la fotosíntesis, sino también para tropismos, dormición, floración, taxías, maduración, etc. Los fotones de un nivel energético superior, correspondientes a una longitud de onda inferior a 300 nm, destruyen las células, y por tanto, la vida.

En la foto un gran bosque de robles de Atlanta, Georgia, EE. UU., quemados por la radiación gamma de un depósito de desechos nucleares radiactivos, no blindados. Los fotones gamma tienen una energía muy superior a la luz ultravioleta, tolerable por las plantas. Los residuos nucleares han causado daños graves a robles situados a 350 m y a pinos, situados a 600 m. Foto USAEC.

bienintencionados ignorantes con su revolucionario y deseado invento del motor de agua. Pues bien, para mí ha resultado todavía más increíble constatar que, en esas mismas fechas y aún más recientemente, varias de las más destacadas autoridades del mundo bioenergético (dos de ellas, premios Nobel) hayan afirmado sin cortapisas que el agua suministra la mitad del combustible que queman los organismos aeróbicos durante la respiración.

Los grandes bioenergetistas coinciden hoy

en afirmar que uno de los más importantes e irresueltos problemas de la moderna Biología es el mecanismo de los procesos de acoplamiento energético a nivel de membrana durante la fotosíntesis y la respiración. La teoría más universalmente aceptada es la quimioosmótica de Mitchell, según la cual la energía redox se convierte primero en un gradiente electroquímico de protones a través de la membrana y subsiguientemente en energía química de enlace. Nuestro criterio, basado en consideraciones teóricas y hechos experimentales muy amplios y sólidos, es que el primer acto de la transducción de energía por los sistemas de óxido-reducción o ácido-base conlleva una energetización de una de las formas del par implicado, con el consiguiente cambio de afinidad por los electrones o los protones. Nuestra teoría postula, pues, que los sistemas redox o ácido-base de transducción exhiben dos potenciales o  $pK_a$  alternantes, según el estado de energetización de las respectivas formas reducida o ácida, u oxidada o básica. El tiempo dirá si hemos o no acertado en nuestra apreciación y hasta qué punto.

### luz, energía y vida

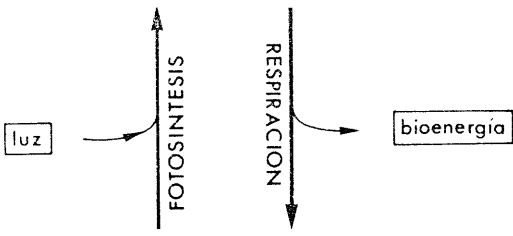
La *bioenergética* constituye hoy uno de los campos más fascinantes de la ciencia y merece

interés prioritario no sólo por cuanto revela el funcionamiento fisicoquímico íntimo de los organismos vivos sino porque casi toda la energía que viene utilizando la humanidad en sus aspectos domésticos e industrial —carbón, petróleo, gas natural— es de origen biológico.

Desde un punto de vista mecanicista podemos decir que *la vida es un equilibrio dinámico e inestable* de infinidad de reacciones fisicoquímicas que se acoplan y concatenan en perfecto orden y armonía. Hasta tal punto es este equilibrio característico de la vida que *su alteración* es causa de *enfermedad* y *su interrupción* la mejor evidencia de la *muerte*. Por ser el dinamismo condición inseparable de la vida, los seres vivos han de consumir continuamente energía para crecer, multiplicarse y realizar sus múltiples actividades vitales, e incluso para simplemente mantenerse vivos.

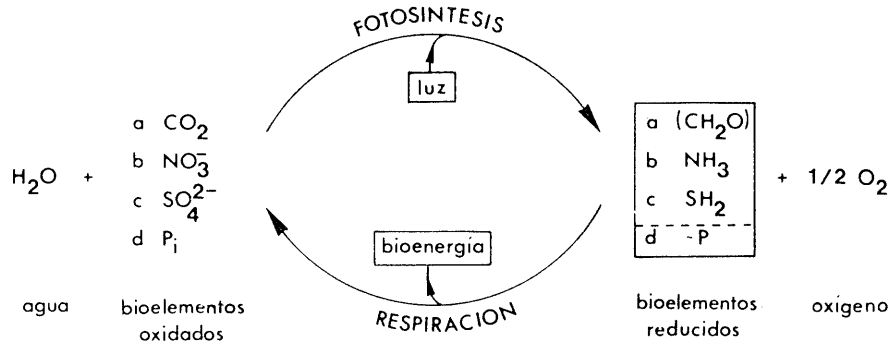
Los organismos son máquinas biológicas que en nada contradicen los principios de la termodinámica. No obstante, las células vivas, que trabajan a presión y temperatura más o menos constantes, no pueden usar calor como fuente de energía a la manera de las máquinas de vapor inventadas por el hombre, que requieren un salto de temperatura para transformar calor en trabajo. Saben, sin embargo, transducir admirable y eficazmente la energía física de la luz solar y la energía química de los

Compuestos inestables ricos en energía (carbohidratos, hidrocarburos, lípidos, proteínas, ácidos nucleicos, etc. y oxígeno). ↓



↑ Compuestos estables pobres en energía (agua, fosfato, dióxido de carbono, nitrato, sulfato, etc.).

La fotosíntesis y la respiración como procesos de transducción de energía. Las plantas verdes transforman los compuestos estables de que se alimentan en productos inestables gracias a la energía de la luz, durante la fotosíntesis. A continuación, los organismos quimioorgánicos liberan, durante la respiración, la energía almacenada en los productos fabricados por las plantas, cerrando el ciclo.



La fotosíntesis y la respiración como proceso redox de transducción de energía. Las plantas verdes fotorreducen con el hidrógeno del agua los bioelementos oxidados de que se alimentan, incorporándolos en material celular y desprendiendo el oxígeno resultante como producto de desecho. Posteriormente los organismos quimioorgánicos respiran con el oxígeno los bioelementos reducidos para obtener energía, cerrando el ciclo. El fosfato participa fundamentalmente en ambos procesos como agente transductor de energía redox en energía de enlace, pasando de grupo fosfato propiamente dicho ( $^-OPO_3^-$ ) a grupo fosfato rico en energía ( $\sim P$ ) —o más propiamente, fosfonio ( $^+PO_3^-$ )— y viceversa, incorporándose también, en parte, en material celular.

alimentos en energía química fisiológica, mediante ingeniosos mecanismos acoplados a reacciones de óxido-reducción. Energéticamente hablando, uno de los caracteres más esenciales del estado viviente es, en frase del gran microbiólogo Kluver, la corriente continua y dirigida de electrones que tiene lugar en las células a través de cadenas de transporte escalonadas en discretos saltos de potencial, del orden de un voltio o décimas de voltio. Otro carácter decisivo es el perfecto *acoplamiento* conseguido a base de intermediarios comunes entre las reacciones exergónicas (catabólicas) y endergónicas (anabólicas) propias del metabolismo.

Desde un punto de vista energético-nutricional los organismos se distinguen primordialmente entre sí, a pesar de la unidad bioquímica que los caracteriza, por la clase de energía de que se alimentan, pudiendo clasificarse en dos grandes grupos de acuerdo con la naturaleza física o química de las fuentes energéticas que consumen. Los *organismos fotoorgánicos* (algas y plantas superiores) convierten la luz en energía electrónica y, subsiguientemente, en energía redox y energía química fisiológica de enlace fosfato y pueden, por tanto, vivir a expensas de nutrientes totalmente oxidados y desprovistos de potencial químico útil, a saber, agua, anhídrido carbónico y cenizas, a los que asimilan en material celular durante la *fotosíntesis*. Por el contrario, los *organismos quimioorgánicos* (bacterias en general, hongos y animales) no pueden utilizar la luz como fuente de energía y dependen absolutamente de la energía redox contenida en los sustratos —inorgánicos y orgánicos— de que se nutren, que igualmente transforman anaeróbica o aeróbicamente en energía de enlace fosfato, durante las reacciones disimilatorias propias de la *fermentación* y la *respiración*, respectivamente.

El hecho de que los organismos fotoorgánicos y quimioorgánicos más evolucionados hayan desarrollado, como *centrales energéticas*, unos orgánulos citoplásmicos altamente especializados —denominados, respectivamente, *cloroplastos* y *mitocondrias*—, con objeto de convertir, con extraordinaria eficacia, la energía electromagnética de la luz visible o la energía redox de los alimentos en energía redox

y/o energía de enlace fosfato, es sólo una prueba de la importancia fundamental que las células conceden a sus procesos energéticos.

Tanto la fermentación y la respiración como la fotosíntesis en sentido estricto son fundamentalmente equivalentes en cuanto implican *procesos redox de transducción* (fosforilación oxidativa *sensu lato*), en los que la *energía que liberan los electrones en su caída*, desde niveles más altos hasta otros más bajos, *queda finalmente atrapada como energía de enlace fosfato* ( $\sim P$ ) en el compuesto conocido como *ATP (adenosintrí fosfato)* la *moneda energética universal* que utilizan los seres vivos en sus transacciones. Cuando las células precisan energía para la realización de un trabajo fisiológico (sintético, osmótico, mecánico, lumínico, eléctrico) separan uno o dos de los restos terminales de fosfato del ATP —que se descarga pasando a adenosíndifosfato (ADP) o adenosínmonofosfato (AMP), respectivamente—, y de esta forma queda la molécula en situación de poder aceptar nuevamente uno o dos restos de fosfato ricos en energía, para así regenerar otra vez la forma energéticamente activa, ATP.

Hay otro aspecto energético estrechamente relacionado con la fotosíntesis y de trascendental importancia para el presente y futuro del hombre que conviene considerar aquí. En efecto, la energía almacenada durante los últimos tres mil millones de años en los llamados *combustibles fósiles*, gracias a la actividad fotosintética de las plantas, representa la más importante fuente de energía que hoy día utiliza la

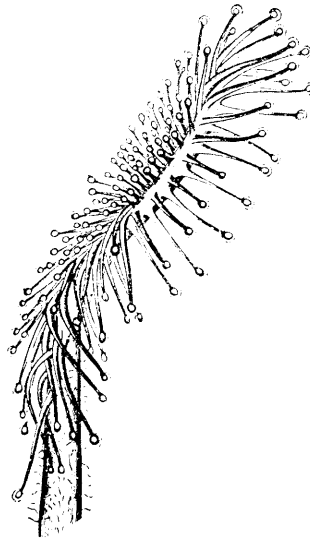
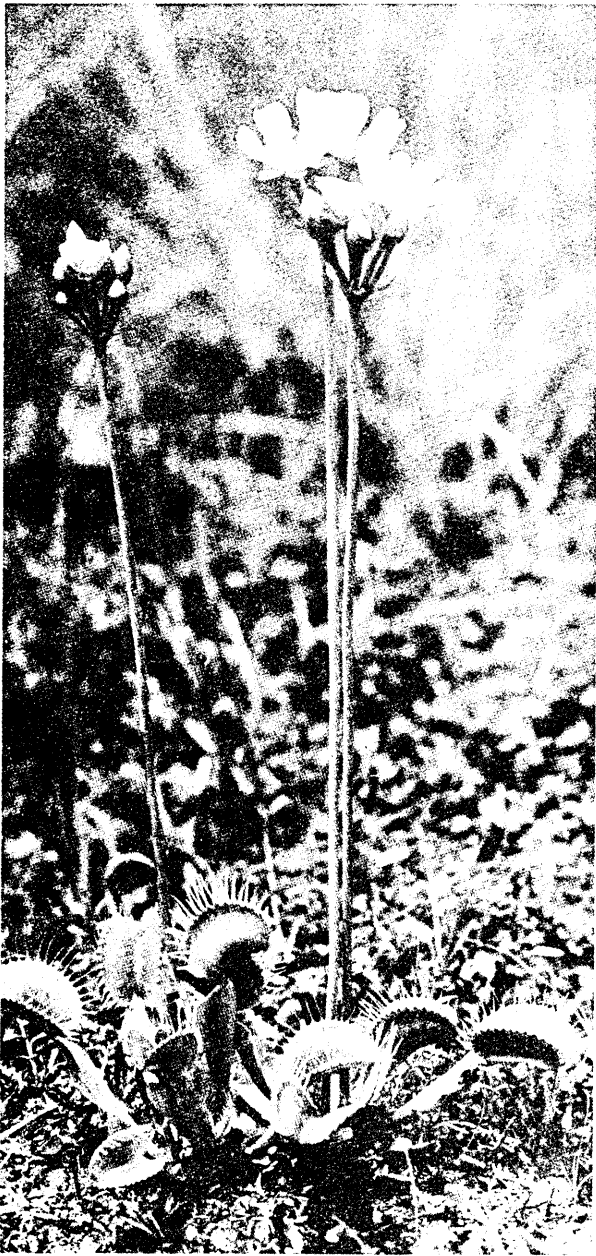
humanidad, si bien insuficiente a plazo no muy lejano para cubrir sus necesidades exponencialmente crecientes. Al ritmo actual de consumo se prevé que las reservas existentes de gas y petróleo se agotarán en las próximas décadas, y las de carbón, en un siglo. A esta *crisis energética* se une otra igualmente grave, motivada por la *carencia de alimentos*, y más concretamente de proteínas, para la nutrición suficiente y sana del género humano.

Aunque el hombre dispone ya de otras prometedoras fuentes de energía —principalmente la nuclear—, hoy por hoy depende casi exclusivamente de la energía solar, fósil o actual, para satisfacer sus acuciantes necesidades energéticas y alimentarias. Si a esto añadimos que la energía solar es la más abundante, continua y limpia que poseemos, no cabe duda que es importante, y quizás indispensable, aprender a utilizar prontamente de la manera más efectiva y rentable, imitando en lo posible el proceso fotosintético que con extraordinaria eficacia realiza la maquinaria clorofílica, especialmente adaptada para la fotoconversión.

Aunque, hasta la fecha, la explotación por el hombre de una fuente de energía tan poderosa y gratuita como la solar ha sido muy limitada, las graves crisis de energía y alimentos a que acabamos de hacer referencia han provocado en la mayoría de los países avanzados una reacción positiva, en el sentido de estimular al máximo las investigaciones destinadas a un más amplio y profundo conocimiento de la fotosíntesis y a un mejor aprovechamiento de la energía solar.

**tabla I**  
**conversión de la energía solar por el reino vegetal en relación con el consumo industrial y con la producción agrícola**

Energía solar que llega a la biosfera .....	10 <sup>17</sup> vatios
Energía que fija el reino vegetal .....	10 <sup>14</sup> vatios
Energía que consume la industria .....	10 <sup>13</sup> vatios
Energía que produce la agricultura .....	0,5 · 10 <sup>12</sup> vatios

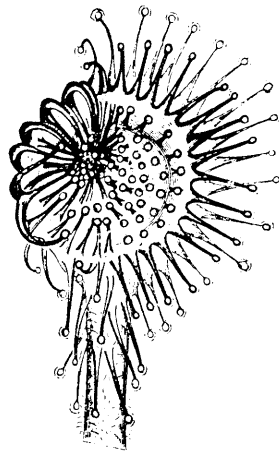


El bioenergista conoce ya, de hecho, mucho sobre el mecanismo de la fotosíntesis como proceso de conversión de energía y sabe qué hace la bacteria, el alga o la planta para transformar eficientemente la energía solar en energía electrónica o química. Sus conocimientos son, por ello, en cierto modo previos para que el ingeniero pueda ensayar las posibilidades tecnológicas que ofrece este maravilloso proceso. *Si consiguiésemos aprovechar la energía solar con un rendimiento del 10 por ciento* —valor que pueden alcanzar las plantas en períodos cortos y condiciones óptimas de campo—, *a España le bastaría con el 1 por ciento de su superficie, es decir, con media provincia, para hacer frente a todas y cada una de sus necesidades energéticas.*

Aparentemente, la *única alternativa a la energía solar* que podría representar también la solución definitiva al problema energético, y que equivaldría a tener un sol en la tierra, es la *energía termonuclear* de fusión, ciertamente no exenta de dificultades y riesgos, y obstaculizada en su desarrollo por serias objeciones políticas, sociales y económicas.

### el flujo de la energía solar a través del mundo vivo

El primero en intuir la función primordial de la *luz solar* como *fuerza inmediata de toda la energía biológica* fue el célebre médico alemán Mayer, quien, en 1845, tres años después de enunciar el principio de la conservación de la energía, formuló, sencilla y certeramente, la esencia del proceso fotosintético en los siguientes términos: «Las plantas son capaces de absorber y convertir la energía, pero no de crearla. El mundo vegetal constituye la despensa en que los efímeros rayos solares son fijados



*La planta recibe la energía del Sol y la materia de la tierra. Así completa su dieta alimenticia. De la tierra toma sustancias orgánicas e inorgánicas y agua. Como los fotones solares tienen una masa en reposo nula, su absorción no aumenta la masa de la planta.*

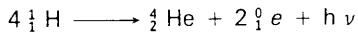
*Las raíces no son la única puerta de entrada de materia en la planta. Las fotos y dibujos de plantas insectívoras lo confirman. La materia orgánica del insecto muerto pasa a la planta a través de la hoja, y la nutre. En la foto vemos hojas con pelos en su parte interior. Al entrar un insecto, las dos partes de la hoja se cierran, formando una bolsa muy cerrada alrededor de la presa. Foto American Museum of Natural History, New York. Los dibujos pertenecen a hojas de Drosera rotundifolia. Arriba, la hoja en reposo, y abajo, tiene parte de sus tentáculos abatidos sobre la presa.*

La fotosíntesis en las algas es mucho más activa que en las plantas superiores.  
Foto de recolección de algas en una playa portuguesa.

y almacenados para su uso posterior; una medida económica providencial a la que va inexorablemente unida la propia existencia de la raza humana».

Es importante subrayar que *las plantas no sólo surten de materiales estructurales a los organismos no fotosintéticos, sino que —lo que es igualmente importante— les suministran la energía química en ellos almacenada*, indispensable para el mantenimiento de las actividades vitales y contenida originariamente, como energía electromagnética, en los rayos del sol. A la fotosíntesis se debe, pues, el milagro de que un pequeño porcentaje de la energía luminosa del sol, antes de degenerar en calor y enfriarse a la temperatura de la tierra, quede transitoriamente almacenada como energía química biológica, en vez de disiparse y malgastarse directamente, como agua derramada, sin beneficio alguno para los seres vivos y su mundo.

Hoy sabemos que la reacción responsable de las enormes cantidades de energía que emite el sol —y que corresponden, según la ecuación de Einstein, a una pérdida de masa de  $5 \cdot 10^6$  Tm por segundo es la *fusión termonuclear* de 4 núcleos de hidrógeno en 1 de helio, en la que 0,7 por ciento de materia se convierte en energía y libera como radiación gamma, de acuerdo con la ecuación global:



Después de una compleja serie de reacciones, en que la radiación gamma es absorbida por los positrones, una gran parte de la radiación se emite en forma de fotones o cuantos de luz.

Las reacciones termonucleares de fusión como la descrita ocurren espontáneamente cuando la temperatura alcanza  $100 \cdot 10^6$  grados centígrados. A estas ingentes temperaturas, los átomos no existen como tales, sino como un plasma de núcleos y electrones, pues las moléculas se disocian en átomos, y estos, a su vez, en núcleos y electrones.

Se calcula que sólo hacia la mitad de la energía que nos envía el sol llega a la biosfera, pues el resto es absorbido por la atmósfera o se difracta y refleja, haciendo que nuestro planeta aparezca brillante como una estrella a los ojos de un observador exterior.

En el espectro de radiaciones electromagnéticas —que se extiende desde los rayos gamma, de  $10^{-4}$  a  $10^{-1}$  mm, hasta las ondas de radio, de hasta 1 km de longitud—, la *fotobiología* se sitúa en una zona estrechísima de 300 a 1100 nm. De las radiaciones comprendidas entre estos límites dependen no sólo la visión humana y de los otros animales, sino las respuestas de los organismos vivos inducidas por la luz —taxias, tropismos, dormición, floración, maduración, etc.— y, sobre todo, la conversión de la energía luminosa en energía química, comúnmente conocida como fotosíntesis. Aunque existiera vida en otros planetas, estos procesos no podrían tener lugar en las regiones ultravioleta o del infrarrojo lejano, porque las radiaciones de estas frecuencias no son apropiadas para las reacciones fotobiológicas: las primeras por exceso de energía y las segundas por defecto.

Las radiaciones de longitud de onda inferior



a 300 nm —es decir, con energía superior a 95 kcal por einstein, o mol de cuantos— *son incompatibles con la vida* y de consecuencias desastrosas para las células, porque desnaturalizan las proteínas y ácidos nucleicos al romper los enlaces de hidrógeno y de Van der Waals que mantienen la estructura y conformación específicas de estas delicadas macromoléculas. Desde el punto de vista evolutivo fue crucial para el tránsito de la vida acuática a la terrestre el que el oxígeno liberado en la fotosíntesis formara, al acumularse en los altos estratos de la atmósfera, por la acción fotoquímica de los rayos solares, un manto de ozono. Esta capa de ozono, situada a una altura de 22 a 25 kilómetros, actúa de pantalla luminosa, que absorbe fuertemente las radiaciones a partir de 320 nm y es prácticamente opaca por debajo de 290 nm. Al filtrarse los rayos solares y quedar privados de las radiaciones de onda corta, las capas bajas de la atmósfera dejaron de estar expuestas a las radiaciones antibióticas, y los organismos vivos pudieron emerger de las aguas e invadir los continentes. No cabe duda de que *los hombres vivimos en un planeta afortunado*, pues el 83 por ciento de las radiaciones solares que llegan a la biosfera caen dentro de los márgenes de la fotobiología.

Por lo que respecta a la fotosíntesis, las radiaciones que utilizan las plantas para la realización del proceso fotosintético se denominan radiaciones fotosintéticamente activas y tienen longitudes de onda comprendidas entre 400 y 700 nm, es decir, un contenido energético de 70 a 40 kcal por einstein. Las plantas utilizan para la fotosíntesis sólo el 40 por ciento de la energía radiante que reciben, pues el 50 por ciento

cae en la región infrarroja del espectro y no puede ser absorbida por los pigmentos fotosintéticos y el 20 por ciento de la restante se pierde por reflexión, transmisión y absorción por las hojas. Aunque el rendimiento máximo teórico de la asimilación fotosintética del carbono respecto a la luz absorbida es del orden del 33 por ciento, si se tiene en cuenta que la energía solar tiene su mayor riqueza energética a 575 nm y que las pérdidas por respiración alcanzan un 40 por ciento, resulta que el rendimiento global del proceso, referido a la luz recibida, queda reducido a un 5 por ciento. Este valor se alcanza en condiciones óptimas de campo y en periodos cortos de crecimiento, pero la media anual es menor y depende también del carácter templado o tropical del clima. En resumen, se puede concluir que, por término medio, la eficiencia real de la asimilación fotosintética del carbono es del 0,5 al 3 por ciento y que el reino vegetal en su conjunto utiliza sólo el 0,1 por ciento de la energía solar.

Gracias a la fotosíntesis, *el reino vegetal convierte, pues, incesantemente una fracción relativamente pequeña* (0,1 por ciento) *pero cuantitativamente muy significativa* ( $10^{14}$  vatios) *de la energía radiante del sol que llega a la biosfera* ( $10^{17}$  vatios) *en energía química*, y abastece posteriormente, en cadena, de materia rica en energía a todo el mundo vivo. Como muestra la Tabla I, la energía solar que fija el reino vegetal equivale a unas 10 veces lo que el mundo moderno gasta como energía ( $10^{13}$  vatios) y a unas 200 veces lo que en la actualidad produce la agricultura de todo el globo ( $0,5 \cdot 10^{12}$  vatios) y consume la humanidad como alimentos.