

ENERGÍA A PARTIR DE LA BIOMASA: UN ANÁLISIS TÉCNICO Y CONTEXTUAL

Jaime González Velasco

Catedrático de Química Física (jubilado). Universidad Autónoma de Madrid

RESUMEN

Biomasa es toda la masa viviente que existe sobre la Tierra, o, más exactamente, en una estrecha capa superficial de la misma a la que se denomina Biosfera. La biomasa constituye un sistema que utiliza la Naturaleza para almacenar energía. Pese a que la masa de materia viviente es insignificante comparada con la masa total del planeta, constituye una apreciable cantidad de energía almacenada y que se está reemplazando de forma continua, pues el origen de esta energía biológica está en la luz solar. Aunque de los 173000 TW que llegan del Sol a la Tierra en forma de radiaciones de distinta longitud de onda solo 40 TW, es decir, menos del 0.5%, se convierte en materia orgánica, a través del proceso fotosintético, ello es equivalente a alrededor de tres veces el consumo actual mundial en energía primaria. En este artículo se hace un análisis detallado de los componentes técnicos de este proceso de conversión, comenzando con una perspectiva histórica, a un nivel tanto nacional como internacional, y pasando a una descripción técnica y conceptual del proceso fotosintético y sus niveles de eficiencia, así como otros aspectos de los biocombustibles y el aprovechamiento energético de la biomasa, sin olvidar sus aspectos e impacto medioambiental.

1. INTRODUCCIÓN

Cuando se habla de biomasa se hace referencia a un almacenamiento de energía solar reciente, pues los propios *combustibles fósiles* son biomasa que ha sido “procesada” por la Naturaleza a lo largo de millones de años, hasta llegar a convertirse en combustibles con mayor densidad de energía (densidad de energía es cantidad de energía contenida en la unidad de masa del combustible considerado) que la biomasa de producción reciente.

La energía solar es utilizada para transformar CO₂, agua y nutrientes, por medio del proceso fotosintético, en hidratos de carbono, grasas, proteínas, vitaminas, hormonas, etc., que forman parte de las plantas. La formación de estos compuestos tiene lugar en dirección no espontánea, es decir, el contenido de energía libre de los productos finales (carbohidratos, grasas, proteínas y oxígeno) es mayor que el de los productos iniciales (esencialmente CO₂ y H₂O). Esta ganancia en energía libre proviene de la contribución que hacen los fotones componentes de la radiación solar, los cuáles, a través de una serie de procesos que se describirán más adelante, promocionan electrones desde los niveles que ocupan en el agua hasta niveles energéticos vacíos en el CO₂, facilitando su reacción con protones, lo que lleva a la reducción de esta molécula, hasta formar carbohidratos, proteínas y grasas.

La energía de los fotones queda almacenada en los enlaces de estas sustancias, a las que se puede considerar como combustibles biológicos. Estos compuestos, en cuya formación participan, básicamente, carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, y otros elementos en menor proporción, están formados por enlaces, o niveles energéticos, de energía elevada con respecto a los niveles vacíos del oxígeno. Así pues, en una atmósfera formada por oxígeno “diluido” en nitrógeno, la puesta en contacto entre los compuestos orgánicos y el oxígeno da lugar a procesos espontáneos, a través de los cuáles, los

electrones situados en enlaces, o niveles energéticos de energía más elevada que la de los niveles libres en las moléculas de oxígeno, tienden a ocupar estos niveles vacíos, liberando la energía almacenada en los enlaces de los combustibles biológicos a través de procesos espontáneos.

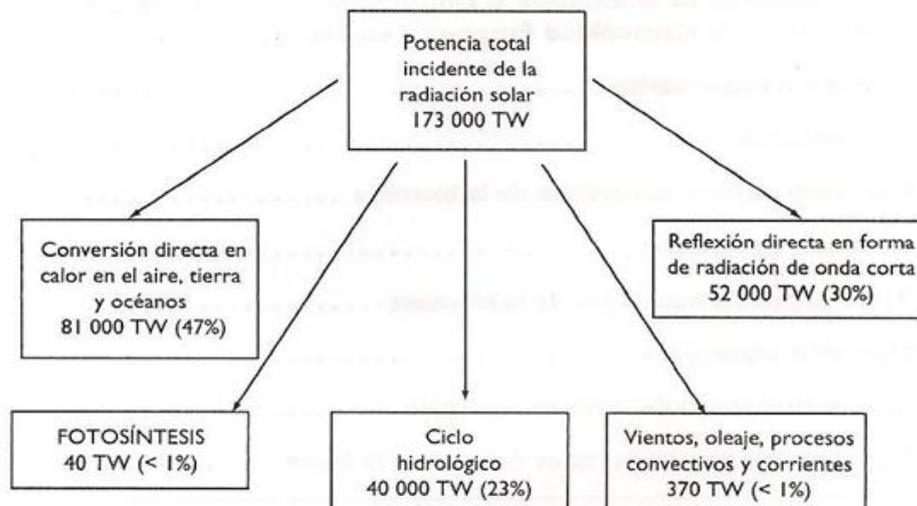


Figura 1. Conversión de la potencia de la radiación solar en diversas formas de potencia renovable. Como elemento de comparación se puede añadir, que el ritmo de consumo de energía por la Humanidad, en el momento actual, es de alrededor de 14 TW.

La energía solar, por lo tanto, se recicla naturalmente, a través de una serie de procesos físicos y químicos que tienen lugar en las plantas, el suelo, la atmósfera, animales que utilizan a las plantas como fuentes energéticas a través de los alimentos, procesos de descomposición, hasta que toda la energía termina por degradarse en forma de calor y es reemitida en forma de radiación infrarroja de longitud de onda larga, al mismo tiempo que se regeneran el CO_2 y el agua, a partir de los que la planta, utilizando fotones de la luz solar había sintetizado las sustancias antes citadas. Una fracción insignificante de toda esa materia orgánica no se termina de descomponer, comienza a formar depósitos de turba y, tras, lentos procesos, que tienen lugar a lo largo de eras geológicas, termina por dar lugar a depósitos de combustibles fósiles.

Las sustancias que resultan del proceso fotosintético contienen energía almacenada en enlaces químicos, una energía química que se caracteriza por poseer un grado termodinámico, o nobleza, menor que la energía cinética, o potencial, o eléctrica, pero todavía elevado. La biomasa puede ser utilizada como combustible en procesos convencionales de combustión, con liberación de energía calorífica y posterior conversión de la misma en electricidad. Asimismo, alguno de los compuestos resultantes de la transformación de la biomasa, como el metano, o el metanol o el etanol, pueden ser utilizados directamente, en los motores de combustión, o bien, como combustibles en células de combustión. En el proceso de combustión se libera la misma cantidad de CO_2 que se había eliminado por las plantas en el proceso de fotosíntesis y que la que se liberaría en un proceso natural de reciclado a través de la descomposición. Se puede, pues, afirmar que, la utilización de combustibles biológicos en la generación de energía es neutra con respecto al problema del calentamiento global, ya que no contribuye a incrementar la proporción de CO_2 existente en la atmósfera.

En resumen, la biomasa constituye uno de los sistemas naturales de almacenamiento de energía solar, en este caso en forma de energía química. Otros sistemas, por medio de los que la Naturaleza almacena energía solar, son las corrientes convectivas que aparecen como consecuencia de calentamientos diferenciales en la atmósfera (energía cinética) o en los mares, o los depósitos (energía potencial) y corrientes de agua (energía cinética) de agua que aparecen como consecuencia de las precipitaciones que se producen a partir de la condensación del vapor de agua que se forma como consecuencia de la absorción de radiación solar por los océanos, lagos, ríos, etc.

Aunque, como se verá, la eficiencia de conversión de energía solar en biomasa podría considerarse pequeña, si a los biocombustibles se los considerara exclusivamente como fuente de energía, su función es primordial, ya que estas sustancias constituyen la fuente de energía que mantiene la vida vegetal y animal en la Biosfera y las plantas contribuyen a la prevención de la erosión de los suelos, a la conservación de la diversidad de las especies y a mantener el equilibrio en los sistemas ecológicos. Pese a todo, por medio del proceso fotosintético, se produce el almacenamiento de cantidades totales de energía elevadas.

El flujo de energía solar total que recibe la Tierra es del orden de 10^{17} W, lo que equivale a recibir en 3 días ($3 \text{ días} \times 24 \text{ (h/d)} \times 3600 \text{ s/h} \times 10^{17} \text{ J/s} \approx 2.6 \times 10^{22}$ Julios) una cantidad total de energía equivalente a todas las reservas constatadas de combustibles fósiles (carbón, gas natural, petróleo) y de biomasa vegetal de que se dispone. La velocidad de producción media en biomasa, en mares y tierra firme, es de 1.33×10^{14} W, lo que equivale a una densidad de potencia de 0.26 W/m^2 , o bien a 16.6 kW por persona: $[(1.33 \times 10^{14} \text{ W}) / (8 \times 10^9 \text{ personas})] = 16.6 \text{ kW persona}^{-1}$, o a la potencia conjunta de 100000 centrales nucleares grandes. Además, se puede llevar a cabo un cálculo como el siguiente: $1.33 \times 10^{14} \text{ W} = 1.33 \times 10^{14} \text{ CV s}^{-1}$; $[(1.33 \times 10^{14} \text{ CV s}^{-1}) / (1.6 \times 10^{-19} \text{ C/electrón})] \approx 10^{33} \text{ electrones} \times \text{V} \times \text{s}^{-1}$. Es decir, esa potencia sería capaz de promover la elevación de 10^{33} electrones por segundo, o de un Gmol [$10^{24} (\cong 6.023 \times 10^{23} = 1 \text{ mol}) \times 10^9 \text{ (G = giga)}$] de electrones por segundo, a una diferencia de potencial de 1 voltio. La velocidad de producción media de biomasa sobre tierra es de $7.6 \times 10^{13} \text{ W}$, lo que, dividido por la superficie de la tierra no ocupada por las aguas (alrededor de 149 millones de $\text{km}^2 = 1.49 \times 10^8 \text{ km}^2 = 1.49 \times 10^{14} \text{ m}^2$) lleva a la cifra de densidad de potencia de 0.51 W/m^2 . Utilizando esta cifra, junto con un valor medio de la irradiación solar de alrededor de 500 W m^{-2} , se puede calcular un valor promedio para la eficiencia de conversión de energía solar en biomasa de: $\eta_{\text{fotosíntesis}} \approx [(0.51 \text{ W m}^{-2}) / (510 \text{ W m}^{-2})] \times 100 = 0.1 \%$.

Tabla 1
Transformación de energía solar en biomasa comparada con el
consumo energético y en alimentos de la humanidad.

	W	J año ⁻¹	J año ⁻¹	Gton año ⁻¹
<i>Ritmo al que la energía solar alcanza la biosfera</i>	10^{17}	3×10^{24}		
<i>Energía almacenada en forma de combustibles fósiles</i>			3×10^{22}	
<i>Energía almacenada en forma de biomasa</i>			3×10^{22}	
<i>Ritmo de fijación de la energía solar por los vegetales</i>	10^{14}	3×10^{21}		200
<i>Ritmo de consumo de energía en forma de alimentos</i>	0.5×10^{12}	1.5×10^{19}		1
<i>Ritmo de consumo de energía en forma de biomasa</i>	1.7×10^{12}	5.5×10^{19}		
<i>Ritmo de incorporación de carbono por fotosíntesis</i>				100

El consumo mundial de energía, por otra parte, se produce a un ritmo de unos 13 TW (algo más de 10^{13} W), lo que significa que del Sol llega energía a un ritmo unas 13300 veces mayor que aquel al que la humanidad está consumiéndola en el momento presente. En la Tabla 1 se muestran algunas cifras interesantes a la hora de estimar los recursos existentes en biomasa y el ritmo de producción de los mismos.

A estas cifras se le pueden añadir que la masa total de materia viva, incluyendo la humedad alcanza, aproximadamente, los 2 billones de toneladas (2×10^{12} ton), la masa total de las plantas sobre tierra es de 1.8 billones de toneladas, la masa total en bosques es 1.6 billones de toneladas y, siendo la población mundial de alrededor de 7500 millones de habitantes, ello produce una cifra de unas 213 toneladas de biomasa por persona.

La eficiencia global con la que los vegetales captan, transforman y almacenan energía solar en forma de biomasa, es decir, energía libre o energía química es del 0.1%: $[(\text{Densidad de potencia producida} = 0.51 \text{ Wm}^{-2} / (\text{Insolación media} = 500 \text{ Wm}^{-2})) \times 100 \approx 0.1\%]$, aunque en el caso de ciertos cultivos puede llegar al 1% (equivalente a unas 40 ton/Ha) e, incluso al 5% (unas 200 ton/Ha).

Otras cifras interesantes son las que resultan de las estimaciones del tiempo que tardan en renovarse todas las moléculas de oxígeno de la atmósfera gracias a la fotosíntesis, que es de unos 2000 años. Por otra parte, todas las moléculas de CO₂ de la atmósfera son asimiladas por las plantas cada 200 años.

Pese a que las aguas cubren casi las tres cuartas partes de la superficie de la Tierra, el ecosistema acuático produce la misma cantidad de biomasa que el terrestre (alrededor de 100000 millones de toneladas cada uno). Sobre la Tierra, las áreas forestales son las más productivas (70%), seguidas de praderas y sabanas (20%) y los cultivos agrícolas (10%). En los mares, el 90% de la producción de biomasa tiene su origen en el fitoplancton, mientras que las denominadas algas macrofitas son responsables del 10% restante. La Figura 2 muestra una imagen tomada desde el espacio por el satélite Landsat de la Nasa de la distribución de vegetación sobre la superficie terrestre.

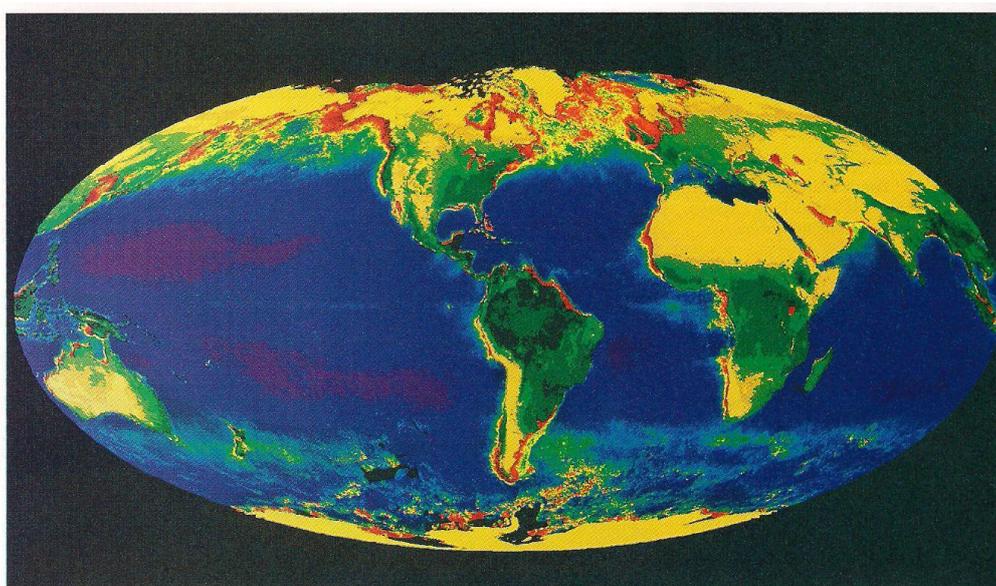


Figura 2. Imagen tomada desde el espacio por el satélite Landsat de la Nasa de la distribución de vegetación sobre la superficie terrestre.

Las cantidades de diferentes elementos químicos que contiene la biomasa pueden ser determinadas por medio del análisis elemental. El resultado que arroja este tipo de análisis es que el contenido medio de la biomasa en carbono es de alrededor del 50% y que la relación promedio entre C y N es $C/N = 10$, de modo que en las microalgas esta relación vale 5, y 15 en las plantas superiores. Haciendo el correspondiente cálculo, resulta que las plantas asimilan al año, aproximadamente, 100000 millones de toneladas de carbono, que extraen del dióxido de carbono atmosférico y del disuelto en las aguas (estas cifras han de compararse con los alrededor de 5500 millones de toneladas de dióxido de carbono que anualmente son emitidas a la atmósfera como consecuencia de procesos de combustión de combustibles fósiles y los 1500 millones de ton emitidas en actividades agrícolas) y del orden de 10000 millones de toneladas de nitrógeno que procede, en su mayor parte de nitratos. Como las proteínas tienen un contenido medio de nitrógeno del 16 %, puede estimarse que la cuarta parte (unas 50 Gton año⁻¹) de la biomasa fotosintetizada al año lo es en forma de proteínas.

En la Tabla 1 puede observarse que la producción anual de biomasa (3×10^{21} J) equivale, en términos energéticos, a la décima parte de las reservas totales de biomasa de la Biosfera (3×10^{22} J) y de combustibles fósiles (3×10^{22} J). La biomasa que forma parte del ecosistema natural está almacenada en un 99% en la Tierra y solo un 1% de las reservas en biomasa se encuentra en las aguas.

Las plantas fijan energía solar a un ritmo de 10^{14} W, que viene a ser equivalente a unas ocho veces el ritmo de consumo de energía primaria por el conjunto de la humanidad ($13 \text{ TW} = 13 \times 10^{12} \text{ W}$) y a unas doscientas veces la energía que se consume en alimentos ($0.5 \times 10^{12} \text{ W}$), lo que equivale a

alrededor de mil millones de toneladas de alimentos al año). Si se traduce a términos energéticos lo que consume una persona, se obtiene: $(5 \times 10^{11} \text{ W}) / (7.5 \times 10^9) \text{ personas} = 66.7 \text{ W/persona}$, lo que supone una energía por día = $[66.7 \text{ (Js}^{-1}\text{/persona)} \times 24 \text{ (h/d)} \times 3600 \text{ (s/h)} = 5762880 \text{ J/(persona} \times \text{día)}] \times (3.6 \times 10^6)^{-1} \text{ kWhJ}^{-1} \approx 1.6 \text{ kWh/(persona} \times \text{día)}$, que es, aproximadamente, lo que consumiría una bombilla de 80 W encendida durante las 24 horas de un día: $[(80 \text{ W} \times (1 \text{ Js}^{-1} \text{ W}^{-1}) \times (24 \text{ h día}^{-1}) \times (3600 \text{ sh}^{-1}) = (6912000 \text{ J}) / (3600000 \text{ J kWh}^{-1}) = 1.92 \approx 2 \text{ kWh}]$. El ser humano necesita una dieta proteica adecuada, lo que supone que alrededor del 10% de los alimentos tienen que ser proteínas. Considerado globalmente, se necesitarían 50 g proteína/(persona×día), es decir unos 100 millones de toneladas de proteínas al año para toda la humanidad, cuyo origen está en la biomasa, y el de ésta en el proceso fotosintético.

Aparte de cómo fuente de alimentos y de materiales para la construcción, el ser humano ha venido utilizando a la biomasa como fuente de los denominados biocombustibles, que constituyen fuentes de energía que contribuyen de forma muy relevante al consumo total de energía primaria, especialmente en los países en vías de desarrollo.

Una definición de *biocombustible* sería la siguiente: “*Biocombustibles son cualquiera de los combustibles sólidos, líquidos o gaseosos que se derivan de los materiales orgánicos que forman parte de la biomasa. Pueden provenir directamente del mundo vegetal, o, indirectamente de desechos industriales, comerciales, domésticos o agrícolas. Pueden obtenerse a partir de una gran variedad de materias primas y ser la consecuencia de una serie de procesos diferentes*”.

Ejemplo. Según ciertas estimaciones, el ritmo de almacenamiento de energía en forma de biomasa es de 3000 EJ/año.

(a). Calcúlese el ritmo de consumo de biomasa por la población mundial sabiendo que asciende a alrededor del 2% del total de la biomasa producida.

(b). Si los seres humanos consumen el 0.33% de la biomasa total producida anualmente y los animales de tiro consumen un 0.1%, calcúlese el total de la energía consumida en forma de alimento por ambos y lo que la misma representa en porcentaje con respecto al total de biomasa que se produce al año por fotosíntesis.

Respuesta:

$$(a) \quad \frac{3000 \text{ EJ}}{\text{año}} \times \frac{2}{100} = \frac{60 \text{ EJ}}{\text{año}} = 60 \times 10^{18} \frac{\text{J}}{\text{año}} = 60 \text{ trillones de julios por año}$$

(b). Los alimentos consumidos por los seres humanos equivalen al 0.33% del total de la biomasa total producida al año, es decir:

$$\frac{3000 \text{ EJ}}{\text{año}} \times \frac{0.33}{100} = \frac{10 \text{ EJ}}{\text{año}}$$

y el 0.1% se consume en alimentos por animales de tiro, es decir:

$$\frac{3000 \text{ EJ}}{\text{año}} \times \frac{0.1}{100} = \frac{3 \text{ EJ}}{\text{año}}$$

Por lo tanto, la suma de la energía consumida en forma de alimentos por los seres humanos y los animales de tiro es 13 EJ/año, lo cual, en porcentaje frente a la producción total anual de biomasa, es:

$$[(13 \text{ EJ/año}) / (3000 \text{ EJ/año})] \times 100 = 0.43 \%$$

2. USOS DE LA BIOMASA A LO LARGO DE LA HISTORIA

Hasta finales del siglo XVIII la humanidad solo consumía biocombustibles como madera, paja o estiércol seco. También la iluminación se conseguía con velas, o con lámparas que utilizaban aceites vegetales o animales. Con la aparición de la metalurgia primitiva se hizo necesario alcanzar temperaturas más elevadas que las que se conseguía con la combustión de la madera. Ello se conseguía sometiendo a la madera seca a un proceso de pirólisis, que se describirá más adelante, en el transcurso del cual se producía una pérdida de poder calorífico global y, a cambio, se obtenía un nuevo combustible, el carbón de madera, cuya combustión permitía alcanzar temperaturas suficientemente elevadas como para producir las reducciones químicas que son necesarias para extraer a los metales de los minerales en que están contenidos.

Una de las consecuencias de la utilización de la madera para este tipo de procesos, aparte de para la navegación, el transporte, la construcción, etc., fue la deforestación de amplias áreas, lo que encareció el precio de la madera e hizo necesaria la búsqueda de nuevas fuentes de energía. Esto llevó, hacia la mitad del siglo XVIII, a la utilización de carbón, que aparecía en vetas poco profundas en ciertos puntos del Reino Unido y cuyas propiedades como combustible ya eran conocidas.

El uso del carbón, junto a la construcción de las primeras máquinas térmicas de vapor, permitió crear las primeras explotaciones industriales, lo que condujo al abaratamiento de ciertos productos y al nacimiento de fortunas elevadas, así como a una elevación generalizada del nivel de vida de las diferentes clases sociales. La creciente prosperidad condujo a que algunas personas pudieran emplear tiempo en invenciones y en la búsqueda de innovaciones técnicas, que se tradujeron en la aparición de máquinas las cuales, generalmente, eran movidas por energía generada por combustión de carbón. Así pues, la creatividad científica y técnica promovió un cambio tecnológico basado en el hecho de que el calor producido por la combustión del carbón, que reemplazó paulatinamente a fuentes de energía basadas en la madera, el viento o el agua. De nuevo, estas innovaciones contribuyeron a incrementar la prosperidad y a aumentar la demanda de la nueva fuente de energía. El carbón había que extraerlo de vetas situadas cada vez a mayor profundidad, lo que daba lugar a brotes de agua, que era necesario extraer recurriendo a bombas movidas por las primeras máquinas de la Revolución Industrial.

Este proceso continuó durante los tres primeros cuartos del siglo XIX, hasta que el petróleo y la electricidad generada en las primeras centrales hidráulicas comenzaron, a complementar primero, y a reemplazar después, al carbón como fuente fundamental de energía primaria.

No obstante, aún hoy en día el 14% de la energía primaria consumida por la humanidad lo es en forma de biocombustibles.

3. CONTRIBUCIONES DE LA BIOMASA AL CONSUMO PRIMARIO DE ENERGÍA EN EL MUNDO, EN LA COMUNIDAD EUROPEA Y EN ESPAÑA

Cuando se pretende estimar la contribución de la biomasa al consumo mundial de energía, aparecen dificultades que resultan de la heterogeneidad y variedad de productos naturales que intervienen, y del hecho de que las transacciones comerciales con estos productos son locales y se realizan sin dejar documentación escrita de ellas. En otras ocasiones, como ocurre en la India y en otros países, se utiliza el estiércol y la leña recolectada directamente por millones de familias campesinas. Pese a todo, hay países, como Etiopía o Nepal, en que prácticamente toda la energía que consumen procede de la biomasa, mientras que en Kenia constituye las tres cuartas partes del total, en India la mitad y la cuarta parte en Brasil. Algunas estimaciones consideran que la cifra per cápita de consumo de biomasa (secada al aire, lo que quiere decir que aún conserva un 20% de humedad, lo que hace disminuir su poder calorífico con respecto a la misma biomasa seca, ya que parte del calor producido en su combustión se emplearía en evaporar el agua que la acompaña) en los países en desarrollo se encuentra entre la media tonelada y las dos toneladas al año. Dado que la población de los países en desarrollo es del orden de 4000 millones, se calcula que llegan a consumir 3 Gton de biomasa secada al aire por año. Si se supone que el contenido energético de una tonelada de biomasa es, por término medio, de 15 GJ, se llega a una cifra anual de entre 45 a 50 EJ (4×10^9 habitantes \times 0.75 ton/hab año \times 15×10^9 J/ton = 45

$\times 10^{18} \text{ J/año} = 45 \text{ EJ/año}$). Esta cifra supone el 35% del consumo total de energía primaria en los países en desarrollo.

En algunos países desarrollados ricos en bosques, como Suecia, Austria, Suiza e incluso EEUU se consume mucha madera en calefacción. En conjunto, la energía total derivada de la biomasa que se consume en los denominados países desarrollados es de unos 8 EJ/año, correspondientes a alrededor de 350 kg de biomasa seca al aire por persona al año.

La suma de las cifras anteriores lleva a un consumo mundial total de biomasa de unos 55 EJ, lo que, comparado con el conjunto de la energía primaria consumida, 400 EJ, indica que, aún hoy en día, la biomasa contribuye con el 14% al consumo de energía del conjunto de la población mundial. Pese a lo elevado del valor calculado, muchos consideran que estas estimaciones se encuentran por debajo de la cifra real.

Ejemplo

El consumo total de energía en los países desarrollados asciende a 250 EJ/año, de los cuales el 3% lo es en forma de biomasa, y su población asciende a 1200 millones de habitantes. En los países en desarrollo se consume un total de energía primaria de 140 EJ/año por 4800 millones de habitantes, y el 35% proviene de los biocombustibles. Calcúlese el consumo en biomasa per cápita en los países desarrollados y en los países en desarrollo.

Respuesta

Consumo total de energía en forma de biomasa en países desarrollados:

$$250 \text{ EJ/año} \times 0.03 = 7.5 \times 10^{18} \text{ J/año.}$$

Consumo de biomasa per cápita

$$7.5 \times 10^{18} \text{ J/año} / 1200 \times 10^6 \text{ habitantes} = 6.25 \times 10^9 \text{ J/habitante} \times \text{año} = 6.25 \text{ GJ/habitante} \times \text{año.}$$

Consumo total de energía en forma de biomasa en los países en desarrollo

$$140 \text{ EJ/año} \times 0.35 = 49 \text{ EJ/año} = 49 \times 10^{18} \text{ J/año.}$$

Consumo de biomasa per cápita en países en desarrollo

$$49 \times 10^{18} \text{ J/año} / 4800 \times 10^6 \text{ habitantes} = 10.2 \text{ GJ/habitante} \times \text{año.}$$

Por lo tanto, de acuerdo con estos cálculos, el consumo de biomasa medio por habitante es casi el doble en los países en desarrollo que en los países desarrollados.

Como ejemplos de países específicos donde el consumo de biomasa es muy elevado se pueden mencionar los siguientes:

India, donde se quema doble cantidad de estiércol y residuos que de madera y donde se estima que alrededor de dos tercios del consumo energético proviene de fuentes no comerciales.

China, donde en 1981 los 830 millones de campesinos chinos obtuvieron el 84% de la energía que consumieron a partir de biomasa, fundamentalmente en forma, de residuos agrícolas. Produjeron así una energía igual a la que hubieran suministrado 216 millones de toneladas de petróleo, lo que equivaldría a unas 0.8 toneladas de biomasa por persona y por año.

Cifras no muy diferentes de consumo por persona y año se producen en Brasil, o en más de una decena de países de África.

Como no es probable que a lo largo de los próximos años se produzca un cambio en los hábitos de consumo energético en muchos países en desarrollo, si se sigue manteniendo el aumento de la población al ritmo actual, ello podría dar lugar a efectos devastadores sobre los bosques, que estarían

sometidos a una deforestación frenética. En los dos países más poblados de la tierra, India y China, se está produciendo en los últimos años un incremento muy rápido de la demanda de petróleo y demás combustibles fósiles, lo que incide sobre la escalada de precios en el mercado mundial y sobre el impacto medioambiental global

A finales de 2003 el consumo de biomasa en la Unión Europea se estimó en 43 Mtep (1 tpe = 42 GJ) = 1.8×10^{18} J = 1.8 EJ, y mostró un incremento del 6.1% con respecto a lo consumido el año anterior. La Tabla 2 muestra las cifras del consumo en cada país en 2003.

Tabla 2
Consumo de biomasa en diversos países de la unión europea en 2003 en Mtep
(1 Mtep = 1 millón de toneladas de petróleo = 42×10^{15} J = 42 PJ)

País	Consumo de biomasa en 2003 en Mtep
<i>Francia</i>	9.3
<i>Suecia</i>	7.9
<i>Finlandia</i>	6.3
<i>Alemania</i>	4.8
<i>Polonia</i>	4.2
<i>España</i>	3.7
<i>Austria</i>	3.2
<i>Portugal</i>	2.4
<i>Italia</i>	1.5
<i>Dinamarca</i>	1.2
<i>Reino Unido</i>	0.9
<i>Grecia</i>	0.8
<i>Holanda</i>	0.5
<i>Bélgica</i>	0.4
<i>Irlanda</i>	0.2
<i>Luxemburgo</i>	0.05

El Libro Blanco de la Comisión Europea para una Estrategia Común y un Plan de Acción para las Energías Renovables elaborado en 1997, preveía para España un desarrollo, a llevar a cabo entre 1999 y 2010, en el empleo de la biomasa, de 6 millones de tep, de las cuales 5.100.000 se emplearían en aplicaciones eléctricas y 900.000 en aplicaciones térmicas. Este plan debía llevarse a cabo en un plazo comprendido entre 1999 y 2010.

A finales de 2004 el consumo de biomasa en España en ese año ascendió a 4167 ktep, repartidas por sectores que como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3
Consumo de biomasa en España en 2004 distribuido por sectores

Sector	Energía en tep	%
<i>Doméstico</i>	2056508	49.4
<i>Pasta y papel</i>	734891	17.6
<i>Madera, muebles y corcho</i>	487939	11.7
<i>Alimentación, bebidas y tabaco</i>	337998	8.1
<i>Centrales térmicas</i>	254876	6.1
<i>Cerámica, cementos y yesos</i>	129013	3.1
<i>Otras actividades industriales</i>	57135	1.4
<i>Hostelería</i>	30408	0.7

<i>Agrícola y ganadero</i>	21407	0.5
<i>Servicios</i>	19634	0.5
<i>Productos químicos</i>	16772	0.4
<i>Captación, depuración y distribución de agua</i>	15642	0.4
<i>Textil y cuero</i>	5252	0.1
TOTAL	4.167.035 tep	

El mapa de la Figura 3 indica el consumo de biomasa en 2004 en las diversas Comunidades Autónomas.

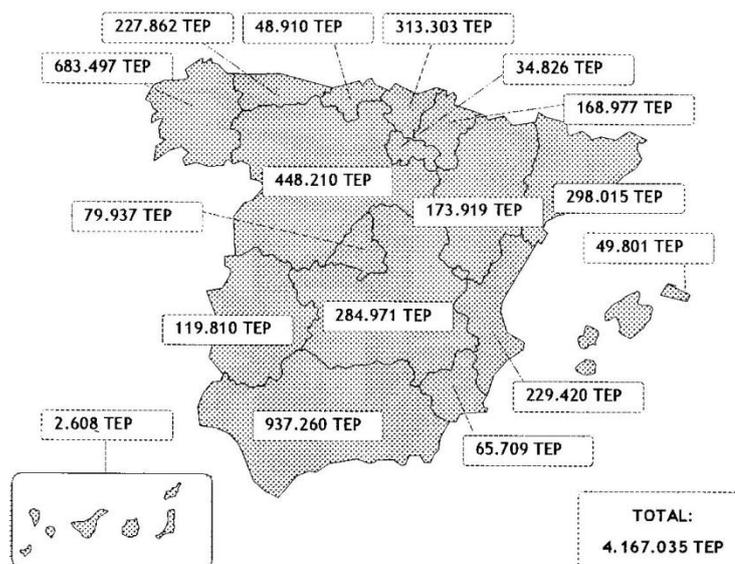


Figura 3. Distribución del consumo de biomasa en las distintas Comunidades Autónomas españolas en el año 2004. Las cifras vienen expresadas en toneladas equivalentes de petróleo (tep).

Se puede ver que Andalucía, Galicia y Castilla y León son las que mayor consumo hacen de energía en forma de biomasa, ya sea debido a la existencia de factorías elaboradoras de derivados de la celulosa, a que poseen un sector forestal desarrollado o a que su población está más diseminada, lo que suele dar lugar a un incremento en la utilización de biomasa en usos domésticos.

4. EL PROCESO FOTOSINTÉTICO

4.1 Fotorreacciones

Se cree que cuando la Tierra se formó, hace unos cuatro mil quinientos millones de años, se rodeó de una atmósfera casi enteramente formada por CO₂ y con temperaturas por encima de las que podrían soportar las formas de vida conocida. En ella no existía oxígeno libre. Con la aparición de las primeras formas de vida, que fueron las bacterias primitivas, y la posterior de las bacterias fotosintéticas, comenzó un cambio lento, producido a lo largo de miles de millones de años. Las bacterias fotosintéticas absorbían fotones solares, lo que les permitía oxidar al agua a oxígeno y reducir al CO₂ con el hidrógeno del agua, para generar los carbohidratos de que estaban formadas, a través del proceso denominado fotosíntesis, por medio del que obtenían energía, para desarrollarse y reproducirse. Con ello cambió la situación de modo paulatino. Al disminuir la concentración de CO₂ en la atmósfera primitiva, disminuyó el efecto invernadero y, con ello, la temperatura, hasta alcanzar, hace unos 3500 millones de años, una temperatura de 40°C o menor.

Al mismo tiempo, como consecuencia del proceso fotosintético, creció la concentración de oxígeno (lo que inicialmente dio lugar a un gran proceso de extinción de especies primitivas de vida anaeróbica, que quedaron sometidas a una destrucción por proceso de oxidación, mientras que comenzaron a aparecer especies adaptadas a la nueva atmósfera naciente, en cuyo metabolismo desempeñaba un papel el oxígeno como molécula capaz de tomar electrones de moléculas de combustibles, proceso mediante el cual se liberaba energía que permitía la existencia de esas nuevas formas de vida) hasta alcanzar el valor existente en la atmósfera actual que es del 21% en volumen. La concentración de CO₂ se redujo inicialmente hasta alcanzar el valor que se ha estimado existía en el proceso preindustrial de 0.020 a 0.030%, pero desde entonces ha ido aumentando hasta alcanzar el valor existente en el momento actual, de alrededor del 0.040% en volumen, o, lo que es lo mismo, 400 partes por millón. Estas condiciones, junto a una temperatura media oscilante entre 0 y 40°C, se han mantenido de forma aproximadamente constante durante 3500 millones de años, lo que ha permitido el desarrollo de la vida en las diferentes formas en que aparece, así como la evolución de las diferentes formas de vida.

El medioambiente global, que representa un oasis en el espacio, ha sido creado por la coincidencia fortuita en dirección y velocidad, de dos procesos: (a). Evolución del Sol, con un incremento continuo de radiación. (b). Decrecimiento en la velocidad de desgasificación del manto superior de la Tierra. La Figura 4 muestra un esquema del mecanismo físico por medio del cual el medioambiente se ha preservado a lo largo de miles de millones de años, con unas características aptas para que en él sea posible la vida.

Se supone que el descenso de la temperatura de la Tierra provocado por la reducción del efecto invernadero asociada a la incorporación del CO₂ se ha compensado, aproximadamente, por un incremento continuo de la emitancia solar a un ritmo de 7°C/1000 millones de años.

La Figura 4 muestra cómo ha ido variando el valor del radio solar como función del tiempo (abajo) y algunos acontecimientos esenciales en el desarrollo de vida sobre la Tierra asociados con el incremento de la concentración de oxígeno en la atmósfera terrestre. El desarrollo rápido del fitoplácton en las capas superiores de los océanos dio lugar a que la concentración relativa de oxígeno en la atmósfera llegara a alcanzar un valor igual a la centésima parte de la concentración existente en el momento actual, lo que, a su vez, puso en marcha el proceso de formación de la capa de ozono en las altas capas de la atmósfera. Como consecuencia de la protección ejercida por el ozono, se eliminó la parte ultravioleta del espectro solar, lo que hizo posible la vida sobre la tierra firme. Cuando la concentración de oxígeno alcanzó un valor igual a la décima parte de la concentración actual, se formó la ozonósfera, con lo que, debido a la absorción ejercida por la misma, la radiación ultravioleta que llegaba a la superficie de la Tierra alcanzó una intensidad suficientemente baja como para permitir a diferentes formas de vida migrar a ambientes terrestres y evolucionar hasta llegar a la aparición de los animales superiores.

Las formas de vida alternativas utilizaban los carbohidratos sintetizados por las bacterias fotosintéticas como combustibles y fuentes de energía por reacción con oxígeno, para regenerar parte del CO₂ previamente utilizado por las bacterias para sintetizar los hidratos de carbono. El desarrollo de las plantas verdes dio lugar a la aparición del proceso de fotosíntesis vegetal (véase la Figura 5).

En dicho proceso, el CO₂ existente en la atmósfera era convertido en carbohidratos, grasas y proteínas, que eran consumidos por todas las formas de vida que habían ido apareciendo, y por las propias plantas, dando lugar a la regeneración del CO₂ antes consumido por las plantas y a agua (véase la Figura 6). Con ello, el CO₂ entraba en un ciclo, del que formaba parte su disolución en aguas marinas y la formación de carbonatos en los esqueletos de los corales, que emergieron a lo largo de procesos geológicos. Parte de las distintas formas de vida, fundamentalmente vegetales, quedaron enterrados y sufrieron procesos desde hace unos 300 millones de años, dando lugar a la formación de los depósitos de combustibles fósiles. Estos depósitos contienen carbono procedente del CO₂, que entonces fue

retirado por las plantas de la atmósfera y que en la actualidad está siendo devuelto a la atmósfera como consecuencia de los procesos de combustión que se utilizan para liberar energía.

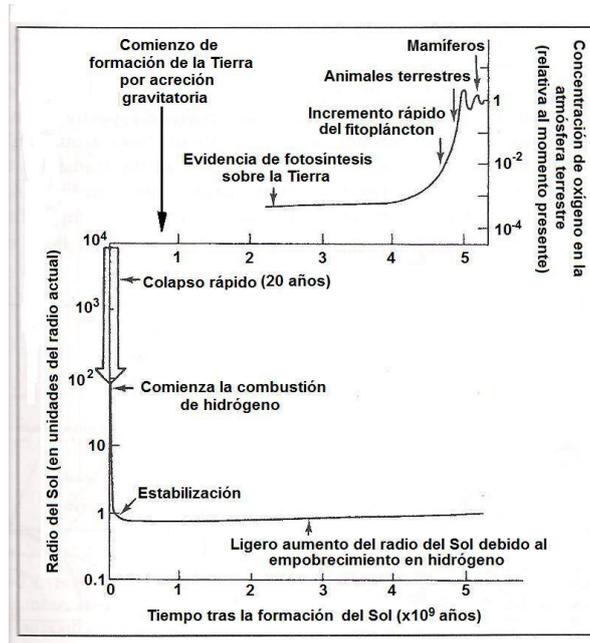


Figura 4. Variación del radio solar como función del tiempo (abajo) y algunos acontecimientos esenciales en el desarrollo de vida sobre la Tierra asociados con el incremento de la concentración de oxígeno en la atmósfera terrestre. El desarrollo rápido del fitoplancton en las capas superiores de los océanos dio lugar a una concentración relativa de oxígeno de 10^{-2} (frente a la concentración en el momento actual). Este incremento de la concentración de oxígeno en la atmósfera dio lugar a la formación de la capa de ozono en las capas superiores de la misma, la cual es capaz de absorber la parte ultravioleta del espectro solar, que es nociva para cualquier forma de vida. Cuando la concentración de oxígeno alcanzó un valor de la décima parte de la concentración actual, se formó la ozonósfera, con lo que la absorción de radiación ultravioleta alcanzó una intensidad suficientemente baja como para permitir a diferentes formas de vida migrar a ambientes terrestres y evolucionar hasta llegar a los mamíferos

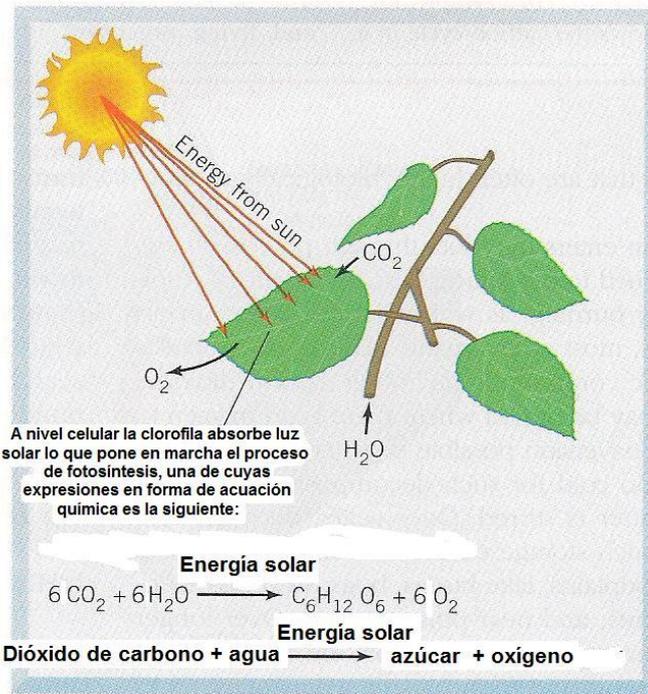


Figura 5. Representación simplificada de la Fotosíntesis por las plantas

La biomasa terrestre presente en la biosfera procede, en su mayor parte, de la fotosíntesis de las plantas verdes. En el transcurso del proceso fotosintético las plantas verdes se las arreglan para, a partir de dos compuestos químicos, como el agua y el dióxido de carbono, que se caracterizan por su estabilidad, junto con pequeñas proporciones de nitratos, sulfatos y fosfatos, dar lugar a la formación de oxígeno y para sintetizar hidratos de carbono, grasas, proteínas, vitaminas, etc., que se caracterizan por su elevado contenido en energía libre, lo que las hace inestables en presencia de oxígeno. En el proceso de combustión (reacción con oxígeno de los combustibles o productos de la fotosíntesis) se regeneran el CO₂ y H₂O y se libera la energía libre química almacenada en los enlaces químicos del carbohidrato que había resultado de la captación de la energía portada por los fotones componentes de la luz solar.

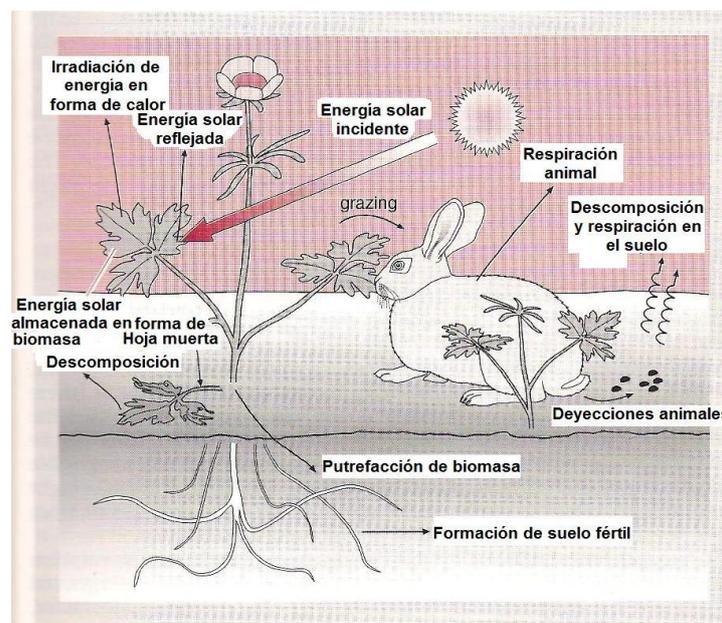


Figura 6. Representación idealizada del ciclo de formación y de descomposición de la biomasa

La velocidad de captación de CO₂ por las plantas depende, fundamentalmente, de la temperatura, de la concentración del CO₂ en la atmósfera, de la intensidad de la luz y de la distribución de fotones por cada longitud de onda.

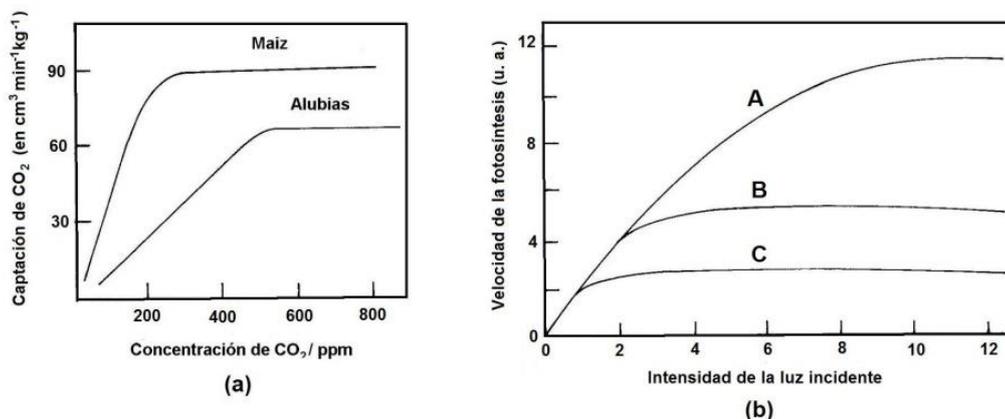


Figura 7. (a). Velocidad de captación de CO₂ por hojas vivas de una planta de maíz y de una de alubias (en cm³ min⁻¹ kg⁻¹) como función de la concentración de CO₂ en ppm. (b). Velocidad de la fotosíntesis como función de la intensidad de la luz para diversas condiciones externas: A) a 25 °C y 0.4 % de CO₂; B) a 15 °C y 0.4 % de CO₂; C) a 25 °C y 0.01 % de CO₂.

También el tipo de planta desempeña un papel significativo a la hora de determinar la velocidad a la que se verifica la fotosíntesis, como puede apreciarse en las representaciones gráficas que se muestran en la Figura 7.

En la parte (a) de la Figura 7 puede observarse, que la velocidad de captación de CO₂ es más rápida en el caso del maíz que de la alubia. Sin embargo, en el caso del maíz, a partir de una concentración de unas 300 ppm (que es, aproximadamente, la concentración actual de CO₂ en la atmósfera) se alcanza una velocidad constante, es decir, la velocidad de fijación de CO₂ por esta planta no aumentará al aumentar la concentración de CO₂ en la atmósfera. En el caso de las alubias, la velocidad de captación límite es menor, pero se alcanza a unas 500 ppm, por lo que, un incremento futuro de CO₂ en la atmósfera puede hacer aumentar la velocidad de crecimiento de esta planta y, además esta planta podría contribuir a la disminución del CO₂ en el aire.

En la parte (b) de la Figura 7, puede observarse que, una disminución de temperatura de 25 a 15°C, conservando constante la intensidad de iluminación y la concentración de CO₂, hace disminuir, aproximadamente a la mitad, la velocidad de la fotosíntesis (Comparar curvas A y B). De modo similar, una disminución de la concentración de CO₂, desde 0.4 a 0.01 %, manteniendo la temperatura en 25°C, reduce la velocidad de la fotosíntesis, aproximadamente a la cuarta parte.

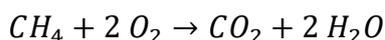
Para adquirir una idea sobre los niveles de producción que se obtienen del proceso fotosintético, se ha podido estimar, que hojas verdes sanas, bajo iluminación solar, producen alrededor de 3 litros de oxígeno por hora y por kg de hojas húmedas. Esto equivale a un flujo energético de 16 W y se obtendría a partir de una superficie de 1 m² de hojas. El gasto energético del metabolismo de una persona viene a ser de unos 100 W en reposo, y de unos 200 W cuando se desarrolla una actividad. Suponiendo 8 horas de reposo y 16 horas de actividad, se obtendría una energía total consumida en el metabolismo de: (100 W×8 h) + (200 W×16 h) = 4000 Wh.

Las hojas producen energía durante las 12 horas de luz. Por lo tanto, los m² de hojas que serían necesarios para producir esa energía, serían: (16 W/m²)×12 h×S(m²) = 4000 Wh; de donde la superficie de hojas que sería necesaria: S(m²) = [4000 Wh/(16 W/m²)]×12 h = 20 m², lo que equivale a la

producción de oxígeno diaria de un árbol grande en regiones templadas. En las regiones tropicales un árbol puede producir el oxígeno necesario para el metabolismo de unas tres personas. En este cálculo se ha supuesto, como muchos autores sostienen, que *la energía de la fotosíntesis queda almacenada, fundamentalmente, en las moléculas de oxígeno* y no en los compuestos orgánicos sintetizados.

Se puede, por ejemplo, realizar el cálculo de cuántos árboles serían necesarios para producir el oxígeno que es preciso consumir para mantener el gasto de calefacción y agua corriente de una vivienda típica de un clima continental, si el calor la casa gasta al año 2 toneladas de gas natural.

Para llevar a cabo dicho cálculo hay que tener en cuenta que el gas natural está compuesto casi enteramente gas metano. La combustión del metano se produce con arreglo a la siguiente ecuación de reacción:



De acuerdo con esta ecuación, para conseguir la combustión de 16 toneladas de metano son precisas 64 toneladas de oxígeno, por lo que, para quemar las dos toneladas de metano se necesitarían: $(2 \times 64) / 16 = 8$ toneladas de oxígeno/año.

Un m² de hojas produce, bajo iluminación solar, 3 litros de oxígeno por hora. Aplicando la ley de gases ideales se puede calcular la masa de esos tres litros de oxígeno, suponiendo una temperatura de 15°C = 288 K y la presión de 1 atmósfera:

$$pV = nRT = \frac{a(g)RT}{M}; \quad a(g) = \frac{pVM}{RT} = \frac{1 \text{ atm} \times 3 \text{ litros} \times 32 \text{ gmol}^{-1}}{(0.0821 \text{ atm l mol}^{-1}K^{-1}) 288 \text{ K}} = 4.06 \text{ g}$$

El cálculo anterior indica que un m² de hojas sanas produce, por hora, 4.06 gramos de oxígeno. El número de horas que, en promedio, hay luz solar en latitudes templadas es 12, por lo que el número total de horas al año con luz será $12 \times 365 = 4380$ horas de luz/año. Por lo tanto, se puede calcular la superficie total de hojas de árbol que sería necesaria para producir las ocho toneladas de oxígeno que son precisas para conseguir la combustión de la cantidad de gas natural que consume la calefacción de la vivienda llevando a cabo la siguiente operación:

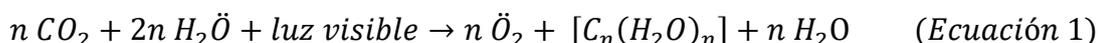
$$4.06 \times 10^{-3} (\text{kg } O_2 \text{ h}^{-1} \text{m}^{-2}) \times (4380 \text{ horas luz año}^{-1}) \times S(\text{m}^2) = 8000 \text{ kg de } O_2$$

Por lo tanto:

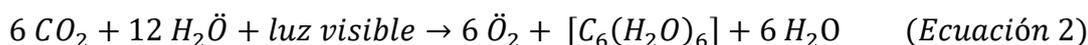
$$S(\text{m}^2) = \frac{8000 \text{ kg de } O_2}{4.06 \times 10^{-3} (\text{kg } O_2 \text{ h}^{-1} \text{m}^{-2}) \times (4380 \text{ horas luz año}^{-1})} = 450 \text{ m}^2 \text{ año}^{-1}$$

Es decir, suponiendo que un árbol grande desarrolla 20 m² de hojas, serían necesarios $450/20 = 22$ ó 23 árboles grandes produciendo oxígeno durante todo un año.

En el proceso global de la fotosíntesis, electrones provenientes del HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital) del agua, que es un orbital de baja energía, son promocionados por fotones componentes de la radiación solar hasta el LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital) del CO₂, y junto con protones producidos en la fotodisociación del agua son capaces de reducir esta molécula a carbohidrato. La reacción global de la fotosíntesis se puede escribir así:

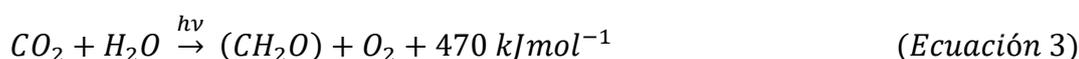


Donde [C_n (H₂O)_n] representa una molécula de carbohidrato de n átomos de C. Aplicando esta fórmula para n = 6 se tiene la formación de la glucosa:



Se ha puesto una diéresis sobre el oxígeno del agua que interviene en el primer miembro para indicar que este se produce a partir de las moléculas de agua iniciales, mientras que el oxígeno del agua resultante se forma a partir del CO₂. El carbohidrato entre paréntesis, junto con el oxígeno formado, contienen mayor energía libre que las sustancias en el primer miembro (contienen 5 eV más por átomo de carbono que las sustancias de partida) y la ecuación queda igualada energéticamente por la presencia de la energía luminosa en el primer miembro. Asimismo, la reacción es exotérmica de derecha a izquierda. De hecho, esa es la reacción de combustión, tal como se produce en el metabolismo de azúcares o de la celulosa, que produce CO₂ y H₂O o en el simple proceso de combustión para generar calor. En la ecuación que muestra la formación de glucosa puede observarse que por cada molécula de este carbohidrato que se forma se producen seis moléculas de oxígeno y, en general, tantas moléculas de oxígeno cuantos átomos de carbono formen parte del carbohidrato sintetizado por la planta (véase la Ecuación 1).

La fotosíntesis que realizan las plantas verdes, algas y bacterias fotosintéticas, es el proceso que determina la existencia de todas las formas superiores de vida. El oxígeno que forma parte de la atmósfera y que interviene en la actividad respiratoria y en el metabolismo se forma como consecuencia del proceso fotosintético. La reacción global que expresa el balance de materia y de energía que se produce en la fotosíntesis es la siguiente:



Donde (CH₂O) representa una hipotética molécula de hidrato de carbono, que realmente no existe tal como está formulada en la ecuación anterior, en la que se respeta la relación 1:1 entre un átomo de carbono y una molécula de agua que es característica de estos compuestos y que les confiere el nombre de hidratos de carbono o carbohidratos. Esta fotorreacción libera una energía de $\Delta H = 470 \text{ kJmol}^{-1}$. Además, ha podido demostrarse, utilizando moléculas marcadas con O¹⁸, que el oxígeno desprendido en la reacción proviene del agua y no del CO₂. Si se calcula, utilizando tablas de valores de funciones termodinámicas, la variación de energía libre que se produce entre reactivos y productos, se encuentra un valor de 504 kJ mol^{-1} . Por lo tanto, el término $-T\Delta S = \Delta G - \Delta H = 34 \text{ kJ mol}^{-1}$, por lo que el cambio de entropía, medido a una temperatura de 300 K, resulta ser $\Delta S = (\Delta G - \Delta H)/T = (34000 \text{ J mol}^{-1})/300 \text{ K} = -113 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$, es decir, parte de la energía luminosa absorbida por las máquinas fotosintéticas de que disponen las plantas verdes se invierte en producir un incremento de orden al pasar de los reactivos a los productos, incremento de orden que se refleja en las estructuras de carbohidratos, grasas, proteínas, vitaminas, hormonas, etc.

La formación de una molécula de O₂ tiene lugar por absorción de ocho fotones, que aportan una energía total próxima a 1470 kJ mol^{-1} . Por lo tanto, la eficiencia de conversión de energía solar, calculada como la relación entre la diferencia de energía libre acumulada en los enlaces de los productos de la fotosíntesis y la energía solar incidente, viene dada por: $\eta = \Delta G/\text{energía fotones} = 504 \text{ kJ mol}^{-1}/1470 \text{ kJ mol}^{-1} = 0.34$. El valor de la energía liberada en la reacción global, $\Delta H_{\text{reacción}}$, aproximadamente 470 kJ mol^{-1} , puede obtenerse a partir del cálculo siguiente:

Valor de $\Sigma\Delta H_{\text{reactivos}}$:

Energía de dos enlaces C=O en el CO ₂	= $-798 \times 2 = -1596 \text{ kJ mol}^{-1}$
Energía de dos enlaces O-H en el H ₂ O	= $-462 \times 2 = -924 \text{ kJ mol}^{-1}$
Total	$\Sigma\Delta H_{\text{reactivos}} = -2520 \text{ kJ mol}^{-1}$

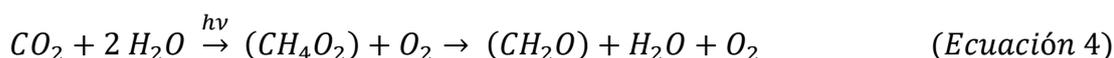
Valor de $\Sigma\Delta H_{\text{productos}}$

Energía del enlace O=O en el O ₂	= -487 kJ mol^{-1}
Energía de dos enlaces C-H en el folmaldehído, CH ₂ O	= $-386 \times 2 = -772 \text{ kJ mol}^{-1}$
Energía del enlace C=O en el CH ₂ O	= -798 kJ mol^{-1}
Total	$\Sigma\Delta H_{\text{productos}} = -2057 \text{ kJ mol}^{-1}$

$$\Delta H_{\text{reacción}} = \Sigma \Delta H_{\text{productos}} - \Sigma \Delta H_{\text{reactivos}} = -2057 - (-2520) = +463 \text{ kJ mol}^{-1}$$

El mismo valor se obtiene a partir de los potenciales redox de los pares $\frac{1}{2} \text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ (neutra) = +0.81 V_{SHE} y del par $\text{CO}_2/\text{CH}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} = -0.40 \text{V}_{\text{SHE}}$. Por lo tanto, la diferencia de energía entre ambos pares es: $0.81 - (-0.40) = 1.21 \text{ eV}$ por electrón. Como son 4 electrones los necesarios para llevar a término la reacción global, se obtiene un valor de $(4 \text{ electrones} \times 1.21 \text{ eV/electrón}) \times (23.03 \text{ kcal mol}^{-1}/\text{eV}) \times (4.18 \text{ kJ/kcal}) = 467 \text{ kJ mol}^{-1}$.

También se llega al mismo valor, partiendo de que, en el curso de la fotosíntesis es preciso hacer pasar cuatro átomos de hidrógeno desde el H_2O al CO_2 :



Igualmente, el balance de energía para esta reacción sería el siguiente:

$$1.21 \times 4 = 4.84 \text{ eV} \times (23.03 \text{ kcal mol}^{-1}/\text{eV}) \times (4.18 \text{ kJ/kcal}) \equiv 470 \text{ kJ mol}^{-1}$$

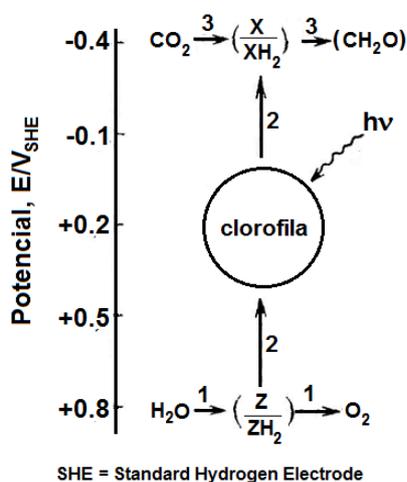


Figura 8. Proceso de reducción del CO_2 por electrones procedentes del agua. 1. Oxidación de H_2O a O_2 por medio de un colorante que se ha convertido en aceptor de electrones por excitación por ocho fotones de energía igual a la diferencia de energía entre el LUMO y el HOMO de dicho colorante. 2. Transferencia de protones y electrones en contra de la espontaneidad por absorción de la energía de la radiación y por intermedio de la clorofila fotoactivada y de varias reacciones enzimáticas sucesivas. 3. Reducción del CO_2 a CH_2O por los electrones y protones “bombeados” por los fotones, a través de varias reacciones enzimáticas sucesivas. $Z/Z\text{H}_2$ y $X/X\text{H}_2$ representan pares redox intermedios, que se transfieren electrones y protones (en conjunto, átomos de hidrógeno).

Puede considerarse pues, que la fotosíntesis de las plantas verdes es una reacción entre una sustancia, el agua, cuyas moléculas son convertidas en reductoras (con respecto al HOMO incompleto de las moléculas de clorofila a_{682} , excitadas por fotones de 682 nanómetros componentes de la radiación solar), a través de la interacción con un colorante que en su estado excitado se comporta como aceptor de electrones del agua, la cual, en este proceso es capaz de comportarse como reductor, y otra, el CO_2 , que tras la interacción de los electrones de los colorantes con los fotones de la radiación, se comporta como un oxidante (pues acaba aceptando electrones provenientes del estado excitado del colorante). Esta reacción de transferencia de cuatro electrones (o de cuatro átomos de H) en contra de la espontaneidad, en que los mismos son transportados hacia arriba en la escala de energías, superando una diferencia de potencial de 1.2 V (y, por lo tanto una diferencia de energía de 1.2 eV), es la que se representa esquemáticamente en la Figura 8.

Puede observarse que la reacción espontánea sería la reducción del oxígeno a agua por el carbohidrato, el cual se oxidaría a CO_2 y H_2O al hacerlo. Sin embargo, los fotones de la radiación, por

interacción con los pigmentos clorofílicos son capaces de convertir al agua en una especie reductora (que se oxida a O₂, al reducir al pigmento) y al CO₂ en oxidante (que se reduce a CH₂O al recibir electrones y protones cedidos por el agua y “bombeados” hasta alcanzar el nivel energético requerido para que la reducción del CO₂ pueda tener lugar).

En el caso de la fotosíntesis bacteriana el H₂S ocupa el lugar del agua. El H₂S se oxida a S y protones, de acuerdo con la siguiente reacción:



En el proceso representado por la Ecuación 4, los dos electrones necesarios para el proceso de reducción son bombeados hasta el potencial requerido para ello por los fotones que interaccionan con el fotosensibilizador, excitando a un electrón situado en el LUMO de este hasta el HOMO del mismo, el cual se encuentra situado a un potencial desde el que es posible su paso espontáneo (es decir, con desprendimiento de energía libre) hasta un nivel electrónico desocupado de la molécula de CO₂, para formar CH₂O.

En el caso de la fotosíntesis bacteriana, los electrones necesarios para la reducción del CO₂ son producidos por la reacción 5, en la que el SH₂ (en vez del agua) resulta oxidado por el fotosistema. En dicho caso la diferencia de potencial que ayudan a superar los cuantos luminosos sería igual a la diferencia de potencial del par H₂S/S, que se encuentra solo 0.2 V por encima de la correspondiente al par CH₂O/CO₂.

Si se observa el espectro de la luz solar que llega hasta la superficie de la Tierra tras atravesar la atmósfera se puede ver que los fotones de las energías correspondientes a las longitudes de onda a las que se produce la absorción por parte de los dos pigmentos clorofílicos, son de los más abundantes en el mismo, mientras que su energía no es suficientemente elevada como para generar grandes daños en los tejidos biológicos que forman las plantas.

En la fotosíntesis de las plantas verdes, la primera etapa consiste en la absorción de fotones de energía correspondiente a la distancia energética entre el HOMO y el LUMO de las moléculas de los pigmentos que forman parte de la clorofila. La Figura 9 muestra las fórmulas estructurales de los pigmentos vegetales más importantes implicados en el proceso de absorción de fotones de la radiación solar.

Las clorofilas α_I y α_{II} absorben fotones de longitud de onda 680 y 700 nm. Haciendo uso de la fórmula: Energía (en eV) = 1240/λ(nm) se obtienen las siguientes energías para dichos fotones; 1240/680 = 1.82 eV y 1240/700 = 1.77 eV. Estos dos valores de la energía se encuentran próximos a la zona del máximo del espectro solar que se mide sobre la superficie de la Tierra, es decir, una zona en la que el número de fotones por unidad de superficie y por unidad de tiempo que llegan es máximo y en la que la energía de los fotones no es suficiente como para que se produzca la fotodescomposición de un número elevado de moléculas de colorante por efecto de la interacción con los fotones. Además estos valores de la diferencia de energía entre HOMO y LUMO de los pigmentos clorofílicos se encuentran próximos al intervalo de energía del espectro solar que coincide con los intervalos de energías prohibidas donde los semiconductores presentan un máximo de eficiencia de conversión.

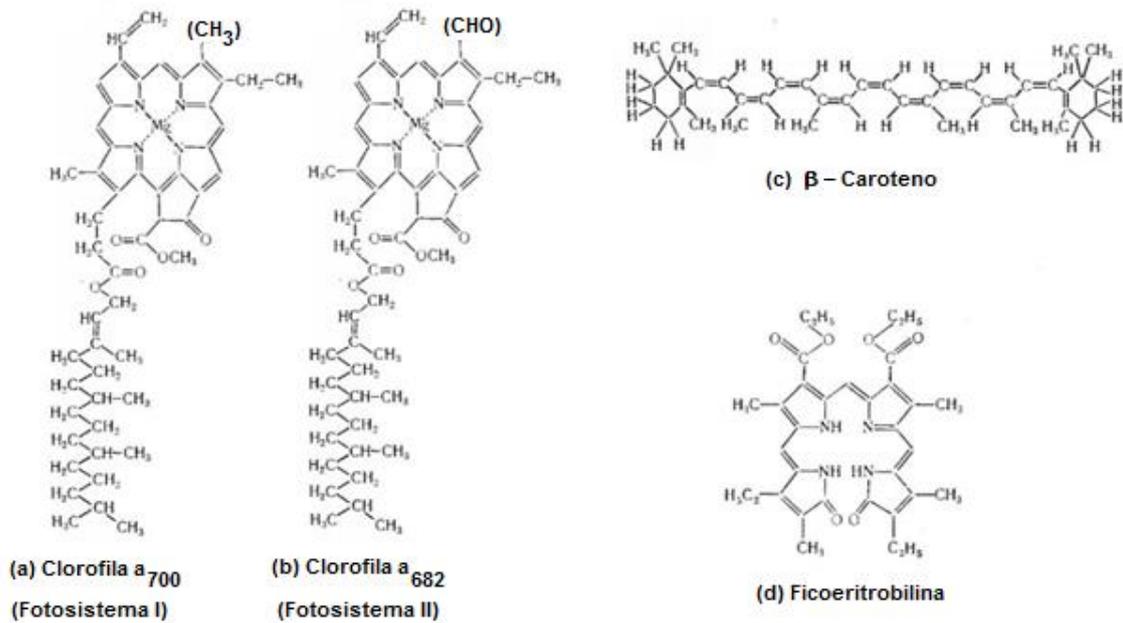


Figura 9. Fórmulas estructurales de algunos de los pigmentos que intervienen en el proceso de absorción y transferencia de la radiación solar hacia la clorofila: a) Clorofila α_I . (b) En la Clorofila α_{II} el metilo que aparece en la Clorofila α_I y que ejerce un efecto de hiperconjugación, enriqueciendo de electrones, es sustituido por un grupo aldehído ($-CH=O$), que ejerce un efecto $-T$, lo que provoca una sustracción electrónica, por lo que el potencial redox de este pigmento se hace más positivo ($+ 0.4 V$) (véase la Figura 4.18) que el de la clorofila α_I y que el del par H_2O/O_2 . Cuando la Clorofila α_{II} es fotoexcitada deja un hueco en su HOMO que tiene menor energía que el HOMO de las moléculas de agua con las que se encuentra en contacto, lo que induce la oxidación de estas últimas, ayudada por la acción de un catalizador apropiado, el denominado centro de manganeso). (c) β -caroteno. (d) ficoeritrobilina. Estos últimos colorantes actúan como pigmentos antena, encargados de absorber fotones de energía próxima a la requerida para excitar a las clorofilas y de transportarlos hasta ellas por un proceso de transferencia secuencial de energía fotónica.

La Figura 10 muestra la absorción relativa de las diversas partes del espectro solar por una hoja verde. Aparecen dos máximos de absorción, uno en la zona del azul y otro en la zona del rojo (a la que pertenecen los fotones de 682 y 700 nm de longitud de onda), mientras que el mínimo se encuentra justamente en la zona del verde, que, al no ser absorbida, es la que les confiere el color verde.

Para que sea posible esta ganancia en energía libre asociada a la promoción de electrones del agua hasta orbitales de mayor energía, los fotones se apoyan en las moléculas de los colorantes. Los dos pigmentos presentes son la clorofila a_{682} y la a_{700} , donde los subíndices se refieren a las longitudes de onda (en nanómetros, $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$), de 682 y 700 nm, (equivalentes a una energía aproximada de 1.82 eV y 1.77 eV por fotón).

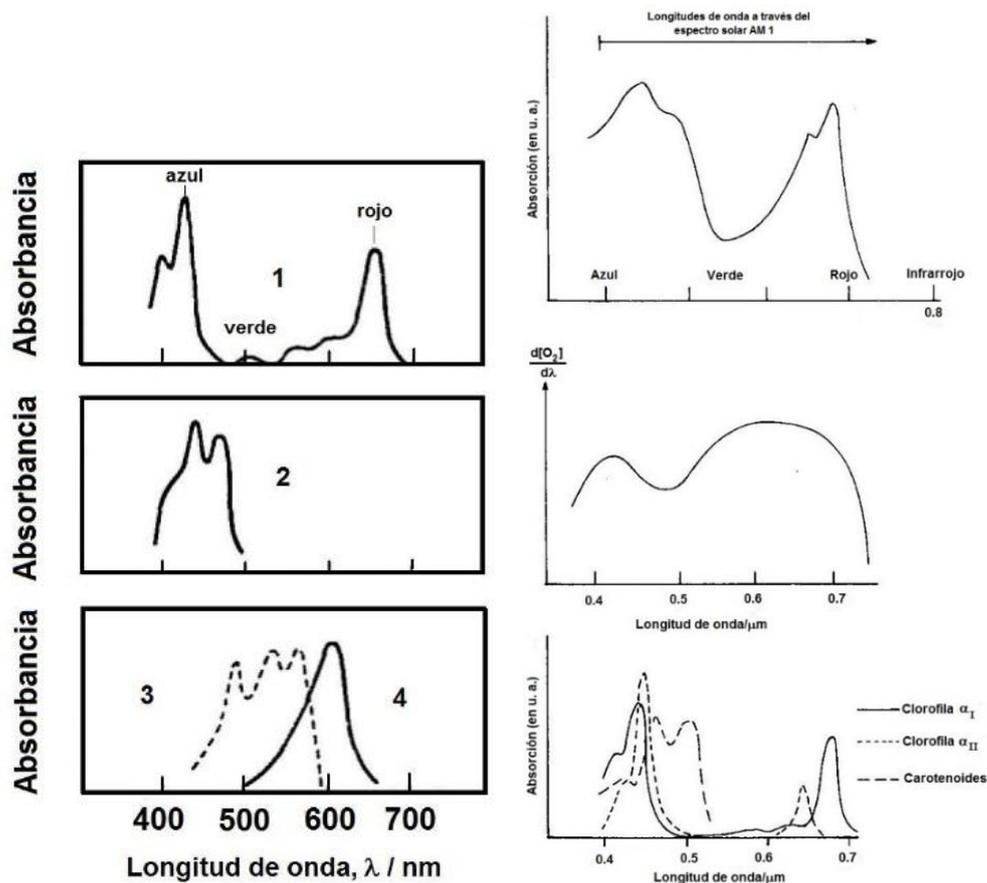


Figura 10. Figuras de la izquierda: Bandas de absorción de la clorofila α_I (1), del carotenoide (2), de la ficoeritrina (3) y de la ficocianina (4). Figuras de la derecha: Arriba: Espectros de absorción y espectro de acción de hojas de plantas y de pigmentos. (a) espectro típico de absorción de una hoja verde en vivo. Pueden observarse dos máximos de absorción en las zonas del azul y del rojo, mientras que la absorción en la zona del verde es muy baja, por lo que esta zona de la radiación no absorbida es la que confiere el color verde a las hojas. En medio: Espectro de acción de una planta verde típica: $d[O_2]/d\lambda$ representa la velocidad de producción de oxígeno por unidad de área y por unidad de intensidad de radiación, medida como función de la longitud de onda. (c) Espectros de absorción individuales de alguno de los pigmentos que colaboran en la absorción de radiación solar por las plantas verdes. Puede observarse que la combinación de todos estos espectros no es capaz de reproducir el espectro de absorción en vivo representado en (a), lo que demuestra que las propiedades de los pigmentos individuales cambian parcialmente cuando todos ellos participan en una estructura cooperativa. Además, el espectro global (a) muestra una absorbancia prácticamente nula en la zona del verde, lo que explica el color verde de las plantas.

La Naturaleza, por lo tanto, ha hecho uso de colorantes en que la diferencia de energía entre el HOMO y el LUMO resulta coincidir con la zona de energías del espectro solar en la que llega un mayor número de fotones por unidad de superficie y por unidad de tiempo. También merece la pena mencionar que la energía de estos fotones no es demasiado elevada, con lo que los procesos de fotodegradación de los pigmentos no son demasiado rápidos.

Para lograr que el proceso fotosintético tenga lugar, la Naturaleza ha recurrido a un dispositivo que forma parte de las hojas verdes. En ellas están contenidas células, cuyo citoplasma contiene un gran número de cloroplastos (véase la Figura 4.10), en cuyo interior existe un líquido, denominado estroma, en el cual se encuentran disueltas muchas proteínas y en el que flota una red de membranas dobles llamadas membranas tilacoides (véanse las Figuras 11, 12 y 13). Estas membranas conforman un espacio cerrado en el que están contenidas moléculas de clorofila, un colorante que aparece en dos formas

ligeramente diferentes, que absorben fotones de distinta longitud de onda, de 682 y 700 nm, las clorofilas a_{682} (fotosistema II) y la a_{700} (fotosistema I).

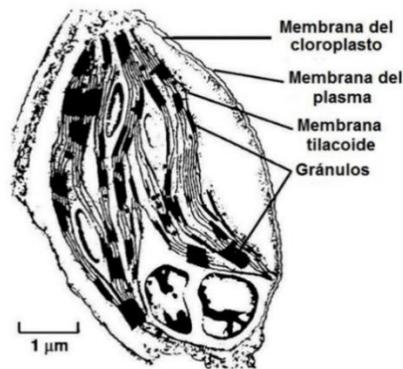


Figura 10. Esquema de la estructura de un cloroplasto.

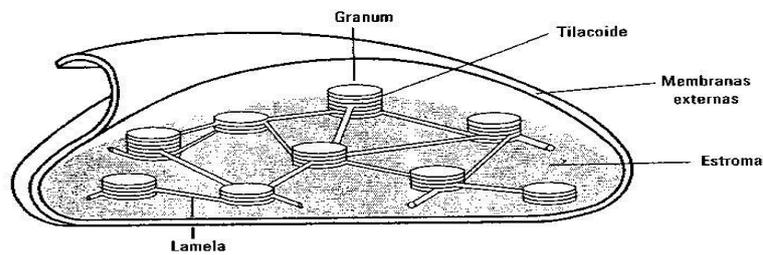


Figura 11. Esquema de un cloroplasto. En los organismos eucarióticos (plantas y la mayoría de las algas) la fotosíntesis tiene lugar en estos orgánulos celulares.

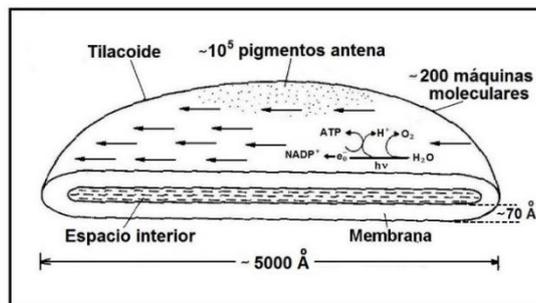


Figura 12. Diagrama simplificado de una membrana tilacoide, en la que se producen las etapas elementales de la fotosíntesis

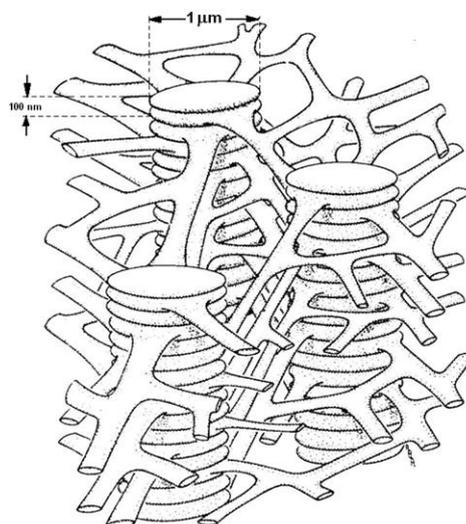


Figura 13. Modelo estructural de la membrana tilacoide mostrando las regiones en las que existe apilamiento y en las que dicho apilamiento no existe. Los grana apilados están unidos entre sí por puentes de láminas de estroma y todos ellos se encuentran en el interior del estroma líquido de las organelas de los cloroplastos.

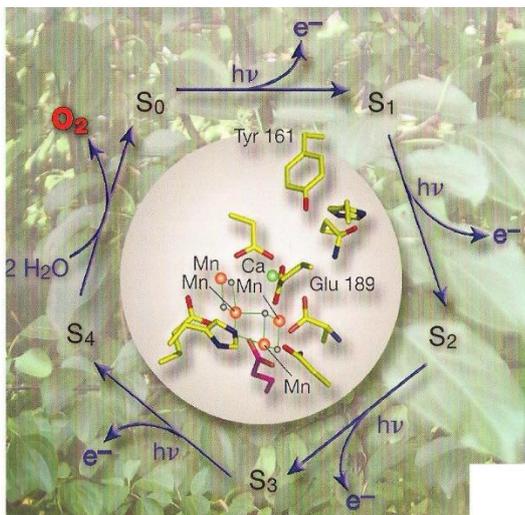


Figura 14. Centro de Mn, donde tiene lugar la oxidación del agua para dar lugar a la formación de protones y oxígeno.

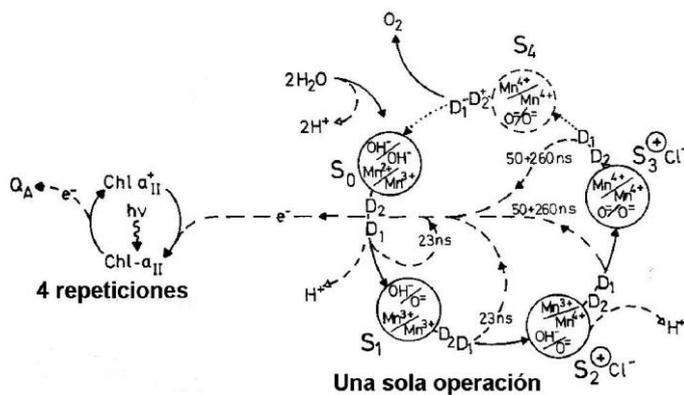


Figura 15. Operación del Centro de Mn.

Las fórmulas estructurales de los diversos pigmentos que intervienen en el proceso de fotosíntesis aparecen representadas en la Figura 9, junto con las de los denominados pigmentos antena, cuyo cometido consiste en absorber fotones y desplazarlos por transferencia secuencial hacia los fotosistemas I y II donde son absorbidos por las clorofilas. Los fotones que son absorbidos corresponden al rojo extremo del espectro solar. Las Figuras 14 y 15 muestran una interpretación de como parece tener lugar el proceso de oxidación de las moléculas de agua sobre el Fotosistema II fotoexcitado.

Los pigmentos son sustancias orgánicas con dos electrones en el HOMO y un LUMO vacío a una distancia energética que coincide con la energía de los fotones que se absorben. El fotón absorbido promociona a un electrón hasta el LUMO (formando lo que se denomina un excitón) y este es transferido a otros compuestos denominados plastoquinonas antes de que, por fluorescencia se desactive hasta su estado inicial, es decir en un tiempo menor de 10^{-8} segundos. El colorante excitado cambia radicalmente su carácter oxidante y reductor.

Así, el hueco dejado en el HOMO por el electrón promocionado tiene menor energía que los electrones del HOMO en la molécula de agua (de hecho, el hueco dejado en el HOMO del colorante

por el electrón excitado alcanza un potencial redox de +0.9 V_{SHE}, mientras que el potencial redox de oxidación de agua a pH = 7 es +0.82 V_{SHE}, lo que quiere decir que los electrones, al pasar del agua al HOMO del pigmento se estabilizan en, aproximadamente, 0.08 V) por lo que estos tienden a pasar a este estado energético más bajo, en una reacción que es catalizada por un compuesto organometálico (proteína de Mn) en que intervienen cuatro centros de manganeso. Es decir, el agua es oxidada por el colorante a₆₈₂ (tras absorber las moléculas de estos fotones de una longitud de onda de 682 nm) excitado en un paso catalizado por la enzima denominada complejo del manganeso.

El colorante, al ganar un electrón, regenera su HOMO al estado inicial, con lo que queda preparado para absorber un nuevo fotón. Ese proceso, repetido cuatro veces, oxida 2 moléculas de agua a una molécula de oxígeno y cuatro protones. Simultáneamente, cuatro electrones son promocionados hasta el nivel excitado de la clorofila a₆₈₂ y de ahí son transferidos (en un tiempo inferior al de desexcitación por fluorescencia, es decir, $\tau < 10^{-8}$ segundos) hasta el nivel energético inferior de la clorofila 700 (Fotosistema I).

Esto puede producirse porque, en la hoja "in vivo", la molécula de colorante se encuentra próxima a otras moléculas similares, y la energía absorbida, pasa a estas por transferencia resonante, asociada al movimiento térmico) a moléculas, cuya estructura aún no se conoce, denominadas Q (plastoquinonas), y que, como consecuencia de su ganancia de electrones se cargan negativamente. La semirreacción que tiene lugar en el denominado fotosistema 2 es la siguiente:

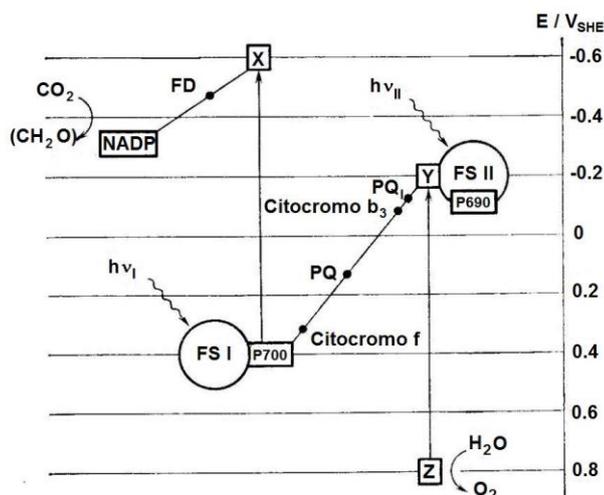
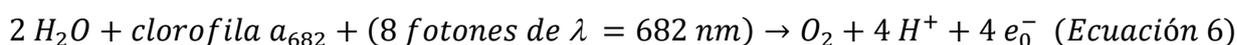
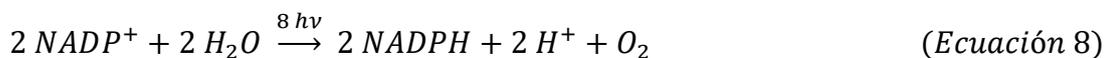


Figura 16. Diagrama energético de los procesos de fotoexcitación que tienen lugar en las plantas verdes.

Estos cuatro electrones, que confieren carga negativa a las plastoquinonas, tras serles transferidos desde el estado excitado de la clorofila a₆₈₂, se encuentran en orbitales de mayor energía que los que ocupaban en el agua y esto se pone de manifiesto en que el potencial de los mismos es 1 V más negativo, es decir llega desde los +0.8 V correspondientes al HOMO del pigmento, a -0.2 V_{SHE} (donde SHE = Standard Hydrogen Electrode) (en electroquímica un potencial más negativo corresponde a mayor contenido de energía libre, o a que los electrones ocupan orbitales de energía más elevada, pues, de acuerdo con la ecuación de Nernst, $\Delta G = -nFE$, donde ΔG = cambio en energía libre, n = número de electrones, F la constante de Faraday y E = potencial). Es decir, la energía del fotón se ha convertido en energía química del electrón, lo cual viene representado por la primera absorción, por parte del Fotosistema II (FS II, clorofila 690 nm) en la parte derecha de la Figura 16.

Los electrones fotoexcitados hasta alcanzar el LUMO de la clorofila a₆₈ son transferidos espontáneamente hasta los orbitales de alta energía de las plastoquinonas, que se encuentran ligeramente por debajo en la escala energética del LUMO de la clorofila a₆₈. Los electrones situados en orbitales de

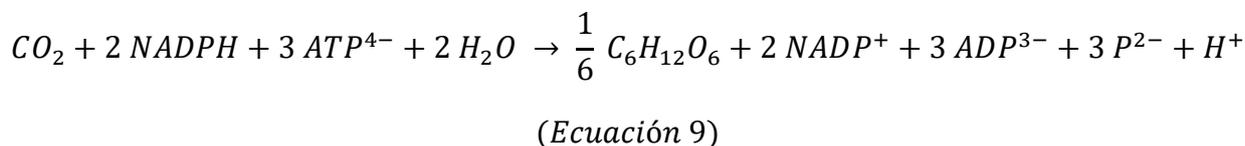
Los protones formados por la fotooxidación del agua en el fotosistema II, tras pasar por el citocromo f, difunden a través de la membrana tilacoide, impulsados por el gradiente de pH, lo que, a su vez, hace posible la reacción 2. Dichos protones, que se habían formado en la reacción de oxidación del agua por el Fotosistema II, reaccionan con NADP y con los electrones para formar NADPH₂, según una reacción que puede ser escrita del modo siguiente:



De acuerdo con esta ecuación de reacción, cada reducción de NADP⁺ requiere dos electrones provenientes de dos “bombeos” por fotones. El NADPH presenta un elevado potencial de reducción ($E_{\text{Redox}} = -0.3 \text{ V}_{\text{SHE}}$). De hecho, es el principal agente reductor que se requiere para conseguir el paso de CO₂ a carbohidrato, junto con la energía que había quedado almacenada en el ATP.

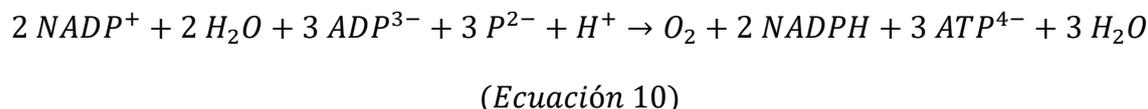
4.2 Reacciones en la oscuridad

El proceso denominado ciclo de Calvin tiene lugar en el estroma de los cloroplastos, fuera de las membranas tilacoides, en una serie de etapas químicas espontáneas, no fotoquímicas y que, por lo tanto, pueden tener lugar en la oscuridad, tras un período de absorción de luz, y también durante intervalos de tiempo durante los que hay absorción de luz. Se puede seguir el transcurso de las reacciones utilizando dióxido de carbono marcado con C¹⁴, ¹⁴CO₂. En el caso de la bacteria púrpura fotosintética no existe el Fotosistema II, por lo que no se produce la fotooxidación del agua, ni el oxígeno proveniente de la misma, aunque sí que tiene lugar la fijación del CO₂ a través del Fotosistema I. En el caso de las plantas verdes se usan, para el estudio del proceso en la oscuridad, los productos químicos que intervienen en toda la serie de reacciones que se verifican en los Fotosistemas II y I. Se puede afirmar que las sustancias más importantes que intervienen en el ciclo de Calvin son NADPH, ATP y H⁺, que se forman a partir de los Fotosistemas I y II, y CO₂ y H₂O provenientes del entorno de la planta. La reacción global resultante del ciclo de Calvin en la oscuridad es la siguiente:



Donde P²⁻ = HPO₄²⁻ = fosfato inorgánico.

El proceso primario, dependiente de la luz, que es capaz de crear las cantidades necesarias de NADPH y de ATP, puede ser representado mediante la siguiente ecuación de reacción:



La reacción global puede ser escrita del siguiente modo:



Para fijar el átomo de C del CO₂ reducido son precisas dos moléculas de NADPH, tres de ATP⁴⁻ y dos protones. A su vez, cada molécula de NADP⁺ requiere dos electrones promocionados por dos fotones de 700 nm apoyándose en la clorofila a₇₀₀ para pasar de nuevo a formar NADPH. Por lo tanto, el ciclo de Calvin viene alimentado por la absorción de cuatro fotones por el fotosistema I, mientras que los protones provienen del interior de la membrana tilacoide, impulsados por varios mecanismos. Como los electrones necesarios para reducir al NADP han de ser bombeados hasta el nivel de la plastocianina por el fotosistema II, ello se produciría por la absorción de otros cuatro fotones de 680 nm por éste. En

resumen, de acuerdo con el ciclo de Calvin, serían necesarios al menos ocho fotones por cada átomo de C fijado en forma de carbohidrato, aunque, en la práctica, son precisos más fotones debido a que se producen pérdidas por saturación. En condiciones óptimas, muchas plantas necesitan absorber unos diez fotones por cada átomo de C que fijan en forma de carbohidrato.

Hay que añadir aquí, que nuevos trabajos realizados por investigadores alemanes (F. Keppler, de la Universidad de Heidelberg), británicos y holandeses, han puesto de manifiesto que las plantas emiten también una cantidad significativa de gas metano, hasta ser responsables de contribuir con un porcentaje de entre el 10 y el 30 % a la cantidad global de metano existente en la atmósfera. La emisión de metano por las plantas varía en función de la intensidad de la luz solar y de la temperatura. Un incremento de 10°C duplica la velocidad de emisión de gas metano. La ruta bioquímica a través de la cual las plantas llegan a la síntesis del metano aún no está clara, pero podría estar relacionada con la presencia en las hojas de la pectina, una sustancia que les da cohesión.

Este descubrimiento, comentado en el número correspondiente al 12 de Enero de 2006 de la revista Nature, pone en evidencia los cálculos que atribuyen el efecto invernadero a la creciente concentración de CO₂ en la atmósfera, proveniente de la combustión de combustibles fósiles. No hay que olvidar que las moléculas de metano son treinta veces más eficaces que las de CO₂ a la hora de captar la radiación infrarroja lejana y que una fuente muy importante de generación de metano parece proceder de las bacterias anaeróbicas que se desarrollan en campos inundados donde se cultiva arroz. Ahora se duda sobre si parte del metano emitido podría provenir de las propias plantas de arroz, con lo que dejaría de tener sentido tratar de desarrollar plantas de arroz que fueran capaces de crecer en seco.

Este hallazgo parece ofrecer una explicación a las grandes bolsas de metano que los satélites habían detectado sobre las selvas tropicales, y sobre el inexplicable descenso en el ritmo de crecimiento de la concentración de metano, que ahora puede correlacionarse con la reducción de las selvas tropicales por deforestación. En la década de 1990 a 2000, el ritmo de acumulación de metano en la atmósfera decreció en unos 20 millones de toneladas al año, cifra que parece estar de acuerdo con la reducción del 12% que experimentó la superficie total recubierta con selvas en dicho período de tiempo. Aún así, el efecto de disminución de la concentración de CO₂ que ejercen las reforestaciones parece que compensa con creces la posible contribución de las plantas al efecto invernadero debido a esta generación de metano.

La Figura 18 muestra un esquema general del proceso de la fotosíntesis con las reacciones fotoinducidas y las que pueden tener lugar en ausencia de luz.

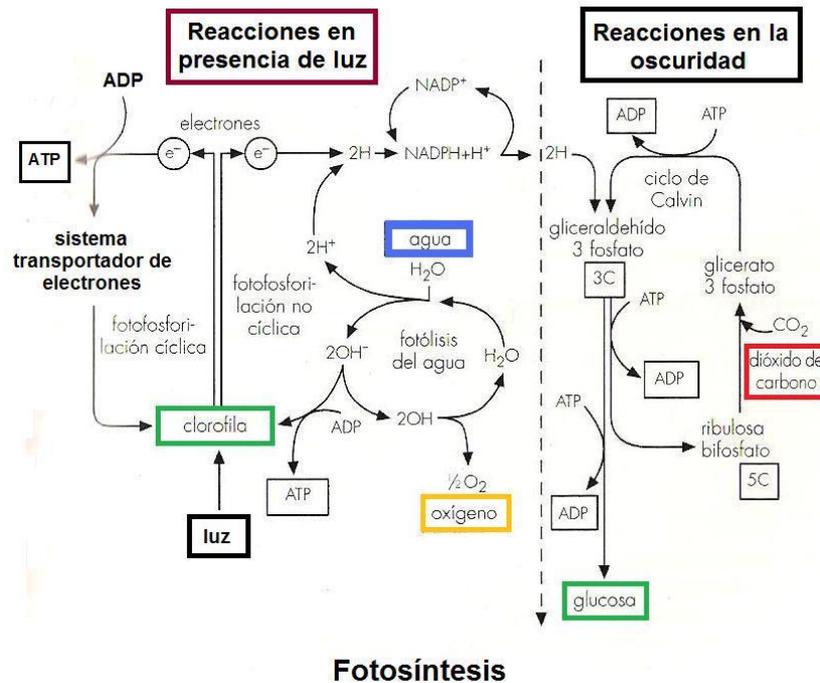


Figura 18. Esquema general del proceso de la fotosíntesis

Ejemplo

- (a). Calcúlese cuantos fotones son necesarios para formar un mol de glucosa por fotosíntesis.
- (b). ¿Cuánta energía se acumula en un mol de glucosa si se sabe que cada átomo de carbono fijado en forma de carbohidrato acumula 4.8 eV?.

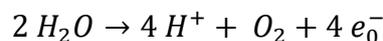
Respuesta

(a). Glucosa = $C_6H_{12}O_6$

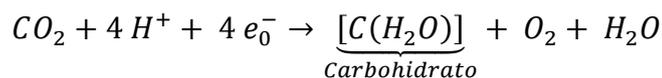
Masa molecular = $M = 6 \times 12 + 12 \times 1 + 6 \times 16 = 180 \text{ g mol}^{-1}$

Para fijar por fotosíntesis un átomo de carbono son necesarios 4 electrones, como se ve en el siguiente esquema reaccionante:

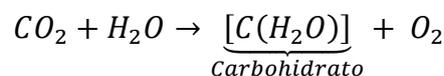
Oxidación del agua. Tiene lugar en el Fotosistema II



Reducción del CO_2 . Tiene lugar en el Fotosistema I



La reacción global puede ser escrita del siguiente modo:



Donde $[C(H_2O)]$ representa a una molécula ficticia de carbohidrato que estuviera formada por un solo átomo carbono.

Como se puede ver, la fijación de un átomo de carbono en forma de carbohidrato, precisa de cuatro electrones, que suministra el agua inicial. Cada electrón es promocionado hasta niveles energéticos, desde los que pueden intervenir, junto con los protones producidos en la fotooxidación del agua, en la reducción del CO_2 , a través de los dos pigmentos clorofílicos, a_{682} y a_{700} , por dos fotones de las longitudes de onda que aparecen en nanómetros como subíndices. Por lo tanto, son ocho los fotones que han de intervenir en la fijación de un átomo de carbono como carbohidrato, aunque, en la práctica serían necesarios más, porque puede haber pérdidas por saturación y otros procesos. El número total de fotones que serían necesarios para dar lugar a la formación de un mol de glucosa por intermedio de la función clorofílica puede ser calculado del siguiente modo:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{4 \text{ electrones}}{\text{átomo de C}} \right) \times \left(\frac{2 \text{ fotones}}{\text{electrón}} \right) \times \left(\frac{6 \text{ átomos de C}}{\text{molécula de glucosa}} \right) \times \left(6.022 \times 10^{23} \frac{\text{moléculas}}{\text{mol}} \right) = \\ & = 2.89 \times 10^{25} \text{ fotones mol}^{-1} = 28.9 \times 10^{24} \text{ fotones mol}^{-1} \\ & \approx 29 \text{ cuatrillones de fotones para formar 180 gramos de glucosa} \end{aligned}$$

(b) La energía luminosa que queda almacenada en un mol (180 g) de glucosa puede ser calculada del siguiente modo:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{4.8 \text{ eV}}{\text{átomo de C}} \right) \times \left(\frac{6 \text{ átomos de C}}{\text{molécula de glucosa}} \right) \times \left(6.022 \times 10^{23} \frac{\text{moléculas}}{\text{mol}} \right) = \\ & = (1.73 \times 10^{25} \text{ eV mol}^{-1}) \times (1.6 \times 10^{-19} \text{ J eV}^{-1}) = 2.77 \times 10^6 \text{ J mol}^{-1} = \\ & = (2.77 \times 10^3 \text{ kJ mol}^{-1}) \times (0.24 \text{ kcal kJ}^{-1}) = 664 \text{ kcal mol}^{-1} = \\ & = (664 \text{ kcal mol}^{-1}) \times (5.55 \text{ mol kg}^{-1}) = 3685 \text{ kcal kg}^{-1} = \\ & = (2.77 \times 10^3 \text{ kJ mol}^{-1}) \times (5.55 \text{ mol kg}^{-1}) = 15.37 \text{ MJ kg}^{-1} \end{aligned}$$

4.3 Eficiencia de conversión energética de la fotosíntesis

Una forma de estimar la eficiencia de conversión del proceso fotosintético es por medio de la relación entre la energía necesaria para fijar un átomo de C en forma de carbohidrato (4.8 eV/C, calculado a partir del calor de combustión del carbohidrato, con $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$) y la energía fotónica solar necesaria para reducir una molécula de CO_2 y dejar ese átomo de C fijo en una estructura de carbohidrato. A esta eficiencia se le denomina eficiencia química, η_q , aunque, en realidad representa una evaluación del rendimiento con que se producen las reacciones fotoquímicas que están implicadas en el proceso fotosintético:

$$\begin{aligned} \eta_q &= \frac{\text{Energía almacenada por átomo de C fijado}}{\text{Energía luminosa absorbida por átomo de C fijado}} = \\ &= \left[\frac{4.8 \text{ eV C}^{-1}}{(4 \text{ fotones de } 1.77 \text{ eV C}^{-1})_{\text{fotos II}} + (4 \text{ fotones de } 1.82 \text{ eV C}^{-1})_{\text{fotos I}}} \right] = \\ &= \left(\frac{4.8 \text{ eV C}^{-1}}{14.4 \text{ eV C}^{-1}} \right) = 0.33 \text{ (o } 33\%) \end{aligned}$$

La energía en el numerador también puede ser calculada como 4 veces la diferencia de energía entre el nivel del HOMO del agua ($E_{\text{redox}} = +0.8 \text{ V}_{\text{SHE}}$) y el necesario para reducir al NADP ($E_{\text{Redox}} \approx -0.35 \text{ V}_{\text{SHE}}$), es decir: $4 \times 1.15 \text{ eV} = 4.6 \text{ eV}$, más tres moléculas de $\text{ATP} \times \text{C}^{-1}$ a 0.34 eV cada una, daría 1.02 eV , dando un total de 5.6 eV , con lo que quedaría: $\eta_q = 5.6/14.4 = 0.39$.

El valor $4.8 \text{ eV} \times \text{C}^{-1}$ en la glucosa, que se ha utilizado anteriormente se puede determinar partiendo de que el poder calorífico de la glucosa es de 15.4 MJ/kg . Como la masa molecular de la glucosa $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ es 180 g mol^{-1} , se tiene que 1 kg de glucosa contiene: $1000 \text{ g} / 180 \text{ g mol}^{-1} = 5.55 \text{ moles}$ de glucosa kg^{-1} . Por lo tanto, en un kg de glucosa existen los siguientes átomos de C: $(5.55 \text{ moles de glucosa kg}^{-1}) \times (6.023 \times 10^{23} \text{ moléculas mol}^{-1}) \times (6 \text{ C molécula}^{-1}) = 200.6 \times 10^{23} \text{ átomos de C por kg de glucosa}$. Por lo tanto: $(15.4 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}) / [(200.6 \times 10^{23} \text{ C kg}^{-1}) \times (1.6 \times 10^{-19} \text{ J eV}^{-1})] = 4.8 \text{ eV C}^{-1}$.

Cuando se trabaja con masas molares se considera en estos casos como unidad de radiación el *einstein* que es igual a un número de Avogadro de fotones de la misma frecuencia, o, también, a un mol de fotones de la misma energía.

Como ya se indicó al explicar las células fotovoltaicas, dentro del espectro solar visible hay muchos fotones de energía menor que la necesaria para fotoexcitar a los pigmentos fotoactivos ($h\nu < 1.8 \text{ eV}$), mientras que otros muchos fotones tienen mayor energía que la necesaria para promocionar a los electrones al LUMO del colorante, con lo que el exceso de energía se pierde en cuanto se refiere a su conversión en energía química. En conjunto, solo alrededor del 50% de los fotones del espectro tienen frecuencias útiles para el proceso fotosintético.

Esto se expresa definiendo una nueva eficiencia, $\eta_\lambda \approx 0.5$. Además, aparece otro factor, que algunos definen como eficiencia geométrica, η_{geom} , que indicaría la fracción de fotones activos a la fotosíntesis que es capaz de llegar a los puntos concretos donde se encuentran los pigmentos clorofílicos. Este valor dependería de factores como la profundidad de penetración a través de las hojas, la reflectancia de las mismas y de la absorción de fotones por otras sustancias componentes de las hojas. Se puede tomar un valor de alrededor de 60% como típico para la eficiencia geométrica. En conjunto, se puede establecer que la eficiencia global del proceso fotosintético puede ser calculada como producto de todas las eficiencias antes mencionadas, por lo que se tiene:

$$\begin{aligned} \text{Eficiencia global de la fotosíntesis} &= \eta_{\text{fotosíntesis}} = \\ &= (\eta_q = 0.39) \times (\eta_\lambda = 0.5) \times (\eta_{\text{geométrica}} = 0.6) \approx 0.12 \end{aligned}$$

Habría que añadir, que la propia planta hace uso de la energía que fija de la luz para mantenerse viva, crecer y desarrollarse. Se ha de considerar entonces un nuevo factor, la eficiencia respiratoria, que puede ser igual a 0.5 en plantas terrestres y algo mayor en plantas acuáticas y algas. Con ello se alcanzaría una eficiencia ideal del 6%, aproximadamente. Valores de este orden de magnitud solo se han conseguido en laboratorios, bajo condiciones de trabajo controladas. Los mejores cultivos o el crecimiento natural solo son capaces de alcanzar una fracción de esta eficiencia.

Ejemplo

Teniendo en cuenta que se estima que las hojas verdes incorporan energía solar a un ritmo de 16 Wm^{-2} de superficie de hoja, (a), ¿cuánta superficie de hojas sería necesaria para formar un mol de glucosa en un segundo? (b). Hágase un cálculo de la eficiencia de conversión de energía luminosa que presentan las hojas cuándo reciben una intensidad de iluminación de 1000 Wm^{-2} .

Respuesta

(a)

$$\begin{aligned} \text{Superficie de hojas} &= \frac{(1 \text{ mol de glucosa s}^{-1}) \times (2770 \text{ kJ mol}^{-1}) \times (10^3 \text{ J kJ}^{-1})}{(16 \text{ W m}^{-2}) \times (1 \text{ J s}^{-1} \text{ W}^{-1})} = \\ &= 173125 \text{ m}^2 \text{ de hojas} \end{aligned}$$

Un árbol grande puede tener unos 20 m² de superficie de hojas, por lo que los 173000 m² podrían representar un bosque de 8650 árboles.

(b)

$$\eta = \frac{\text{Energía generada por fotosíntesis}}{\text{Energía luminosa incidente}} \times 100 =$$

$$= \frac{\text{Potencia generada por fotosíntesis}}{\text{Potencia luminosa incidente}} \times 100 = \frac{16 \text{ W m}^{-2}}{1000 \text{ W m}^{-2}} \times 100 = 1.6\%$$

Ejemplo

¿De qué tiempo dispone cada fotón del espectro solar para interactuar con una molécula de clorofila suponiendo que las dimensiones de esta son de unos 10 Å?

Respuesta

$$e = 10 \text{ Å} = 10^{-7} \text{ cm} = 10^{-9} \text{ m y}$$

La velocidad del fotón = velocidad de la luz = $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1} = c$

$$t_{\text{interacción}} = \frac{e}{c} = \frac{10^{-9} \text{ m}}{3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}} = 3.3 \times 10^{-18} \text{ segundos}$$

En este tiempo el fotón tiene que ser capaz de transferir su energía (1.82 eV a la clorofila a₆₈₂ ó 1.77 eV a la clorofila a₇₀₀).

5. BIOCOMBUSTIBLES

Biomasa es el conjunto de materiales que forman las plantas y animales. Está formada por compuestos orgánicos cuyo origen se encuentra en el proceso fotosintético. Estos compuestos orgánicos contienen electrones formando parte de enlaces cuyo contenido energético es mayor que los niveles electrónicos libres de las moléculas de oxígeno. Puesto en contacto el oxígeno con los compuestos orgánicos sintetizados por fotosíntesis, los electrones que ocupan los orbitales de estos tienden, espontáneamente, a ocupar el nivel de energía más bajo que les es asequible, es decir, el LUMO de la molécula de oxígeno.

Por lo tanto, el resultado del proceso fotosintético es la formación, a partir de sustancias de gran inercia química (CO₂ y H₂O), de compuestos orgánicos y de oxígeno, que son inestables puestos en contacto mutuo. Cuando se produce ese contacto, comienza un proceso espontáneo de transferencia electrónica desde los enlaces de los compuestos hacia el LUMO de las moléculas de oxígeno (en definitiva, una oxidación), con desprendimiento de energía en forma de calor y con reorganización de enlaces que conduce a la formación de nuevos compuestos con menor contenido de energía libre, hasta que terminan por regenerarse los compuestos de que habían partido las plantas para sintetizar la biomasa, CO₂ y H₂O.

Este proceso espontáneo, que libera una energía de bajo grado termodinámico, el calor, puede ser muy lento en descomposiciones de materia orgánica o bien, cuando se produce en el interior de las células de los seres vivos, con intervención de biocatalizadores enzimáticos (el denominado ciclo de Krebs), puede ser más rápido y dar lugar a la emisión de energía en forma de calor, que sirve para mantener la temperatura de los cuerpos de diversas formas vivientes. También puede dar lugar a otras formas de energía, como bioelectricidad, la cual permite que se produzcan impulsos nerviosos, o musculares, o el acto de pensar, o transformarse en energía mecánica por acción de los músculos, etc.

Pero los productos finales siguen siendo los mismos de los que partieron las plantas para llevar a cabo el proceso fotosintético, es decir, CO₂ y H₂O.

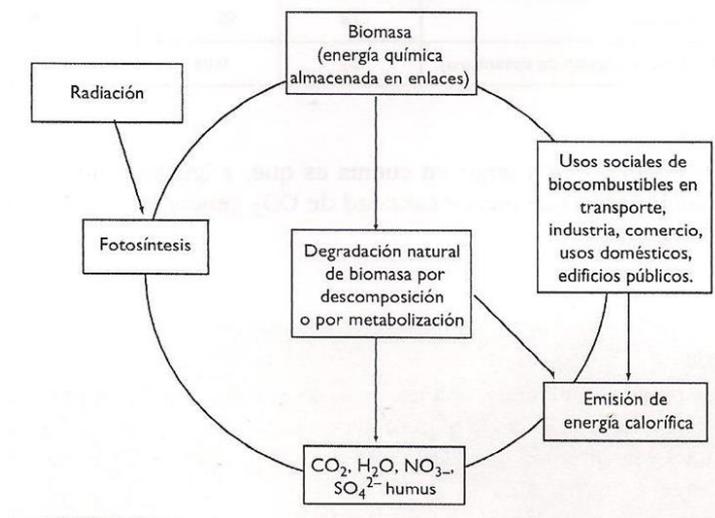


Figura 19. Esquema de la formación y usos de la biomasa.

Otro proceso que permite la liberación aún más rápida de energía en forma de calor, es la combustión. Los productos finales siguen siendo CO₂ y H₂O. A la reacción entre el oxígeno y sustancias de origen orgánico se la ha llamado tradicionalmente combustión, al compuesto orgánico combustible y al oxígeno comburente. Por eso a los materiales que forman parte de la biomasa y que reaccionan con el oxígeno, se les denomina **biocombustibles** y constituyen una fuente de energía renovable de origen solar directo.

Un biocombustible característico, como es el carbohidrato formado en la inversa de la reacción 12 (es decir, C_nH_{2n}O_n), reacciona con el oxígeno de forma espontánea con desprendimiento de calor de acuerdo con una reacción que es la inversa de la Ecuación 12:

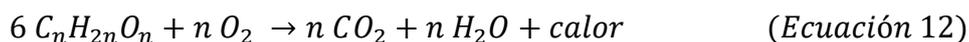


Tabla 4
Contenido medio de energía de diversos biocombustibles

Biocombustible	Contenido de energía (GJ/ton)		Contenido de energía (GJ/m ³)	kg de CO ₂ producido por GJ de calor liberado
Madera (secada al aire, 20 % de humedad)	15		10	77
Papel (periódicos apilados)	17		9	
Estiércol (seco)	16		4	
Paja (embalada)	14		1.4	
Caña de azúcar (tallos secados al aire)	14		10	
Basura doméstica (tal como se recoge)	9		1.5	
Desechos comerciales (media aproximada)	16		Depende	
Hierba (recién cortada)	4		3	
Petróleo	42		34	70
Carbón (promedio)	28		50	90
Gas natural (CH ₄ , a presión de suministro)	55		0.04	50

Los compuestos orgánicos que forman la biomasa contienen también átomos de nitrógeno, azufre y otros, de forma que también pueden ser productos de la combustión óxidos de nitrógeno, NO_x, óxidos

de azufre, SO_x , y otras sustancias, aunque su proporción es demasiado baja como para considerarlos fuente de contaminación por lluvia ácida. Desde el punto de vista de su utilización como fuente renovable de energía, se puede considerar que la biomasa participa en un ciclo energético como el que aparece en el esquema de la Figura 6.

El resultado de la fotosíntesis es la transformación de energía de la radiación electromagnética en energía química, la cual queda almacenada en los enlaces que forman parte de carbohidratos, grasas, proteínas, etc., que constituyen lo que se denominan biocombustibles. Estos liberan en forma de calor la energía almacenada en sus enlaces por reacción con el oxígeno, reacción a la que se denomina combustión. Los materiales formados inicialmente en el proceso fotosintético pueden ser transformados por medio de procesos químicos y biológicos para dar lugar a biocombustibles, sustancias con mayor poder calorífico o mayor densidad de energía (densidad de energía es la cantidad de energía contenida en una unidad de masa del combustible), como metano, etanol o carbón de madera. Estas sustancias y otras, como los aceites vegetales están empezando a utilizarse como sustitutivos del aceite pesado o Diesel y por ello se habla del biodiesel como combustible alternativo para el transporte.

La Tabla 4 da una idea aproximada del contenido en energía de algunos biocombustibles, junto con la cantidad de CO_2 que se libera en su combustión por GJ de calor liberado.

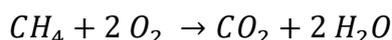
Un dato interesante a tener en cuenta es que, a igualdad de calor producido, el combustible que menor cantidad de CO_2 genera es el gas natural y el que más el carbón.

Ejemplo

En áreas próximas al Pirineo una casa necesita alrededor de 55 GJ por año para calefacción y agua caliente. Si el calor necesario se produce por combustión de gas natural y la eficiencia del quemador es del 50%, ¿cuánto CO_2 al año es emitido a la atmósfera por parte de esta vivienda?

Respuesta

El gas natural está compuesto casi por entero de metano, cuya reacción de combustión es la siguiente:



La masa molecular del metano es $M_{\text{metano}} = 12 \times 1 + 1 \times 4 = 16$; y la del CO_2 , $M' = 12 \times 1 + 16 \times 2 = 44$. Por lo tanto, la ecuación anterior nos dice que la combustión de 16 toneladas de metano produce 44 toneladas de CO_2 . El contenido energético del gas natural se puede ver en la Tabla 4.3 que es de 55 GJ ton^{-1} . Como el quemador tiene una eficiencia del 50%, para producir los 55 GJ que gasta la casa se necesitarán 2 toneladas de gas natural, cuya combustión producirá:

Cantidad de CO_2 producido al año por una casa para calefacción y agua caliente = $(2 \times 44) / 16 = 5.5$ toneladas de CO_2 año^{-1} .

Los biocombustibles han sido siempre utilizados por los seres humanos y, aún hoy en día en los países más desarrollados que poseen reservas importantes, por ejemplo, de madera, aportan un porcentaje significativo al consumo global de energía primaria. Este porcentaje puede llegar a ser hasta del 40 % en usos industriales en países productores de caña de azúcar.

Los datos de la Tabla 4 permiten hacer una estimación de la energía contenida en residuos de explotaciones agrarias o forestales siempre que se sepan las toneladas o los m^3 que existen del material.

Últimamente se considera la posibilidad de recurrir como fuente de energía a los denominados *cultivos energéticos*, es decir, plantas que se cultivan con la finalidad específica de que sirvan como fuente de energía. Los motivos de algunos países para recurrir a esta fuente energética no se limitan al

hecho de que el balance de CO₂ sea nulo, sino también a que muchas tierras antes dedicadas a cultivos agrícolas han quedado en barbecho y a que se pretende generar una mayor independencia con respecto al suministro de combustibles fósiles aumentando la proporción de las fuentes de energía propias en el consumo total.

Según las condiciones climáticas o de los suelos disponibles, los cultivos energéticos más comunes pueden ser madera para quemar, plantas para hacerlas fermentar hasta obtener *bioetanol* y *metanol* y cultivos de semillas ricas en aceites, como la soja, el girasol, el coco, la colza, o la palma, que últimamente se han comercializado con el nombre de *biodiesel*, como combustibles para vehículos. La fotosíntesis podría ser considerada, en términos energéticos, como un proceso poco eficiente. Una cifra que se considera razonable para la producción energética anual por hectárea es 180 GJ obtenibles en forma de calor, por combustión de la biomasa, lo que representa el 0.5% del total de los 36000 GJ que aporta en esa área la radiación solar en países del hemisferio Norte, o quizás el doble, en un país con más horas de sol anuales, como España. Si esa hectárea se recubriera con paneles fotovoltaicos, se podrían obtener más de 3600 GJ anuales y en una forma de energía de gran nobleza, como es la electricidad.

Por lo tanto, la conversión de energía electromagnética en biomasa se produce con una eficiencia baja. Ello es debido a varias razones. Hay períodos de tiempo durante el año en que la planta “descansa”, prácticamente no se produce crecimiento y, en consecuencia, la eficiencia de conversión energética es casi nula. Además, durante el período de crecimiento, hay luz que no es interceptada por las hojas, otra parte es reflejada (las longitudes de onda correspondientes al color verde) y la propia planta consume un 40% de la energía generada por ella misma en su propio metabolismo, para crecer y mantenerse viva. Volviendo al cálculo de la eficiencia del proceso fotosintético, pero ahora referido a una hectárea de terreno, se puede resumir del modo siguiente:

Se va a considerar una superficie de una hectárea situada en un lugar geográfico caracterizado porque le llega una energía en forma de radiación solar de $1000 \text{ kWh m}^{-2} \text{ año}^{-1}$.

Energía solar que llega anualmente a una hectárea =

$$\begin{aligned} (1000 \text{ kWh m}^{-2} \text{ año}^{-1}) \times (3.6 \times 10^6 \text{ J kWh}^{-1}) \times (10^4 \text{ m}^2 \text{ Ha}^{-1}) &= \\ &= 36000 \text{ GJ Ha}^{-1} \text{ año}^{-1} \end{aligned}$$

De esta cantidad, un tercio, 12000 GJ, es lo que le llega a la planta en el periodo de tiempo en que no “descansa”. El 20% de esta cantidad, 2400 GJ, es lo que llega a las hojas. El 20% se pierde por reflexión y quedan 1920 GJ, de los cuales, el 50% corresponde a radiación de las longitudes de onda adecuadas para que se verifique el proceso fotosintético. Quedan 960 GJ, de los que el 30% se convierte en biomasa. Quedan almacenados, por lo tanto, 288 GJ, de los que la propia planta consume un 40% en mantenerse viva, con lo que, lo que realmente se almacena anualmente es unos 160 GJ de los 36000 GJ que han llegado, lo que corresponde a una eficiencia de conversión del 0.44%. Esta eficiencia produce alrededor de 10 toneladas anuales por hectárea de biomasa seca.

En el caso de los cultivos energéticos, es importante adquirir una idea sobre la cantidad de energía que se puede generar por hectárea de terreno y de cómo se puede hacer óptimo el rendimiento de dichos cultivos. La cantidad de biomasa que produce la unidad de área es función del lugar donde se encuentre, del clima, de la naturaleza del suelo, del agua disponible, de los nutrientes y de que la planta elegida como cultivo energético sea la adecuada para el tipo de suelo disponible. Una hectárea de terreno puede producir anualmente cantidades de biomasa que varían desde una tonelada, hasta treinta, en los casos más favorables. O bien, en términos energéticos, desde unos 15 GJ hasta casi 500 GJ. La Tabla 5 muestra cómo pueden variar los rendimientos anuales obtenibles por hectárea para el caso de diversos cultivos.

Tabla 5

Rendimientos anuales de diversos cultivos. Los datos se expresan en toneladas de material secado al horno por hectárea y por año

Cultivo	Rendimiento medio	Rendimiento óptimo
<i>Caña de azúcar</i>	35	90
<i>Maíz (grano)</i>	10	40
<i>Trigo</i>	5	20
<i>Arroz</i>	4	16
<i>Remolacha</i>	8	18
<i>Mandioca</i>	8	35
<i>Madera (crecida en regiones templadas)</i>	10	20
<i>Madera (crecida en regiones tropicales)</i>	20	35

La capacidad de almacenamiento de energía de la biomasa o de los biocombustibles sometidos a combustión puede ir desde alrededor de 10 MJ kg⁻¹ de la madera verde hasta los, aproximadamente, 40 MJ kg⁻¹ en grasas y aceites, o los 55 MJ kg⁻¹ del metano. La mayor proporción de biomasa se presenta en forma de carbohidratos, cuyo calor de combustión promedio cuando están secos viene a ser de unos 20 MJkg⁻¹.

Estimación del recurso energético

Se mencionó que la renovación natural de la biomasa que crece sobre tierra firme representa una aportación energética de unos 3000 EJ año⁻¹, de los cuales los seres humanos utilizan algo menos del 2% en forma de combustible. No hay que olvidar que la materia viva, la biomasa, desempeña un papel primordial en el mantenimiento de la atmósfera, en la prevención de la erosión de los suelos, en la conservación de la diversidad de las especies y en el equilibrio de los sistemas ecológicos. Por lo tanto, solo serían sostenibles y aceptables aquellos esquemas de explotación de biomasa que respetaran dichos equilibrios. No solo es necesaria la energía, sino que hay que tener en cuenta la contribución que hace la biomasa a la alimentación de seres humanos y animales y a la construcción, la fabricación de papel, etc.

Dada la heterogeneidad de sustancias que se pueden considerar como biocombustibles, así como la diversidad de condiciones sociales, medioambientales, técnicas y económicas que se dan en distintos países, no resulta sencillo evaluar los recursos de biomasa que podrían ser explotables con respeto al medioambiente.

A escala mundial, la Conferencia de las Naciones Unidas para el Medioambiente y el Desarrollo, (UNCED), estimó que hacia la mitad del presente siglo, la biomasa podría aportar al consumo de energía humano alrededor de 200 EJ, la mitad del consumo actual mundial en energía primaria. Para ello se deberían dedicar alrededor de 400 millones de hectáreas a los cultivos energéticos, lo que supone casi el 2.5% de la superficie de tierra firme, y se tendría que recuperar la energía contenida en las tres cuartas partes de los residuos producidos. Además, habría que incrementar las eficiencias de conversión energética asociadas a los procesos de combustión de la biomasa e idear nuevas técnicas de conversión de biomasa en electricidad. La Tabla 6 muestra las aportaciones de diferentes formas de biomasa a la cifra anterior.

Tabla 6
Estimación de la cantidad de energía obtenible a partir de biomasa hacia 2050

<i>Recurso de biomasa</i>	<i>Posible aportación energética anual (EJ)</i>
<i>Cultivos energéticos</i>	128
<i>Estiércol</i>	25
<i>Residuos forestales</i>	14
<i>Residuos cereales</i>	13
<i>Residuos de caña de azúcar</i>	12
<i>Bosques</i>	10
<i>Basuras urbanas</i>	3
<i>TOTAL</i>	205

Se llegó a la conclusión de que en todo el mundo podrían existir alrededor de 2000 millones de hectáreas de tierras no utilizadas, que podrían ser productivas para alimentos y para producción de energía a partir de biomasa. En Latinoamérica podría haber unos 150 millones de hectáreas de tierras degradadas, que podrían reforestarse, y hasta 100 millones de hectáreas en África. Si se consiguiera hacer plantaciones de biomasa en dichas extensiones, con una productividad de $300 \text{ GJ Ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, se podrían alcanzar producciones anuales de energía a partir de biomasa de 47 EJ en Latinoamérica y de 31 EJ en África, lo que convertiría a esas regiones en máximos exportadores de biocombustibles. A largo plazo, si se hicieran plantaciones con la productividad mencionada en el 10% del total de las tierras dedicadas a bosques, pastos, y agricultura en el mundo, lo que supondría unos 890 millones de hectáreas, se podría llegar a una contribución anual de la energía a partir de la biomasa de unos 270 EJ.

En la Unión Europea se han hecho estimaciones de la energía obtenible a partir de biomasa hacia la mitad de este siglo, llegándose a cifras que varían entre 4000 y 14000 PJ por año. En EE.UU. se considera recuperable de todo tipo de residuos de biomasa, sin tener en cuenta cultivos energéticos, una cantidad de 6700 PJ al año.

6. APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LA BIOMASA

Los combustibles fósiles presentan una serie de ventajas sobre la biomasa en su forma vegetal o primaria. Entre ellas se encuentran la estabilidad en el tiempo, lo que los hace *disponibles* en todo momento. Otra muy importante es la *densidad de energía* que contienen, que los hace *transportables*. Por densidad de energía se entiende la cantidad de energía que aporta un combustible por unidad de masa (y, también, por unidad de volumen). Cuanto mayor sea la densidad de energía, menor será la cantidad de energía consumida en el transporte del propio combustible. El petróleo y el gas natural son combustibles valiosos, porque su energía se almacena sin pérdidas significativas, además de que dicha energía puede ser utilizada en el momento necesario y porque aportan más energía por unidad de masa que ningún otro combustible de su precio, lo que los hace más transportables.

La biomasa vegetal primaria, por el contrario, está formada por materiales que sufren descomposición rápida, por lo que solo algunas formas de biomasa pueden considerarse como almacenadoras de energía a largo plazo. Por otra parte, la densidad de energía de la mayor parte de los materiales componentes de la biomasa es tan baja, que se gasta más energía en transportarlos que la que ellos aportarían por combustión. Eso hace que algunos residuos agrícolas solo tenga sentido emplearlos como fuente de energía en las propias explotaciones en las que se generan.

La Figura 20 muestra el esquema del proceso agroenergético. La agroenergética consiste en la utilización de la energía solar por medio de la biomasa formada en vegetales cultivados para producir energía (cultivos energéticos). El CO_2 que se produce en la combustión de la biomasa es el que fue eliminado de la atmósfera en su formación. Los nutrientes minerales se recuperan también de las cenizas.

Para poder aprovechar del modo más eficiente posible la energía contenida en la biomasa, desde siglos atrás la humanidad ha aprendido a transformar la biomasa, desde su forma primaria, en combustibles más estables y con mayor densidad energética.

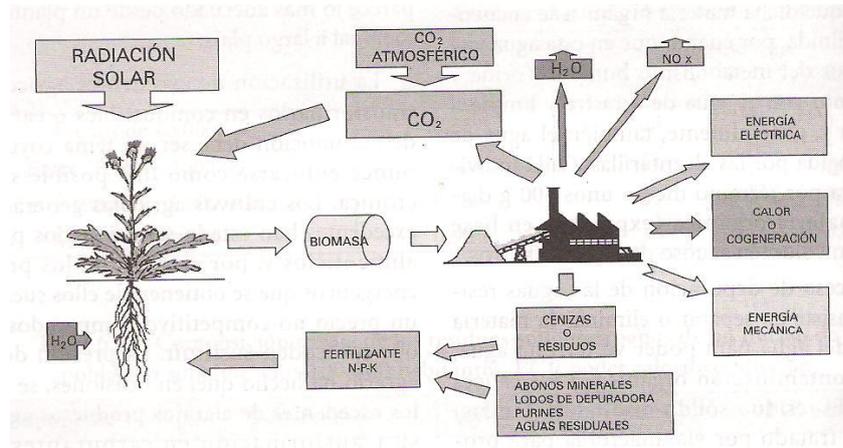


Figura 20. Esquema del proceso agroenergético. La agroenergética consiste en la utilización de la energía solar por medio de la biomasa formada en vegetales cultivados para producir energía (cultivos energéticos). El CO_2 que se produce en la combustión de la biomasa es el que fue eliminado de la atmósfera en su formación. Los nutrientes minerales se recuperan también de las cenizas.

Métodos para extraer energía de la biomasa

Los métodos que se utilizan para extraer energía de la biomasa son:

Combustión directa de biomasa vegetal o primaria. Es un proceso poco eficiente.

Ejemplo

Cuando se cocina directamente sobre una hoguera se produce un gasto de 1 kg de madera por persona y por día.

(a). Estímese la energía calorífica requerida para llevar a ebullición 2 litros de agua en un puchero. Suponiendo que esta energía es igual a la que se necesita para cocinar para una persona, compárese la misma con el poder calorífico de la madera (18 MJ/kg) y estímese la eficiencia térmica con que se ha verificado el proceso.

(b) ¿Cuánta madera habría que talar para suministrar energía para cocinar a una aldea de 200 personas?

(c) Suponiendo que toda la madera talada se replanta ¿qué área tiene que reservar la aldea para obtener energía por reforestación si no quiere que aumente la deforestación, teniendo en cuenta que la producción media de madera es de 11 toneladas por hectárea y por año?

Respuesta

(a)

$$\begin{aligned} \text{Calor} &= mc\Delta T = \rho Vc\Delta T = (2 \text{ l} \times 1 \text{ kg l}^{-1}) \times (4.18 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ l}^{-1}) \times (100 - 20)^\circ\text{C} = \\ &= 640 \text{ kJ} = 0.64 \text{ MJ} \end{aligned}$$

Como cada persona consume 1 kg de madera y la energía de cocción equivale al gasto de una persona, los 0.64 MJ son la energía que se aprovecha de los 18 MJ del kg de madera. Por lo tanto, la

eficiencia que resulta del aprovechamiento de la energía contenida en la madera podría ser calculada del siguiente modo:

$$Eficiencia = \frac{Energía\ aprovechada}{Energía\ total} \times 100 = \frac{0.64\ MJ}{18\ MJ} \times 100 = 3.6\%$$

(b)

$$200\ personas \times \left(\frac{1\ kg\ de\ madera}{persona \times día} \right) \times (365\ días\ año^{-1}) = 73\ toneladas\ año^{-1}$$

(c)

Número de hectáreas que hay que reservar para extraer la madera sin deforestar:

$$\frac{73\ ton\ año^{-1}}{11\ ton\ Ha^{-1}\ año^{-1}} = 6.6\ Ha$$

Como la madera tarda en hacerse unos 20 años, en realidad habría que reservar $6.6 \times 20 = 132$ hectáreas y talar cada año 6.6 Ha.

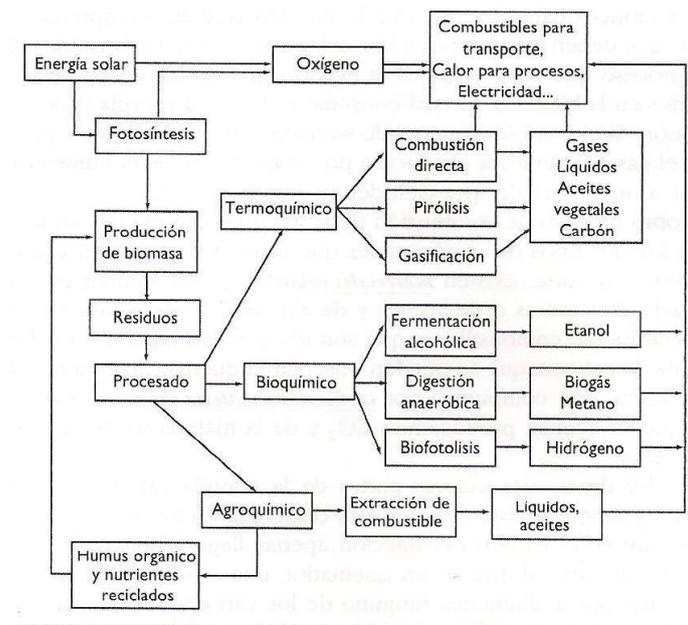


Figura 21. Procesos de producción de biocombustibles.

Combustión tras un proceso físico simple de selección y separación, astillado, compresión y secado al aire.

Procesado termoquímico con el fin de mejorar tanto el nivel térmico como la densidad de energía del combustible. Procesos de este tipo son *pirólisis*, *gasificación* y *licuefacción*.

Procesado bioquímico. La biomasa puede convertirse, por medio de procesos naturales promovidos por bacterias, como la *digestión anaerobia* y la *fermentación* en combustibles gaseosos o líquidos de mayor grado, estabilidad y densidad energética.

En la Figura 21 se muestra un esquema de los procesos antes mencionados:

Todos estos procesos, además de a productos más energéticos, dan lugar a la emisión de calor, que puede ser aprovechado en el lugar donde es producido, para calefacción, para generar vapor, que llevado a una turbina convierte su energía térmica en electricidad, o para llevar a cabo ciertos procesos químicos.

Combustión directa

La combustión directa de biomasa vegetal o primaria suele ser un proceso muy poco eficiente. Si se trata de aprovechar el calor emitido por combustión de madera en llevar a ebullición un litro de agua, el calor necesario sería algo menos de 100 veces el calor necesario para hacer subir 1°C la temperatura de un litro de agua, que es 4.18 kJ. Por lo tanto, serían necesarios alrededor de 400 kJ para conseguir llevar hasta el punto de ebullición al litro de agua. Se vió anteriormente que el contenido energético de madera secada al aire (por lo tanto, conteniendo aún, alrededor del 20% de humedad) es de 15 MJ kg⁻¹ ó de 10 MJ dm⁻³, por lo que, para dicha ebullición, debería bastar con quemar una astilla de 27 gramos o de unos 40 cm³ (un prisma cuadrangular de 2 cm × 2 cm × 10 cm), es decir, una pequeña astilla. Sin embargo, si se intenta llevar a cabo ese proceso a fuego abierto se podrá comprobar que sería necesario quemar más de un kilo de madera. En consecuencia, se necesitaría alrededor de 50 veces el calor que realmente se emplea en conseguir hervir el agua, haciendo que la eficiencia de conversión no llegue a ser ni del 2%.

Tiene sentido, por lo tanto, intentar incrementar esa eficiencia, recurriendo a diseños idóneos para el calentador, lo que requiere una comprensión de los procesos que tienen lugar durante la combustión de un combustible sólido. El primer proceso que tiene lugar es la evaporación de los restos de humedad contenidos en la biomasa, lo cual consume parte de la energía producida por combustión. Si el combustible ha sido sometido previamente a un proceso de secado, el gasto de energía producido por evaporación de la humedad puede reducirse a unas unidades por cien del total de la energía.

El propio proceso de combustión tiene lugar en dos etapas, en las que se queman los dos tipos de combustibles que forman parte de un combustible sólido. Por una parte, existen *materiales volátiles*, que se emiten en forma de una mezcla de vapores o de aceites y de alquitranes vaporizados al elevarse la temperatura del combustible y que son los que dan lugar a los súbitos avivamientos de la llama que se pueden observar al quemar madera o carbón. El sólido restante está compuesto por carbonilla y materia inerte. La carbonilla es carbón que se quema, produciendo CO₂ y de la materia inerte quedan escorias y cenizas.

Alrededor de las tres cuartas partes de la energía calorífica emitida por combustión de los biocombustibles está contenida en los materiales volátiles, mientras que en el carbón esa fracción apenas llega a ser la mitad. Por eso hay que asegurarse, al diseñar un quemador, una estufa o un horno, de que no se escape por la chimenea ninguno de los vapores sin quemar. Para ello tiene que llegar al quemador oxígeno en cantidad suficiente y facilitar el contacto entre el aire y la carbonilla reduciendo el tamaño de las partículas del combustible. Esta división, a su vez, genera problemas, pues si el combustible se introduce en pequeños trozos en el quemador, las cenizas resultantes estarán en forma de pequeñas partículas, que fácilmente pueden abandonar la chimenea en suspensión en el aire saliente.

El flujo de aire entrante tiene que estar controlado, de tal modo que entre el preciso. Si entra menos oxígeno del necesario para la combustión completa, esta solo se producirá hasta dar lugar a monóxido de carbono, sustancia tóxica y contaminante, mientras que, si se hace llegar demasiado aire, una parte sustancial del calor producido se empleará en calentar nitrógeno, que se escapa por la chimenea llevándose parte de las calorías generadas en la combustión.

Los diseños de los quemadores que se utilizan son tan variados como los tipos de biocombustibles existentes.

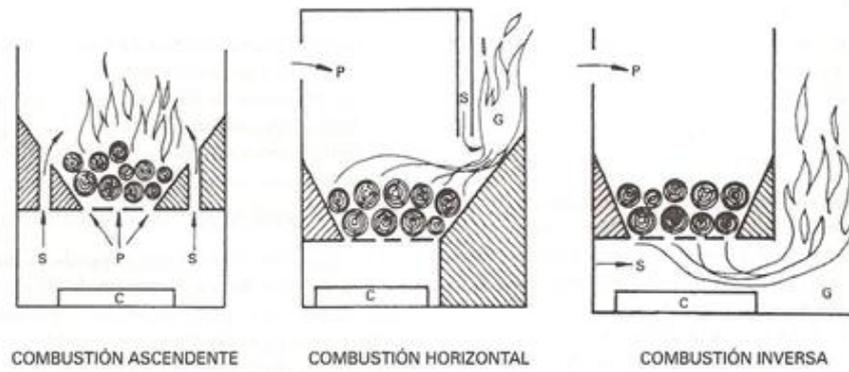


Figura 22. Tipos de hornos de combustión. P: aire primario para combustión de la biomasa. S: aire secundario para la combustión de los gases. G: cámara de combustión. C: cenizas

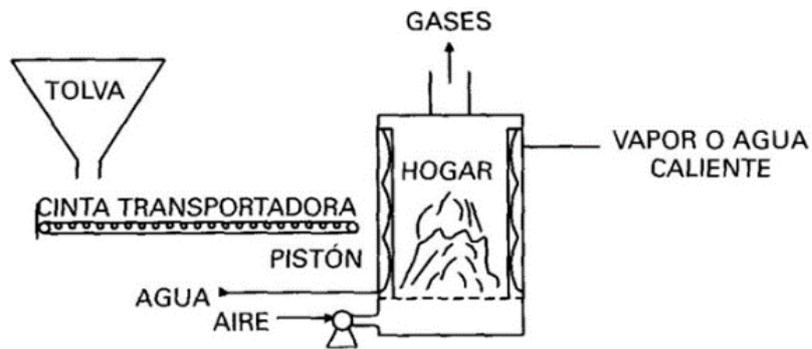


Figura 23. Proceso de combustión con alimentación automática.

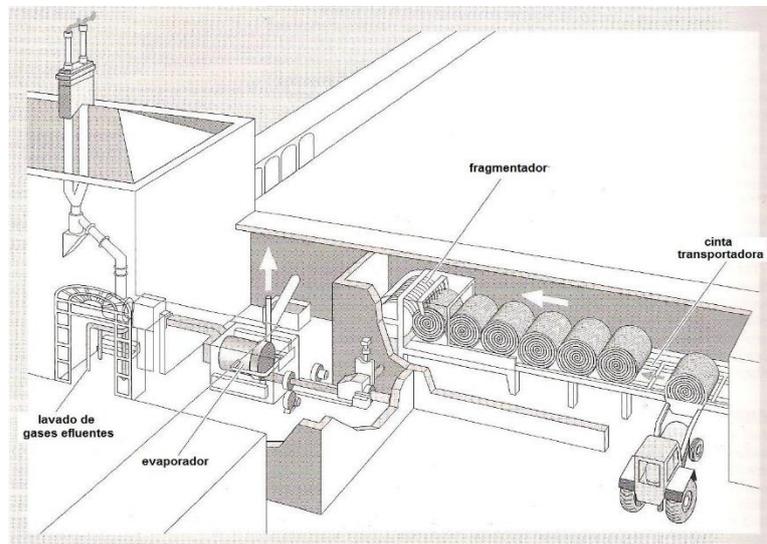


Figura 24. Sistema de combustión de paja en una explotación agrícola.

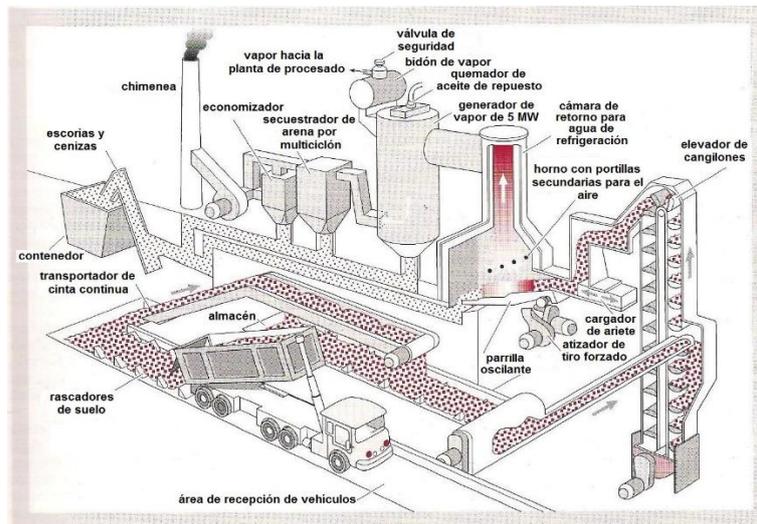


Figura 25. Esquema de una gran planta para generación de vapor a partir de virutas de madera

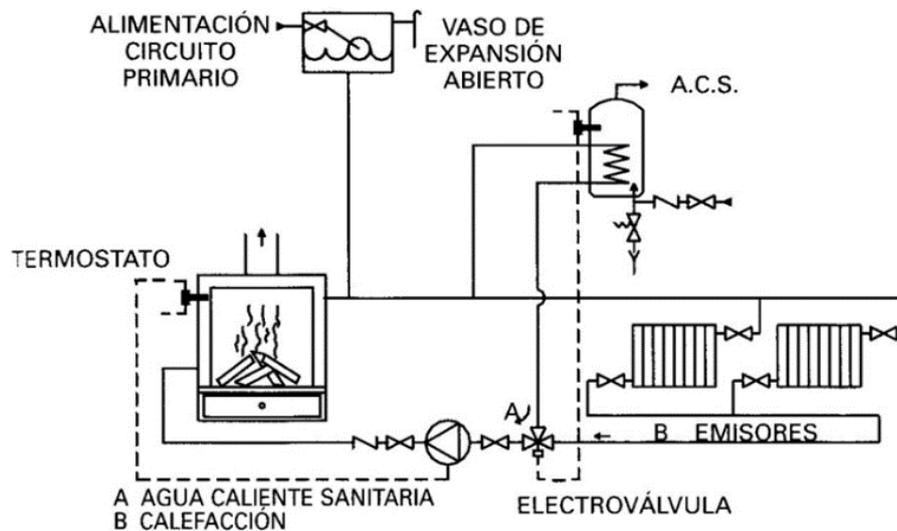


Figura 26. Esquema de chimenea con recuperador de calor para calefacción y agua caliente sanitaria.

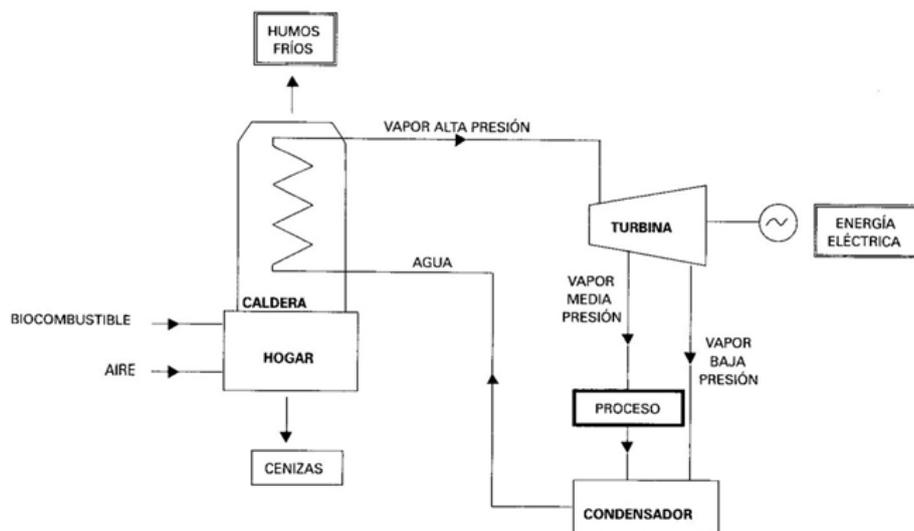


Figura 27. Esquema de un sistema de producción de electricidad basado en la utilización de biocombustibles sólidos.

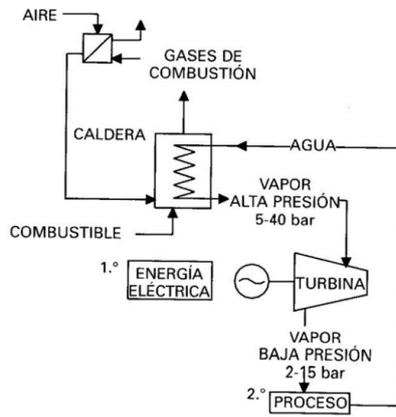


Figura 28. Turbina de vapor a contrapresión.

En las Figuras 22 a 28 se muestran diversos modelos de hornos de combustión y de estrategias para extraer y convertir la energía calorífica producida en la combustión en otras formas de energía.

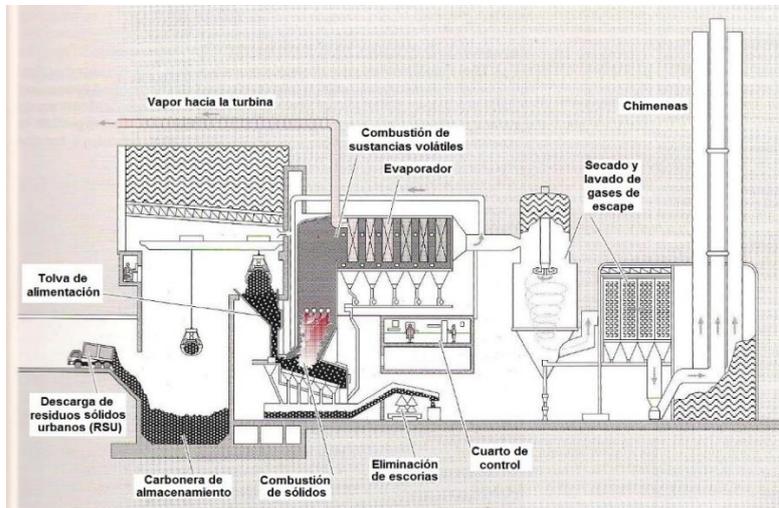


Figura 29. Esquema de una gran planta para la combustión de residuos sólidos urbanos (RSU).

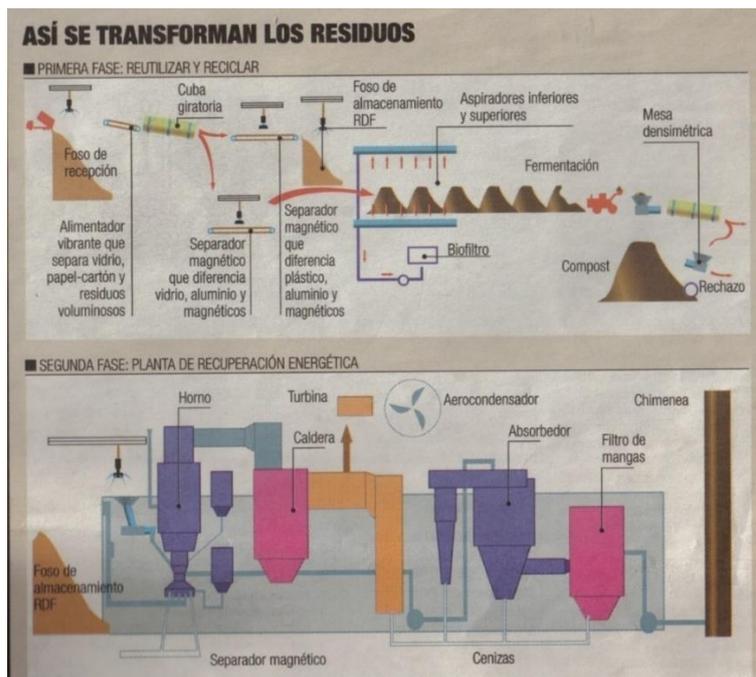


Figura 30. Esquema de una planta para la combustión de residuos sólidos urbanos (RSU).

Una forma de extraer la energía contenida en las basuras domésticas es por combustión. Sin embargo, antes de someter a estos residuos a procesos de selección contienen poca energía por unidad de masa, lo que hace caro su transporte. Además, su combustión requiere quemadores específicamente diseñados. En otras ocasiones, las basuras son sometidas a procesos que permiten obtener *combustibles derivados de la basura*. Estos procesos pueden consistir en separar materiales no deseables, trituración, secado y cualquier sistema que permita mejorar sus cualidades como combustible. Los productos más elaborados obtenidos de este modo, se obtienen tras extraer de los residuos originales los metales magnéticos, someterlos a trituración, secado y compresión, con lo que se obtiene combustible densificado derivado de la basura que puede llegar a tener hasta el 60% de la densidad energética del carbón. Las Figura 29 y 30 muestran dos modelos de plantas de combustión de residuos sólidos urbanos.

Pirólisis y gasificación

La *pirólisis* se verifica calentando biomasa en ausencia de aire o provocando la combustión parcial o incompleta de una parte de la biomasa total en un flujo insuficiente de aire.

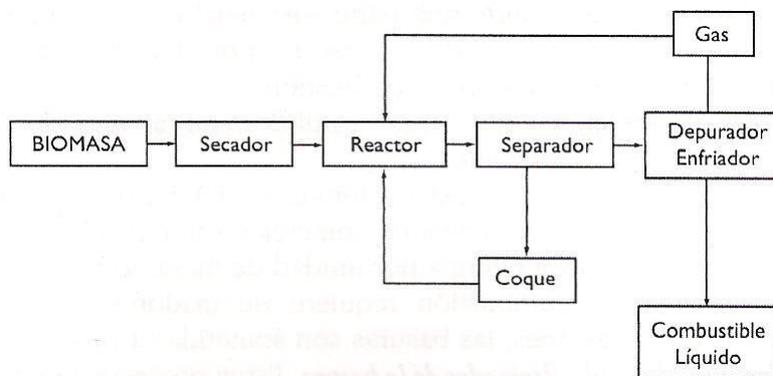


Figura 31. Esquema de un proceso de pirólisis para la obtención de combustibles líquidos.

En la Figura 31 se muestra un esquema del proceso pirolítico.

La pirolisis es el más simple y antiguo método para procesar un combustible con el fin de obtener uno con valores mayores de la potencia calorífica y de la densidad energética. Los productos de la misma son gases, vapores, líquidos y aceites, y carbonilla. La composición del extracto depende de la temperatura, del tipo de biomasa del que se parte, y del proceso en sí. En algunos casos el proceso necesita llevarse a cabo en presencia de humedad, por lo que se puede partir de biomasa vegetal o primaria.

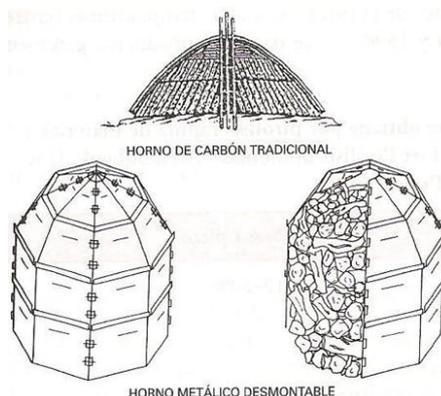


Figura 32. Hornos para pirolisis. En la parte superior se puede apreciar el corte esquemático de un horno de carbón tradicional con cubierta de tierra. En la parte inferior se muestra el esquema de un horno eléctrico portátil y desmontable que todavía se utiliza en España (en el campo de Salamanca).

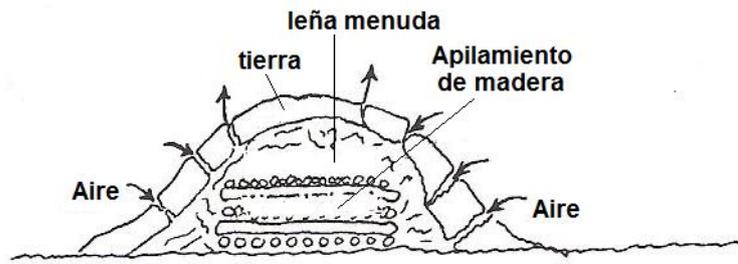


Figura 33. Método tradicional de elaboración de carbón vegetal

En la pirólisis convencional se calienta la biomasa primaria en la casi total ausencia de aire, entre 300 y 500°C, hasta eliminar prácticamente todos los materiales volátiles. Lo que queda como materia sólida es el carbón vegetal, que es un combustible cuya densidad de energía viene a ser el doble que la de la biomasa original y que alcanza al quemarse temperaturas mucho más elevadas. Este material sirvió durante siglos como reductor en procesos metalúrgicos y aún se sigue obteniendo en muchos países por pirólisis de la madera. Según sea el contenido en humedad de la madera original y la eficiencia que se logre en el proceso, se suelen requerir de 4 a 10 toneladas de biomasa vegetal para obtener una tonelada de carbón vegetal. Si no se procura recoger las materias volátiles emitidas, el carbón vegetal obtenido apenas si contiene la tercera parte de la energía total existente en la biomasa de que se partió. Las Figuras 32 y 33 muestran algunas formas tradicionales de llevar a cabo procesos de pirólisis.

En algunos casos se puede utilizar la pirólisis para llegar a obtener combustibles líquidos. Para ello se trabaja en ausencia total de oxígeno y, dado que, en conjunto, el proceso es endotérmico, se trabaja a temperaturas por encima de 250°C, hasta 500 o 600°C. Al comienzo se forma el denominado vapor piroleñoso, que es una mezcla de hidrógeno, CO, CO₂ e hidrocarburos. Después se forman compuestos líquidos, como aceites, alcoholes y ácidos, y, finalmente, queda un residuo sólido, el coque, que está compuesto de alquitrán, carbón y cenizas. El carbón vegetal resultante puede ser utilizado como combustible doméstico y como producto reductor en la industria. Se pueden someter a este proceso a los residuos forestales y agrícolas y a los residuos sólidos urbanos (RSU), que es como se denomina a las basuras.

Con técnicas más complejas es posible recoger los materiales volátiles y, si además se hace una buena elección de la temperatura, es factible conseguir un control sobre la composición de la mezcla que se obtiene. Los productos líquidos podrían ser utilizados como biodiesel previa eliminación de los ácidos que aparecen en la mezcla. En la Figura 34 se muestra un modelo de proceso pirolítico a pequeña escala.

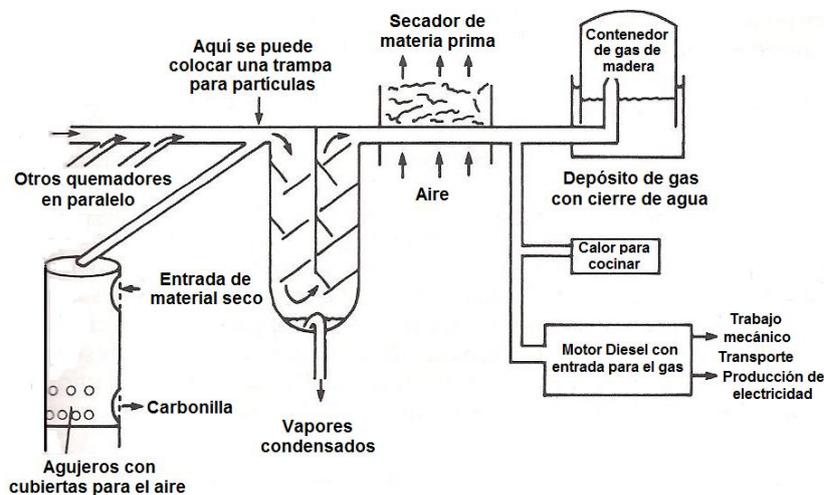


Figura 34. Unidad de proceso pirolítico a pequeña escala.

Pese a su sencillez, hay quien considera a la pirólisis convencional como una tecnología con futuro y menos contaminante que otras técnicas de extracción y tratamiento de combustibles de biomasa. En ella se alcanzan temperaturas relativamente bajas, con lo que se consigue emitir menos sustancias contaminantes que con la combustión completa. Métodos pirolíticos han sido utilizados en plantas de tratamiento de plásticos o de neumáticos usados.

Antes de comenzar la pirólisis hay que eliminar los componentes no combustibles que pueda llevar la biomasa vegetal, tales como metales, tierra, etc, secarla, aunque una cierta cantidad de humedad puede ser conveniente si se utilizan gasificadores, y someterla a desmenuzamiento o astillado. La temperatura que se alcance en el proceso y los productos del mismo son una función de la proporción entre aire y combustible que se alcance. Las plantas pirolíticas más simples suelen trabajar a temperaturas menores de 600°C y el proceso de destilación pasa a través de cuatro etapas: 1) Cuando la temperatura es de entre 100 y 120°C se produce una eliminación de la humedad; 2) hacia 275°C se produce una emisión de gases formada, principalmente, por nitrógeno, monóxido y dióxido de carbono, y como líquidos aparecen ácido acético y metanol; 3) de 280 a 350°C tienen lugar una serie de reacciones exotérmicas, que conducen a la formación de una mezcla de productos químicos, tales como aldehidos, cetonas, fenoles, ésteres, CO₂, CO, CH₄, C₂H₆ y H₂.

Utilizando ciertos catalizadores, como el ZnCl₂, se consigue que estas reacciones se produzcan a temperaturas más bajas; 4) por encima de 350°C se eliminan todas las sustancias volátiles y se forma una cantidad mayor de H₂ y de CO, mientras que el residuo sólido que queda está formado por carbón vegetal y cenizas.

Los líquidos condensados, formados por alquitranes y ácido piroleñoso se pueden separar y procesar hasta obtener metanol. La Tabla 8 muestra los rendimientos en diversos productos que se pueden generar en la pirólisis de la madera seca.

*Tabla 8
Rendimientos de la pirólisis de la madera seca*

<i>Rendimientos por 1000 kg de madera seca</i>	
<i>Carbón vegetal</i>	<i>300 kg</i>
<i>Gas (calor de combustión 10500 kJ m⁻³)</i>	<i>140 m³ (p y T standard)</i>
<i>Metanol</i>	<i>14 litros</i>
<i>Ácido acético</i>	<i>53 litros</i>
<i>Ésteres</i>	<i>8 litros</i>
<i>Acetona</i>	<i>3 litros</i>
<i>Aceite de madera y alquitranes ligeros</i>	<i>76 litros</i>
<i>Aceite de cerosota</i>	<i>12 litros</i>
<i>Brea</i>	<i>30 kg</i>

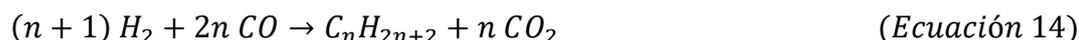
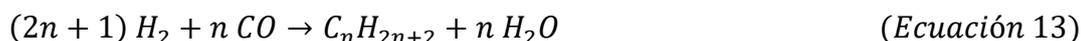
Procesos de gasificación

Si lo que se trata de conseguir es productos en su mayor parte gaseosos, al proceso se le denomina *gasificación*.

En realidad esta palabra se utiliza para designar a una serie de procesos a través de los cuales se hace reaccionar a un combustible sólido con vapor de agua y aire u oxígeno, lo que da lugar a combustibles gaseosos. Es un proceso ineficiente desde el punto de vista energético, ya que el contenido total de energía de los productos del mismo es menor que el del carbón o la biomasa de que se parte. No

obstante, se considera que el combustible gaseoso es más limpio y más versátil, e, incluso con mayor densidad de energía que el material de partida.

Debido a la escasez de carburante, Alemania puso en marcha, durante la Segunda Guerra Mundial, un proceso de conversión de carbón en petróleo pasando por la gasificación de este combustible a monóxido de carbono e hidrógeno. Esta mezcla de gases, a la que se denomina gas de síntesis, se hace pasar por un reactor de lecho fluidizado con partículas de catalizadores que consistían en compuestos de níquel, cobalto, o hierro y que convertían la mezcla en hidrocarburos a través de reacciones como las siguientes:



Antes de pasar los gases a través del reactor, hay que eliminar los compuestos de azufre, que son venenos catalíticos. Las eficiencias de conversión que se consiguen en este denominado proceso Fischer-Tropsch van del 21 al 55% y los hidrocarburos que se sintetizan contienen de 4 a 10 átomos de carbono.

En la gasificación tiene lugar una oxidación parcial de la biomasa de partida, lo que produce una mezcla de gases como CO, CO₂, hidrógeno, metano y agua y gas de síntesis. Con la gasificación se trata de obtener combustibles gaseosos, que pueden estar más limpios que la biomasa original, ya que durante el proceso de generación de gases se aprovecha para eliminar productos contaminantes, entre otros los residuos sólidos. Además, los gases se pueden utilizar en motores de combustión y turbinas. La Figura 35 muestra un esquema de proceso de gasificación simple, que, cuando es aplicado partiendo de carbón, conduce al ya mencionado gas ciudad:

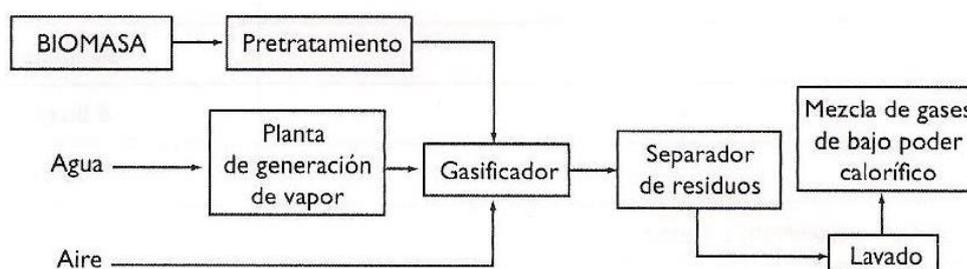


Figura 35. Esquema de un proceso de gasificación sencillo, que resulta en la producción de una mezcla de gases que contiene más del 50% en volumen de N₂ y de CO₂.

El proceso descrito por el esquema anterior conduce a la formación de una mezcla de gases de unos 5 a 6 MJ m⁻³ de poder calorífico (alrededor de la décima parte del poder calorífico del gas natural), por lo que su transporte puede gastar más energía que la que se podría generar a partir de su combustión. Sin embargo, sí que tendría sentido la utilización de la mezcla de gases resultante del proceso de gasificación para generar energía en el propio lugar en que se ha llevado a cabo dicho proceso.

Cuando se somete al carbón a un proceso tan sencillo como el anterior, bajo presiones que pueden variar entre 1 y 30 atmósferas y temperaturas que pueden ir desde 600 o 700 a más de 1000°C, se obtiene el denominado **gas ciudad**, que se utilizó ampliamente durante décadas antes de ser reemplazado por el gas natural. El gas ciudad está compuesto por una mezcla de metano, monóxido y dióxido de carbono, hidrógeno y nitrógeno, y tiene un poder calorífico de unos pocos MJ m⁻³.

En los años 40, la falta de petróleo condujo a la utilización para el transporte de los denominados gasógenos, que iban incorporados a los automóviles y producían combustibles por gasificación de la madera.

Procesos más complejos, aplicados al carbón como material de partida, conducen a la formación del denominado *gas de síntesis*, cuya obtención se describe en el esquema de la Figura 36.

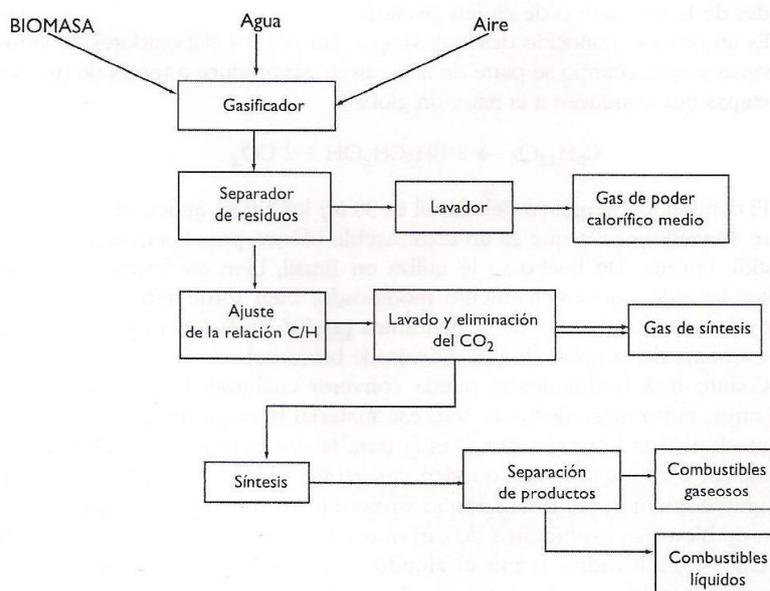


Figura 36. Proceso de obtención de gas de síntesis y de hidrocarburos.

El gas de síntesis puede ser utilizado en reacciones más sencillas que las que tienen lugar durante el proceso Fischer-Tropsch, para la generación de metano o de metanol, de acuerdo con las reacciones globales siguientes:



El metanol es líquido a la temperatura ordinaria y presenta una densidad de energía de 23 GJ ton⁻¹. La reacción global de formación de metanol a partir de gas de síntesis es la suma de una serie de procesos químicos, para cuya culminación hay que alcanzar elevadas presiones (unas 150 atmósferas) y temperaturas (del orden de 330°C) y trabajar en presencia de catalizadores, en plantas de tratamiento que requieren inversiones cuantiosas. Sin embargo, el gasto de producción puede merecer la pena, si se tiene en cuenta que el metanol puede ser un sustituto o un complemento de las gasolinas en los motores de explosión. Como se ha visto, el gas de síntesis puede obtenerse tanto a partir de biomasa, como de carbón y puede ofrecer un camino para el futuro, pues la tecnología necesaria para su obtención y tratamiento ya está suficientemente desarrollada.

Tratamientos bioquímicos de la biomasa

Otra forma de obtener combustibles a partir de biomasa vegetal o primaria es someterla a tratamientos bioquímicos, entre los que se pueden mencionar la *fermentación alcohólica*, la *digestión anaeróbica*, la *digestión aeróbica* y la *biofotólisis*.

La *fermentación* es un proceso biológico anaeróbico a través del cual azúcares contenidos en la biomasa se convierten en alcohol etílico por intermedio de la levadura o de ciertas bacterias.

La Figura 37 muestra un esquema del proceso de elaboración de bioetanol por fermentación de hidratos de carbono procedentes de diferentes plantas.

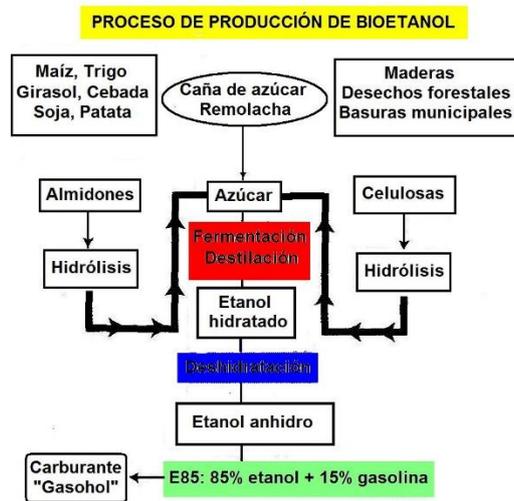


Figura 37. Esquema del proceso de elaboración de bioetanol.

La fermentación es un proceso conocido desde la antigüedad por elaboradores de vinos y cervezas y que, cuando se parte de la sacarosa se produce a través de una serie de etapas que conducen a la siguiente reacción:



El contenido energético del etanol es 30 MJ kg^{-1} y su índice de octano varía entre 89 y 100, por lo que es un combustible idóneo para los motores de combustión interna. De hecho se le utiliza en Brasil, bien en forma directa, si el motor de gasolina ha sido convenientemente modificado, o formando una mezcla al 20% con la gasolina a la que se denomina *gasohol*.

Cuanto más fácilmente se pueda convertir cualquier tipo de biomasa en azúcares, tanto más adecuado será ese material para producir etanol por fermentación. Una fuente muy utilizada para la obtención de etanol es la caña de azúcar o bien las melazas que quedan tras extraer el jugo de la caña, que tienen un gran contenido del disacárido sacarosa. Sin embargo, en una gran proporción de biomasa los hidratos de carbono aparecen en forma de polímeros, denominados polisacáridos, como el almidón, contenido en las patatas o las semillas de maíz, trigo, etc., o la celulosa, cuya fórmula general es $(C_6H_{10}O_5)_n$.

El almidón (o la hemicelulosa) se pueden someter a un proceso de *hidrólisis enzimática*, por medio del cual se llega al *hidrato de carbono monomérico, la glucosa*. La madera está formada por celulosa pero tiene un elevado contenido de lignocelulosa (alrededor del 25%), o celulosa que contiene lignina, un material que actúa como adhesivo para mantener pegadas las fibras de celulosa. La paja tiene un contenido el lignina del 13%, mientras que el almidón tiene un bajo contenido en *lignina*. Algunos enlaces que mantienen las fibras de la lignina pueden romperse por aplastamiento mecánico o por la acción de reactivos que producen hinchamiento de la biomasa de partida.

El proceso de hidrólisis de la celulosa o el almidón tiene lugar, en presencia de ácidos, de acuerdo con la siguiente reacción global:



La concentración de ácido a utilizar tiene que ser controlada de forma rigurosa, ya que, si es demasiado baja, la *lignocelulosa* no resulta degradada, mientras que, si la concentración de ácido es excesiva el azúcar que se forma por hidrólisis de la hemicelulosa puede resultar destruida.

Debido a ello se ha recurrido a métodos de hidrólisis enzimática, a partir de enzimas procedentes de bacterias o de hongos, que son capaces de convertir alrededor del 80% del material celulósico original en glucosa, dejando un resto de *celodextrinas*, que puede hacerse fermentar por medio de microorganismos diferentes.

El líquido que resulta de la fermentación contiene solo alrededor del 10% de etanol, ya que, si la concentración es mayor, el proceso de fermentación se hace más lento, hasta llegar a detenerse. Antes de que el producto pueda ser utilizado como combustible hay que proceder a su destilación (véase la Figura 38) lo que da lugar a que el balance energético global de la producción de etanol sea negativo a no ser que para calentar la mezcla se utilicen los propios residuos agrícolas y de la fermentación. El contenido de energía del producto destilado es de alrededor de 30 GJ ton⁻¹ o 24 GJ m⁻³. En conjunto, el proceso consume una considerable cantidad de calor, el cual puede ser obtenido por combustión de los residuos de cultivos, como los tallos de la caña de azúcar o del maíz y las mazorcas.

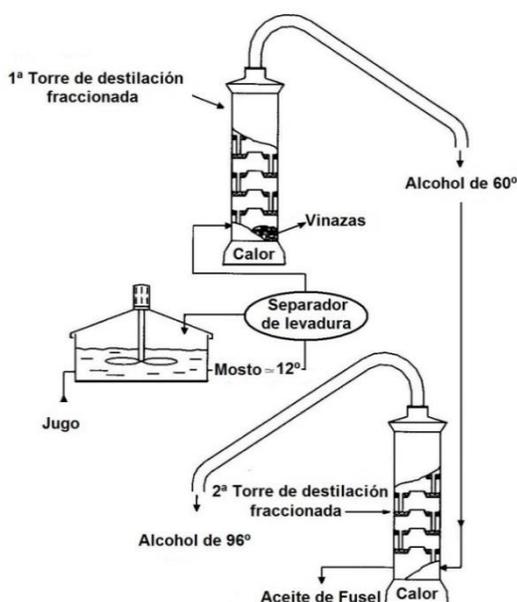


Figura 38. Diagrama representativo de un proceso de fermentación y destilación, por medio del cual se llega a la mezcla azeotrópica de alcohol al 96%.

El residuo que queda de la fermentación puede ser lavado y secado hasta llegar a un producto sólido que puede utilizarse como abono o como pienso

La Tabla 9 muestra los rendimientos de etanol que pueden extraerse por tonelada de materia prima y por hectárea a partir de diferentes cultivos. La energía que puede obtenerse del etanol es solo una fracción de la energía total contenida en la biomasa de partida, pero el combustible líquido obtenido tiene mayor densidad de energía y más versátil que el material de partida.

Tabla 9
Rendimientos en etanol de diversos cultivos

Biomasa vegetal	Litros ton⁻¹	Litros Ha⁻¹ año⁻¹
Caña de azúcar	70	400-12000
Grano (maíz, cereal)	360	250-2000
Remolacha	100	6000
Sorgo azucarero (tallos)	150	1300
Raíces de mandioca	180	500-4000
Patatas	120	1000-4500
Madera	160	160-4000

Donde los intervalos de valores reflejan las diferencias en rendimiento que se producen según la fertilidad de los suelos, el clima, etc.

En la Figura 39 se muestra una gráfica de cómo ha evolucionado en los últimos años la producción mundial de etanol.

• Producción mundial de etanol

En miles de millones de litros

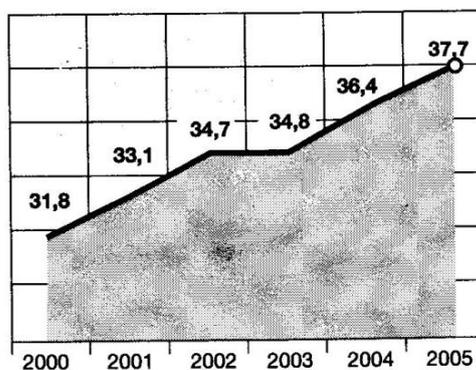


Figura 39. Evolución de la producción mundial de etanol en los últimos años. Las cifras se expresan en miles de millones de litros

España es el máximo productor de bioetanol de la Unión Europea. En la Unión Europea se alcanzó en 2003 una producción total de biocarburantes (bioetanol y biodiesel), medida en términos de energía primaria, de 1489 ktep, con un incremento con respecto a la producción de 2002 del 26.1%. En 2003 España produjo bioetanol por valor de 115000 tep mientras que el objetivo fijado para 2010 es llegar a las 400000 tep. Otros países productores fueron Francia con 50000 tep y Suecia con 35000.

La Figura 40 muestra un diagrama en el que se pueden ver los usos más frecuentes del etanol.

• Principales usos del etanol

En porcentaje

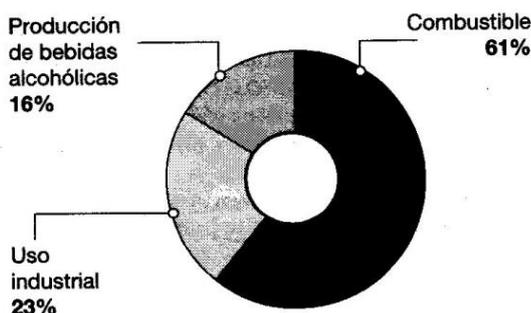


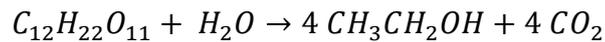
Figura 40. Usos más frecuentes del etanol.

Ejemplo

- (a) ¿Cuánto etanol podría producirse por fermentación de una tonelada de sacarosa por intermedio de la levadura?. (b). Un país produce $300000 \text{ ton año}^{-1}$ de azúcar e importa $300000 \text{ ton año}^{-1}$ de petróleo, ¿qué proporción de las importaciones se podría ahorrar si transformase toda el azúcar en etanol?

Respuesta

(a). Azúcar = sacarosa. La reacción global de conversión de sacarosa en etanol se puede escribir así:



Masa molecular de la sacarosa = $(12 \times 12) + (22 \times 1) + (11 \times 16) = 342 \text{ g mol}^{-1}$

Masa molecular del etanol = $(12 \times 12) + (6 \times 1) + (1 \times 16) = 46 \text{ g mol}^{-1}$

La ecuación de reacción dice que a partir de 342 ton de sacarosa se podrían obtener $4 \times 46 = 184$ ton de etanol, si el rendimiento fuera del 100 %. Por lo tanto, de una tonelada de sacarosa se podrían obtener: $184/342 = (0.538 \text{ ton alcohol})/(\text{ton de sacarosa}) = 538 \text{ kg de alcohol por tonelada de sacarosa}$, suponiendo un rendimiento del 100%. Un rendimiento más realista podría ser, en el mejor de los casos, del 90%, por lo que se podrían obtener: $538 \times 0.9 = 484 \text{ (kg de alcohol) / (ton de sacarosa)}$.

(b). La cantidad de alcohol que se puede obtener a partir de las 300000 toneladas de sacarosa, si el rendimiento es del 90%, sería: $300000 \times 0.484 = 145200 \text{ ton de alcohol}$.

El etanol líquido tiene un poder calorífico de 24 GJ m^{-3} , o de unos 30 GJ ton^{-1} . Por lo tanto, la energía total que se puede obtener por combustión de las 145200 toneladas de alcohol sería: $145200 \text{ ton alcohol} \times 30 \text{ GJ ton}^{-1} = 4356000 \text{ GJ} = 4.36 \text{ PJ} = 4.36 \times 10^{15} \text{ J}$.

El petróleo proporciona 42 GJ ton^{-1} , por lo que las 300000 ton/ año daría una energía total de: $(300000 \text{ ton año}^{-1}) \times 42 \text{ GJ ton}^{-1} = 12.6 \times 10^6 \text{ GJ año}^{-1} = 12.6 \text{ PJ año}^{-1} = 12.6 \times 10^{15} \text{ J año}^{-1}$. Por lo tanto, suponiendo que el alcohol fuera tan eficaz a la hora de llevar a cabo los procesos como el petróleo (por ejemplo en su utilización en motores de combustión interna), el porcentaje de las importaciones de petróleo que se podría ahorrar recurriendo a la producción propia de alcohol sería: $(4.36 \text{ PJ}/12.6 \text{ PJ}) \times 100 = 34.6\%$.

Digestión anaeróbica

La *digestión anaeróbica* es un proceso de descomposición de biomasa que se produce en ausencia de aire y que es provocado por bacterias. Lo sufre cualquier material de origen biológico y se produce más favorablemente en ambientes cálidos, húmedos y faltos de aireación. En ciénagas pantanosas donde se descompone vegetación en el fondo de remansos da lugar al denominado *gas de los pantanos (metano)* y también es responsable de parte de la producción de metano que se observa en los cultivos de arroz.

La descomposición anaeróbica de estiércol de origen animal y de basuras domésticas enterradas da lugar a la formación del denominado *biogás* que es una mezcla de gases, fundamentalmente, de metano y dióxido de carbono con nitrógeno. Se produce a partir de *residuos generados en explotaciones ganaderas intensivas* con alta concentración de ganado. Los *RSU* contienen una fracción orgánica que puede ser sometida a digestión anaerobia en biorreactores para producir biogás y también a compostaje aerobio para producir fertilizantes. Industrias como la cervecera, azucarera, alcoholera, láctea, oleícola, etc., generan *residuos industriales biodegradables*, que se pueden someter a digestión anaeróbica. Los lodos de depuración procedentes de los tratamientos a que son sometidas las aguas residuales urbanas en las estaciones depuradoras pueden generar *biogás* por digestión anaeróbica y las cantidades generadas pueden ser importantes en ciudades mayores de cien mil habitantes.

El *biogás* puede utilizarse con el fin de generar energía térmica o quemarlo en motores de combustión interna que transforman la energía térmica en energía mecánica de rotación que puede utilizarse para mover un alternador y producir energía eléctrica. Los motores de combustión que se utilicen han de estar adaptados a la composición especial de este combustible, de bajo poder calorífico. Por lo general, la inversión necesaria para este tipo de uso del biogás es elevada aunque su falta de rentabilidad viene compensada por el beneficio medioambiental que reporta.

Las bacterias y hongos responsables de este tipo de descomposición de biomasa son capaces de obtener la energía para mantenerse vivas, rompiendo enlaces de los carbohidratos y convirtiendo parte del carbono presente en CO₂ y otra parte en metano. Se denomina digestión porque el proceso es similar al que se produce en el tracto digestivo de los rumiantes.

La Figura 41 muestra un esquema del proceso de digestión anaeróbica.

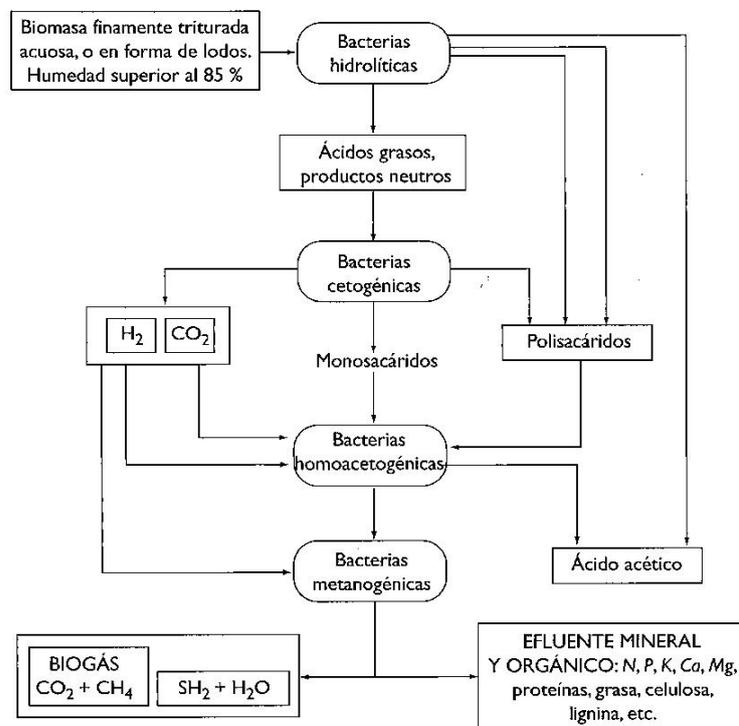
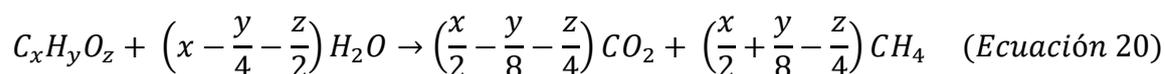


Figura 41. Esquema del proceso de digestión anaeróbica.

La reacción general que describe la digestión anaeróbica es la siguiente:



Según este esquema, la reacción global para la descomposición anaeróbica de la celulosa es la siguiente:



Igualmente, la reacción de descomposición de la glucosa puede ser escrita del siguiente modo:



Con esta reacción como base, y teniendo en cuenta los calores de combustión de la glucosa (686 kcal mol⁻¹) y del metano (210 kcal mol⁻¹), y que se producen 3 moles de metano por mol de glucosa (3×210 = 630 kcal), se puede estimar que alrededor del 92% de la energía contenida en los enlaces de la glucosa permanece en los enlaces del metano, y el restante 8% de la energía lo emplearían las bacterias para mantenerse con vida y multiplicarse.

Esta reacción global se admite que es la suma de tres procesos. En una *primera fase*, denominada *hidrólisis*, la biomasa vegetal se hidroliza, transformando productos poliméricos, como la celulosa o el almidón, en monómeros como la glucosa, por intermedio de una serie de enzimas que actúan como biocatalizadores y que forman parte de microorganismos anaeróbicos, aunque algunos también pueden ser aeróbicos. Las proteínas se hidrolizan a aminoácidos y los lípidos a ácidos grasos de cadena larga.

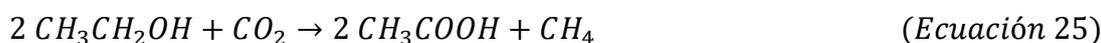
En este estado casi toda la biomasa es soluble en agua y está formada por compuestos más sencillos, que pueden intervenir como reactivos en una segunda fase del proceso global. Si se parte de celulosa, la reacción que resume lo que ocurre en esta primera fase sería la siguiente:



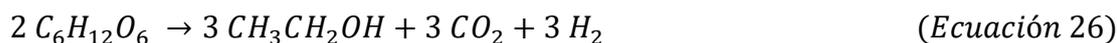
En la *segunda fase* se produce una *deshidrogenación* por intermedio de bacterias ácidofílicas (que requieren un pH de entre 6 y 7 para que sean efectivas, por lo que, dado que los propios ácidos que producen (como en esta fase se producen ácidos orgánicos, algunos autores denominan a la misma *acidogénesis*) pueden hacer el pH menor que 6, es necesario agregar cal para reajustar el pH a sus valores óptimos). Así se convierte a la glucosa en ácido acético, a través de una serie de etapas como las siguientes:



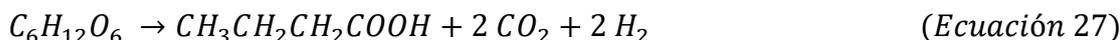
Esta etapa viene seguida por una oxidación de alcohol etílico a ácido acético acompañada de una reducción del CO₂ a metano:



También tienen lugar reacciones como la de formación de ácido propiónico:



Y la de formación de ácido butírico:



En esta segunda fase se produce también la *decarboxilación de los aminoácidos* para formar *cetoácidos, ácido pirúvico, ácido láctico, propiónico y acético*, mientras que los ácidos grasos de cadena larga se convierten en ácidos grasos de cadena corta y en ácido acético como producto final. Ambas primeras fases pueden durar horas o días, según el tipo de biomasa de que se parta.

Es en la *tercera fase*, denominada *metanogénesis*, cuando tiene lugar la formación de *biogás* a partir del ácido acético resultante de las dos primeras. Esta fase se produce por intermedio de la *metanobacteria o bacteria metanogénica** (*en trabajos llevados a cabo en los años 90 del pasado siglo, ha podido determinarse, que los microorganismos que participan en la digestión anaeróbica, no son bacterias, sino archeas, las cuales se distinguen de aquellas, en los lípidos que contienen y en la membrana) la cual requiere, para prosperar, un medio estrictamente anaeróbico y que utilizan al CO₂ y al H₂ como fuente de carbono y de energía y poder reductor (ya que el hidrógeno posee electrones en orbitales moleculares de energía elevada), respectivamente. Las reacciones en la tercera fase se producen durante semanas y conducen a una ecuación global de reacción como la siguiente:



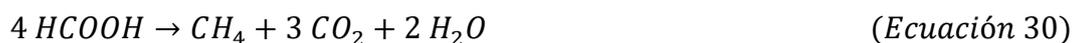
Esta reacción es consecuencia de la acción de las denominadas *bacterias acetoclásticas* y a partir de ella se genera alrededor del 70% del biogás.

También se genera metano en reacciones como las siguientes:

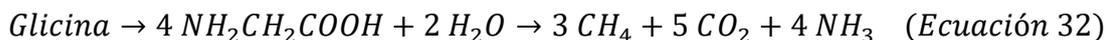


Esta reacción es resultado de la acción de las denominadas *bacterias hidrogenofílicas*, y debido a la misma se genera alrededor del 25 % de biogás.

En mucho menor proporción también se puede generar biogás a partir de ácido fórmico y de metanol, de acuerdo con reacciones como las siguientes:



A partir de aminoácidos tienen lugar también reacciones que dan lugar a la formación de biogás, proteínas y lípidos, de acuerdo con esquemas reaccionantes globales como los siguientes:



Por hidrólisis de aceites y grasas se producen glicerina y ácidos grasos, los cuales, a su vez, son convertidos en biogás a través de reacciones, que, escritas globalmente, quedarían así:



En los tratamientos más simples, *todas las fases se verifican en un solo digestor*, pero el rendimiento del proceso global se incrementaría si se lograra una conveniente separación entre las diferentes fases.

En conjunto, las reacciones son ligeramente exotérmicas, con calores de reacción de alrededor de 1.5 MJ por kg de material digerible seco, o de unos 250 kJ por mol de glucosa. El rendimiento en biogás suele ser de 0.2 a 0.4 m³, medidos en condiciones normales de presión y temperatura, por kg de biomasa digerible seca original.

Según se ha visto, se genera más biogás a partir de proteínas y grasas que a partir de carbohidratos, por lo que la proporción de biogás generado a partir de la biomasa inicial será tanto mayor cuanto más elevado sea el contenido en ella de proteínas y grasas.

Cuanto más elevada sea la temperatura, mayor será la velocidad de digestión, con rendimientos en biogás que se duplican por cada incremento en 5°C de la temperatura. Este efecto continúa hasta llegar a los 55°C. Pero habría que emplear parte del biogás producido en calentar el digestor, aunque el propio proceso desprende una cantidad de calor que puede no ser suficiente en países de clima templado.

Algún componente de la biomasa, como la lignina, así como restos de sustancias inorgánicas, no son digeridos y pueden quedar en forma de escoria o verdín, que puede taponar los conductos de los digestores que se disponen para generar el biogás. La mayor parte de la masa (hasta el 95%) del material digerible es agua.

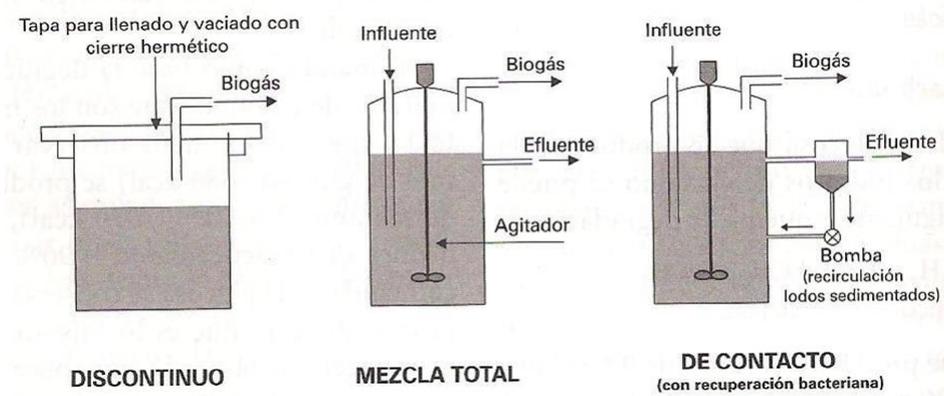
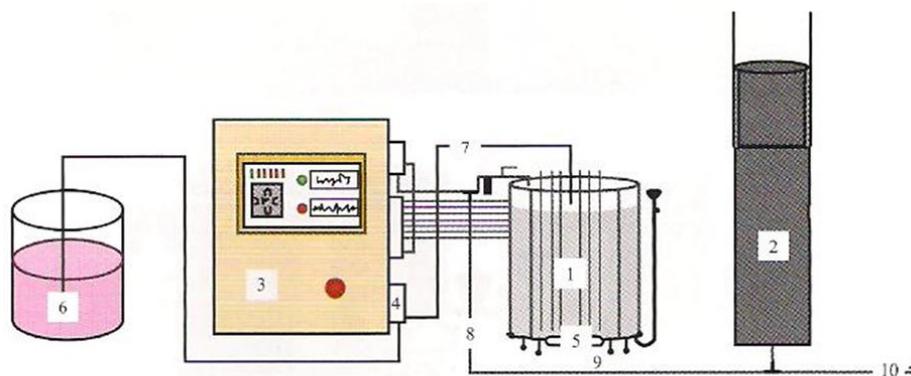


Figura 42. Tipos de digestores de tecnología sencilla. Los digestores de mezcla y de contacto funcionan en modo continuo.

Para que tenga lugar la digestión anaeróbica hay que tener en cuenta que la acción de las bacterias resulta inhibida por la presencia de sales metálicas, sulfuros solubles, penicilina o amoníaco. Las bacterias, además necesitan nitrógeno para crecer, por lo que tiene que existir en la biomasa original alguna fuente de la que puedan extraer este elemento. Sin embargo, un exceso de nitrógeno puede conducir a la formación de concentraciones elevadas de amoníaco, lo que sucede cuando la relación carbono-nitrógeno en la biomasa de partida excede un valor de 30.

Para la producción de biogás se suele partir de estiércol de animales, el cual se introduce, en forma de barrillo con un contenido del 95% de agua, en un **digestor**. Los digestores son reactores que adoptan diversas formas, tal como puede observarse en las Figuras 42 a 44.



- (1) Digestor. (2) Gasómetro. (3) Sistema de control. (4) Válvula de alimento. (5) Sistema de placas calefactoras. (6) Tanque de alimentación. (7) Entrada de alimento. (8) Recirculación de biogás. (9) Toma de muestras. (10) Antorcha quemadora.

Figura 43. Digestor anaeróbico de mezcla perfecta (CSTR = Continuous Flow Stirred Tank = Reactor por Agitación de Flujo Continuo). Volumen de trabajo: ~6 litros

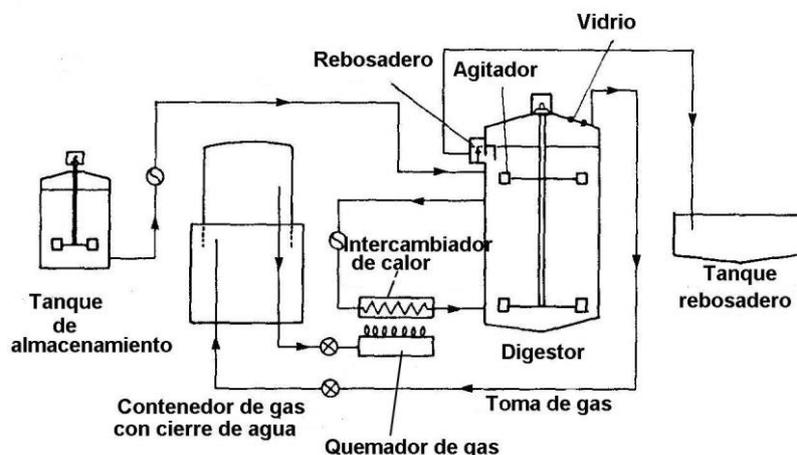


Figura 44. Modelo de digestor para una granja situada en países templados, donde es necesario quemar una parte del biogás generado, para alcanzar una temperatura de digestión óptima.

El tamaño de esta especie de reactor puede variar entre 1 y 10 m³ para granjas unifamiliares, y hasta 2000 m³ en instalaciones comerciales grandes. Los digestores pueden trabajar de forma discontinua, recibiendo nueva alimentación tras terminar la digestión en unos 20 días, o trabajar de modo continuo.

Un digestor en buen funcionamiento puede producir de 200 a 400 m³ de biogás por tonelada de biomasa, medidos en condiciones normales de presión y temperatura (CNpT), con un contenido de metano de entre el 50 y el 75%, lo que puede significar, en el mejor de los casos, un total de unos 11 GJ

de energía útil por m^3 . Este valor viene a representar alrededor de dos tercios del contenido energético de la biomasa de partida.

El contenido energético del biogás depende de la proporción que contenga de CO_2 y CH_4 . El contenido energético del metano puro es 38 MJ m^{-3} (CNpT) y el del CO_2 nulo. Si el biogás contuviera un volumen $V\%$ de metano, el contenido energético del biogás valdría: $38 \times (V/100) \text{ MJ m}^{-3}$, de modo que si V fuera un 50%, entonces el contenido energético del biogás se calcularía así: $38 \times (50/100) = 19 \text{ MJ m}^{-3}$.

Finalmente, los barros que quedan como resto de la digestión anaeróbica, pueden tener valor como fertilizantes.

Ejemplo

Una planta de producción de electricidad a partir de biogás generado a partir de purines de cerdo, puede tratar unos 90 m^3 de purines diarios. Los generadores eléctricos movidos por la energía generada en la combustión del biogás suministran a la red de tendido eléctrico 750000 kWh de electricidad al año.

(a). Calcúlese la potencia media de la planta en kW.

(b). Suponiendo que la eficiencia de la planta sea del 25%, calcúlese la cantidad de energía total que se debe convertir en calor.

(c). Suponiendo que el biogás contuviera un 60% en volumen de metano, calcúlese el volumen de biogás que sería necesario diariamente para generar la energía anterior, sabiendo que el contenido energético del metano puro es de 40 MJ m^{-3} .

(d). Si el contenido medio de sólidos en los purines es del 5%, es decir, 50 kg de sólido por m^3 de purines, calcúlese el volumen de gas producido por cada tonelada de sólido seco.

Respuesta

(a). La cantidad total de energía eléctrica producida por la planta es 750000 kWh al año. Como cada año tiene 8760 horas, la potencia media de la planta sería:

$$\text{Potencia media} = \frac{\text{Energía total producida}}{\text{tiempo}} = \frac{750000 \text{ kWh año}^{-1}}{8760 \text{ horas año}^{-1}} = 85.62 \text{ kW}$$

(b). La potencia total necesaria para generar esa producción, con una eficiencia del 25% sería:

$$\text{Potencia total} = \frac{\text{Potencia producida}}{\text{Eficiencia}} = \frac{85.62 \text{ kW}}{0.25} = 342.5 \text{ kW}$$

$$\text{Potencia total} = \frac{\text{Potencia producida}}{\text{Eficiencia}} = \frac{85.62 \text{ kW}}{0.25} = 342.5 \text{ kW}$$

De acuerdo con este valor, la cantidad de energía producida diariamente debería ser la siguiente:

$$342.5 \text{ kW} = 342500 \text{ J s}^{-1}$$

$$\text{Energía por día} = (342500 \text{ J s}^{-1}) \times (24 \text{ h día}^{-1}) \times (3600 \text{ s h}^{-1}) = 2.96 \times 10^{10} \text{ J día}^{-1} = 29600 \text{ MJ día}^{-1}$$

1.

(c). El contenido de energía del biogás es $(40 \text{ MJ m}^{-3} \times 0.6) = 24 \text{ MJ m}^{-3}$. Entonces, para producir los 29600 MJ diarios se necesitaría el siguiente volumen de biogás:

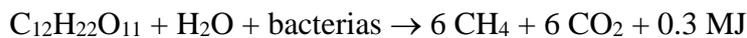
$$\text{Volumen de biogás por día} = (29600 \text{ MJ día}^{-1}) / (24 \text{ MJ m}^{-3}) = 1233 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}.$$

(d). 91 m^3 de biogás contienen una masa de sólidos que puede ser calculada del siguiente modo $= (91 \text{ m}^3) \times (50 \text{ kg sólidos m}^{-3}) = 4550 \text{ kg de sólidos} = 4.55 \text{ toneladas de sólidos}$.

Por lo tanto, por cada tonelada de sólidos se tienen que producir $(1233 \text{ m}^3) / 4.55 \text{ ton} = 271 \text{ m}^3$ de biogás por tonelada de sólido, que es una cifra razonablemente parecida a la obtenida en la práctica.

Ejemplo

A un digestor de 3 m^3 se le suministran diariamente 0.2 m^3 de purines de cerdo, 4 kg de los cuales son sólidos volátiles (SV, 1 kg de sólidos volátiles produce 0.4 m^3 de biogás). Una vez terminada la digestión se elimina el volumen de purines digeridos. Suponiendo que la reacción de digestión es la siguiente:



y que la reacción tarda 7 días en producirse, calcúlese:

(a). El volumen de biogás producido (70% de este biogás es metano)

(b). El calor que puede obtenerse por combustión del biogás producido cada día.

(c). ¿Cuánto keroseno habría que quemar para producir el mismo calor que el que se genera al quemar el biogás que se produce cada día? (El calor de combustión del keroseno = 37 MJ litro^{-1})

(d). Se puede duplicar prácticamente la velocidad de reacción en el digestor elevando la temperatura desde 28 (temperatura ambiente) a 35°C . 1), ¿qué ventaja reportaría? 2), ¿Cuánto calor habría que aportar diariamente para conseguir ese cambio de temperatura? 3), ¿En qué proporción puede contribuir a este calor el desprendido durante el propio proceso de digestión?

Respuesta

(a). 1 kg de SV produce 0.4 m^3 de biogás, por lo tanto, los 4 kg de SV contenidos en los 0.2 m^3 de purines añadidos diariamente, contendrían:

$$(4 \text{ kg de SV día}^{-1}) \times (0.4 \text{ m}^3 \text{ biogás} / 1 \text{ kg SV}) = 1.6 \text{ m}^3 \text{ de biogás día}^{-1}; (11.2 \text{ m}^3 \text{ en } 7 \text{ días}).$$

$$(b) (1.6 \text{ m}^3 \text{ de biogás día}^{-1}) \times (38 \text{ MJ m}^{-3}) \times 0.7 = 42.6 \text{ MJ día}^{-1}.$$

(c). El calor de combustión del keroseno es 37 MJ litro^{-1} , por lo tanto, habría que quemar diariamente: $(42.6 \text{ MJ día}^{-1}) / (37 \text{ MJ litro}^{-1}) = 1.15 \text{ litros de keroseno}$.

(d). 1) La ventaja sería que al duplicarse la velocidad de reacción se podría recurrir a un digestor con la mitad de volumen para producir la misma cantidad diaria, con lo que se ahorraría en la inversión inicial.

2). Calor necesario para calentar de 28 a 35°C un líquido que está compuesto en su 95% por agua y que tiene un calor específico de $4180 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ y una densidad de aproximadamente $1 \text{ kg dm}^{-3} = 1 \text{ kg litro}^{-1}$:

$$\text{Cantidad de calor día}^{-1} =$$

$$= \rho V c \Delta T = (1 \text{ kg litro}^{-1}) \times (200 \text{ litros día}^{-1}) \times (4180 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}) \times 7 \text{ }^\circ\text{C} = 5.85 \text{ MJ día}^{-1}.$$

3). El calor de reacción es 0.3 MJ/ mol de sacarosa.

Masa molar de la sacarosa = $(12 \times 12) + (22 \times 11) + (11 \times 16) = 342 \text{ g mol}^{-1}$.

Como se agregan 4 kg día^{-1} , el calor de reacción por día sería: $[(4 \text{ kg día}^{-1}) / (0.342 \text{ kg mol}^{-1})] \times 0.3 \text{ MJ mol}^{-1} = 3.51 \text{ MJ día}^{-1}$. Como se necesitan 5.85 MJ día^{-1} para elevar la temperatura, el propio calor de la reacción suministraría el $(3.51/5.85) \times 100 = 60\%$ del calor necesario.

Biogás a partir de rellenos de terrenos con basuras urbanas. gas de vertederos

Una proporción elevada (a veces mayor del 50%) de las basuras domésticas (RSU, Residuos Sólidos Urbanos) está formada por biomasa. Cuando este componente de los RSU se entierra en un vertedero, es decir, se le impide el contacto con el oxígeno del aire, se puede poner en marcha un proceso de digestión anaeróbica.

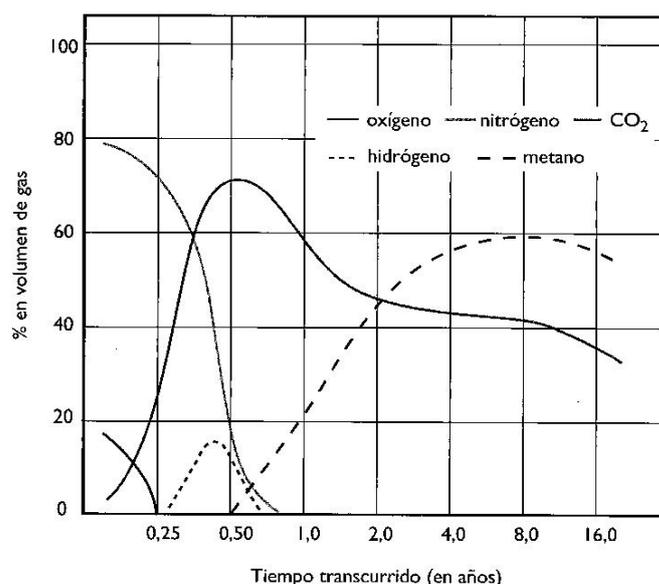


Figura 45. Cambio de la composición del gas de vertederos como función del tiempo (en años).

La Figura 45 muestra el cambio de composición que el gas generado sufre a lo largo de varios años de digestión.

Estos procesos se llevan a cabo en vertederos controlados que se preparan disponiendo en el fondo una capa de arcilla impermeable, u otro material análogo. Encima se recubre con una capa de basura, que, a su vez, se cubre con una de tierra, otra de basura, etc. De ese modo se va compactando el vertido y creando un medio propicio para la digestión anaeróbica. Así se llega a producir biogás en intervalos de tiempo que pueden ser de años, es decir, períodos mucho más prolongados que en un digestor, ya que los residuos de los vertederos son más heterogéneos que los que se tratan en digestores. Además, las condiciones en que se verifica el proceso no son tan favorables. El resultado final del proceso se alcanza al cabo de unos cuatro años, con una producción de unos 150 a 300 m^3 de biogás por tonelada de basuras sin seleccionar, lo que vendría a representar una energía total de 5 a 6 GJ por tonelada de basura, aunque en la práctica los rendimientos son menores y muestran variaciones significativas según la composición de las basuras, el clima del sitio de la instalación y como se le manipule. El biogás suele estar compuesto por un 60% de CH_4 y un 40% de CO_2 .

El producto puede ser llamado también *gas de vertederos*. El biogás se extrae por medio de un entramado de tuberías perforadas, para dejar salir al biogás generado, y enterradas en la basura a profundidades de hasta 20 metros, tal como aparece representado en la Figura 46.

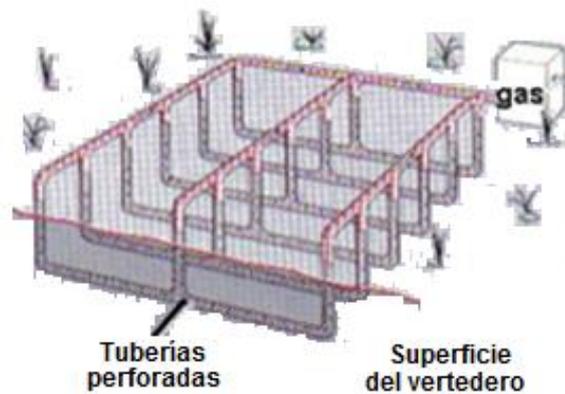


Figura 46. Entramado de tuberías perforadas para extraer el gas de vertederos.

Cuando se proyecta el vertedero con anterioridad, se puede construir el sistema de tuberías antes de arrojar las basuras, llegándose a tendidos de tuberías de miles de metros a través de los cuales se pueden llegar a extraer hasta 1000 m³ por hora de gas.

Este gas de vertederos suele utilizarse para generación de electricidad. Se han podido alcanzar cantidades de energía eléctrica que pueden variar entre 100 y 500 kWh por tonelada de RSU. Muchas de las plantas de producción de electricidad funcionan quemando el gas en motores de combustión grandes, como pueden ser los que se utilizan en los barcos. Con suministros de gas equivalentes a 10 GJ por hora se pueden mover generadores de unos 500 kW (a = Energía generada en una hora = (500 kW × 3600 s h⁻¹) = 1.8 × 10⁹ J = 1.8 GJ h⁻¹. b = Energía total en el gas = 10 GJ h⁻¹. Eficiencia de conversión = a × (100/b) = 18%). Con turbogeneradores modernos se pueden alcanzar mejores eficiencias de conversión.

A finales de 2003 el consumo de biogás en la Unión Europea alcanzó los 3219 ktep con un crecimiento del 2% con respecto al 2002. El consumo de biogás en 2003 por países en la UE viene dado en la Tabla 10.

Tabla 10
Consumo de biogás en 2003 en los países de la Unión Europea

País	Consumo de biogás en ktep
Reino Unido	1151
Alemania	685
Francia	322
España	257
Italia	155
Holanda	154
Suecia	147
Portugal	76
Austria	64
Dinamarca	62
Bélgica	56
Grecia	42
Irlanda	28
Finlandia	18
Luxemburgo	2

A finales de 2004, el consumo de biogás en España alcanzó los 266.7 ktep, distribuidas por Comunidades Autónomas del modo que se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11
Consumo de biogás en España en 2004

<i>Comunidad Autónoma</i>	<i>Consumo de biogás en 2004 en tep</i>
<i>Madrid</i>	88265
<i>Cataluña</i>	55271
<i>Galicia</i>	27875
<i>Asturias</i>	24956
<i>Valencia</i>	16783
<i>Castilla y León</i>	14483
<i>País Vasco</i>	8942
<i>Andalucía</i>	8456
<i>Aragón</i>	5910
<i>Murcia</i>	4896
<i>Cantabria</i>	3719
<i>Navarra</i>	2824
<i>La Rioja</i>	1765
<i>Castilla-La Mancha</i>	1523
<i>Baleares</i>	1106
<i>TOTAL</i>	266724

Ejemplo

Una comunidad de 6000 viviendas (unos 24000 habitantes) se propone construir una central térmica para aprovechar el biogás producido en un vertedero controlado de RSU donde se digieren las 6000 toneladas de basuras producidas por la comunidad cada año. Suponiendo que se produce biogás al ritmo de 6 GJ por tonelada de RSU.

(a). Si la eficiencia de conversión del calor producido en la combustión del biogás en electricidad es del 20 %, ¿cuánta energía eléctrica, expresada en kWh, produciría la planta en un año?

(b). Dado que cada vivienda consume, por término medio, 3000 kWh de electricidad al año, ¿qué porcentaje del consumo de electricidad se podría cubrir con la producción de la planta?

(c). La demanda media de calor para calefacción y agua caliente de cada vivienda alcanza un valor medio de 60 GJ. Si el 80% de la energía calorífica que sale del turbogenerador se pudiera aprovechar para usos térmicos en las viviendas, ¿qué porcentaje de la demanda se cubriría con ella?

(d). Hágase una estimación de la potencia nominal del generador de electricidad que se debería instalar, si la planta se diseña para funcionar a un factor de carga del 75%.

Respuesta. El contenido de energía total del biogás producido por las 6000 toneladas anuales de RSU, sería:

$$(6000 \text{ ton RSU año}^{-1}) \times (6 \text{ GJ/ton RSU}) = 36000 \text{ GJ año}^{-1} = 36 \times 100 \text{ MJ año}^{-1} \text{ o } = (36 \times 100 \text{ MJ año}^{-1}) / (3.6 \text{ MJ kWh}^{-1}) = 10 \times 10^6 \text{ kWh año}^{-1}.$$

De esta energía, el 20% se convierte en electricidad, es decir $2 \times 10^6 \text{ kWh año}^{-1}$.

(b). El consumo total anual de electricidad de las 6000 viviendas sería el siguiente:

$$6000 \text{ viviendas} \times (3000 \text{ kWh vivienda}^{-1} \text{ año}^{-1}) = 18 \times 10^6 \text{ kWh año}^{-1}.$$

Por lo tanto, los $2 \times 10^6 \text{ kWh}$ de electricidad producida en la planta de transformación de la energía del biogás en electricidad, suponen:

$[(2 \times 10^6 \text{ kWh año}^{-1}) / (18 \times 10^6 \text{ kWh año}^{-1})] \times 100 = 11\%$ de la electricidad consumida por la comunidad puede provenir de la generada a partir del gas de vertederos.

(c). De los $36000 \text{ GJ año}^{-1}$ obtenidos por combustión del biogás, solo se convierte el 20 %, 7200 GJ año^{-1} en electricidad, y los gases efluentes conservan $28800 \text{ GJ año}^{-1}$, que se podrían utilizar en calefacción y agua caliente para la comunidad. De este calor solo se aprovecha el 80%, es decir: $28800 \text{ GJ año}^{-1} \times 0.8 = 23049 \text{ GJ año}^{-1}$.

La demanda anual de energía térmica de las 6000 viviendas sería la siguiente:

$6000 \text{ viviendas} \times (60 \text{ GJ vivienda}^{-1} \text{ año}^{-1}) = 360000 \text{ GJ año}^{-1}$, por lo que el calor de desecho podría suministrar. $[(23049 \text{ GJ año}^{-1}) / (360000 \text{ GJ año}^{-1})] \times 100 = 6.4\%$ del calor total consumido.

(d). La producción de electricidad anual de la planta es de 2 millones de kWh que tienen que producirse con un factor de carga del 75%, es decir en el 75% de las horas del año. Por lo tanto:

$$0.75 \times 24 \text{ h día}^{-1} \times 365 \text{ d año}^{-1} = 6570 \text{ horas año}^{-1}.$$

El generador necesario debería tener una potencia de:

$$\text{Potencia} = \text{Energía} / \text{tiempo} = (2 \times 10^6 \text{ kWh año}^{-1}) / (6570 \text{ horas año}^{-1}) = 304 \text{ kW}.$$

Por lo tanto, la comunidad debería pensar en comprar un generador de unos 325 a 350 kW, si quiere obtener los resultados discutidos.

Otros procesos bioquímicos de transformación de biomasa son la *digestión aeróbica* en la que se produce la descomposición por intermedio de microbios y con generación de calor, y la *biofotólisis* por medio de organismos vivos como las algas y las cianobacterias. También se han desarrollado, a escala de laboratorio de investigación, sistemas fotoelectroquímicos capaces de producir combustibles por fotooxidación o fotorreducción de ácidos orgánicos para generar metano (reacción de fotokolbe) y otros combustibles.

7. APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS AGRÍCOLAS

Los desechos provenientes de cultivos y de animales constituyen todavía, tras la madera, la segunda fuente de energía en muchos países en desarrollo. En la India se utilizan al año más de 120 millones de toneladas de estiércol y de residuos de cultivos, además de 140 millones de toneladas de madera, mientras que en China se estima que la energía proveniente de la combustión de los residuos agrícolas es más del doble que la que se obtiene de la madera.

Residuos de madera

Como consecuencia de las podas o del entresacado en plantaciones de árboles se genera una gran cantidad de *residuos forestales*. En vez de dejarlos descomponerse en el propio sitio, se pueden recoger, y utilizarlos como combustibles domésticos e industriales tras un proceso de secado y de conversión en virutas de unos 40 mm. Los algunos países ricos en explotaciones forestales se utilizan tales residuos para producir vapor que llevado un turbogenerador da lugar a electricidad. En EE UU se producen hasta 10 GW a partir de la combustión de biomasa. En Austria se queman desechos de madera, virutas y cortezas de árbol para generar hasta 1500 MW en forma de calor para calefacción. En Suecia se obtiene alrededor del 15% de la energía primaria de la biomasa, y los residuos forestales e industrias de la madera llegan a contribuir con más de 200 PJ año^{-1} (véanse las Figuras 22 y 23)

En España hay 147 proyectos en explotación (1999-2004) para obtener energía térmica a partir de residuos forestales con una capacidad equivalente en energía primaria de unas 4000 tep. Existen también dos proyectos, para dicho período, de generación de electricidad con una capacidad de 5773 tep

y el objetivo del plan de utilización de energías renovables prevé llegar a las 450000 tep (térmicas y eléctricas) en el 2010. Los recursos totales que se estima que existen en forma de residuos forestales alcanzan en España la cifra de 590000 tep.

Otra fuente de residuos, como el aserrín, astillas, virutas, recortes, cilindros de madera proviene del procesado de los troncos en industrias de muebles y de la madera. En España existen 121 proyectos basados en la explotación de residuos de industrias forestales con un equivalente de 250000 tep.

Residuos agrícolas herbáceos. Son, principalmente, la paja proveniente de los cultivos de cereales de secano y el cañote del maíz. La generación de estos residuos es estacional y se produce tras los períodos de cosecha, por lo que su posible utilización en plantas de producción de electricidad tiene que venir complementada con la de otros combustibles. Por otra parte, la cantidad producida anualmente depende del clima, lo que no asegura suministros estables y da lugar a variaciones en los precios.

En España las principales zonas de producción de residuos herbáceos son las Comunidades Autónomas de Castilla y León, Castilla-La Mancha y Andalucía, donde se genera más del 65% del potencial nacional lo que supone unas 5200000 tep al año.

En los países tropicales se producen también residuos de cultivos que presentan un elevado potencial para su aprovechamiento en la generación de energía. La *fibra de caña de azúcar* se utiliza en factorías azucareras como combustible para dar lugar a vapor, que llevado a un turbogenerador puede generar electricidad. Las vainas del arroz se producen en grandes cantidades en países como India, China, Indonesia, Filipinas y otros donde el arroz constituye el ingrediente primordial de su alimentación. Su combustión deja un residuo silíceo en forma de cenizas, pero su textura uniforme permite un buen tratamiento en procesos de gasificación. La fibra de coco puede también someterse a gasificación y, finamente dividida, puede ser útil como biocombustible.

8. CULTIVOS ENERGÉTICOS

En los últimos años se está recurriendo a utilizar tierras tradicionalmente dedicadas a cultivos agrícolas que hoy se consideran poco rentables, a plantaciones de *cultivos energéticos*, que son cultivos destinados específicamente a la producción de materiales combustibles. Este tipo de cultivos puede recurrir a la plantación de especies herbáceas o leñosas como alternativa a los cereales extensivos. Tienen que presentar una productividad elevada y poder ser trabajados con maquinaria agrícola convencional, además de no dar lugar a la degradación del suelo, de dar un balance energético positivo y de permitir una recuperación de las tierras después de finalizados. En estas plantaciones se hace uso de los conocimientos más avanzados en producción agrícola con el fin de optimizar los rendimientos de producción de biomasa, hasta conseguir que los biocombustibles obtenidos lleguen a ser competitivos en precio con los combustibles fósiles.

Se pretende llegar a una mayor producción por unidad de superficie y a hacer uso de tierras en barbecho o mal aprovechadas. Otras ventajas derivadas de este tipo de cultivos serían el aumento del empleo rural y la disminución de la migración hacia centros urbanos. Se contribuiría además a una mejora de la fijación del CO₂ de la atmósfera, a una protección del suelo contra la erosión y a aumentar su contenido en materia orgánica. Los bosques así creados pueden suministrar protección a la fauna. Los bosques pueden explotarse por talas rotativas, en las cuales, el terreno talado un año se deja retoñar en años sucesivos en que se talan parcelas contiguas, hasta llegar a la primera parcela tras un número de años que haya permitido recuperarse a los árboles. Los árboles más adecuados a climas templados pueden ser chopos o sauces siempre que sean tierras de regadío y los eucaliptos en terreno de secano. Se pueden plantar de 5000 a 20000 árboles por hectárea y talarlos en ciclos de unos cinco años, con lo que permanecen productivos durante 30 años con rendimientos anuales de unas 10 toneladas por hectárea.

Ejemplo

Se estima que el área total que existe de bosques y madera en la tierra es de alrededor de 4000 millones de hectáreas o 40 millones de km². Las industrias madereras procesan unos 1200 millones de madera seca por año, y se emplea la misma cantidad en obtener carbón de madera y en madera para quemar, dejando 800 millones de toneladas de residuos forestales.

(a). Calcúlese la productividad anual media en toneladas de madera por año y hectárea.

(b). Hágase una estimación de lo que contribuye la producción total de madera al consumo total mundial de energía primaria. (Contenido de energía de la madera seca = 15 GJ ton⁻¹)

(c). Coméntese qué relación puede establecerse entre los resultados obtenidos en los apartados a y b.

Respuesta

(a). Producción total de madera = 1200 millones de ton + 1200 Mton + 800 Mton = 3200 millones de toneladas de madera seca por año. Esta producción se obtiene de una superficie total de 4000 millones de hectáreas, por lo tanto, la producción media por hectárea será la siguiente:

$$\frac{3200 \times 10^6 \text{ ton mad. seca año}^{-1}}{4000 \times 10^6 \text{ Ha}} = 0.8 \text{ ton mad. seca Ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$$

(b). Si se supone un contenido de energía en la madera seca de 15 GJ ton⁻¹, la energía total derivada al año de la madera sería la siguiente:

$$(3200 \times 10^6 \text{ ton año}^{-1}) \times (15 \times 10^9 \text{ J año}^{-1}) = 4.8 \times 10^{19} \text{ J año}^{-1} = 48 \text{ EJ año}^{-1}$$

(c). Se ha propuesto un modelo para el futuro según el cual se deberían producir 270 EJ/año a partir de la madera producida en 890 millones de Ha. La productividad por Ha y año, en este modelo sería la siguiente:

270 EJ año⁻¹ = 270 × 10¹⁸ J año⁻¹ = 270 × 10⁹ GJ año⁻¹. Esta sería la energía contenida en las siguientes toneladas de madera seca:

$$\frac{270 \times 10^9 \text{ GJ}}{15 \text{ GJ ton}^{-1}} = 18 \times 10^9 \text{ toneladas de madera seca}$$

Por lo tanto, la productividad media por hectárea a la que se debería llegar para llegar a esa cantidad madera sería la siguiente:

$$\frac{18 \times 10^9 \text{ ton año}^{-1}}{890 \times 10^6 \text{ Ha}} = 20.2 \text{ toneladas de madera seca Ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$$

Como la productividad en el momento actual es de 0.8 ton Ha⁻¹ año⁻¹, ello quiere decir que el modelo propuesto estaría basado en un aumento de la productividad en 20.2/ 0.8 = 25 veces la que se consigue actualmente.

En España se cultivan el cardo, el sorgo y la colza etíope, esta última como fuente de aceites sustitutivos del gasóleo (biogasóleo o biodiesel). Las Comunidades Autónomas con mayor producción en cultivos energéticos son Castilla y León (29.5%), Castilla-La Mancha (19.6%), Andalucía (18.4%) y Aragón (12.4%), para una producción total de 5800000 tep por año. En el CIEMAT se ha desarrollado un proceso por medio del cual es posible extraer etanol de la paja de cereales. El proceso de obtención de etanol a partir de la paja es semejante al que se utiliza para extraerlo a partir de granos de cereal o de la caña de azúcar.

En una primera fase la paja se trata con vapor de agua 200°C, lo que produce un esponjamiento, con producción de una especie de algodón que facilita la formación de azúcares y su posterior hidrólisis y fermentación enzimática hasta llegar al etanol. España es el primer productor europeo de etanol a partir de cereales. Una planta de elaboración funciona en Cartagena con un potencial de producción de 142 millones de litros al año y otra en La Coruña de 168 millones de litros. Otra planta está en construcción en Salamanca, con un potencial de 200 millones de litros anuales y otras en proyecto en distintos lugares hasta otros 115 millones de litros

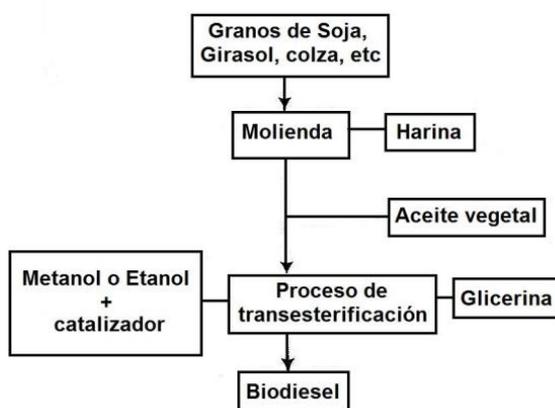
El cultivo energético más extendido en el mundo es la caña de azúcar para obtener etanol, aunque en EE UU se desarrolló un plan para obtener bioetanol a partir de los excedentes en la producción de maíz con el fin de mezclarlo con gasolina, hasta una proporción del 10%. También es posible extraer etanol de alguna variedad del sorgo, una herbácea que se cultiva ya en EE UU y en Brasil.

9. BIOCARBURANTES. BIODIESEL

Los biocarburos son combustibles líquidos que se obtienen de diferentes transformaciones de materia vegetal y animal, que pueden ser utilizados para sustituir a los combustibles fósiles en motores de combustión interna. Los más importantes son el bioetanol, del que ya se ha hablado, y el biodiesel.

Diversas semillas de diferentes plantas, denominadas oleaginosas, producen aceites vegetales, muchos de los cuales son ésteres de la glicerina con ácidos grasos, que se comportan de modo análogo a los hidrocarburos en cuanto a su uso en motores de combustión interna. Los aceites vegetales presentan contenidos de energía de entre 37 y 30 GJ ton⁻¹, similares al del gasóleo (o Diesel) que es de 42 GJ ton⁻¹ y superiores al del etanol (30 GJ ton⁻¹). Algunos aceites vegetales pueden quemarse directamente en motores diesel, bien en forma pura, o mezclados con gasóleo. Parece que las mezclas con elevados contenidos en aceite vegetal pueden provocar obstrucciones en los inyectores y depositarse en determinadas partes del motor. Esto se puede evitar, sometiendo a los aceites vegetales a un proceso de hidrólisis, catalizado por una base como KOH, con lo cual se obtienen ácidos grasos y glicerina, que es un subproducto que también se puede comercializar. Los ácidos grasos, a su vez, son sometidos a un proceso de esterificación con metanol, con lo que se obtiene los ésteres metílicos, que son menos viscosos y se queman mejor en los motores de explosión convencionales. Estos ésteres metílicos son los que forman el biodiesel. En la Figura 47 se muestra un esquema simplificado del proceso de elaboración del biodiesel.

PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL



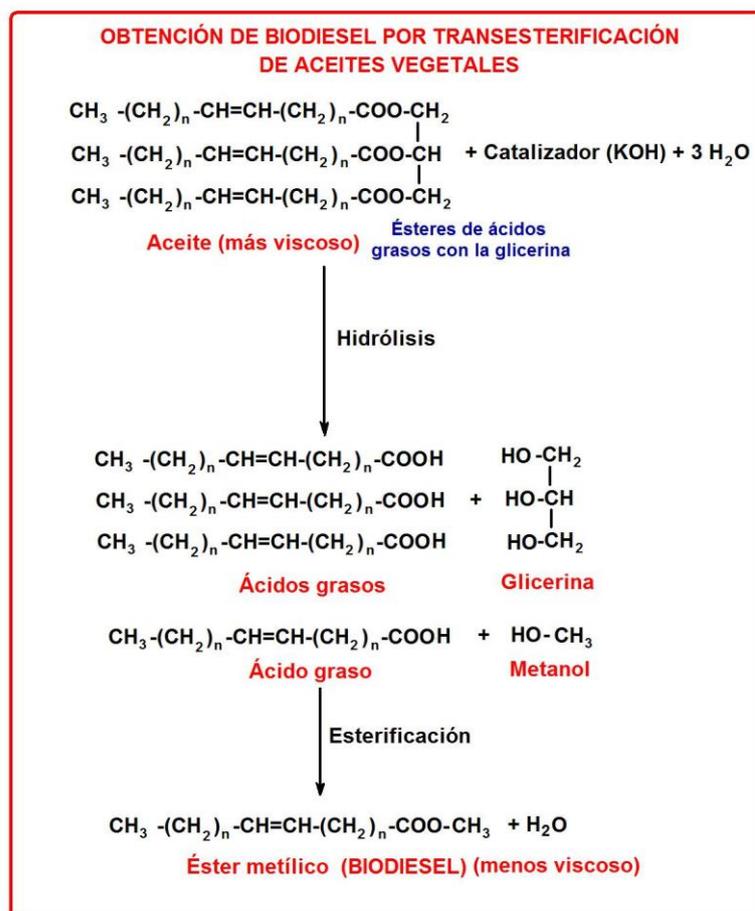


Figura 47. Esquema simplificado del proceso de fabricación de biodiesel.

Por tratamiento de 1.05 Ton de aceite vegetal con 0.11 Ton de alcohol metílico, se puede obtener una tonelada de éster metílico (biodiesel), más unos residuos formados por 0.1 Ton de glicerina y 23 kg de ácidos grasos.

A partir del aceite de semilla de colza se obtiene así el éster metílico de la colza, al que se atribuye un potencial para el futuro en la Unión Europea debido a que es posible su cultivo en zonas agrícolas abandonadas. En Francia se proyecta una planta industrial capaz de procesar 100000 toneladas al año. También ha mostrado utilidad como sustitutivo del gasóleo los aceites derivados de semillas de oleaginosas convencionales, como el girasol, la colza, la soja o la borraja, que pueden cultivarse según las características del suelo, el clima, el entorno económico y las tradiciones y como cultivos agrícolas de la zona donde se pretendan cultivar. En el momento actual se investiga sobre la posible utilización de unas trescientas especies vegetales que ofrecen posibilidades de producción de aceites vegetales y que se podrían cultivar en cualquier tipo de terreno. Los aceites usados no se producen en cantidades tan elevadas como para considerar su contribución a generar carburantes como significativa, pero su uso en tal aplicación hace que su impacto contaminante se reduzca drásticamente.

En cuanto al girasol, en la zona mediterránea la producción media puede alcanzar la cifra de 900 kg de semilla por hectárea, con un rendimiento en aceite del 44%. Sometido este aceite a un proceso de transesterificación (en este proceso se sustituye la glicerina, que forma los ésteres iniciales con ácidos grasos en los aceites vegetales originales, por metanol y etanol, con lo que se consiguen los ésteres metílico y etílico de dichos ácidos, que son los que componen los biogásóleos), se obtiene un litro de biodiesel por cada litro de aceite, lo que lleva a una cifra media (900×0.44) de unos 400 litros de biogásóleo por hectárea. Como se supone que las tareas agrícolas necesarias para cosechar la semilla de girasol se realizan con tractores y maquinaria movidos por biodiesel, y, se ha calculado que el gasto en

estas tareas puede alcanzar los 75 litros por Ha, la producción neta media se queda en unos 325 litros por Ha.

• Producción mundial de biodiésel

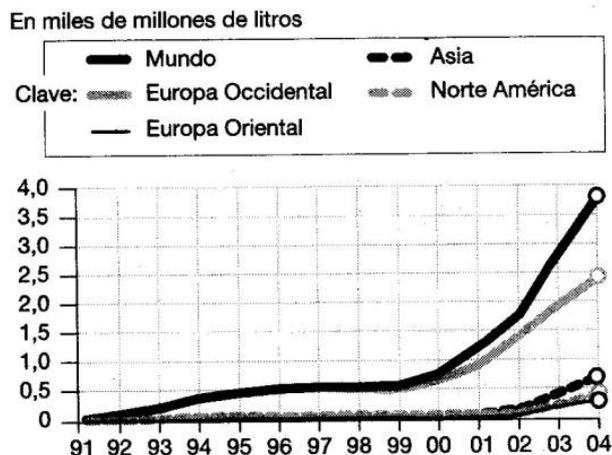


Figura 48. Evolución de la producción de biodiesel en diferentes partes del mundo en los últimos años.

Se suelen utilizar los aceites vegetales mezclados al 30% con gasóleo. Otras fuentes de aceites vegetales son el aceite de coco (copra), que se utiliza para mover camiones y tractores en Filipinas; los aceite de palma y de ricino que se extraen en Brasil.

En la Figura 48 se muestra la evolución de la producción de biodiesel en diferentes continentes y en el mundo en los últimos años.

En España, el IDAE ha hecho estimaciones según las cuales se pretende que los biocarburantes (incluyendo el bioetanol) lleguen a cubrir el 6 % del consumo energético en 2010. También existen proyectos conjuntos entre empresas alemanas y españolas para desarrollar una red de plantas de producción de biocarburantes. Según esta propuesta, en Madrid se instalaría a partir de 2006 una planta capaz de llegar a las 50000 toneladas anuales, que produciría biodiesel a partir de grasas animales y de aceites vegetales. Los combustibles resultantes de los tratamientos se destinarían al consumo de vehículos de transporte público.

En Andalucía una fuente importante de biocombustible lo constituye los denominados alpechines, que es un subproducto de la elaboración de aceite de oliva, que antes daban lugar a una contaminación medioambiental importante y que han pasado a ser una fuente de energía a tener en cuenta. De este modo se ofrece una oportunidad a las zonas agrícolas que están en trance de abandono como consecuencia de la política agrícola de la UE, para que dediquen sus tierras a cultivos energéticos que reduzcan la dependencia energética y contribuyan a la disminución del contenido de CO₂ en la atmósfera.

En la Unión Europea se alcanzó una producción, expresada en términos de energía primaria, de unas 1200 ktep de biodiesel. Alemania fue el máximo productor con 640000 toneladas, por 320000 de Francia, 250000 de Italia, 35000 de Dinamarca, 30000 de Austria y 10000 en el Reino Unido. Actualmente hay en España seis plantas de elaboración de biodiesel en fase de producción. Dos con capacidad de 6000 toneladas al año funcionan en Cataluña. Hay otra con una capacidad de 20000 toneladas año en el País Vasco y otra de 40000 toneladas en Castilla-La Mancha. También existe una con capacidad de producción de 5000 ton año en Madrid y otra de 4000 ton en Asturias.

El biodiesel puede ser obtenido, también, a partir del aceite de palma. La gran demanda de este nuevo tipo de combustible, ha dado lugar a problemas ecológicos graves, derivados del hecho de que, con el fin de conseguir grandes plantaciones de palma, se han roturado extensiones considerables de selvas, en Borneo y en el Amazonas. Mediante estudios, cuyos resultados se han publicado

recientemente, se ha llegado a determinar, que para compensar del CO₂ que incorporaban las zonas selváticas desaparecidas, sería necesario utilizar el biodiesel obtenido, durante, hasta trescientos años. Asimismo, el cultivo de colza, soja, etc., con el fin de obtener biocombustibles, ha dado lugar a una subida de los precios de los piensos y de los alimentos. Por estas razones, grupos ecologistas, comienzan a poner en duda las supuestas ventajas del biodiesel, a la hora de paliar el incremento de la concentración del CO₂ en la atmósfera.

Puede afirmarse, que los biocarburantes presentan una serie de ventajas, entre las que se pueden mencionar las siguientes:

Ofrecen nuevas actividades al sector agrícola.

Permiten mantener la actividad de sectores industriales relacionados con la producción de productos agrícolas, como las industrias de fertilizantes, maquinaria agrícola, o producción de semillas.

Crean puestos de trabajo en el sector agrario y en industrias relacionadas con el mismo.

Reducen el ritmo de emisiones de CO₂.

Reducen las emisiones de Pb de las gasolinas y de otros productos tóxicos, así como de derivados del azufre.

Reducen parte de la dependencia energética externa, al ser sustitutivos de los hidrocarburos.

Energía a partir de la combustión de Residuos Sólidos Urbanos (RSU)

Las grandes cantidades de basura que se generan en centros habitados, a las que se da el nombre de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) suelen destinarse a vertederos la mayor parte y una fracción menor a la incineración. Hoy en día pueden constituir una fuente de energía apreciable, que se puede convertir en electricidad y/o en calor para calefacción y agua caliente.

Según datos provenientes de la Oficina de Estadística Comunitaria (Eurostat), cada habitante de la UE generó, por término medio, 534 kg de basuras a lo largo del año 2003, bastantes más que los 457 kg producidos en 1995. El 48.9% de estos desechos fueron depositados en vertederos (frente al 64.3% en 1995) y el 17.2% incinerados (frente al 14.9% en 1995). Los países de la UE más avanzados en la utilización de métodos de incineración son Holanda, Francia, Alemania, Dinamarca, Bélgica, Italia y el Reino Unido.

Cada español generó 609 kg de desechos en 2003, frente a los 463 kg en 1995. Del total, el 59.3% fue descargado en vertederos y un 6.6% incinerado (frente al 66.2% y el 5.1%, respectivamente, en 1995).

Estos residuos o desechos urbanos llevan una elevada proporción de plásticos contaminantes, metales y toxinas que pueden dar lugar a serios problemas medioambientales si no se regulan adecuadamente las descargas en vertederos y las plantas de combustión de RSU con el fin de mantener las emisiones de gases dentro de límites aceptables. Por otra parte, cada vez queda menos espacio para vertederos y se agotan las materias primas, por lo que se recurre al reciclado y recuperación de materiales y a la incineración no solo con el fin de aprovechar la energía contenida, sino también para disminuir el espacio que ocupan los residuos.

El tratamiento de RSU en dos plantas existentes en Madrid generó en 2004 750000 MWh de energía limpia suficientes para satisfacer el consumo del 17% de su población (unos 100000 hogares).

10. IMPACTOS MEDIOAMBIENTALES DEL USO DE LA BIOMASA

Como se ha repetido anteriormente la combustión de biomasa libera la misma cantidad de CO₂ que fue eliminada de la atmósfera por el proceso fotosintético, por lo que al proceso en conjunto se le considera neutro con lo que respecto al balance de CO₂ atmosférico. Si la combustión es incompleta se puede generar CO en mayor proporción que cuando se quema carbón. Se calcula, por ejemplo, que una central térmica de 10 MW que utiliza carbón como combustible, viene a quemar unas 38000 toneladas al año de este combustible, dando lugar a la emisión de 112000 toneladas de CO₂ al año y a 1520 de SO₂. Una central térmica de 10 MW que utilice biomasa como combustible, quemaría 76000 toneladas al año de biomasa y generaría el mismo CO₂ que fue eliminado un tiempo corto antes.

Óxidos de azufre, SO_x, se producen en la combustión de biomasa especialmente cuando se queman cortezas en que se pueden generar hasta 1.5 kg de SO_x por tonelada. También se producen durante los procesos de pirólisis y fermentación y en la combustión de residuos agrícolas. En la digestión anaeróbica se genera SH₂.

En la combustión directa de la biomasa no se suelen alcanzar temperaturas tan elevadas como para facilitar la formación de NO_x en cantidades tan elevadas como las producidas en la combustión del carbón o de las gasolinas. Por término medio pueden producirse unos 5 kg de óxidos de nitrógeno por tonelada de biomasa quemada. También se emiten partículas sólidas en suspensión en cantidades que varían entre 12.5 y 15 kg por tonelada quemada. Esta emisión se puede minimizar recurriendo a filtros, ciclones y precipitadores electrostáticos.

Otras emisiones gaseosas pueden tener lugar en la combustión de RSU, en los cuales existen plásticos y compuestos con cloro que pueden generar dioxinas y ácido clorhídrico. En la combustión de la madera se producen benzopireno e hidrocarburos aromáticos policíclicos, que son cancerígenos. En general, se debe prestar atención en el diseño, la construcción y operación de quemadores con el fin de llegar a combustión completa y evitar la emisión de productos tóxicos a la atmósfera.

En los residuos sólidos puede haber metales pesados, como el Pb o el Cd, lo que exige un tratamiento de las cenizas.

Residuos líquidos se producen en los procesos de gasificación y pirólisis. Son sustancias como el ácido acético, fenol y aceites insolubles en agua como el tolueno, el benzopireno y una variedad de compuestos orgánicos no aromáticos, muchos de ellos cancerígenos. Para eliminar alquitranes de los efluentes se utilizan lavadores, lo que encarece el proceso. Se puede reducir la producción de alquitranes por medio de catalizadores.

Por último, hay que recordar que alguno de los métodos propuestos para tratar de disminuir la concentración de CO₂ en la atmósfera, como las forestaciones masivas, pueden tener efectos colaterales contraproducentes, como la generación de metano que se detecta en las proximidades de grandes masas forestales.

BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

Renewable Energy Resources, J. Twidell y T. Weir, E & FN, 1986.
Renewable Energy, B. Sorensen, 2^a Edición, Academic Press, 2000.