

Conversión biológica de la energía solar

por Miguel García Guerrero y Manuel Losada

Miguel García Guerrero y Manuel Losada *
Departamento de Bioquímica, Facultad de Biología y Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Sevilla

■ En sus más variadas facetas, la vida en la Tierra depende de manera casi absoluta de la energía radiante proveniente del Sol. No es exagerado, pues, afirmar que la radiación solar ha sido desde los tiempos más remotos, lo es en el presente, y, posiblemente, lo seguirá siendo en el futuro, la fuente de energía mejor distribuida y más abundante, útil e inocua de que admirable y gratuitamente dispone la humanidad.

■ La energía solar es, de hecho, la fuente inagotable de luz que ilumina a diario nuestro planeta, promoviendo a la par el crecimiento perenne del plancton y de los prados, cultivos agrícolas y bosques, que más o menos directamente suministran alimento a los peces, a los animales y a la especie humana en su conjunto. Además, la luz solar surte también al hombre, a través de la biomasa fotosintetizada, de una gran variedad de materias primas.

■ Por otro lado, la propia biomasa generada a expensas de la luz solar en épocas remotas ha dado origen a lo largo del tiempo, tras experimentar una serie de alteraciones biofísicoquímicas complejas, a las hoy tan codiciadas reservas de combustibles fósiles: carbón, gas y petróleo.



*Los autores desean expresar su reconocimiento al Centro de Estudios de la Energía, Fundación Areces, Laboratorios Philips y Comisión Asesora de Investigación Científica y Técnica.

La energía solar que llega a la biosfera es captada y convertida en biomasa por los organismos biosintéticos. Aunque la energía que fija el reino vegetal al año es 1000 veces menor que la energía solar que recibe la Tierra en dicho periodo, es 10 veces mayor que la energía consumida por la humanidad.

La fotosíntesis se inicia con la captación de la luz por los pigmentos fotosintéticos accesorios y su conversión en energía electrónica por los pigmentos clorofílicos de los centros de reacción. (Foto Minia.)

■ El calor de los rayos solares permite también mantener la biosfera a temperatura habitable y controlada, y promueve asimismo el ciclo de las aguas. Este ciclo se inicia con la evaporación de los mares y océanos, proceso que, a través de la condensación del vapor de agua, determina en primer lugar la formación de las nubes, que después riegan los campos y renuevan el caudal de los manantiales y ríos; éstos, a su vez, cierran finalmente el ciclo, alimentando en su camino de vuelta hacia el mar a hogares, industrias y centrales hidroeléctricas. Por último, los vientos originados por la diferencia de temperatura entre zonas calentadas desigualmente por los rayos solares ventilan nuestra atmósfera, a la par que constituyen una fuente de energía utilizable para distintos fines.

Este somero análisis pone de relieve la estrecha dependencia de la radiación solar por parte del hombre, puesto que sigue siendo una fuente insustituible de energía y vida no obstante los maravillosos avances científicos y tecnológicos ya logrados en otros sentidos. Es obvio, por tanto, que el aprovechamiento, consciente o inconsciente, directo o indirecto, de la energía solar por la humanidad representa, todavía, más bien una práctica natural, vinculada a su existencia desde sus mismos orígenes, que una conquista ganada con su genio y esfuerzo. Ha sido precisamente la angustiosa crisis de energía y alimentos que sufre el mundo actual la que, en cierto modo, ha puesto en marcha en todos los países, tanto a nivel científico como tecnológico, un movimiento incipiente, pero ya pujante, dirigido a conseguir por múltiples vías la utilización plural y eficiente de la radiación solar con la intención y fundada esperanza de que estas nuevas tecnologías permitan que la energía solar pueda reemplazar pronto, al menos parcialmente, a la energía proveniente de los combustibles fósiles, sobre los que la civilización moderna ha basado su trepidante progreso en los últimos decenios. En el

momento presente se han conseguido notables avances en la implantación de dispositivos colectores de calor (sistemas activos, pasivos y de concentración), así como de captación y conversión directa de luz en electricidad (sistemas fotovoltaicos). Otra faceta de trascendental relevancia relacionada con la utilización de la energía solar atañe a su bioconversión en energía química, de cuyo análisis nos ocuparemos especialmente en este artículo tras unas consideraciones preliminares acerca del origen, magnitud y características bioenergéticas de la radiación solar.

Conversión de la energía solar por el ecosistema natural

La energía solar que llega a la biosfera ($1 \text{ nSol} \cong 10^{17} \text{ W} \cong 3 \times 10^{24} \text{ J año}^{-1}$) es captada y convertida en biomasa por los ecosistemas terrestre y acuático con una eficiencia⁽¹⁾ del 0.1 por ciento, almacenándose $2 \times 10^{14} \text{ kg año}^{-1}$, equivalentes a $1 \text{ pSol} \cong 10^{14} \cong 3 \times 10^{21} \text{ J año}^{-1}$.

Cuando se compara la producción anual de biomasa con las reservas energéticas ya almacenadas en la propia biomasa y en los combustibles fósiles resulta que dicha producción anual de biomasa es sólo un orden de magnitud menor que las reservas actuales de biomasa ($2 \times 10^{15} \text{ kg} \cong 3 \times 10^{22} \text{ J}$) y que las reservas comprobadas de combustibles fósiles ($3 \times 10^{22} \text{ J}$), que, a su vez, pueden ser un orden de magnitud menor que las estimadas como probables ($3 \times 10^{23} \text{ J}$). Por otro lado, la energía solar que fija el reino vegetal en su conjunto es, como se discutirá más adelante, un orden de magnitud mayor que la energía que consume la humanidad como tal energía ($10^{13} \text{ W} \cong 3 \times 10^{20} \text{ J año}^{-1}$) y unas 200 veces mayor que la energía que consume la humanidad como alimento ($0,5 \times 10^{12} \text{ W} \cong 1,5 \times 10^{19} \text{ J año}^{-1} \cong 10^{12} \text{ kg año}^{-1}$).

En resumen, como muestra la Tabla I, la energía que fija el reino vegetal al año

Tabla II

Producción de biomasa por los ecosistemas terrestre y acuático

	kg año ⁻¹
Ecosistema terrestre	10 ¹⁴
Bosques (70 %)	
Praderas y sabanas (20 %)	
Cultivos agrícolas (10 %)	
Ecosistema acuático	10 ¹⁴
Fitoplancton (90 %)	
Macrófitas (10 %)	
TOTAL	2 × 10 ¹⁴

es 1000 veces menor que la energía solar que recibe la Tierra en dicho periodo, 100 veces menor que las reservas estimadas de combustibles fósiles, y 10 veces menor que las reservas comprobadas de estos combustibles y de la biomasa existente.

Por otro lado, la energía solar fijada es 10 veces mayor que la energía consumida como tal por la humanidad y 200 veces mayor que la energía consumida como alimento.

Aunque el ecosistema acuático cubre aproximadamente 2/3 de la superficie de la Tierra frente a 1/3 el terrestre, ambos ecosistemas producen aproximadamente la misma cantidad de biomasa ($10^{14} \text{ kg año}^{-1}$), ya que el ecosistema terrestre presenta una eficiencia de al menos el doble que el marino, modificando así las ideas anteriores que adjudicaban a éste valores de hasta un orden de magnitud mayor. La Tabla II presenta la proporción de biomasa producida en uno y otro ecosistema por los distintos conjuntos de organismos que integran las diversas formaciones vegetales.

En el ecosistema terrestre, la mayor proporción corresponde a las áreas forestales (70 por ciento), seguida de las praderas y sabanas (20 por ciento) y finalmente de los cultivos agrícolas (10 por ciento), en tanto que en el ecosistema marino casi toda la producción se debe al fitoplancton (90 por ciento) y sólo una pequeña proporción (10 por ciento) a las algas macrofitas.

Teniendo en cuenta que la Tierra, con un diámetro del orden de 10 mil km, presenta una superficie de unos 500 millones de km² ($50 \times 10^9 \text{ ha}$) se puede calcular que el rendimiento biomásico medio del ecosistema natural ($200 \times 10^9 \text{ ton año}^{-1}$) es de hacia $4 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, correspondiendo, al menos, el doble al ecosistema terrestre ($6 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) que al acuático ($3 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). A título comparativo cabe mencionar el rendimiento de algunos cultivos agrícolas y formaciones naturales terrestres y acuáticas, entre los que se pueden destacar la caña de azúcar ($60 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), maíz (50 ton ha^{-1}

(1) Estas equivalencias energéticas se establecen sobre la base de que anualmente se sintetizan a expensas de la energía solar 200 mil millones de toneladas (peso seco) de material vegetal, cuyo contenido calórico es, por término medio, de 4 kcal g^{-1} . Puesto que 1 caloría (cal), o cantidad de calor necesaria para elevar 1 grado C la temperatura de 1 g de agua, equivale a 4,187 J, resulta que $1 \text{ W año} \cong 3 \times 10^7 \text{ J} \cong 2 \text{ kg biomasa}$. Por otro lado, la energía almacenada en 1 g de biomasa $\cong 16 \text{ kJ}$ es suficiente para elevar 1,6 ton a 1 m de altura. Aparte de que en muchos casos las cifras globales no se conocen con suficiente exactitud u oscilan ampliamente entre márgenes variables, se han redondeado intencionadamente en aras de la simplicidad.

Tabla I

Conversión biológica de la energía solar en relación con la reserva mundial de combustibles fósiles y de biomasa, y con el consumo energético y alimentario de la humanidad

	W	J año ⁻¹	J	kg	kg año ⁻¹
Energía solar que llega a la biosfera	10 ¹⁷	3×10^{24}			
Energía almacenada en los combustibles fósiles			3×10^{23} (*) 3×10^{22} (**)		
Energía almacenada en la biomasa			3×10^{22}	2×10^{15}	
Energía solar que fija el reino vegetal	10 ¹⁴	3×10^{21}			2×10^{14}
Energía que consume la humanidad	10 ¹³	3×10^{20}			
Energía que consume la humanidad como alimento	$0,5 \times 10^{12}$	$1,5 \times 10^{19}$			10^{12}

(*) estimada; (**) comprobada

año⁻¹), bosques (10-40 ton ha⁻¹ año⁻¹), jacinto de agua (150 ton ha⁻¹ año⁻¹) y algas (50-200 ton ha⁻¹ año⁻¹). Estas últimas serán objeto de especial atención en este artículo.

Las reservas de biomasa del ecosistema natural —que, como se ha dicho anteriormente, se estiman superiores en un orden de magnitud a la producción anual, es decir, 2×10^{15}

kg $\approx 3 \times 10^{22}$ J— se encuentran almacenadas casi en su totalidad en el ecosistema terrestre (99 por ciento), siendo ínfimas (1 por ciento) las del ecosistema acuático.

Origen, magnitud y características bioenergéticas de la radiación solar

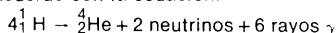
El Sol es una potentísima central nuclear situada, por remota, a una tranquilizadora distancia de la Tierra (del orden de 100 millones de km = 10^{11} m); su energía, dada la extraordinaria velocidad de la luz ($c = 300$ mil km por segundo = $0,3 \times 10^9$ m s⁻¹, en el vacío), sólo tarda en llegarnos unos 10 minutos. La energía⁽²⁾ radiante que emite el Sol viene determinada por la temperatura de su superficie (hacia 6 mil grados K), de acuerdo con la ley de Stefan-Boltzmann:

$$I = \sigma T^4 \text{ (J m}^{-2}\text{s}^{-1}, \text{ ó W m}^{-2}\text{)}$$

que relaciona la intensidad I , o energía irradiada por unidad de área y por unidad de tiempo por un «emisor ideal», con su temperatura absoluta T (K) mediante la denominada constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 56,70 \times 10^{-9}$ (W m⁻² K⁻⁴). Teniendo en cuenta la superficie del Sol (cuyo diámetro es del orden de 1 millón de km = 10^9 m, es decir, unas 100 veces mayor que el de la Tierra), se puede calcular que la energía total que irradia es de unos 10^{26} W. Para hacernos una idea de lo que este número representa digamos que, si toda esta energía incidiese sobre nuestro planeta, las aguas de los océanos hervirían en 1 segundo. Sin embargo, por fortuna, dada la distancia que nos separa del Sol, sólo llega a la Tierra la pequeña fracción (aprox. 10^{-9} del total) que, en razón inversa al cuadrado de la distancia, corresponde a su superficie. Debe hacerse notar que sólo la mitad aproximadamente de la energía solar que llega a las altas capas de la atmósfera terrestre alcanza la biosfera, es decir, unos 10^{17} W, pues el resto es absorbido o se difracta y refleja haciendo que nuestro planeta aparezca brillante como una estrella a los ojos de un observador exterior. Como más adelante analizaremos, esta cantidad de energía sigue siendo enorme en su conjunto, correspondiendo a unas 10 mil veces la que en la actualidad consume toda la humanidad.

Aunque durante mucho tiempo el origen de la energía solar fue un enigma para los científicos, ahora se acepta fundamentalmente que el proceso responsable de su generación es la fusión termonuclear que ocurre en el interior del Sol a la inimaginable temperatura de 10^7 K. A este nivel térmico los átomos no existen como tales, sino como un plasma de núcleos y electrones, ya que están despojados de sus cortezas

electrónicas. La secuencia de reacciones nucleares conduce a la fusión de cuatro núcleos de hidrógeno, a través del denominado ciclo protón-protón, en una partícula α , o núcleo de helio, y libera una enorme cantidad de energía, de acuerdo con la ecuación:



En efecto, la ecuación de Einstein, ajustada a unidades del sistema SI:

$$E/m = c^2 = 9 \times 10^{16} \text{ (J kg}^{-1}\text{)}$$

o también, a unidades atómicas elementales⁽³⁾:

$$E/m = 1,036 \times 10^{-17} c^2 = 0,932 \text{ (GeV D}^{-1}\text{)}$$

establece la equivalencia entre masa (m) —en kg o en dalton (D)— y energía (E) —en J o en GeV (1 GeV = 10^9 eV)— mediante la velocidad de la luz (c), y permite calcular que la fusión de 4 núcleos de hidrógeno en 1 de helio —que conlleva la pérdida de unas 25 miliunidades atómicas de masa— da lugar a la liberación de unos 25 megaelectronvoltios (1 MeV = 10^6 eV). Las anteriores relaciones nos permiten también calcular que la aniquilación de 1 electrón —cuya masa es aproximadamente 0,5 mD— lleva consigo la liberación de aproximadamente medio MeV, y la de 1 g s⁻¹ de materia, alrededor de 100 teravatios (1 TW = 10^{12} W). En consecuencia, si el Sol emite del orden de 10^{26} J s⁻¹ ha de aniquilar su masa a razón de casi 1 millón de toneladas por segundo (10^9 kg s⁻¹). Esta cifra no debe, sin embargo, inquietarnos, pues, dada la masa solar (10^{30} kg), es ciertamente insignificante. En los 10 mil millones de años (10^{10} años) que lleva «ardiendo» debe haber perdido sólo una milésima parte de su masa, por lo que es de esperar que siga haciéndolo en igual medida en un futuro casi perdurable.

Otro aspecto muy interesante de la radiación solar es que tiene su máximo de intensidad en la zona visible del espectro, concretamente en el verde, si bien contiene también una proporción apreciable de luz infrarroja y ultravioleta, de mayor y menor longitud de onda, respectivamente. En efecto, la longitud de onda máxima, $\lambda_{m\acute{a}x}$, a que emite un cuerpo viene dada, en función de su temperatura absoluta, T , por la ley de Wien, de acuerdo con la ecuación:

$$\lambda_{m\acute{a}x} = C/T \text{ (m)}$$

donde C es una constante igual a $2,897 \times 10^{-3}$ (m K).

En el espectro de radiaciones electromagnéticas —que se extiende desde los rayos γ , de longitud de onda del orden del picómetro (1 pm = 10^{-12} m), hasta las ondas largas de la radio, del orden del kilómetro (1 km = 10^3 m), la fotobiología comprende una franja

estrechísima de 300 a 1100 nanómetros (1 nm = 10^{-9} m). 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 biológica de la energía solar en energía química, comúnmente conocida como fotosíntesis. Estos procesos no pueden tener lugar en las regiones ultravioletas o del infrarrojo lejano, porque las radiaciones de estas longitudes de onda no son apropiadas para las reacciones fotobiológicas: las primeras por exceso de energía, y las segundas por defecto.

La radiación luminosa que emite un oscilador dipolar eléctrico cuando vibra con un cierto periodo y frecuencia (como resultado, por ejemplo, de la excitación y desexcitación de un átomo o molécula) está constituida por partículas elementales o fotones, que se propagan en línea recta a la velocidad de la luz en forma de onda electromagnética de igual periodo y frecuencia, y viene definida por dos constantes universales: la llamada constante de Planck, h , o producto de la energía del fotón o cuanto de luz, E , por su periodo, T :

$$ET = h = 4,135 \times 10^{-15} \text{ (eV s)}$$

y la velocidad de la luz, c , o cociente entre la longitud de onda del fotón, λ , y su periodo, T :

$$\lambda/T = c = 0,2998 \times 10^9 \text{ (m s}^{-1}\text{)}$$

Del producto de estas dos ecuaciones resulta la ecuación de la fotoquímica que relaciona, en razón inversa, la energía de un fotón con su longitud de onda:

$$E\lambda = hc = 1240 \text{ (eV nm)}$$

Por tanto, una radiación cuyos fotones posean, por ejemplo, una energía de 1 eV (es decir, un periodo de $4,135 \times 10^{-15}$ s, y una frecuencia $\nu = 1/T$, de $2,418 \times 10^{14}$ s⁻¹, hertzios, Hz) se propaga a la velocidad de la luz con una longitud de onda de 1,24 μ m (infrarrojo), y otra de 10 eV, con pasos igualmente ondulantes, pero de 124 nm (ultravioleta).

Los límites energéticos de la fotobiología (1100-300 nm) se sitúan pues, más o menos, entre 1 y 4 eV, siendo las radiaciones de longitud de onda inferior a 300 nm, es decir, aproximadamente con energía superior a 4 eV fotón⁻¹, ó 400 kJ einstein⁻¹, incompatibles con la vida y de consecuencias desastrosas para las células porque, debido a su elevada energía, pueden romper los enlaces de las macromoléculas biológicas más características —ácidos nucleicos y proteínas— y destruir

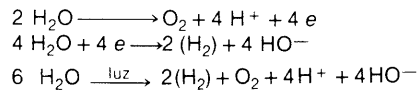
(2) La unidad de energía en el sistema internacional (SI) es el julio (J), que puede definirse como el trabajo mecánico que se realiza al levantar 1 newton —equivalente al peso de unos 100 gramos en la superficie terrestre— a una altura de 1 m. La unidad de potencia es el vatio (W) = 1 J s⁻¹.

Mecanismos de transducción biológica de la energía luminosa

En el mundo vivo existen fundamentalmente dos tipos de organismos: los fotoergónicos, que utilizan como fuente de energía la luminosa, que convierten en energía química redox, y los quimioergónicos, que se valen de la energía redox que le suministran los fotoergónicos. Ambos tipos de organismos disponen, por lo demás, de mecanismos fosforilantes *ad hoc* que les permiten transformar, a su vez, la energía química redox —conseguida directamente a través de la luz o indirectamente a través de los alimentos— en energía química de enlace fosfato (~P).

La fotosíntesis se inicia con la captación de la luz por los pigmentos fotosintéticos accesorios y su conversión en energía electrónica por los pigmentos clorofílicos de los centros de reacción. Subsiguientemente, la energía electrónica se transforma en energía redox y queda almacenada como tal. El sustrato fisiológico implicado en el proceso de la transducción de la energía luminosa en energía redox es por antonomasia el agua, que, actuando como donadora de electrones, sirve como manantial inagotable de estas partículas elementales. Dichas partículas son bombeadas continuamente en cantidades ingentes, a expensas de la energía de la luz, por

los sistemas clorofílicos transductores, desde el potencial normal del par H₂O/O₂ (E₀' pH 7, +0,82 V) al potencial normal del electrodo de hidrógeno, (E₀' pH 7, -0,42 V), a una diferencia de potencial de 1,24 V, según muestra esquemáticamente la figura 1 y resumen las siguientes ecuaciones, ajustadas para el caso particular de que la propia agua, es decir, el par H₂/H₂O, actúe también simultáneamente como aceptor de electrones:



La energía necesaria para la fotólisis neta, a pH 7, de 2 H₂O en 2 (H₂) y O₂, con transferencia de 4 e⁻ a 1,24 V, es ΔG₀' = 479 kJ (115 kcal) por cada 2 moles de H₂O fotolizada. Al representar el hidrógeno entre paréntesis, 2 (H₂), se quiere indicar que en general se trata, más que de hidrógeno molecular, de poder reductor ligado a coenzimas redox al nivel de potencial del electrodo normal de hidrógeno (-0,42 V). Obsérvese, por otro lado, que la fotólisis del agua, según la reacción anterior, cuando ella misma actúa como dadora y aceptora de electrones, requiere energía adicional, dependiente del gradiente creado de pH, puesto que genera simultáneamente energía ácido-base, o fuerza

sus delicadas estructuras.

Debe hacerse también notar, de acuerdo con las consideraciones precedentes y a efectos de comparación entre la energía solar y la nuclear, que así como la excitación de 1 electrón por un fotón de la zona fotobiológica (≅ 1 μm) implica una energía del orden de 1 eV, la aniquilación o destrucción de su masa libera hacia 1 MeV, correspondiente a un fotón γ (≅ 1 pm), es decir, aproximadamente 1 millón de veces más de energía.

Desde el punto de vista evolutivo fue crucial en la historia de la Tierra para el tránsito de la vida acuática a la terrestre el que el oxígeno liberado en la fotosíntesis, como más adelante analizaremos, formara, al acumularse en los altos estratos de la atmósfera y por la acción fotoquímica de los rayos solares, un manto de ozono. Esta capa de ozono, situada a una altura de 22 a 25 km, 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 la radiación solar y quedar privada de los rayos 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 y quizás único, pues, entre otras circunstancias providenciales, el 83 por ciento de la radiación solar que llega a la biosfera, con un máximo hacia 575 nm (≅ 2 eV fotón⁻¹, ó 200 kJ einstein⁻¹), cae dentro de los márgenes de la fotobiología, siendo visible aproximadamente la mitad de la radiación total, e infrarroja la otra mitad.

También es providencial que el vapor de agua y el dióxido de carbono, que son componentes minoritarios de la atmósfera, absorban la radiación que reemite la Tierra durante la noche, a una temperatura de unos 300 K, como luz totalmente infrarroja, evitando que sufra un enfriamiento rápido y excesivo (efecto invernadero). Aunque las concentraciones locales de vapor de agua en la atmósfera pueden variar transitoriamente, la cantidad global resulta amortiguada por las vastas áreas oceánicas y se mantiene relativamente constante. Otro tanto puede afirmarse con respecto al anhídrido carbónico, sustrato de la fotosíntesis y producto de la respiración y la combustión, si bien hay indicios, no plenamente confirmados, de que su nivel podría aumentar como consecuencia de la utilización por el hombre de los combustibles fósiles, determinando un sobrecalentamiento de la superficie terrestre.

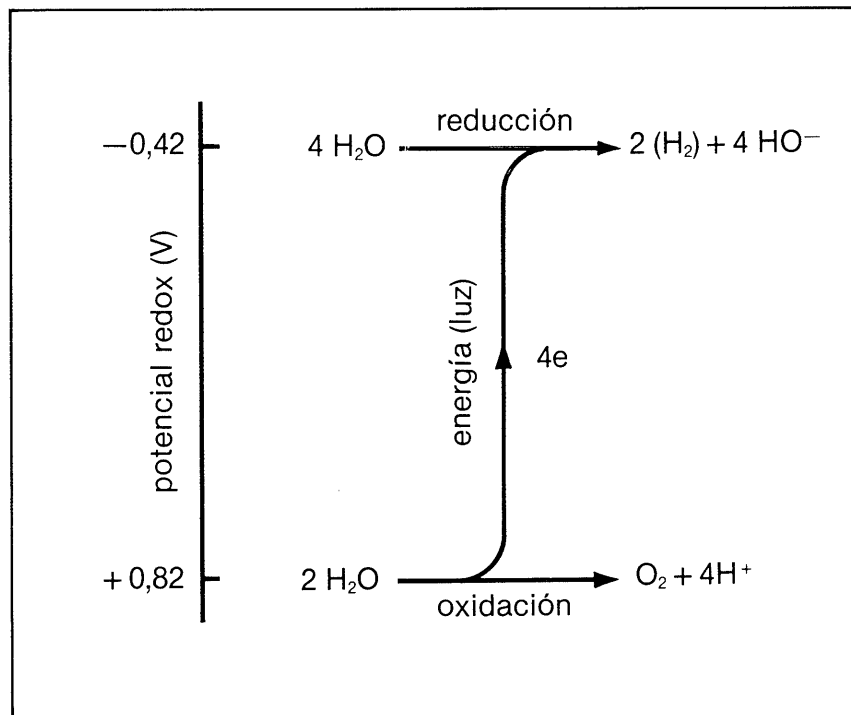


Figura 1. Biofotólisis del agua. El agua se fotooxida, con el concurso del pigmento verde clorofila, en el interior de los sacos tilacoides, liberando oxígeno molecular y protones. Los electrones removidos del agua son bombeados por el pigmento, a expensas de la propia energía luminosa, al espacio extratilacoidal, donde, a su vez, reducen el agua a hidrógeno, con la consiguiente liberación de iones hidroxilo.

(3) La unidad atómica de masa —uma, o dalton— viene definida por la relación: 1 mol dalton = 0,6022 × 10²⁴ D = 1 g, o sea, 1 D = 1,661 × 10⁻²⁴ g. La unidad atómica de energía es el electrón-voltio (eV), o trabajo eléctrico necesario para elevar la carga de 1 electrón (e) a una diferencia de potencial de 1 voltio (V), mientras que la unidad de energía en el sistema SI es el julio, que, eléctricamente, puede definirse como el trabajo necesario para elevar la carga de 1 culombio (C) a una diferencia de potencial de 1 voltio, es decir, 1 J = 1 CV. Puesto que 1 mol de electrones (0,6022 × 10²⁴ e), o faraday (F), equivale a 96,48 × 10³ C, resulta que 1 e = 1,602 × 10⁻¹⁹ C, y que 1 eV = 1,602 × 10⁻¹⁹ J = 96,48 kJ mol⁻¹. La unidad molar de fotones es el einstein.

El agua: sustrato primario de la fotosíntesis.

protomotriz, al ir acompañada también de la liberación simultánea de 4 iones hidrógeno y 4 iones hidroxilo, fenómeno que por su especial relevancia biológica se discutirá con cierto detalle más adelante.

Posteriormente, los organismos quimioenergéticos y los propios fotoenergéticos oxidan, en el proceso exergónico inverso, el poder reductor fotosintetizado con el oxígeno molecular, formando de nuevo agua y empleando parte de la energía liberada en la síntesis de enlaces de fosfato ricos en energía, a razón de 3 moles de $\sim P$ (99 kJ = 24 kcal) por cada 2 moles de electrones, es decir, 198 kJ ó 48 kcal por mol de oxígeno. En resumen, la lisis del agua en poder reductor y oxígeno molecular a expensas de la energía de la luz, que llevan a cabo las plantas verdes durante la fotosíntesis, es la reacción endergónica más simple y primordial de la bioenergética; e igualmente simple y esencial para la vida es la reacción exergónica inversa que los organismos aerobios llevan a cabo durante la respiración, para transformar la energía almacenada en el hidrógeno y oxígeno en energía de enlace fosfato y calor, cerrando de esta manera el ciclo. Es decir, el agua es tanto el sustrato primario de la fotosíntesis, en la conversión de la energía luminosa en energía redox, como el producto final de la respiración aeróbica del hidrógeno, en la subsiguiente conversión de la energía redox en energía

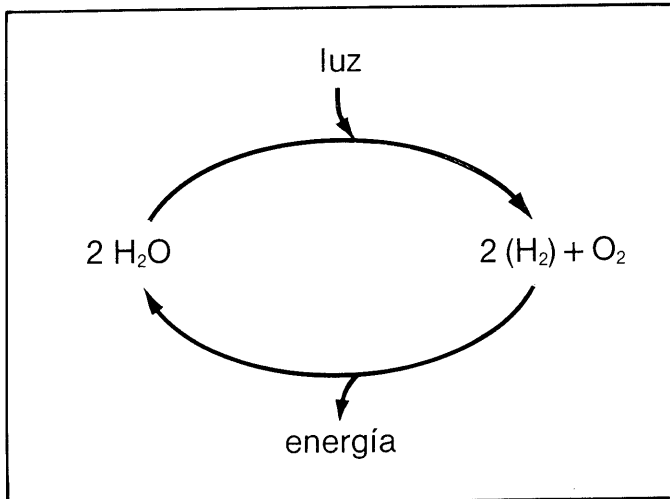


Figura 2. Ciclo fotobioquímico de oxidación-reducción del agua. En una primera fase, los organismos fotosintéticos lisan el agua, a expensas de la energía luminosa, en sus dos elementos integrantes, oxígeno e hidrógeno, incorporando el hidrógeno como material celular (biomasa) y liberando al medio el oxígeno molecular. El ciclo se cierra por oxidación biológica (respiración) o química (combustión) del hidrógeno por el oxígeno molecular, liberándose la energía almacenada como energía de enlace fosfato y/o calor.

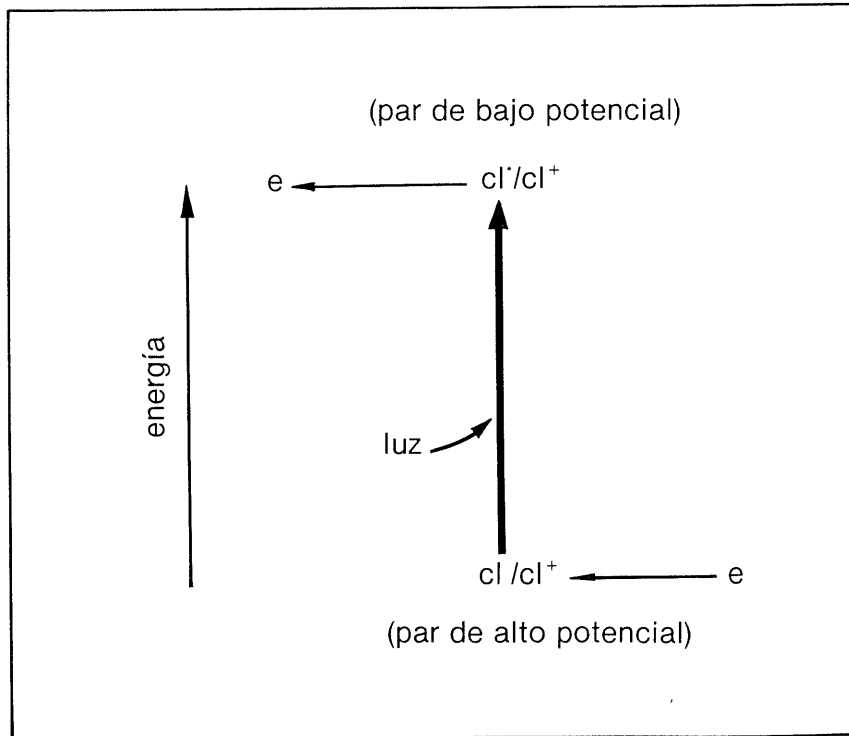


Figura 3. Flujo no-cíclico de electrones en fotosíntesis. En él participan en serie los dos fotosistemas (II y I) interconectados por una cadena de transportadores de electrones. La transferencia de un electrón contra el gradiente de potencial desde +0,82 V a -0,42 V requiere dos cuantos de luz. La energía liberada en la caída de los electrones en el tramo que interconecta los dos fotosistemas se emplea en la síntesis química de enlaces de fosfato ricos en energía. El esquema que se presenta corresponde al caso, discutido en detalle en el texto, de que el agua actúe simultáneamente como donadora y aceptora de electrones.

de enlace fosfato y energía calorífica. Alternativamente, el hidrógeno resultante de la fotosíntesis y acumulado en la biomasa vegetal (véase más adelante) puede también oxidarse por el propio oxígeno, pero a través de procesos no biológicos, liberándose directa y totalmente como calor la energía correspondiente, según muestra esquemáticamente la figura 2.

Aunque los fotones de luz roja de 700 nm —los de más larga longitud de onda que pueden promover el bombeo de electrones en fotosíntesis— poseen un contenido energético de 1,77 eV, suficiente teóricamente para óxido —reducir el agua a oxígeno e hidrógeno molecular, hay acuerdo general y fundamentado en que fisiológicamente no es suficiente un fotón por electrón. La opinión más aceptada en la actualidad entendiéndose que son precisos 2 fotones por electrón, es decir, un total de 8 fotones para fotolizar 2 moléculas de agua y liberar una molécula de oxígeno. De hecho, como muestra el esquema de la figura 3, se supone que en la cadena fotosintética de transporte de electrones actúan en serie dos fotosistemas, I y II, cada uno de ellos con un centro clorofílico de reacción fotoactivo, que

promueve, en contra de gradiente, el salto de un electrón a una diferencia de potencial de aproximadamente 1 V a expensas de la energía de un fotón. El flujo electrónico incluye también un tramo cuesta-abajo entre los dos fotosistemas, de aproximadamente 0,4 V, que, en un alarde de economía biológica, permite la síntesis de 1 $\sim P/2e$. El rendimiento neto del proceso fotosintético básico constituido por la fotólisis del agua en poder reductor y oxígeno molecular, así como por la síntesis acoplada de enlaces fosfato, es de casi el 40 por ciento.⁽⁴⁾ La liberación de una molécula de oxígeno en el lado oxidante del fotosistema II requiere la acción repetitiva de 4 fotones y la acumulación de 4 equivalentes de carga positiva para remover de golpe 4 electrones de 2 moléculas de agua y producir una molécula de oxígeno (O₂). En cambio, en el lado reductor del fotosistema I, los electrones son atrapados de uno en uno por aceptores sulfoférricos.

Es importante llamar la atención sobre el hecho fundamental, patente en las ecuaciones parciales y globales anteriores y en el esquema de la figura 2, de que tanto la fotooxidación del agua como su fotorreducción o la de otro

aceptor de electrones son reacciones redox que ocurren a uno y otro lado de la membrana fotosintética, con la consiguiente liberación de iones hidrógeno e hidroxilo, respectivamente. Es decir, el proceso fotosintético de transducción de la energía luminosa en energía redox va acompañado de la liberación de protones en el interior de los sacos del aparato fotosintético, o tilacoides, y de su fijación en el exterior de los mismos, con la creación simultánea de un potente gradiente electroquímico de protones, o fuerza protomotriz, a costa igualmente de la energía de la luz. La similitud del proceso fotosintético con el proceso electrolítico que tiene lugar en los electrodos durante la electrólisis del agua merece ser resaltada.

El papel fundamental que cabe en bioenergética no sólo a los electrones sino también a los protones es cada vez más evidente, aceptándose ya universalmente como dogma fundamental de la bionergética que tanto las membranas fotosintéticas como las respiratorias poseen sistemas transductores específicos para transformar la energía redox en energía ácido-base, y ésta, a su vez, en energía de enlace fosfato. A este respecto conviene también mencionar que, si bien la mayoría de los organismos fotosintéticos hacen uso del pigmento verde universal clorofila para transducir la energía luminosa en energía redox, existe un tipo aberrante de organismos fotosintéticos del grupo de las halobacterias que, excepcionalmente y gracias al pigmento bacteriorodopsina, convierte la energía luminosa en energía ácido-base, al traslocar protones el pigmento fotoexcitado.

El análisis del mecanismo de la conversión biológica de la energía luminosa por diversos tipos de sistemas transductores redox o ácido-base nos ha llevado recientemente a proponer, con visión unificada de los hechos, que el primer acto de la fotosíntesis consiste en la energización por la luz de una de las formas (reducida u oxidada, ácida o básica) del par redox o ácido-base implicado en la transducción, el cual experimenta en consecuencia un cambio de potencial (afinidad por los electrones) o de pK_a (afinidad por los protones). Refiriéndonos concretamente a la clorofila *a* (*cl*) de los centros de reacción de los fotosistemas, como uno de los sistemas transductores de energía más importantes de la biología, digamos que constituye un sistema redox capaz de existir en dos estados de potencial: uno, de alto potencial, cuando la forma reducida del pigmento se presenta en su estado fundamental desenergizado (*cl/cl*⁺), y otro de bajo potencial, cuando la forma reducida del pigmento se encuentra fotoexcitada por la absor-

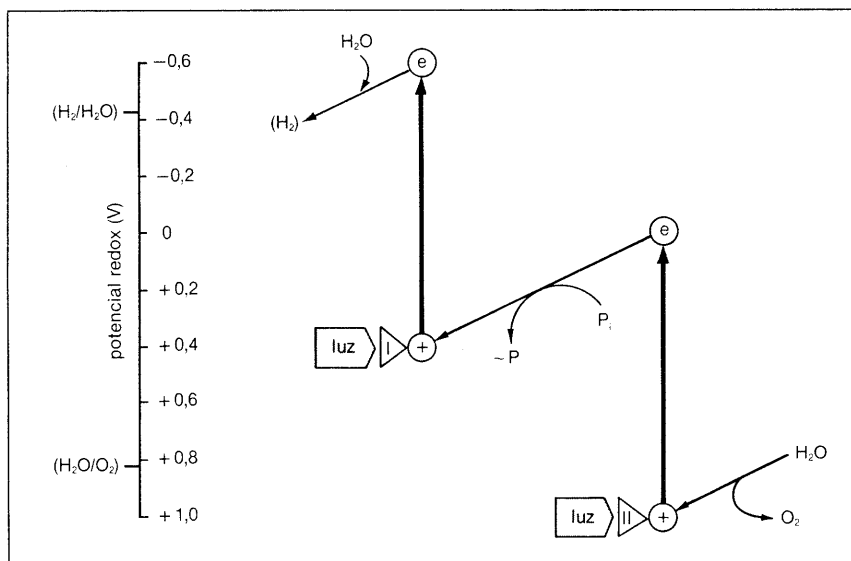


Figura 4. Transducción de la energía luminosa en energía redox por la clorofila. El pigmento en su estado reducido basal (*cl*) se excita por la absorción de un fotón (*cl*^{*}) y cede su electrón (*e*) fotoexcitado a un aceptor adecuado, a un nivel más alto de energía, pasando a su correspondiente forma oxidada (*cl*⁺). En su estado oxidado, la clorofila acepta electrones de un donador apropiado, a un nivel más bajo de energía, regenerando la forma reducida inicial y cerrando de este modo el ciclo.

ción de un fotón (*cl*^{*}/*cl*⁺). Ambos pares comparten, pues, la misma forma oxidada y, funcionando de manera cíclica alternante, permiten el bombeo de electrones contra-gradiente a expensas de la energía de la luz, según muestra esquemáticamente la figura 4.

La fotosíntesis no termina normalmente con la fotólisis del agua en hidrógeno —es decir, electrones al nivel de electrodo de hidrógeno— y oxígeno molecular, ni tampoco la respiración ni la combustión se inician usualmente con la oxidación de aquel elemento por el oxígeno. De hecho, las células verdes no acumulan el poder reductor suministrado por la fotodescomposición del agua como hidrógeno molecular, sino que lo transfieren, a través de transportadores de electrones adecuados, para incorporarlo eventualmente en material celular por reducción y posterior asimilación de los elementos biogénicos primordiales, carbono, nitrógeno y azufre. En consecuencia, la fotosíntesis, en su conjunto, consiste en la síntesis endérgica, a expensas de la luz solar visible, de productos inestables, a saber, material celular (proteínas, ácidos nucleicos, carbohidratos, lípidos, hidrocarburos, etc.) y oxígeno molecular, a partir de sustratos oxidados carentes de potencial químico útil, a saber, agua, dióxido de carbono, nitrato o nitrógeno molecular, sulfato y fosfato (figura 5). En el proceso, el carbono pasa por reducción de dióxido de carbono (estado de oxidación + 4) a carbohidrato (estado de oxidación 0) e incluso a hidrocarburo (de

—2 a —4); el nitrógeno, de nitrato (+ 5) o dinitrógeno (0) a amoníaco (—3); el azufre, de sulfato (+ 6) a sulfuro (—2); en tanto que el oxígeno del agua (—2)

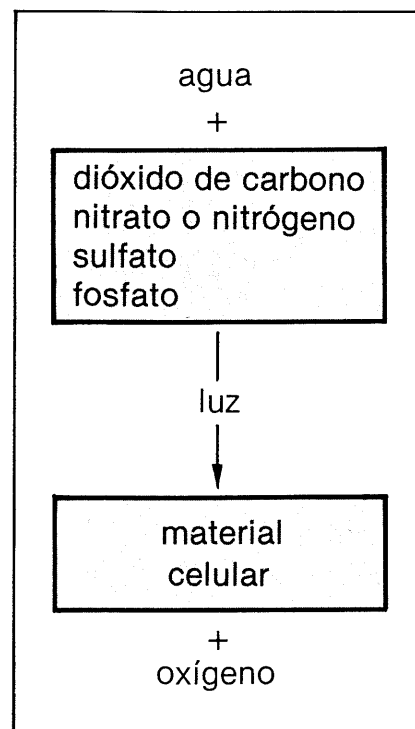


Figura 5. Asimilación fotosintética de los elementos biogénicos fundamentales. Las plantas verdes reducen fotosintéticamente, con el hidrógeno del agua, los bioelementos oxidados de que se alimentan, incorporándolos como material celular (biomasa), y desprenden oxígeno como subproducto.

(4) En efecto, se necesitan 8 moles de fotones de luz roja de 700 nm y contenido energético de 1,77 eV (14,16 eV/8 fotones = 1366 kJ/8 einstein) para fotolizar 2 moles de H₂O (479 kJ) y sintetizar, al menos, 2 moles de ATP (66 kJ), lo que resulta en un rendimiento del 545/1366 = 39,9 por ciento.

Necesidades energéticas y alimentarias de la población humana

La crisis energética y alimentaria que hoy sufre la humanidad está tan estrechamente vinculada al problema demográfico que no puede analizarse con perspectiva y objetividad al margen de éste.

La población humana ha experimentado a lo largo de los tiempos una evolución primero lenta y últimamente explosiva. Se estima que, a partir del paleolítico inferior y durante el periodo de 1 millón de años que duró la Edad de Piedra, la población de cazadores paleolíticos pasó aproximadamente de 0,5 millones a 5 millones, cifra que se alcanzó hace 10 mil años. Con la introducción de la agricultura, la humanidad pudo experimentar un nuevo crecimiento al no depender exclusivamente del ecosistema natural, llegando a alcanzar, hace unos 300 años, la cifra de 500 millones. Entonces, la revolución científica e industrial y el uso de la energía fósil permitieron que la población humana resurgiera de nuevo de manera espectacular, aproximándose en la actualidad a la cifra de 5 mil millones, de los que, por desgracia o por desidia inexplicable, más de la mitad viven hacinados en condiciones infrahumanas de indigencia y nutrición deficiente, y una parte considerable en paro forzoso y creciente.

La gráfica de la figura muestra la evolución de la población humana a lo largo de la era cristiana. Es alarmante imaginar lo que puede ocurrir en los años venideros si no se remedia sensata, honesta e inteligentemente la situación que presagia la marcha de la curva. Baste sólo pensar que el problema será cada vez más grave, y su solución cada vez peor y más difícil. Cualquier remedio para tratar de paliar la crisis que se avecina habrá de partir de esta base realista; y no olvidemos que, a largo plazo, el mejor y quizás único ahorro posible de alimentos y energía habrá de consistir no tanto en que disminuya el consumo por habitante como en que no aumente el número de éstos.

La humanidad tiene unas necesidades imperiosas y apremiantes de espacio, energía y alimentos que es preciso conocer, lo que, a su vez, como condición previa, requiere un balance ecuánime de las disponibilidades presentes y futuras. En cuanto al espacio asequible, la Tierra presenta una superficie total de unos 500 millones de km^2 (50×10^9 ha), que, repartida entre los casi 5 mil millones de habitantes (5×10^9 hab.) que la pueblan permitiría disponer de 10 ha por cabeza, de ellas, aproximadamente 7 en

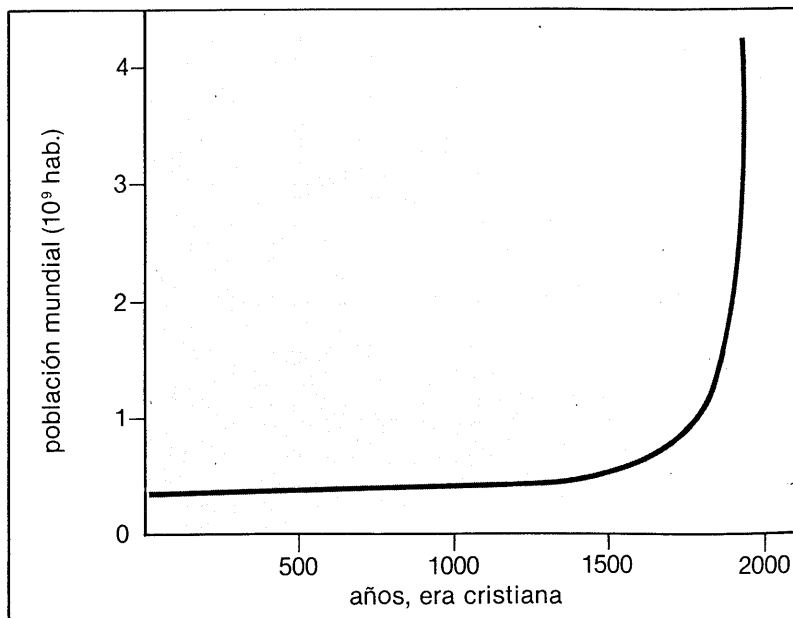
el mar y 3 en la tierra. En cuanto a la energía, repitamos que solamente la milésima parte de la energía solar que llega a la biosfera ($10^{17} \text{ W/5} \times 10^{14} \text{ m}^2$), a razón, por término medio, de 200 W m^{-2} , es fijada por el reino vegetal como biomasa ($2 \times 10^{14} \text{ kg año}^{-1}$), a razón, por término medio, de $0,2 \text{ W m}^{-2} \approx 1 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1} \approx 0,4 \text{ kg m}^{-2} \text{ año}^{-1}$.

Debe subrayarse que el valor de 200 W m^{-2} es obviamente el valor medio de energía que recibe la superficie terrestre cuando la radiación solar incide perpendicularmente sobre ella, variando lógicamente en el espacio y en el tiempo según las estaciones y condiciones climáticas, etc. Así, en el Ecuador, la intensidad solar a mediodía y con cielo despejado puede alcanzar 1 kW m^{-2} ; en nuestras latitudes, el valor medio puede oscilar entre 150 W m^{-2} en invierno y 250 W m^{-2} en verano; y en un país como Inglaterra, el valor medio es de 150 W m^{-2} . Expresada en fotones de 575 nm (2 eV fotón^{-1} , ó $200 \text{ kJ einstein}^{-1}$), la radiación solar media corresponde a $1 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, ó sea, $100 \text{ mol m}^{-2} \text{ día}^{-1}$.

Los datos anteriores permiten hacer un balance de las disponibilidades energéticas de la humanidad, referidas no sólo a la población mundial en su conjunto sino a cada individuo en particular. En su virtud, cada persona dispondría, en principio, de $2 \times 10^7 \text{ W}$ (20 MW) de energía solar, de los que $2 \times 10^4 \text{ W}$ (20 kW) quedan fijados como biomasa ($100 \text{ kg día}^{-1} \approx 40 \text{ ton año}^{-1}$).

Pasemos ahora a un breve análisis de las disponibilidades alimentarias. Digamos en primer lugar que una parte significativa de la biomasa fotosintetizada se utiliza directa o indirectamente como alimento energético y proteico, razón por la que es necesario conocer previamente su contenido tanto en carbono (C) como en nitrógeno (N). El análisis elemental del material vegetal arroja un valor de hacia el 45-53 por ciento de C frente al 3-11 por ciento de N, con una razón media C/N de 10, que oscila entre 5 en las algas y 15 en las plantas superiores. En consecuencia, puesto que el reino vegetal sintetiza unos $200 \times 10^{12} \text{ kg año}^{-1}$ de biomasa, asimila del orden de $80 \times 10^{12} \text{ kg año}^{-1}$ de C, procedente del dióxido de carbono atmosférico y disuelto en las aguas, y de $8 \times 10^{12} \text{ kg año}^{-1}$ de N, procedente en su mayor parte del nitrato (sólo $2 \times 10^{11} \text{ kg año}^{-1}$ por fijación del nitrógeno atmosférico), lo que corresponde a la síntesis de unos $50 \times 10^{12} \text{ kg año}^{-1}$ de proteína, ya que $1 \text{ g N} \approx 6,25 \text{ g proteína bruta}$. En otras palabras, de las 40 ton año^{-1} de biomasa asequibles potencialmente a cada ser humano, la cuarta parte, es decir, 10 ton año^{-1} , son proteína bruta.

Examinemos ahora las necesidades alimentarias energéticas y proteicas de la población humana, consideradas individual y globalmente. A efectos energéticos, una persona consume por término medio igual que una bombilla común de 100 W , que, como enseña la experiencia cotidiana, produce una ilumi-



Evolución de la población humana a lo largo de la era cristiana. Obsérvese el espectacular crecimiento experimentado en los últimos 300 años, que acerca en la actualidad la población mundial a 5 mil millones de habitantes.

Tabla III

Necesidades energéticas y alimentarias de la población humana

	Energía (W)	Alimentos	
		Energéticos (W)	Proteicos (kg año ⁻¹)
Población (5 × 10 ⁹ hab.)	10 ¹³	0,5 × 10 ¹²	10 ¹²
Individuo	2 × 10 ³	100	200

nación bastante intensa. Esto equivale a $8,6 \times 10^3$ kJ día⁻¹, o sea, 2×10^3 kcal día⁻¹, y, desde el punto de vista alimentario y teniendo en cuenta el contenido calórico de los alimentos (4 kcal g⁻¹ de hidrato de carbono), a 0,5 kg día⁻¹ de azúcar u otro carbohidrato asimilable. Puesto que en la respiración cada mol de glucosa (180 g) permite la síntesis de 36 moles de enlaces de fosfato ricos en energía, resulta que los 3 moles de glucosa que el hombre necesita al día producen unos 100 moles de enlaces de fosfato ricos en energía (3400 kJ ó 800 kcal), lo cual, expresado en términos de la moneda energética universal de los seres vivos, o ATP (adenosín-trifosfato), equivale a unos 50 kg de este compuesto. El rendimiento energético de la respiración es pues del 40 por ciento, es decir, que el hombre aprovecha como energía de enlace fosfato 40 W de los 100 W que consume, o también 800 kcal de cada 2000 kcal, y el resto directamente como calor. A muchos puede sorprender que el hombre consuma al día, en su mantenimiento, su propio peso de ATP. La explicación está en el hecho de que no sólo él sino todos los organismos vivos disponen del ATP en cantidades catalíticas, manteniéndolo en continuo recambio, de modo que constantemente lo fabrican y utilizan, beneficiándose de su energía de enlace.

Por otro lado, el hombre necesita, por término medio, que la décima parte de los alimentos que consume sean proteínas de alto valor nutritivo, es decir, de cada 500 g, 50 g han de ser alimento proteico. En suma, para satisfacer sus necesidades alimentarias energéticas y proteicas, el hombre requiere $100 \text{ W} \approx 500 \text{ g día}^{-1}$ (200 kg año^{-1}) de

alimentos energéticos y 50 g día⁻¹ (20 kg año^{-1}) de alimentos proteicos (Tabla III). Si extrapolamos estos valores al nivel de la población mundial resultan $0,5 \times 10^{12} \text{ W} \approx 10^{12} \text{ kg año}^{-1}$ de alimentos energéticos y $10^{11} \text{ kg año}^{-1}$ de alimentos proteicos, frente a $10^{14} \text{ W} \approx 200 \times 10^{12} \text{ kg año}^{-1}$ de biomasa y $50 \times 10^{12} \text{ kg año}^{-1}$ de proteína fotosintetizada por el reino vegetal.

Ya hemos mencionado que la mitad de la biomasa fijada por el reino vegetal corresponde al ecosistema marino ($10^{14} \text{ kg año}^{-1}$) y la otra mitad al terrestre ($10^{14} \text{ kg año}^{-1}$), representando en este último los cultivos agrícolas una fracción de hacia el 10 por ciento ($10^{13} \text{ kg año}^{-1}$) de la que, a su vez, sólo es cosechable una parte. El ganado y los peces consumen una gran parte de la biomasa (pastos, forrajes, plancton) no utilizable directamente por el hombre, pero actualmente es también muy elevada la proporción de cereales (maíz, cebada), leguminosas (soja) y pescado (anchoa), directamente comestibles, que, a pesar de la pérdida que ello conlleva, se destina a usos ganaderos para su transformación en alimentos proteicos de alto valor nutritivo y atractivo culinario. Hoy por hoy, las fuentes proteicas que consume la humanidad ($10^{11} \text{ kg año}^{-1}$) se distribuyen así: cereales $4,7 \times 10^{10}$ (47 %); carne $2,4 \times 10^{10}$ (24 %); leguminosas $2,0 \times 10^{10}$ (20 %); pescado $5,0 \times 10^9$ (5 %); otros vegetales $4,0 \times 10^9$ (4 %). Puede observarse que representan sólo 1/500 de la proteína total fabricada por el ecosistema natural ($50 \times 10^{12} \text{ kg año}^{-1}$), en su mayor parte por el marino, ya que a éste cabe el alto contenido en nitrógeno propio del fitoplancton. Recuérdese que hacia el 50

por ciento del peso seco de la materia viva propiamente dicha (por ejemplo, célula procariota o eucariota típica) es proteína.

Los cálculos anteriores se refieren a la necesidad alimentaria mínima vital, pero el hombre moderno tiene muchas más exigencias que las meramente biológicas —representando algunas de ellas un verdadero despilfarro— y no tolera vivir en la naturaleza como un animal más, ni limitarse a consumir la energía que le facilitan sus músculos. Concretamente, en los países prósperos la tasa energética para vivir al nivel que se considera confortable es de un orden 100 veces mayor y, en la media del conjunto global, del orden de 20 veces. Es decir, el hombre de nuestro tiempo no consume lo que una bombilla de 100 W, sino lo que un motor de cierta potencia, 2 kW. En consecuencia, como muestran también los datos de la Tabla III, la población humana en su conjunto está consumiendo, aunque muy desigualmente, 20 veces más energía (10^{13} W) de la que necesita para su alimentación ($0,5 \times 10^{12} \text{ W} \approx 10^{12} \text{ kg año}^{-1}$). En contrapartida, el reino vegetal fija, como biomasa, 10 veces más energía, es decir, $10^{14} \text{ W} \approx 2 \times 10^{14} \text{ kg año}^{-1}$, de la que, como tal, consume la humanidad.

Como resumen, es útil comparar de nuevo en forma panorámica los datos concernientes a la conversión biológica de la energía solar en relación con el consumo energético y alimentario de la humanidad y con las reservas mundiales, comprobadas y estimadas, de combustibles fósiles y de biomasa.

**En el final de la «era de los combustibles fósiles»
el hombre a vuelto su atención a la fotosíntesis.**

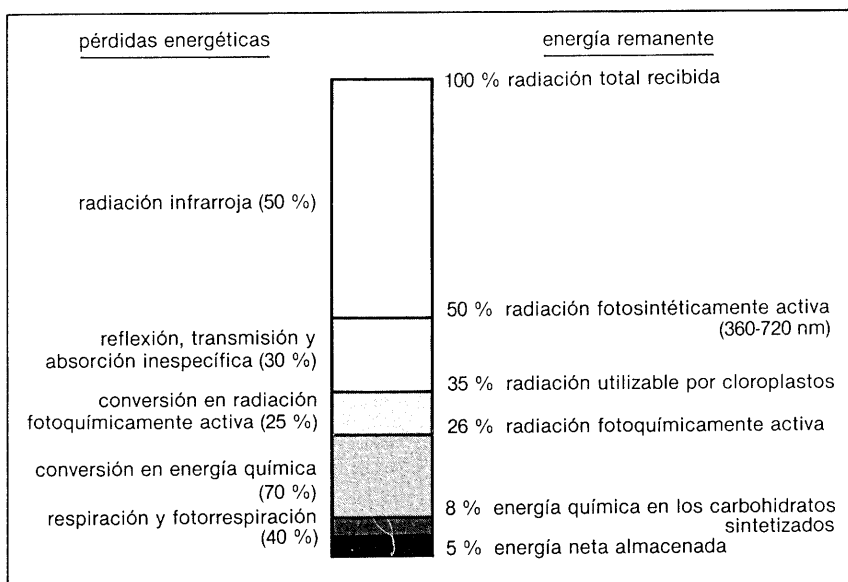


Figura 6. Eficiencia de la conversión de luz solar en carbohidratos por las plantas verdes. Los factores que se indican contribuyen a que sólo alrededor del 5 por ciento de la energía de la luz solar incidente sobre las plantas clorofílicas quede finalmente almacenada como energía química.

se oxida estequiométricamente a oxígeno molecular (O). Curiosamente, el fósforo no cambia su estado de oxidación, sino de fosfato inorgánico a fosfato orgánico rico en energía, que actúa catalíticamente como eslabón energético o se incorpora como tal a las macromoléculas celulares.

La figura 6 recoge los diversos factores de pérdida energética que afectan a la conversión de la luz solar en energía química por una planta verde que sintetice carbohidratos a partir de anhídrido carbónico. La eficiencia máxima teórica del proceso, que incluye también las pérdidas energéticas posteriores a la síntesis debidas a procesos degradativos, es del orden del 5 por ciento. Los procesos de reducción fotosintética de las formas oxidadas de los otros bioelementos transcurren igualmente con rendimientos análogos.

Aprovechamiento de la biomasa vegetal

Un aspecto muy relevante en relación con la conversión de la energía solar que realizan las plantas radica en la enorme variedad de productos que resultan del proceso fotosintético. Dichos productos constituyen en conjunto el material denominado biomasa vegetal, propio de los diferentes organismos que integran la riquísima flora terrestre, desde las bacterias fotosintéticas y las algas microscópicas hasta los árboles gigantes.

En general, la biomasa vegetal ha sido utilizada en gran escala con distintos fines —alimentarios, plásticos y energéticos— según su composición y

propiedades. Así, el hombre ha seleccionado para su alimentación y la cría de ganado plantas con elevado contenido en proteínas, grasas, féculas y azúcares, y se ha servido de determinados tipos de fibras celulósicas para su utilización en la industria textil, destinando preferentemente la madera a su uso como combustible, y también como material para la construcción en sentido amplio, fabricación de máquinas y enseres, industria papelera, etc.

Hasta el advenimiento de la llamada «era de los combustibles fósiles» en que actualmente nos encontramos, la humanidad cubrió sus necesidades, tanto de alimentos como de materiales plásticos y energéticos, con los productos de la fotosíntesis mediata y contemporánea. Luego comenzó a utilizar además, masivamente, las reservas acumuladas de los productos de la fotosíntesis remota —carbón en una primera fase, y petróleo y gas natural posteriormente— no sólo como fuente de combustibles, sino también para la fabricación de compuestos químicos, fibras y otros materiales sintéticos.

Dado que las reservas de combustibles fósiles se encuentran ya próximas a su agotamiento y que, según hemos analizado más arriba, la población del planeta crece exponencialmente y exige cada vez mayores aportes, tanto alimentarios como materiales y energéticos, el hombre ha vuelto su atención a la fotosíntesis como proceso de captación, conversión y almacenamiento de la energía solar, en la confianza de que el aprovechamiento adecuado de su inmenso potencial pueda contribuir significativamente a mantener en el futuro el

nivel de vida alcanzado en los países prósperos, haciéndolo a su vez extensivo a toda la población mundial. Una nueva mirada a la Tabla I indica que ello es teóricamente posible, ya que tanto la energía solar asequible como la fijada por el reino vegetal en su conjunto sobrepasan ampliamente, en principio, tanto las necesidades presentes como las previsibles a corto y medio plazo.

No pueden ignorarse, sin embargo, los graves factores que dificultan y limitan el aprovechamiento no sólo de la energía solar primaria, sino de una fracción considerable de la biomasa fotosintetizada, destacando en primer lugar, por lo que a ésta respecta, el de la localización de gran parte de la misma en los océanos y lugares de difícil acceso, que de momento la dejan fuera del alcance del hombre. Los costes energéticos de recolección y transporte restringen también el posible aprovechamiento de la biomasa producida en lugares relativamente alejados de los centros de utilización. Por otra parte, la existencia de vastos eriales, la extensión limitada de las zonas cultivables, y el tipo de materias primas carbonadas y combustibles, preferentemente líquidas y gaseosas, en que la civilización actual basa su funcionamiento imponen serios condicionamientos tanto a la producción de biomasa aprovechable como al estado en que ésta puede utilizarse, por lo que consiguientemente y con frecuencia es necesario el procesamiento previo de la misma. Se impone, pues, la introducción de nuevas concepciones para mejorar la productividad de las áreas cultivables y para la explotación de las baldías, incluyendo, si procede, el cultivo de especies hasta ahora poco consideradas, con el fin de optimizar la producción de biomasa tanto alimentaria como plástica y energética. Se precisa también implantar la producción de fuentes alternativas de proteínas, así como el desarrollo de tecnologías adecuadas para la transformación de la biomasa en materiales de interés industrial y energético.

Producción de alimentos

Para conseguir aumentar la producción de alimentos ha de incrementarse tanto la superficie de las tierras cultivables como la productividad del suelo. Aunque, en principio, podría doblarse la superficie dedicada a cultivos agroalimentarios, ello requeriría enormes inversiones en el acondicionamiento de los suelos. En lo referente a los aumentos de productividad por unidad de área, y a falta de avances revolucionarios en las investigaciones que en este sentido se llevan a cabo, la posibilidad de conseguir tal objetivo descansa, ante todo,

en la optimización de las prácticas agrícolas, que requiere, como uno de los factores primordiales, el abono adecuado de los suelos mediante el aporte de nitrógeno y demás elementos necesarios para el máximo rendimiento de los cultivos.

La síntesis industrial de los abonos agrícolas, particularmente de los nitrogenados, se basa esencialmente en la utilización de materias primas y energía derivadas de combustibles fósiles. La escasez de petróleo y gas natural, con las consiguientes alzas de precios, inciden fuertemente en la disponibilidad y asequibilidad de abonos, cuyo coste energético constituye alrededor del 50 por ciento del aporte energético total a los cultivos, representando los de naturaleza nitrogenada el componente mayoritario. Actualmente se presta por ello extraordinaria atención a la posibilidad de utilizar medios biológicos de abono, especialmente a base de incrementar la contribución de la fijación biológica de nitrógeno atmosférico. Este proceso lo llevan a cabo un reducido número de microorganismos, caracterizados por su capacidad de reducir el nitrógeno molecular a amoníaco, bien por sí solos a expensas de sustratos carbonados o de energía solar, o en asociación simbiótica con algunas plantas superiores, especialmente las leguminosas. Las esperanzas inmediatas de desarrollar una explotación intensiva de la fijación biológica de nitrógeno en la práctica agronómica se fundan especialmente en conocer mejor el proceso, sobre todo a nivel genético, bioquímico y fisiológico, y en conseguir la utilización adecuada de los organismos fijadores.

Por otro lado, merece mención especial la posibilidad de disponer de fuentes de proteínas alternativas a las de origen agrícola para su empleo en la alimentación humana, bien directamente bien a través de animales que las transformen eficaz y convenientemente para su uso ulterior. Entre estas fuentes alternativas de alimentos de calidad se encuentra la representada por la biomasa rica en proteínas de microorganismos adecuadamente seleccionados, que se denomina proteína unicelular o microbiana (*single cell protein*). Algunos de los microorganismos utilizados con este propósito (bacterias quimiotróficas, levaduras, hongos) son capaces de crecer rápidamente sobre materiales biológicos de escaso valor energético o alimentario (representados en algunos casos por residuos de la industria alimentaria u otro tipo de biomasa con alto contenido en celulosa), mientras que otros, como los fotosintéticos, sólo requieren energía solar y nutrientes inorgánicos.

Aunque no constituye de por sí un re-

quisito indispensable, resulta conveniente para la economía del sistema el que los microorganismos utilizados sean fijadores de nitrógeno, pues de este modo se obvia la necesidad de tener que aportar a los medios de cultivo nutrientes nitrogenados.

Las ventajas que reportaría la puesta en marcha a gran escala de estas vías alternativas a los cultivos agrícolas convencionales justifican totalmente los esfuerzos intensivos dedicados a este fin. Especialmente destacables son los sistemas de microalgas, que trataremos en detalle más adelante

Transformación en materias primas y combustibles

La utilización de biomasa vegetal seca, especialmente en forma de madera o paja, para la generación de calor por combustión directa es un hecho cotidiano de todos conocido. Este uso, aunque bastante disminuido si se compara con el de épocas anteriores, todavía persiste. Así, la madera cubre, por término medio, hasta el 5 por ciento de las necesidades energéticas presentes en los países industrializados (porcentaje similar al cubierto por la energía nuclear), llegando a representar la fracción mayoritaria (hasta el 95 por ciento) en los países en vías de desarrollo, donde la media de consumo alcanza alrededor de una tonelada por habitante y año. En conjunto se estima que la madera suministra en la actualidad aproximadamente el 14 por ciento del consumo energético mundial. Aparte de otros usos más directos, el calor producido en la combustión de la biomasa seca puede también transformarse en electricidad mediante la generación de vapor de agua a alta presión y su paso a través de una turbina.

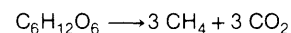
Sin embargo, la baja densidad física y energética de gran parte de la biomasa, tal como se recolecta directamente del terreno o se recupera de los desechos, así como su contenido en agua, normalmente alto, determinan que en la mayoría de los casos no sea adecuada como tal para reemplazar a los combustibles fósiles, gaseosos o líquidos. Se hace necesaria, pues, la transformación previa de la biomasa en combustibles de mayor densidad energética y/o física, contándose para ello con diversos procedimientos, que generan una gran variedad de productos. Según resume la figura 7, los procedimientos de conversión de la biomasa para la generación de combustibles de calidad pueden dividirse en dos grupos, de acuerdo con la naturaleza biológica o fisicoquímica de los procesos implicados.

La biomasa con alto grado de humedad puede transformarse por degrada-

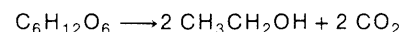
ción biológica, mediante procesos de digestión anaeróbica o de fermentación alcohólica, en metano o etanol, respectivamente, consiguiéndose aumentar la densidad energética de la biomasa de 16 kJ g⁻¹ a 30 kJ g⁻¹ (etanol) y 56 kJ g⁻¹ (metano). En la actualidad, las técnicas más desarrolladas son, por un lado, la digestión anaeróbica de biomasa con alto contenido en celulosa (basuras, residuos agrícolas, ganaderos e industriales, plantas acuáticas, etc.) para la generación de metano, y por otro, la fermentación de materiales azucarados o amiláceos para la producción de etanol. En contraste con la fermentación alcohólica que utiliza como sustratos productos de alto valor económico que sirven también para la alimentación humana o del ganado, la digestión anaeróbica emplea materias primas de escaso valor.

Las ecuaciones globales para los procesos biológicos implicados, suponiendo la glucosa como sustrato, son las siguientes:

a) Digestión anaeróbica



b) Fermentación alcohólica



En la fermentación alcohólica intervienen levaduras que convierten directamente hexosas en etanol. En la digestión anaeróbica participan secuencialmente tres categorías de bacterias cuyas funciones son: 1) hidrólisis de polímeros (celulosa, lípidos, proteínas); 2) producción de ácidos volátiles (principalmente acético), CO₂ y H₂; y 3) generación de metano.

En lo que se refiere a la producción de etanol, el rendimiento teórico en peso, con glucosa como sustrato, es superior al 50 por ciento, recuperándose aproximadamente el 93 por ciento de la energía contenida en el sustrato. En la práctica, el rendimiento puede estar entre el 85 y el 90 por ciento del valor teórico. En el caso del metano, y también con glucosa como materia prima, el rendimiento en peso es sólo del 27 por ciento, aunque el rendimiento energético es superior al 93 por ciento. Sin embargo, la naturaleza compleja de la materia procesada en los digestores anaeróbicos y la baja eficiencia de conversión se traducen, por lo común, en rendimientos energéticos brutos del 20 al 50 por ciento.

Aunque son previsibles mejoras notables en la tecnología de estos procesos que conduzcan a aumentos de rendimiento, su eficiencia se encuentra ya avalada por la práctica. Así, la existencia de más de 7 millones de digestores

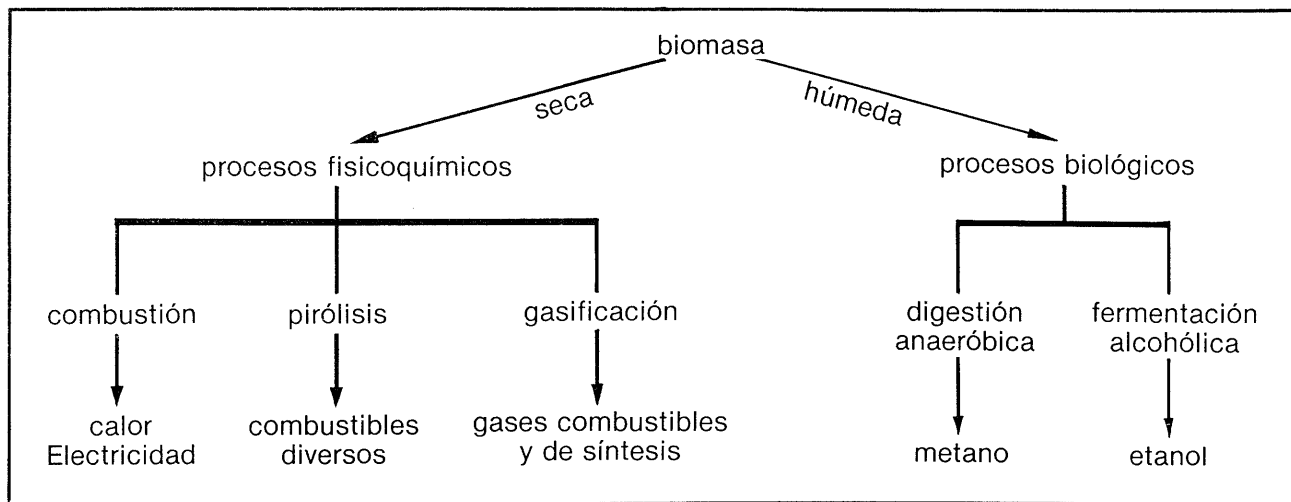


Figura 7. Procedimientos para la conversión de la biomasa en combustibles. La biomasa con bajo contenido en agua es más idónea para su transformación mediante procesos térmicos, mientras que los procesos biológicos se llevan a cabo en medios acuosos, pudiendo utilizar por ello como materia prima biomasa con alto contenido en agua.

en China y su implantación masiva en otros países puede ser indicativa en lo que se refiere al interés de la digestión anaeróbica, en su doble papel de generación de un combustible gaseoso (biogas, con alto contenido en metano) y eliminación de desechos, con la ventaja adicional de suministrar un residuo sólido con valor de abono. En cuanto a la fermentación alcohólica, el caso de Brasil, con una producción anual de 5 mil millones de litros de etanol a partir de caña de azúcar, sorgo y mandioca, representa hoy el mayor programa de utilización de biomasa para la generación de combustibles líquidos. Estados Unidos planifica la producción, a partir de maíz, de 2 mil millones de litros de etanol al año para su uso como combustible en mezcla al 10 por ciento con gasolina (gasohol). Actualmente se realizan también grandes esfuerzos para conseguir una producción efectiva de etanol a partir de madera y otros materiales celulósicos, previa hidrólisis química o biológica de los correspondientes polímeros.

Los materiales más idóneos para su conversión fisicoquímica son los de bajo contenido en agua y alto en lignocelulosa, tales como madera, paja, cáscaras, etc. Los procedimientos fisicoquímicos de conversión se basan en someter la biomasa a la acción de altas temperaturas, y pueden dividirse en dos amplias categorías, dependiendo de que el calentamiento se lleve a cabo en ausencia de aire (pirólisis) o en presencia de cantidades limitadas de oxígeno (gasificación). El producto principal de la gasificación es un gas pobre, compuesto de cantidades variables de CO, CO₂, H₂ y CH₄. Este gas puede enriquecerse en metano, dando lugar así a un sustituto del gas natural, o reformarse a gas de síntesis, con proporciones

adecuadas de CO y H₂. Los productos de la pirólisis son una mezcla de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos en proporciones variables, dependiendo de las temperaturas y presiones empleadas en el proceso. Hay una tercera categoría de procesos térmicos de conversión, la hidrogasificación, que consiste en hacer reaccionar la biomasa con hidrógeno a temperaturas superiores a 500° C para producir metano y etano. Este procedimiento parece tener menor interés que los anteriores, pues requiere hidrógeno, en sí mismo un combustible valioso.

Entre las diferentes opciones analizadas, el procedimiento que podría ofrecer mayores ventajas sería el de una gasificación que a base de utilizar parte del material como combustible, con objeto de generar las altas temperaturas requeridas, permitiese su transformación en gas de síntesis, fácilmente convertible en metanol o incluso en hidrocarburos.

En la actualidad ya se posee una tecnología adecuada, aunque ciertamente perfectible, para la producción de calor, electricidad y combustibles sólidos, líquidos y gaseosos a partir de la biomasa (figura 7). Entre los productos que se obtienen de la biomasa, los alcoholes constituyen, además de poderosos combustibles líquidos, el punto de partida para la producción de toda una serie de compuestos químicos, plásticos y fibras sintéticas. Quedan, pues, abiertas nuevas vías para la sustitución parcial de los combustibles fósiles convencionales y de sus derivados por la biomasa renovable.

Beneficio de productos industriales

Hay multitud de plantas que acumulan compuestos de gran interés energético o industrial como parte de su

biomasa, razón por la que poseen notable valor práctico y pueden explotarse en gran escala con indudable beneficio. Se da, además, la circunstancia de que la mayoría de estas plantas viven y se desarrollan en zonas áridas, caracterizándose por su extraordinaria economía en el uso del agua, así como por su marcada resistencia frente a condiciones ambientales extremas motivadas por diversos factores ecológicos.

Entre este tipo de plantas se han identificado diversas especies que producen y acumulan hidrocarburos utilizables como combustibles o materias primas tras una sencilla extracción, es decir, sin necesidad de someter la correspondiente biomasa a los procedimientos biológicos o termoquímicos que se requieren normalmente para su transformación. Un ejemplo bien conocido es el árbol del caucho (*Hevea*), cuyo látex representa la fuente natural de dicho producto. Otro arquetipo de planta cauchífera a la que se está prestando atención como fuente de este material es el guayule (*Parthenium argentatum*), especie herbácea de desarrollo espontáneo, bastante común en algunas zonas desérticas de México y Estados Unidos. También se están llevando a cabo en distintos países una serie de intentos, encabezados por los del premio Nobel Melvin Calvin, para establecer plantaciones de determinadas especies de plantas, típicas de zonas áridas y representadas especialmente por las del género *Euphorbia*, que acumulan hidrocarburos de peso molecular inferior al del caucho. El látex de estas «lechetreznas» presenta propiedades similares a las del petróleo, habiéndose estimado como razonable para terrenos desérticos una producción anual del orden de veinte barriles de «petróleo vegetal» por hectárea.

Además de las plantas que producen hidrocarburos se han identificado otras muchas especies vegetales que contienen diferentes compuestos orgánicos mayoritarios de interés práctico, entre los que se incluyen, por ejemplo, los aceites lubricantes y combustibles. La jojoba (*Sidmonsia chinensis*) es una de tales especies, y su aprovechamiento mediante cultivo controlado ha despertado gran interés en diferentes países, entre ellos España. El aceite extraído de su semilla es bastante similar al del cachalote, cuyo suministro empieza a escasear como consecuencia de las medidas adoptadas para la conservación de este cetáceo. El uso más interesante del aceite de jojoba es como lubricante industrial, pero representa asimismo una fuente excelente de ceras y barnices, empleándose también en la industria farmacéutica y en cosmética.

En los últimos años se ha concedido también gran atención a la posible utilización de aceites vegetales como combustibles para motores diesel, habiéndose comprobado la eficiencia de diferentes mezclas de gas-oil y aceites de girasol, soja, palma, cacahuete y otros. Se ha sugerido que bastaría con destinar al cultivo del girasol el 10 por ciento de la superficie de una plantación de maíz totalmente mecanizada para asegurar la autonomía total de combustible para la maquinaria empleada. Por lo que se refiere a la cuestión de si el aceite de plantas oleaginosas deberá utilizarse preferentemente para la alimentación o como combustible, la respuesta habrá de decidirse en función de las circunstancias particulares de cada región o país, sin que puedan ofrecerse reglas generales. Por lo demás, ésta es una cuestión que se presentará como contencioso no fácil de resolver siempre que se considere la disyuntiva de cultivos agroalimentarios frente a cultivos agroenergéticos. Por descontado que lo ideal sería emplear para fines energéticos tierras marginales y residuos agrícolas que no compitieran con los cultivos para la producción de alimentos, aunque es muy posible que sean criterios de tipo social, económico y político los que finalmente determinen la decisión que haya que tomar.

Potencial fotosintético de las microalgas

Como es típico de la mayoría de los organismos clorofílicos, las microalgas poseen la facultad de llevar a cabo el proceso de la fotosíntesis utilizando agua como donador terminal de electrones. Las microalgas presentan gran diversidad de tamaños, formas y estructuras, caracterizándose sus representantes

más primitivos, las cianobacterias o algas verde-azuladas, por ser procariotas. Por lo que se refiere a la conversión de la energía luminosa en energía química almacenada, las microalgas constituyen organismos fotosintéticos extraordinariamente eficientes, que alcanzan rendimientos de hasta el 5 por ciento y productividades de biomasa del orden de 50 a 200 toneladas (peso seco) por hectárea y año, valores no sólo notablemente superiores a los de los cultivos agrícolas convencionales sino de los más elevados que se conocen.

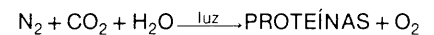
En general, las microalgas se desarrollan naturalmente en medios acuáticos, tanto de aguas dulces como saladas, por lo que su cultivo no compete, en principio, con la mayoría de los cultivos agrícolas convencionales. Las microalgas pueden cubrir total y permanentemente las superficies de las zonas destinadas a su cultivo, ya que, en las áreas donde no se presentan cambios climáticos drásticos, su crecimiento puede mantenerse sin solución de continuidad a lo largo de todo el año, habiendo además estirpes que pueden tolerar condiciones ambientales adversas para la mayoría de los organismos.

La calidad de la biomasa de las microalgas viene determinada por la ausencia de tejidos y órganos no aprovechables, así como por su bajo contenido en materiales estructurales, destacando particularmente en su composición el elevado contenido en proteína con valores de proteína bruta ($N \times 6,25$) del orden del 50 al 60 por ciento del peso seco. La proteína de algas presenta un aminograma bastante equilibrado, similar al de la harina de soja o de pescado, así como al estándar de la FAO. Los estudios de digestibilidad llevados a cabo hasta ahora con distintas especies de algas han arrojado resultados muy positivos, comparables, en lo que se refiere a los diferentes parámetros internacionales de nutrición, con cualquiera de los alimentos de uso frecuente para animales. Las microalgas poseen gran interés no sólo por su riqueza en proteína, sino por su contenido en vitaminas y minerales. El porcentaje de ácidos nucleicos de las microalgas (del 5 al 10 por ciento) no es demasiado alto si se compara con el de las bacterias, y su empleo en la dieta en combinación con otros piensos convencionales no representa ningún problema especial.

Si bien el estudio científico intensivo del potencial alimentario de las microalgas se ha puesto en marcha sólo hace unos años, el inicio de su uso como alimento por el hombre es tan remoto que resulta difícil de precisar. A este respecto podría citarse que el alga verde-azulada *Spirulina*, que crece espontáneamente en los lagos Chad (El Chad) y

Texcoco (México), se recolecta desde tiempo inmemorial para su consumo, después de secada al sol y mezclada con granos de cereales, por los pueblos kanembu y azteca. Mientras que la población que vive alrededor del lago Chad mantiene aún esta práctica tradicional, la producción de *Spirulina* del lago Texcoco ha sido industrializada por una compañía privada que extrae 2 toneladas diarias de algas de la zona de 20 ha que cultiva, exportándola a distintos países para su consumo como alimento de peces y ganado. Recientemente se ha extendido su mercado, utilizándose también como componente de harinas para regímenes vegetarianos y de píldoras medicinales.

Actualmente se llevan a cabo en una serie de países repartidos a lo largo y ancho del globo experiencias destinadas a la implantación de cultivos masivos de microalgas. Entre los diversos grupos de microalgas utilizables destacan especialmente las verde-azuladas fijadoras de nitrógeno atmosférico, ya que, en contraste con el resto de los organismos fotosintéticos —si se exceptúan las bacterias fotosintéticas y las plantas que viven en simbiosis con microorganismos fijadores— no requieren nitrógeno fijado para su desarrollo. En efecto, las algas verde-azuladas filamentosas provistas de heterocistos pueden utilizar el nitrógeno molecular presente en el aire para la síntesis de proteínas y demás componentes nitrogenados de su materia celular, en reacciones impulsadas por la energía luminosa, que, globalmente y de una manera esquemática y simplificada, pueden representarse como sigue:



En nuestra opinión, el cultivo de estos microorganismos, con requerimientos tan simples, económicos y abundantes como la luz solar, el aire, el agua y algunas sales minerales, puede constituir una de las futuras vías de elección para la producción de alimentos proteicos alternativos o complementarios de los tradicionales. Uno de los programas hoy en curso en el Departamento de Bioquímica de la Facultad de Biología y CSIC de Sevilla se centra en la selección de estirpes idóneas de microalgas, atendiendo fundamentalmente a criterios de composición, productividad y tolerancia a condiciones extremas, para su empleo en la producción de biomasa de calidad.

Al margen de la implantación de cultivos de microalgas en zonas adecuadas para la producción de biomasa de calidad, también se han desarrollado sistemas que utilizan aguas residuales con el doble objetivo de producción de

La utilización de las microalgas no se limita a su cultivo normal, también pueden manipularse mediante técnicas bioquímicas o genéticas.

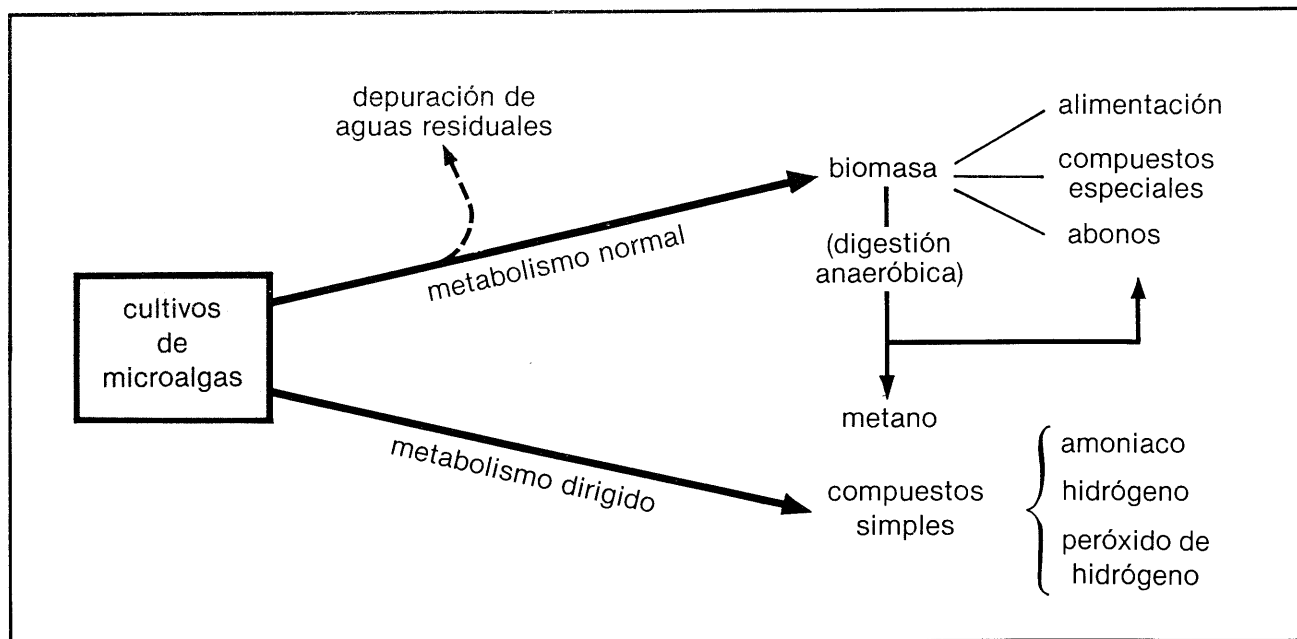


Figura 8. Posibilidades del empleo de microalgas en la conversión de la energía solar con distintos fines. La biomasa producida a través del proceso fotosintético normal puede utilizarse para la alimentación animal o humana, extracción de compuestos especiales, o abono agrícola, así como para la producción de metano, pudiéndose entonces emplear también los residuos como abono. La propia producción de biomasa puede llevarse a cabo sobre aguas residuales, consiguiéndose al mismo tiempo la depuración de éstas. La manipulación de los cultivos permite modificar el metabolismo fotosintético normal, dirigiéndolo a la producción de compuestos de interés energético, industrial y agrícola.

biomasa proteica y de recuperación del agua para riego y otros fines. Estos sistemas, que se encuentran ya funcionando en Israel y otros países, emplean aguas residuales urbanas para el crecimiento de cultivos mixtos de bacterias y algas. Las bacterias degradan aeróbicamente los compuestos orgánicos a sus correspondientes formas oxidadas inorgánicas, y las algas utilizan a continuación esos nutrientes inorgánicos resultantes para producir material celular a expensas de la energía solar. El oxígeno que producen fotosintéticamente las algas suministra a su vez el medio aeróbico que requieren las bacterias, por lo que ambos tipos de microorganismos cierran un ciclo cuyo balance final resulta en el suministro de agua purificada para el riego y de biomasa microbiana para la alimentación animal. Se ha estimado que para producir la misma cantidad de materia orgánica útil que la que suministra la agricultura convencional, este tipo de cultivos requiere sólo 1/50 de la superficie, 1/10 del agua, 2/3 de la energía, 1/5 del capital y 1/50 de la mano de obra.

Como se representa esquemáticamente en la figura 8, hay otros posibles fines, alternativos a los alimentarios, para la biomasa de algas. Así, por su contenido en C,N,P,K y otros elementos biogénicos, la biomasa de algas representa un abono agrícola muy completo, que aporta al suelo todos los nutrientes requeridos para el desarrollo de los cultivos agrícolas. Este uso de

las algas como abono se practica de forma empírica en distintos países de Oriente, recogiendo los agricultores las algas que crecen naturalmente en charcas o lagos para añadirlas a los suelos cultivables. Por otro lado, la biomasa de algas se puede emplear con propósitos energéticos, en cuyo caso la digestión anaeróbica para la producción de biogas con alto contenido en metano parece ser el proceso más adecuado, ya que, como mencionamos anteriormente, este proceso permite la utilización de materiales con alto contenido en agua. Los residuos sólidos remanentes de la digestión anaeróbica representan un perfecto abono, pues conservan prácticamente todos los elementos minerales de la biomasa original.

Otra posibilidad para el aprovechamiento de la biomasa de algas, como de las de plantas en general, es su utilización como materia prima para la extracción de compuestos de alto valor y calidad. Ejemplos de compuestos de este tipo son pigmentos para la industria alimentaria (tales como carotenos y xantofilas), vitaminas o provitaminas, lípidos y esteroides especiales, así como otros de utilidad en bioquímica y farmacia. Digamos, en fin, que algunas microalgas pueden almacenar intracelularmente cantidades considerables de algunos productos especiales de interés. En este contexto resaltan las algas verdes *Botryococcus braunii*, cuyo contenido en hidrocarburos ligeros representa hasta el 75 por ciento del peso seco del

organismo, y *Dunaliella parva*, que en respuesta a altas concentraciones salinas estimula la producción de glicerol, alcanzando valores del orden del 50 por ciento de su peso seco. También en estos casos, una vez extraídos los compuestos de interés, el resto de la biomasa puede utilizarse para otros de los propósitos mencionados anteriormente, tales como el abono agrícola o la producción de metano por digestión anaeróbica.

Las posibilidades hasta aquí analizadas para la utilización de las microalgas se limitan a su cultivo normal, de forma que aprovechen la luz solar para la producción de biomasa en condiciones fisiológicas que no alteren su metabolismo. Otra opción no menos interesante, también recogida en la figura 8, se refiere a manipulación, mediante técnicas bioquímicas o genéticas, de las rutas metabólicas de estos organismos, de manera que la energía solar se utilice preferentemente en la generación de productos específicos simples de relevante significación práctica y económica, que se liberen al exterior de la célula. Las perspectivas más prometedoras al respecto se centran en la producción de hidrógeno, amoniaco, peróxido de hidrógeno, etc., todos ellos, además, excelentes combustibles.

En nuestro Departamento se llevan a cabo actualmente estudios destinados a la producción fotosintética de amoniaco, compuesto de excepcional interés como abono agrícola nitrogenado,

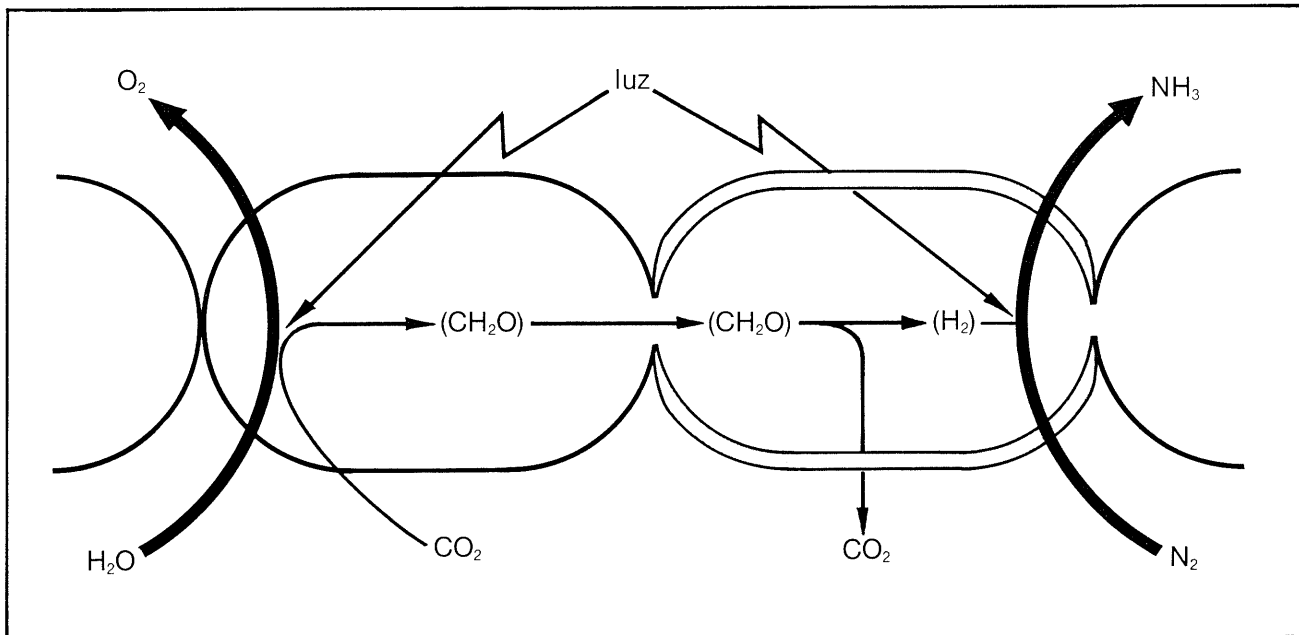
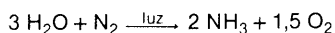


Figura 9. Esquema de la producción fotosintética de amoníaco por algas verde-azuladas filamentosas a partir del nitrógeno atmosférico. En una primera fase, las células vegetativas fotorreducen, con el hidrógeno del agua, el anhídrido carbónico a carbohidratos. En una segunda fase, los heterocistos fotorreducen el nitrógeno atmosférico a amoníaco, utilizando como fuente de poder reductor los carbohidratos provenientes de las células vegetativas. El resultado neto del proceso consiste, pues, en la fotorreducción del nitrógeno con agua, desprendiéndose simultáneamente oxígeno molecular.

utilizando para ello algas verde-azuladas fijadoras de nitrógeno atmosférico. Mediante manipulación química selectiva se ha logrado que el amoníaco que estas células fabrican en la luz, con nitrógeno del aire como sustrato, se excrete al medio externo, donde se acumula, en lugar de incorporarse al material celular como nitrógeno orgánico. Las células así tratadas no pueden crecer, y utilizan la mayor parte de su actividad metabólica en la síntesis de amoníaco, por lo que pueden considerarse como «microfactorías solares» para la producción de este compuesto. La figura 9 muestra esquemáticamente las reacciones básicas que, impulsadas por la luz, conducen a la síntesis de amoníaco a partir de nitrógeno molecular y agua como sustratos, lo que en forma simplificada puede representarse según la ecuación global:



Las condiciones experimentales establecidas hasta el momento para sistemas de algas verde-azuladas que operan con N_2 o nitrato como sustratos nitrogenados rinden, en condiciones controladas de laboratorio, tasas de producción del orden de 10 a 20 g de amoníaco por m^2 y día. La extrapolación de estas cifras en área y tiempo arroja valores de unas 50 toneladas por ha y año. En la actualidad se persigue no sólo establecer las condiciones que permitan mejorar el rendimiento y la duración del proceso y su realización fuera

del laboratorio sino también conseguir la selección de estirpes mutantes, capaces de llevar a cabo la generación de amoníaco sin necesidad de tratamientos especiales. La producción a expensas de la energía solar de un compuesto de la importancia del amoníaco, de creciente demanda y cuya síntesis química (proceso Haber-Bosch) se hace cada vez más costosa a medida que se incrementan los precios de los combustibles fósiles, presenta, pues, considerable interés científico y económico. En efecto, como hemos mencionado anteriormente, el aporte de abonos nitrogenados a los cultivos agrícolas constituye en la actualidad un factor decisivo e indispensable para poder conseguir los aumentos de productividad en las cosechas al ritmo requerido por la población humana para cubrir sus necesidades energéticas y alimentarias.

El funcionamiento efectivo al aire libre y en gran escala de los sistemas productores de amoníaco de algas verde-azuladas, así como la extracción del amoníaco producido y su posterior concentración, deben planificarse con miras a la utilización del proceso industrial. Otra posible alternativa, menos ambiciosa y costosa, pero quizá más práctica y factible a corto e incluso a largo plazo, consiste en la instalación de suspensiones de algas en albercas poco profundas, contiguas a las zonas de cultivo por abonar, de manera que el líquido enriquecido en amoníaco resultante de su actividad fotosintética

pueda utilizarse, sin más, directamente para el riego. Se puede estimar que el amoníaco fotosintetizado por una masa de microalgas de una cierta superficie permitiría el abono adecuado de una área de cultivo 100 veces superior.

Fotosíntesis artificial

Las alternativas analizadas hasta aquí con miras a conseguir un mejor aprovechamiento de la fotosíntesis se han centrado fundamentalmente en el empleo —directo o tras tratamientos adecuados— de la biomasa producida naturalmente. Recientemente se ha considerado también la posibilidad de manipular el proceso fotosintético, simplificando el que opera normalmente en la célula viva. En este sentido, uno de los objetivos más prometedores consiste en canalizar el poder asimilatorio que generan las reacciones luminosas de la fotosíntesis, a expensas de la energía solar, para su utilización preferente o exclusiva en la reducción de determinados sustratos inorgánicos oxidados, con la consiguiente formación de productos reducidos simples de alta calidad y contenido energético. Los sistemas que en la actualidad se consideran más adecuados para estos fines son, por un lado, cultivos de microorganismos fotosintéticos cuyo metabolismo se altera específicamente mediante tratamientos genéticos, bioquímicos, o por modificación del medio donde se desarrollan (véase apartado de Microalgas), y por otro, sistemas fotosintéticos

Agrupació Astronòmica

ASTER

La Agrupación Astronómica Aster es una Entidad privada que reúne a los interesados por la Astronomía y ciencias afines, y a la que pueden pertenecer desde el aficionado que empieza hasta el conocedor profundo, unidos por la misma inquietud.

La actividad que realizamos está orientada a la divulgación e investigación de esta ciencia en todos los ámbitos posibles. Para ello contamos con un céntrico local social que dispone de un observatorio dotado de un refractor ecuatorial en estación con su correspondiente astrocámara. Asimismo disponemos de varios telescopios portátiles, refractor ecuatorial D 60 mm y dos reflectores, también ecuatoriales, D 150 mm y D 200 mm (Schmidt-Cassegrain) con diverso material para la obtención de fotografías astronómicas. A su vez contamos con una Biblioteca con más de 500 libros, la cual ofrece un servicio de préstamo para aquellos que no dispongan del tiempo necesario para efectuar consultas en el propio local. Al material bibliográfico se une nuestra Hemeroteca que contiene boletines, revistas, trabajos, tesis doctorales y, en general, publicaciones de más de un centenar de observatorios y universidades de todo el mundo.

Complementariamente funcionan Comisiones de trabajo que tienen como finalidad orientar y promover la actividad científica de la Agrupación. Las personas que forman parte de estas Comisiones se reúnen periódicamente en nuestro local social y en ellas tienen cabida todos aquellos socios que quieran colaborar activamente en las tareas divulgativas y científicas de la Agrupación.

Además de todas las actividades que derivan de las distintas Comisiones y secciones como son: observaciones periódicas y de las efemérides más importantes, sesiones sobre el manejo del instrumental, expediciones prácticas, etc., realizamos a lo largo del año cursos periódicos a distintos niveles, conferencias especializadas a cargo de miembros de la Entidad o invitados, visitas a entidades análogas, proyecciones de películas y diapositivas, etc. Por otra parte atendemos visitas concertadas de escuelas y entidades culturales.

Asimismo el Departamento de Publicaciones lleva a cabo la edición de una Revista especializada no periódica y de un Boletín Informativo de carácter mensual que se remiten gratuitamente a los socios. En estas publicaciones que se

hallan abiertas a la colaboración de todos aquellos que quieran aportar sus trabajos para ser difundidos, se vierte toda la información y programas de los trabajos y actividades que se realizan, así como artículos y comunicaciones de interés científico o general. Este mismo Departamento tiene encomendado la elaboración y difusión de mapas, planisferios, libros, folletos, etc. que puedan ser de interés y complemento en el aficionado de los diversos campos de la Astronomía y ciencias afines. Los beneficios obtenidos por la venta de publicaciones tienen una finalidad especial ya que se destinan exclusivamente tanto a la ampliación de nuestras instalaciones como del material científico.

Una actividad especial se ha unido recientemente a nuestra labor científica. Es la convocatoria del Premio «Ferran de Quadras» para trabajos sobre Astronomía y ciencias afines efectuados por jóvenes no mayores de 23 años. Constituye para nosotros una labor de gran importancia ya que es el único premio de su índole en nuestro país y que tiene precisamente carácter juvenil en recuerdo de nuestro amigo y colaborador. El objetivo primordial es potenciar los trabajos que se vienen realizando sobre estos temas por jóvenes que no superan dicha edad. Las convocatorias tienen lugar anualmente sobre el mes de octubre admitiéndose trabajos hasta el uno de marzo del año siguiente. El Premio está dotado con 50 000 ptas. para el ganador y con 25 000 ptas. para el finalista. Pueden solicitarse las bases en nuestra Secretaría.

«Aster» no sólo ofrece al socio unos medios materiales y unos servicios de información y divulgación, sino que brinda también la posibilidad de participar activamente colaborando en las tareas propias de las distintas secciones que funcionan. Esta integración activa y directa, unida al tono familiar de nuestras relaciones, consideramos que contribuye a una más sólida y completa formación del socio, no sólo desde el punto de vista científico sino que también en el aspecto de su realización personal.

Para ingresar como miembro de la Agrupación sólo es necesario cumplir con los sencillos requisitos de entrada establecidos. Para mayor información dirigirse a nuestro local sito en Paseo de Gracia, 71 (ático) Barcelona-8 (España) Tel. (93) 215 15 31. Horario: de 19,30 a 21,30 horas.

reconstruidos o artificiales capaces de llevar a cabo un tipo simplificado de fotosíntesis que se traduce en la producción específica de determinados compuestos energéticos, como hidrógeno, amoníaco, peróxido de hidrógeno, metano u otros.

La producción fotosintética de hidrógeno a expensas de agua y energía solar se conoce como «biofotólisis» e implica la escisión del agua en sus dos elementos integrantes, según se ha discutido en el apartado sobre mecanismos de transducción de la energía luminosa. La biofotólisis del agua, empleando como sistema transductor membranas fotosintéticamente activas suplementadas con enzimas y otros componentes adecuados, constituye de hecho la clave de lo que se ha dado en llamar «fotosíntesis artificial», que aún los esfuerzos de investigación tendentes a reproducir el proceso fuera de la célula viva. Si en estos sistemas artificiales pudieran soslayarse algunas de las pérdidas de eficiencia en la conversión de energía solar que ocurren en los organismos fotosintéticos intactos, podrían alcanzarse rendimientos del orden del 15 por ciento. Tales sistemas bioquímicos reconstruidos presentan, no obstante, problemas de estabilidad, entre otros, que han de ser superados antes de su posible utilización con propósitos prácticos. Con todo, el objetivo esencial de esta nueva línea de investigación consiste, en primer lugar, en llegar a comprender cómo opera el sistema biológico, para entonces modelar sistemas totalmente artificiales que mimeticen el sistema fotosintético natural. ■

Para más información:

- Hall, D.O., Rao, K.K. (1981). *Photosynthesis*, 3ª edición. Edward Arnold. London. Hay versión en castellano de la 1ª edición, publicada por la Editorial Omega.
- Losada, M. (1977). Los distintos tipos de fotosíntesis y su regulación. *Investigación y Ciencia*, 7, 7-18.
- Losada, M. (1979). Reflexiones en torno a la conversión biológica de la energía. Discurso de ingreso en la Real Academia de Medicina de Sevilla.
- New trends in research and utilization of solar energy through biological systems (1982). *Experientia Supplementum 43*, Birkhauser Verlag, Basilea: Conjunto de artículos de diferentes autores sobre aspectos varios del aprovechamiento de la energía solar mediante sistemas biológicos.
- Pimentel, D., Pimentel, M. (1979). *Food, energy and society*. Edward Arnold, Londres.
- Slessor, M., Lewis, C. (1979). *Biological Energy Resources*. E & FN Spon Ltd., Londres.