

⋮

---

# Energía de Biomasa



*Fotosíntesis. Biomasa.  
Conversión por microorganismos.  
Biogas. Etanol. Biodiesel.*

Leonor Carrillo

---

Edición del autor, S.S. Jujuy, 2004

Carrillo, Leonor  
Energía de biomasa. – 1° ed. – S.S. Jujuy : el autor, 2004.  
82 p. ; 28x22 cm.

ISBN 987-43-8679-7

1. Energía-Reciclado de Basura. I. Título  
CDD 534.0363 722

# Contenido

➤	Conversión biológica de la energía solar. Fotosíntesis.	5
➤	Aprovechamiento de la biomasa. Conversión microbiana.	16
➤	Metanogénesis. Producción de biogas.	20
➤	Digestores anaeròbicos. Digestores rurales.	27
➤	Digestores de residuos industriales.	47
➤	Digestores de residuos urbanos.	55
➤	Producción de etanol.	65
➤	Biodiesel y biofuel. Hidrocarburos vegetales.	71



# FOTOSÍNTESIS

*Conversión biológica de la energía solar. Características bioenergéticas de la radiación solar. Captación de la energía luminosa. Reducción del dióxido de carbono. Ciclo de Calvin. Ciclo de Hatch y Slack. El gas carbónico en la atmósfera.*

## Conversión biológica de la energía solar

La energía solar que llega la biósfera ( $\sim 3 \cdot 10^{24}$  J/año) es captada y convertida en biomasa por los ecosistemas terrestre y acuático con una eficiencia del 0,1% ( $\sim 3 \cdot 10^{21}$  J/año) almacenándose en 200 Gt (peso seco) de material vegetal por año a expensas de la energía solar, pues  $\sim 30$  GJ corresponde a la síntesis de  $\sim 2$  toneladas biomasa (7).

Cuando se compara la producción anual de biomasa con las reservas energéticas ya almacenadas en la propia biomasa y en los combustibles fósiles, resulta que dicha producción anual de biomasa es sólo un orden de magnitud menor que las mismas.

Por otra parte, la energía solar que fija el reino vegetal en su conjunto es 10 veces mayor que la energía consumida como tal por la humanidad y unas 200 veces mayor que la energía consumida como alimento.

Aunque el ecosistema acuático cubre aproximadamente  $\frac{2}{3}$  de la superficie de la Tierra, produce aproximadamente la misma cantidad de biomasa que el terrestre, debido a que éste presenta una eficiencia que al menos duplica la del marino.

Teniendo en cuenta que la Tierra, con un diámetro del orden de  $10^4$  km, presenta una superficie de unas  $5 \cdot 10^{10}$  ha, se puede calcular que el rendimiento medio de biomasa seca es de 4 t/ha.año, correspondiendo al menos 6 t/ha.año al ecosistema terrestre y 3 t/ha.año al acuático (6). Cabe mencionar que el rendimiento que puede alcanzar el cultivo de caña de azúcar es 60 t/ha.año, el del maíz 50 t/ha.año, el de los bosque entre 10 y 40 t/ha.año, el del camalote 150 t/ha.año, el de las algas entre 50 y 200 t/ha.año (7).

**Cuadro 1.** Producción de biomasa (7).

Ecosistema terrestre	Bosques 70% Praderas y sabanas 20% Cultivos agrícolas 10%
Ecosistema marino	Fitoplancton 90% Macrófitas 10%

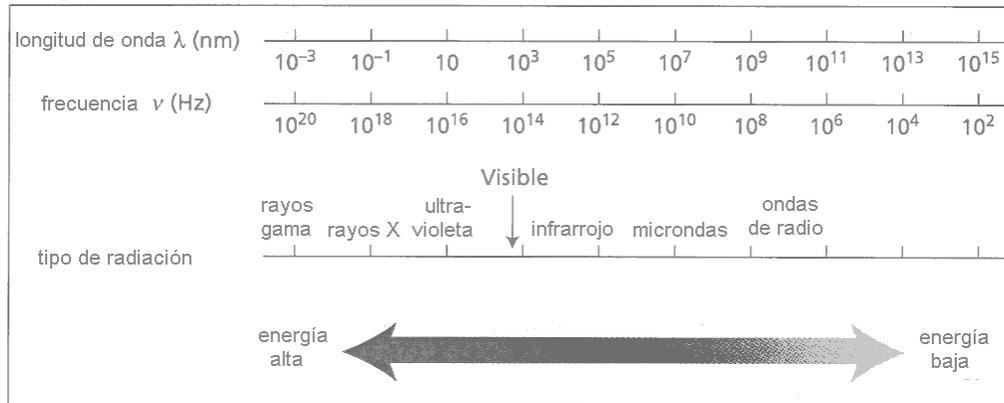
El fitoplancton o plancton que puede fotosintetizar, está constituido en su gran mayoría por microorganismos (seres pequeños que se miden en micrómetros) con un diámetro no menor de 20  $\mu\text{m}$ , principalmente diatomeas, cocolitofóridos y dinoflagelados aunque también se encuentran cianobacterias (1).

## Características bioenergéticas de la radiación solar

Debido a la distancia que la separa del Sol, la Tierra recibe aproximadamente  $10^9$  de la energía irradiada por el mismo. Sólo parte de la energía solar que llega a las altas capas de la atmósfera terrestre alcanza la biósfera, unos  $10^{17}$  W, pues el resto es absorbido o se dispersa y refleja haciendo que nuestro planeta aparezca brillante a los ojos de un observador exterior. Esta cantidad de energía que llega es una diez mil veces la que actualmente consume la humanidad (7).

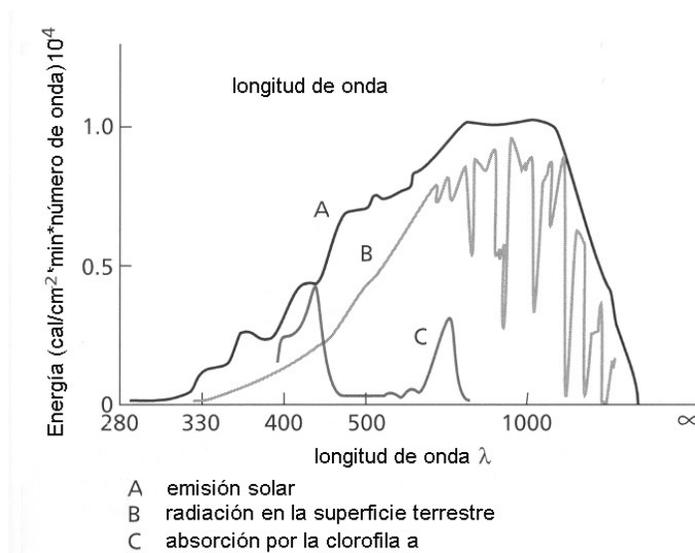
La fotobiología comprende una franja estrechísima de 300 a 1100 nanómetros, de la que dependen la visión, las taxias, los tropismos, la dormición, la floración, la maduración, y sobre todo la fotosíntesis que es la conversión biológica de la energía solar en energía química. Estos procesos no pueden tener lugar en la región ultravioleta o la del infrarrojo lejano, porque las radiaciones de estas longitudes de onda no son apropiadas para las reacciones fotobiológicas.

Los límites energéticos de la fotobiología se sitúan más o menos, entre 100 y 400 kJ/mol de fotones, siendo las radiaciones de longitud de onda inferior a 300 nm, es decir con una energía superior a 400 kJ/mol, incompatibles con la vida porque pueden romper enlaces en las macromoléculas biológicas, tales como ácidos nucleicos y proteínas.



**Figura 1.** Espectro electromagnético (15)

La distribución del espectro solar en la biosfera comprende un 51% de radiación infrarroja, un 40% visible y un 9% ultravioleta. El 83% de esa radiación solar cae dentro de los márgenes de la fotobiología, con un máximo hacia 575 nm (~200 kJ/mol) (3).



**Figura 2.** Espectro solar y su relación con el espectro de absorción de la clorofila (15).

## Captación de la energía luminosa

Las células no pueden emplear o almacenar la energía química directamente, sino que la tienen que convertir en energía química, más fácil de utilizar. Las reacciones bioenergéticas pueden explicarse en términos de transferencia de electrones entre moléculas (9).

Existen dos tipos de fotosíntesis, una llamada oxigénica que es llevada a cabo por las plantas, algas y cianobacterias y el agente reductor es el agua; otra anoxigénica que es cumplida por bacterias donde diversos compuestos orgánicos u inorgánicos actúan como donadores de electrones, según la especie. Estas sustancias relativamente infrecuentes determinaron que las bacterias fotosintéticas anaeróbicas se desarrollen solamente en fuentes sulfúreas, fondos lacustres y ambientes similares (10).

La fotosíntesis se inicia con la captación de la luz por los pigmentos fotosintéticos accesorios y su conversión en energía electrónica por los pigmentos clorofílicos de los centros de reacción. Luego la energía electrónica se transforma en energía química y queda almacenada como tal. En la etapa siguiente, de naturaleza no fotoquímica aunque la luz es necesaria para activar determinadas enzimas, la energía química almacenada se utiliza para la reducción del dióxido de carbono y la consiguiente síntesis de carbohidratos (7).

La unidad fotosintética básica está constituida por moléculas de clorofilas y otros pigmentos que actúan como antenas y por clorofila a especializada. Existen distintos tipos de clorofila pero todos tienen un anillo tetrapirrólico cíclico (porfirina) con un átomo de magnesio en el centro (13).

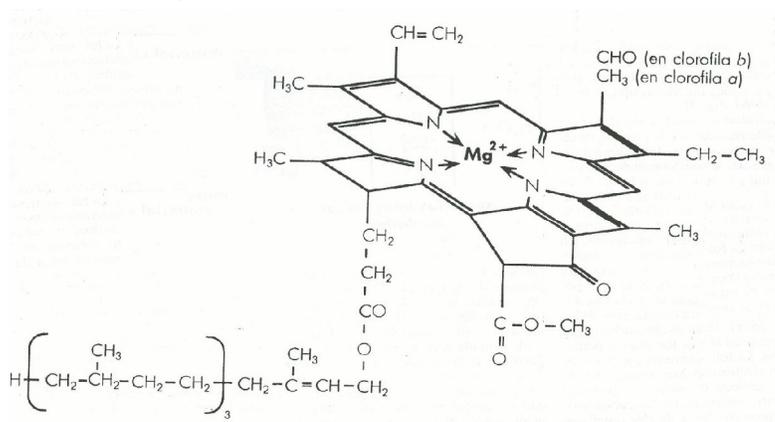


Figura 3. Molécula de clorofila (15).

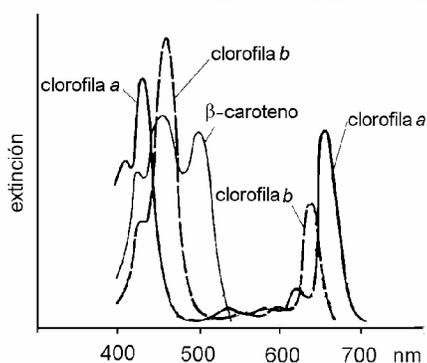


Figura 4. Espectro de clorofilas y caroteno (15).

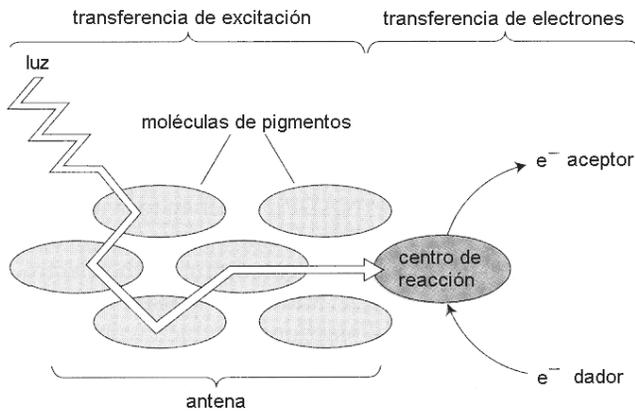
Las clorofilas *a*, *b* y *d* poseen una larga cadena hidrófoba de fitol que les permite anclarse en las membranas biológicas, en tanto que la clorofila *c* carece de este resto hidrocarbonado. Las clorofilas tienen un mínimo de absorción allí donde es mayor la intensidad de la luz solar, o sea en el verde y el verde azulado. El espectro de absorción de la clorofila *a* es modificado por la vecindad de otras moléculas, sobre todo la de proteínas. El espectro *in vitro* difiere del *in vivo* (15).

Las distintas formas de clorofila actúan en su mayoría como pigmentos antena, si bien existen moléculas especializadas de clorofila *a*, ligeramente modificadas, que intervienen como pigmentos fotoactivos de plantas y algas: P680 en el fotosistema II, P700 en el fotosistema I. En las bacterias se encuentran bacterioclorofilas de tipo *a* y *b*, entre ellas las moléculas especializadas de

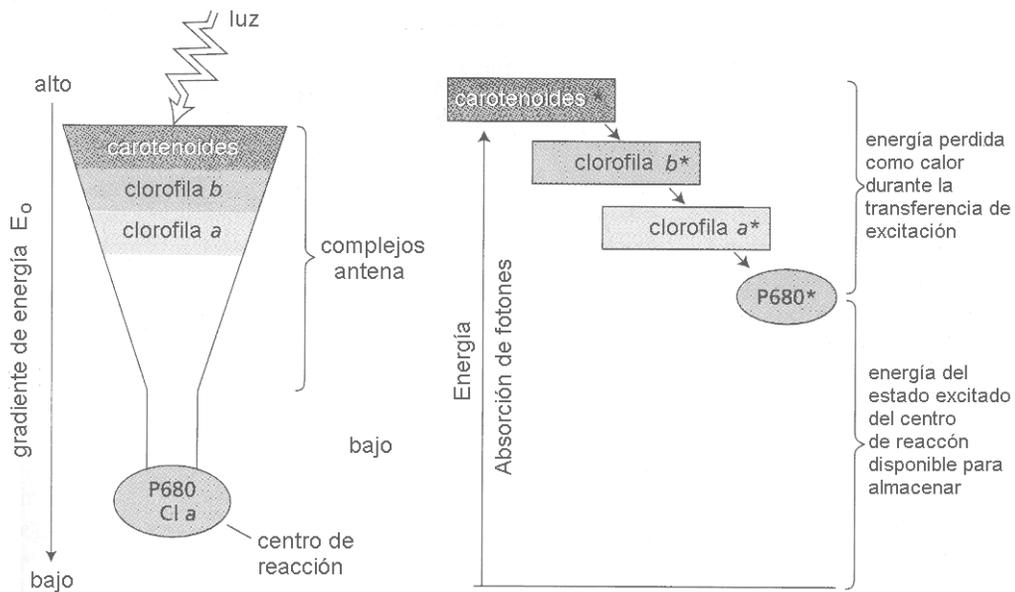
bacterioclorofila *a* en los centros de reacción: P840 en las bacterias verdes y P870 en las purpúreas (3).

Los otros pigmentos que forman parte de las antenas fotosintéticas realizan exclusivamente funciones de fotorrecepción. Entre ellos se encuentran las feofitinas (clorofilas sin magnesio) y ficobilinas que son derivados tetrapirrólicos de cadena cerrada

abierta, además de los carotenoides que son isoprenoides poliénicos hidrofóbicos (carotenos y xantófilas). No todos los pigmentos están en cualquier organismo fotosintético, por ejemplo las ficobilinas son propias de algas y cianobacterias (8).



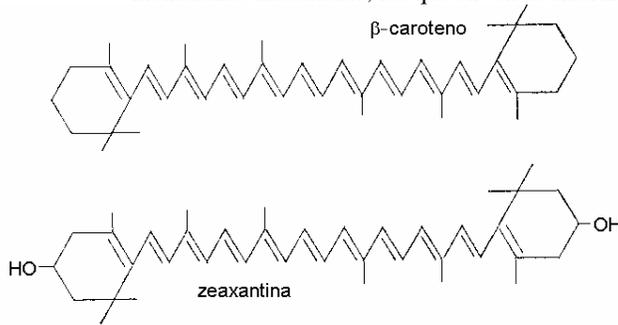
**Figura 5.** Antena de pigmentos (15).



**Figura 6.** Transferencia de energía en la antena de pigmentos (15).

Los pigmentos fotosintéticos se encuentran organizados, estructural y funcionalmente, en las membranas biológicas que en las bacterias verdes y purpúreas se disponen en estructuras conocidas como clorosomas y cromatóforos, respectivamente. En los organismos que realizan la fotosíntesis oxigénica, los pigmentos están localizados en unas vesículas membranosas aplastadas y cerradas llamadas tilacoides. La disposición celular de los tilacoides en cianobacterias es variable, pero en las algas y las plantas superiores se distribuyen de manera ordenada formando pilas (granas), que a su vez se conectan entre sí por medio de lamelas, dentro del estroma de los orgánulos citoplasmáticos denominados cloroplastos (12).

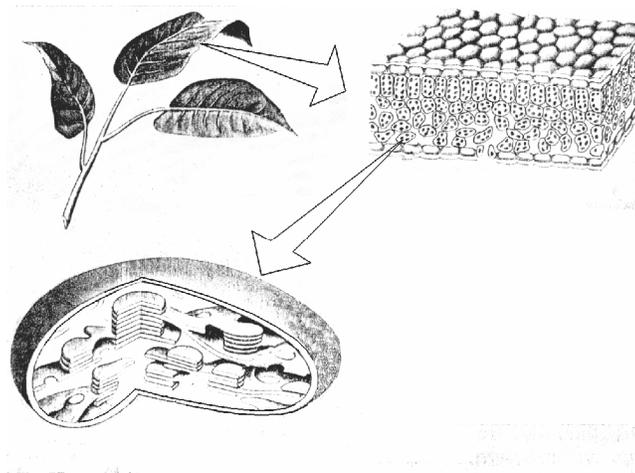
Estos pigmentos forman asociaciones muy estrechas con proteínas o polipéptidos en las membranas tilacoidales, los que sirven de matriz estabilizadora (15).



**Figura 7.** Carotenos y xantófilas (15).

Varios iones orgánicos e inorgánicos (manganeso, cloruro, calcio, hierro, bicarbonato) están implicados en la catálisis de la transferencia de electrones, en el mantenimiento de la estructura proteica o en la regulación de la actividad de los fotosistemas

(11). Se encuentran tres tipos de complejos de la clorofila: uno es el complejo colector de luz donde se integran la mayoría de las antenas de clorofilas y pigmentos accesorios; los otros son los fotosistemas I y II donde tiene lugar estrictamente la fotosíntesis. Ambos fotosistemas se conectan funcionalmente entre sí mediante una serie de transportadores de electrones y por el complejo de citocromos hidrofóbicos *b<sub>6</sub>f*, asimismo embebido en las membranas tilacoidales.

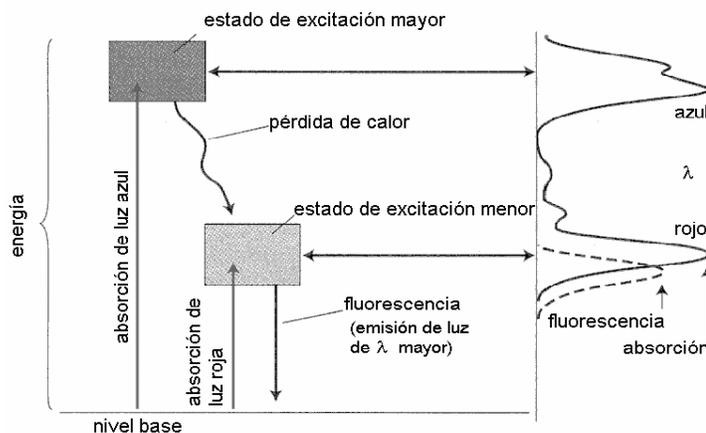


**Figura 8.** Cloroplastos mostrando los tilacoides (15).

Los pigmentos de la antena se excitan por los fotones absorbidos y transfieren la energía de excitación a otras moléculas vecinas en algunos picosegundos. De esta forma se canaliza la energía luminosa hacia la clorofila especializada del centro de reacción, que realmente realiza la conversión de la energía luminosa en energía química. La clorofila *a* del centro de reacción se excita por la energía absorbida y aumenta

extraordinariamente su capacidad reductora o de donación de electrones. De hecho, el potencial estándar del par redox correspondiente adopta valores mucho más negativos tras

la excitación de la clorofila, pasando de +1,0 V en la oscuridad a -0,8 V en la luz en el caso de P680, y de +0,5 V a -1,3 V en el de P700 (11).



**Figura 9.** Excitación de la molécula de clorofila (2).

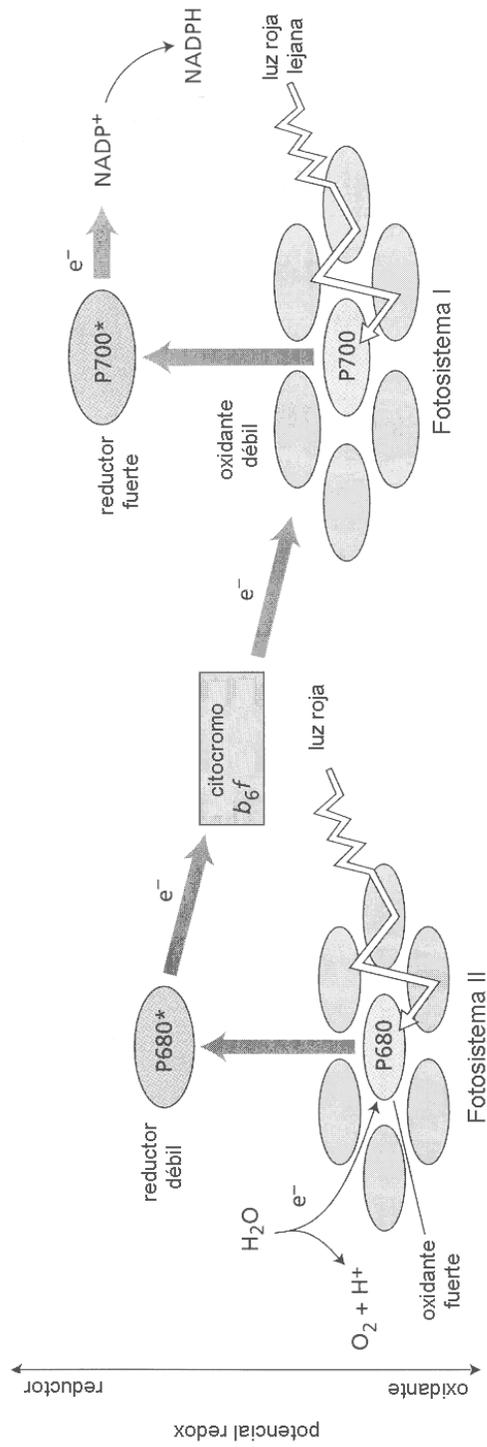


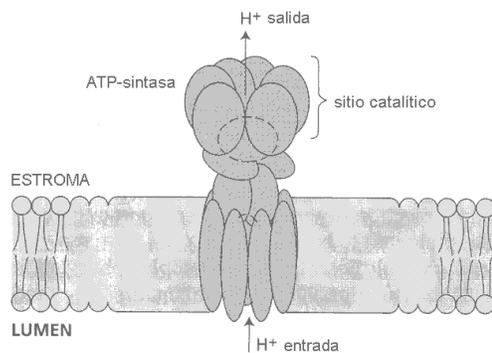
Figura 10. Esquema de los fotosistemas (15).

La molécula de clorofila absorbe un fotón y pasa a un estado excitado con mayor energía. La absorción de la luz azul excita a un nivel superior que el alcanzado con la luz roja. La clorofila es muy inestable en el estado excitado de mayor energía y rápidamente cede algo de su energía al ambiente en forma de calor. Entra luego en un estado energético inferior donde se mantiene algunos nanosegundos y puede iniciar el proceso fotoquímico mediante reacciones extremadamente rápidas. Alternativamente puede emitir un fotón en un proceso de fluorescencia dentro de la región roja del espectro, o retornar al estado inicial convirtiendo la energía de excitación en calor o transferirla a otra molécula de pigmento (15).

La primera etapa del proceso de conversión y almacenamiento de la energía radiante es común a los distintos tipos de organismos fotosintéticos, estando promovida por las moléculas clorofílicas especializadas de los centros de reacción, cada una de las cuales se encuentra estrechamente asociada a un aceptor y a un donador primario de electrones. La molécula de clorofila se excita por la luz y cede uno de sus electrones más externos al aceptor, quedando la clorofina oxidada y el aceptor reducido. La clorofila oxidada actúa, por su parte, como un fuerte agente oxidante que capta un electrón del donador. Éste se oxida y la clorofila recupera su estado original. El donador oxidado y el aceptor reducido recuperan su estado original al interaccionar con los sistemas redox vecinos del aparato fotosintético. De esta manera se transfieren los electrones impulsados por la luz de un compuesto a otro a través de las denominadas cadenas de transporte fotosintético de electrones. Los componentes de estas cadenas suelen ser proteínas de origen hemínico (citocromos), átomos de cobre (plastocianina) o centros sulfoférricos (ferredoxina), así como feofitinas y quinonas, variando de unos organismos a otros en función del tipo de fotosíntesis que llevan a cabo (3).

En el caso de las plantas superiores, con la cadena fotosintética de transporte de electrones actúan en serie dos fotosistemas, cada uno con un centro clorofílico de reacción que promueve el salto del electrón en contra del gradiente, a expensas de la energía fotónica. En la fotosíntesis oxigénica, que implica la reducción de la ferredoxina con electrones procedentes del agua, la absorción de un fotón por el fotosistema I promueve la excitación de un electrón del P700 y su transferencia posterior a la ferredoxina a través de una serie de centros sulfoférricos que forman parte del propio fotosistema I. El déficit de electrones así creado se equilibra, tras la correspondiente excitación de P680, por el aporte continuo de electrones desde el fotosistema II (12).

Debido a la intervención del complejo de citocromos *b<sub>6</sub>f*, anclado en la membrana del tilacoide, que se reduce por las quinonas de la membrana y se oxida por la plastocianina libre en el interior del tilacoide, los electrones pueden fluir con rapidez (en milisegundos) desde el fotosistema II al fotosistema I. Finalmente el agua, que libera oxígeno al oxidarse, suministra los electrones necesarios para cubrir el déficit del fotosistema II.



**Figura 11.** Flujo de protones acoplado a la ATP sintasa en la membrana del tilacoide (15).

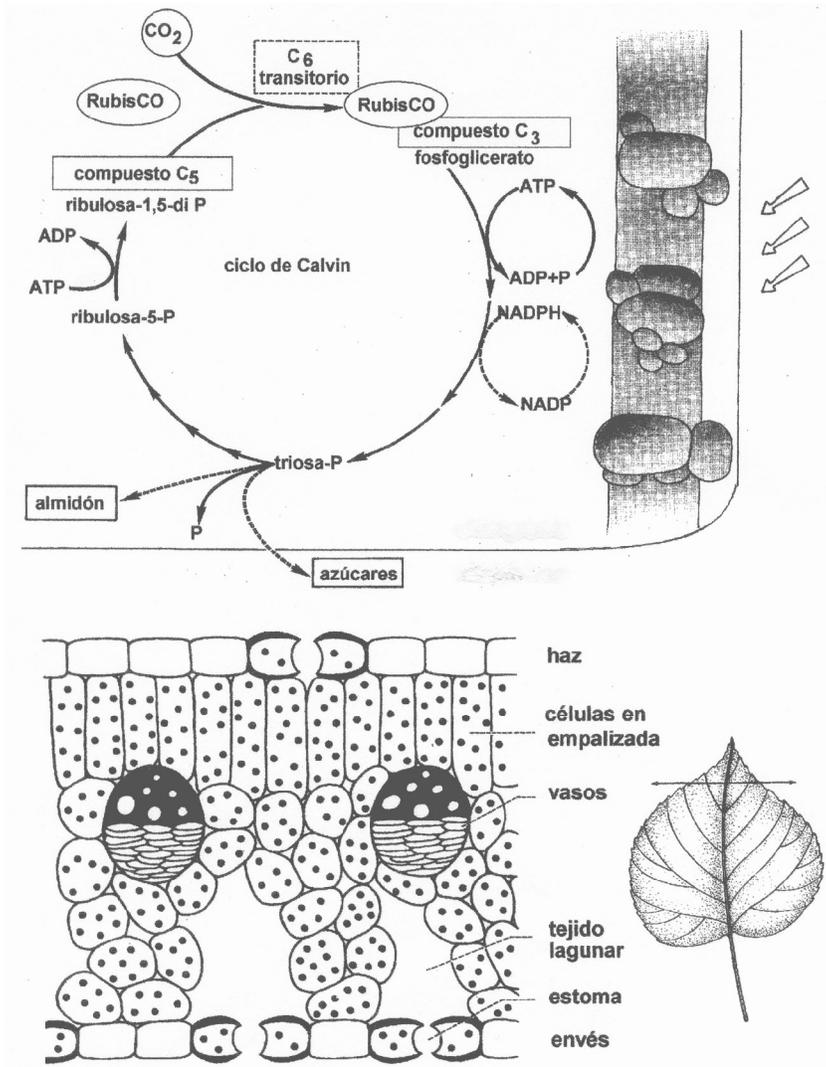
La molécula de agua se oxida:  $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{e}^- + 4\text{H}^+$ . La energía necesaria para la fotólisis, a pH 7, es  $\Delta G_o' = 479$  kJ por cada 2 moles de  $\text{H}_2\text{O}$ . Los fotones de luz roja de 700 nm son los de más larga longitud de onda que pueden promover el bombeo de electrones en fotosíntesis. Se

necesitan 2 fotones por electrón, es decir un total de 8 fotones (170 kJ/mol) para fotolizar 2 moléculas de agua y liberar una molécula de oxígeno (11). En las bacterias fotosintéticas el flujo de electrones es promovido por un único fotosistema (10).

Estrechamente acoplada al flujo de protones se encuentra la síntesis de adenosín-trifosfato (ATP) a partir de adenosín-difosfato y ortofosfato (Pi):  $\text{ADP} + \text{Pi} \rightarrow \text{ATP} + \text{H}_2\text{O}$ ; que al estar asimismo promovida por la luz se denomina fotofosforilación (11). El

fotosistema II produce la descomposición del agua en la membrana del tilacoide y la liberación de protones en el lumen del mismo. La plastoquinona reducida y la plastocianina transfieren electrones al complejo de citocromos y al fotosistema I, respectivamente. El fotosistema I reduce el NADP a NADPH en el estroma del cloroplasto, mediante la acción de la ferredoxina y una flavoproteína. Los protones también son transportados al lumen por acción del complejo de citocromos y luego difunden hacia la bomba de protones acoplada a la enzima ATP-sintasa que usa el gradiente de energía electroquímica para sintetizar ATP en el estroma del cloroplasto (15).

## Reducción del dióxido de carbono



**Figura 12.** Ciclo de Calvin y corte de hoja  $C_3$  (12).

**Ciclo de Calvin.** La fotosíntesis que realizan las células vegetales produce en la primera fase poder reductor (NADPH) y energía química de enlace fosfato (ATP), los que se utilizan en la segunda etapa para reducir el dióxido de carbono (12).

La ruta de asimilación del  $CO_2$  que tiene lugar en el estroma de los cloroplastos en plantas y algas, y en el citoplasma de los organismos procarióticos, se conoce como ciclo de Calvin y comprende tres fases bien diferenciadas.

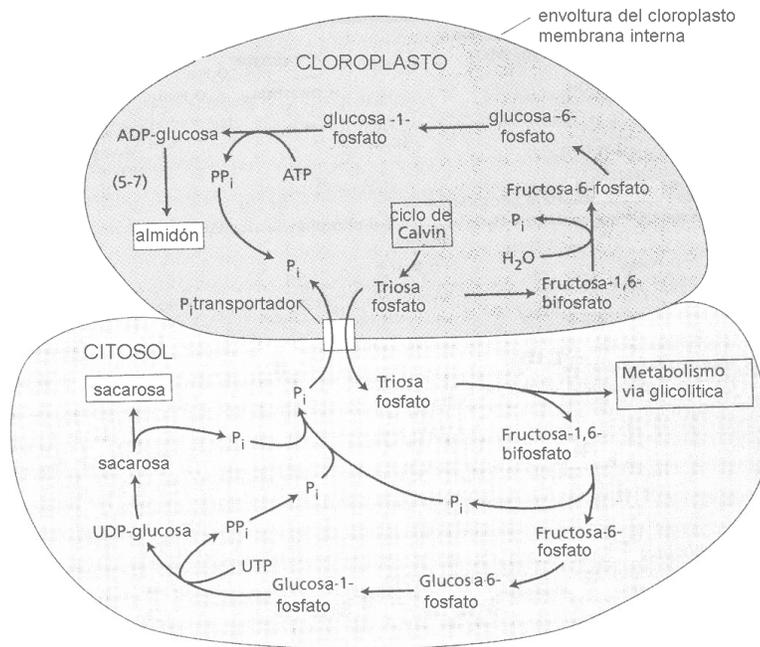
La primera fase, carboxilativa, corresponde a la incorporación de una molécula de  $\text{CO}_2$  en otra de ribulosa-1,5-difosfato (una pentosa) formando un compuesto de transición de seis átomos de carbono que se hidroliza rápidamente en dos moléculas de 3-fosfoglicerato (una triosa). Esta reacción está catalizada por la enzima ribulosa-1,5-bifosfato carboxilasa / oxigenasa (RubisCO) que es una de las proteínas que más abunda en la biosfera.

La segunda etapa, reductiva, es la de la reducción del grupo carboxilo del fosfoglicerato a aldehído con el  $\text{H}^+$  donado por el NADPH dando gliceraldehído-3-fosfato. Esta reacción requiere la energía provista por el ATP, previa a la reducción catalizada por la enzima NADP-gliceraldehído-3-fosfato deshidrogenasa.

La tercera etapa, regenerativa, tiene por misión recuperar la molécula de ribulosa-1,5-difosfato aceptora del  $\text{CO}_2$ . Por la acción secuencial de una serie de enzimas que catalizan en total diez reacciones de interconversiones de azúcares, cinco moléculas de la triosa-fosfato producida en la fase reductiva, se reorganizan para dar lugar finalmente a tres moléculas de ribulosa-1,5-difosfato, cerrando el ciclo. La última reacción está catalizada por la fosfo-ribulosa-quinasa que fosforila la ribulosa-5-fosfato con una molécula de ATP (12).

En resumen, las tres fases del ciclo reductivo de las pentosa-fosfato o ciclo de Calvin conducen a la formación neta de una molécula de gliceraldehído-3-fosfato a partir de tres moléculas de  $\text{CO}_2$ , para lo cual se requiere el aporte de un total de seis moléculas de NADPH y nueve de ATP.

La gran mayoría de las plantas (musgos, helechos, árboles, trigo, cebada, remolacha, papa, tabaco y muchas otras) siguen la vía normal  $\text{C}_5 + \text{C}_1 = 2 \text{C}_3$ , así como las bacterias fotosintéticas, cianobacterias y algas (12).



**Figura 13.** Integración del ciclo de Calvin con la síntesis de almidón y sacarosa (15).

**Ciclo de Hatch y Slack.** Aunque el ciclo de Calvin es la ruta única para la asimilación fotosintética del  $\text{CO}_2$ , algunas especies como el maíz, la caña de azúcar y otras gramíneas originarias de climas cálidos, utilizan la ruta auxiliar  $\text{C}_3 + \text{C}_1 = \text{C}_4$  en la que el  $\text{CO}_2$  se incorpora al fosfoenol piruvato para dar oxalacetato, un compuesto de cuatro carbonos que se reduce a malato o aspartato (según la especie). Éste pasa de las células del mesófilo a las de la vaina del haz vascular, donde se descarboxila y libera el

CO<sub>2</sub> previamente fijado. De este modo aumenta la concentración de CO<sub>2</sub> en los cloroplastos de las células de la vaina, favoreciendo la actividad carboxilasa de la enzima RubisCO en comparación su actividad oxigenasa y acrecentando la eficiencia de la fijación de CO<sub>2</sub> por la ruta del ciclo de Calvin (12). El ácido de tres carbonos remanente luego de la descarboxilación (piruvato o alanina), regresa a la célula del mesófilo donde se regenera el fosfoenol piruvato (15).

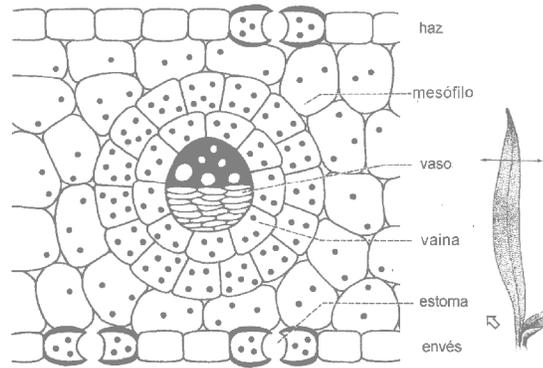
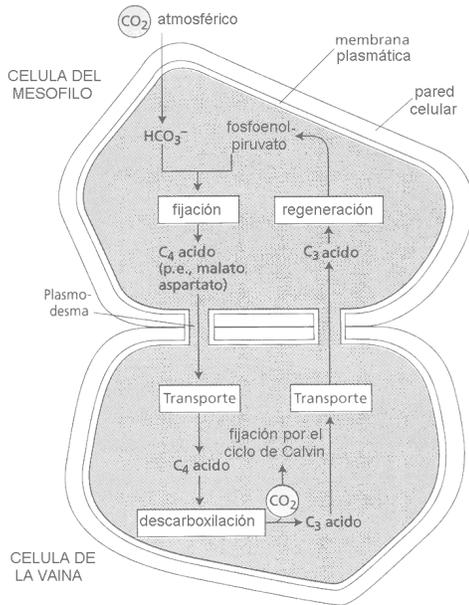


Figura 14. Asimilación de CO<sub>2</sub> en plantas C<sub>4</sub> (12,15).

Hay tres variantes del ciclo fotosintético C<sub>4</sub> que difieren principalmente en la naturaleza del ácido con cuatro carbonos transportado a las células de la vaina, y en el ácido de tres carbonos que retorna al mesófilo, así como en la naturaleza de la enzima que cataliza la descarboxilación (15).

**Plantas suculentas.** En estas plantas (CAM), la difusión del CO<sub>2</sub> hacia los tejidos es nocturna. El primer compuesto producido tiene cuatro átomos de carbono y a la luz del día siguiente, ocurre la segunda etapa de las reacciones fotosintéticas que precisa la enzima RubisCO (12).

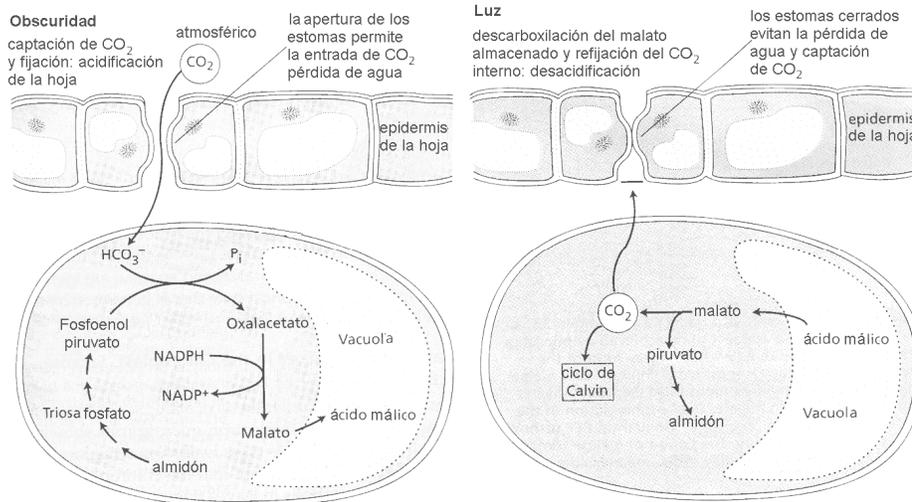


Figura 15. Fotosíntesis en las plantas suculentas (15).

## El gas carbónico en la atmósfera

El dióxido de carbono del aire, presente a una concentración del 0,03% (300 mmol por mol de aire) es la única fuente de carbono para las plantas. Los vegetales lo tienen que captar e incorporar a sus tejidos. El paso de este gas a las plantas tiene lugar por difusión desde el medio en el que está más concentrado, el aire, hacia el medio menos concentrado, el líquido intracelular, donde se disuelve (8). La biomasa vegetal seca tiene un contenido en carbono bastante estable, que varía entre 45 al 50% según las especies, y que constituye el esqueleto de todas las sustancias orgánicas de las células. Esta variación es de hecho, mucho menor que la de otros elementos como nitrógeno, fósforo y potasio, cuyos valores pueden variar en un factor cinco según la especie y el abono del suelo.

Así la vegetación es por sí misma una reserva de carbono de igual importancia que la reserva atmosférica: 2000 Gt (500 Gt en la biomasa y 1500 Gt en el suelo) frente a 700 Gt en la atmósfera (8).

La intensidad del impacto humano sobre la atmósfera proviene del hecho que esta reserva es muy pequeña y fácilmente modificable. Una duplicación del nivel de CO<sub>2</sub> conducirá a un aumento medio del 40% del contenido de materia seca en las plantas C<sub>3</sub>, y del 15% en las C<sub>4</sub>.

El nivel de CO<sub>2</sub> se estabiliza por el equilibrio de los intercambios que se producen entre la atmósfera, el océano y las rocas carbonatadas (calcáreas, etc.). El ritmo de intercambio de carbono entre la atmósfera y el océano, y la atmósfera y la biósfera terrestre son cada uno del orden de 70 Gt de carbono al año (4). Una molécula de CO<sub>2</sub> permanece en la atmósfera durante unos siete años, unos ochocientos años en el océano y en promedio unos cuarenta años en la biósfera terrestre (8).

La principal fuente antrópica de gas carbónico proviene del consumo de combustibles fósiles. Este ritmo de emisión es tan elevado, entre 5 y 6 Gt al año que la biósfera no puede compensar este vertido. Otra fuente importante de CO<sub>2</sub> se debe a la destrucción de los bosques a gran escala: unas 1,7 Gt C/año (14).

La biósfera terrestre actúa tanto a nivel de fuente de carbono como de trampa de carbono. Se estima que el aumento del gas carbónico atmosférico induce a un aumento de la productividad vegetal global, al estimular la fotosíntesis y la biósfera, pudiendo absorber alrededor del 20% (1,1 Gt C/año) de la emisión total de CO<sub>2</sub>, o sea un valor inferior al liberado por la deforestación. Los factores limitantes del crecimiento vegetal son la intensidad de la luz, la eficiencia en la utilización del agua y la disponibilidad de sales minerales en el suelo (5).

### Referencias

1. Balech E. Introducción al Fitoplancton Marino. EUDEBA, Buenos Aires, 1977
2. Campbell D, Hurry V, Clarke AK, Gustafsson P, Öquist G. Chlorophyll fluorescence analysis of cyanobacterial photosynthesis and acclimation. *Microbiology and Molecular Biology Reviews* 62(3): 667-683, 1998
3. De la Rosa MA, García Guerrero M, Losada M. Fotosíntesis: sol, agua, tierra y aire. *Mundo Científico* 138: 744-755, 1993
4. Falkowski PG, Barber RT, Smetacek V. Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production. *Science* 281: 200-206, 1998
5. Fan S, Gloor M, Mahlman J, Pacala S, Sarmiento J, Takahashi T, Tans P. A large terrestrial carbon sink in North America implied by atmospheric and oceanic carbon dioxide data and models. *Science* 282: 442-446, 1998
6. Field CB, Behrenfeld MJ, Randerson JT, Falkowski P. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science* 281: 237-240, 1998
7. García Guerrero M, Losada M. Conversión biológica de la energía solar. *Mundo Científico* 26: 616-630, 1983
8. Goudriaan J. El papel de la vegetación. *Mundo Científico* 126: 686-692, 1993
9. Govindjee, Coleman WJ. Cómo producen oxígeno las plantas. *Investigación y Ciencia* 163: 50-57, 1990
10. Madigan MT, Martinko JM, Parker J. *Brock Biology of Microorganisms*. 10ª edición. Prentice Hall. Pearson Education Inc, Upper Saddle River, 2003
11. Mathis P, Rutherford AW. La producción de oxígeno en las plantas. *Mundo Científico* 144: 240-247, 1994
12. Somerville CR, Somerville SC. Las fotosíntesis de las plantas. *Mundo Científico* 37: 612-623, 1984
13. Strasburger E et al. *Tratado de Botánica*. Marín, Barcelona, 1986
14. Vitousek PM, Mooney HA, Lubchenco J, Melillo JM. Human domination of earth's ecosystems. *Science* 277: 494-499, 1997
15. Taiz L, Zeiger E. *Plant Physiology* 2ª ed. Sinauer Associates, Sunderland, Massachusetts, 1998

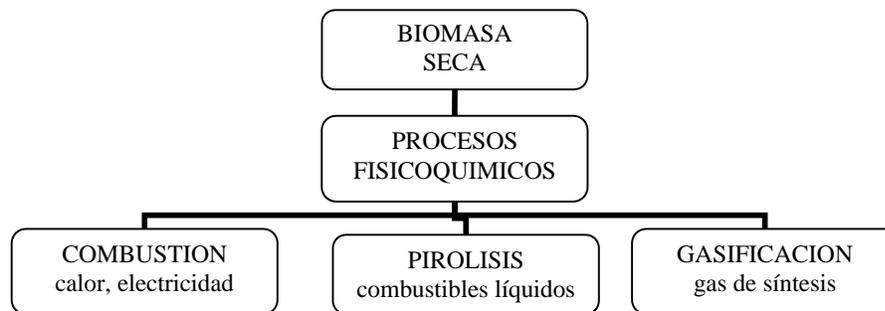
# BIOMASA

## ■ Materiales. Tratamientos.

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

La biomasa vegetal ha sido utilizada en gran escala con fines energéticos, sin embargo hay factores que dificultan y limitan el aprovechamiento de una parte considerable de la misma, por ejemplo la localización de gran parte de la biomasa en los océanos. Los costos energéticos de recolección y transporte restringen el aprovechamiento de la biomasa producida en lugares relativamente alejados de los centros de utilización.

Por otra parte, la existencia de vastos eriales, la extensión limitada de las zonas cultivables, impone la introducción de nuevas concepciones para mejorar la productividad de las áreas cultivables y explotación de las baldías, incluyendo especies hasta ahora poco valorizadas, con el fin de optimizar la producción de biomasa energética (1).



La utilización de la biomasa vegetal seca, especialmente en forma de madera, para la generación de calor por combustión directa es un hecho cotidiano. Así la madera cubre, en promedio, hasta el 5% de las necesidades energéticas presentes en los países industrializados (porcentaje similar al cubierto por la energía nuclear), llegando a representar la fracción mayoritaria (hasta 95%) en países subdesarrollados, donde la media de consumo alcanza alrededor de una tonelada por habitante por año. En conjunto se estima que la madera suministra aproximadamente el 14% del consumo energético mundial (1).

En escala industrial, se hacen plantaciones de árboles cortando los troncos, por lo común, con un intervalo de 1 a 4 años. Las podas y los aserraderos proveen desperdicios para quemar. El calor de combustión puede ser empleado directamente, o para producir vapor que genera electricidad por medio de máquinas a pistón o turbinas. La energía neta obtenible durante la combustión es de unos 8 MJ/kg madera verde, 20 MJ/kg materia vegetal seca, 40 MJ/kg grasas, aceites naturales o ésteres de aceites de semillas, 55 MJ/kg metano, 27 MJ/kg hulla y 46 MJ/kg aceites minerales. Por otra parte, la basura urbana

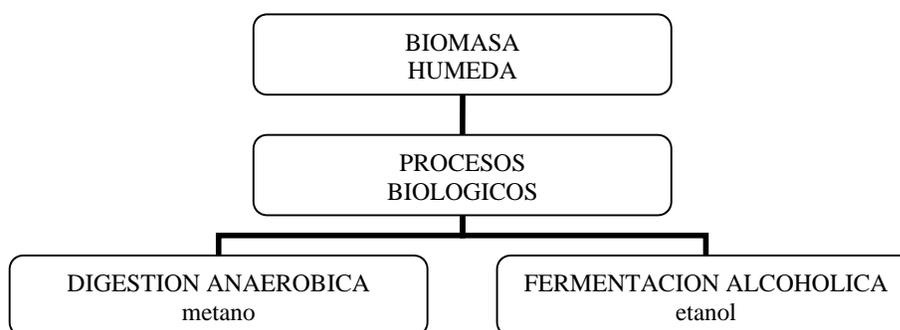
contiene restos de biomasa y plásticos hechos con fuentes fósiles que también son combustibles y suele ser 'peleteada' para su uso (3).

Sin embargo, la baja densidad física y energética de gran parte de la biomasa, tal como se recolecta directamente del terreno o se recupera de los desechos, así como su contenido en agua, normalmente alto, determinan que sea necesario una transformación previa de la biomasa, contándose para ello con diversos procedimientos que generan una gran variedad de productos.

Los materiales más convenientes para su conversión son los de bajo contenido en agua y alto en lignocelulosa, tales como madera, paja, cáscaras, etc. Los procedimientos físicoquímicos de conversión se basan en someter la biomasa a la acción de altas temperaturas, y pueden dividirse en dos amplias categorías, dependiendo de que el calentamiento se lleve a cabo en ausencia de aire (pirólisis) o en presencia de cantidades limitadas de oxígeno (gasificación) (3).

El producto principal de la gasificación es un gas pobre, compuesto de cantidades variables de CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>. Este gas puede enriquecerse en metano, dando lugar así a un sustituto del gas natural, o reformarse a gas de síntesis, con proporciones adecuadas de CO e H<sub>2</sub>, fácilmente convertible en metanol (2). La mejora del método de gasificación mediante arena supercalentada permite obtener un gas con un valor calorífico de 580-650 kJ/m<sup>3</sup> (3).

Los productos de la pirólisis son una mezcla de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos en proporciones variables, dependiendo de las temperaturas y presiones empleadas en el proceso (2).



La biomasa con alto grado de humedad puede transformarse por degradación biológica, mediante procesos anaeróbicos, en metano o etanol, consiguiéndose aumentar el valor energético de la biomasa de 16 kJ/g a 30 kJ/g en el caso de etanol y a 56 kJ/g en el de metano.

Las técnicas más desarrolladas son, por un lado, la digestión anaeróbica de biomasa con alto contenido en celulosa (basura, plantas acuáticas y residuos agrícolas, ganaderos e industriales) para la generación de metano, y por otro, la fermentación de materiales azucarados o amiláceos para la producción de etanol. En contraste con la digestión anaeróbica que emplea materias primas de escaso valor, la fermentación alcohólica utiliza como sustratos productos de alto valor económico.

En la fermentación alcohólica intervienen levaduras que convierten directamente las hexosas (glucosa, etc.) en etanol. El rendimiento teórico en peso, con glucosa como sustrato, es superior al 50%, recuperándose aproximadamente el 93% de la energía contenida en el sustrato. En la práctica, el rendimiento puede estar entre el 85 y 90% del valor teórico (1).

En la digestión anaeróbica participan sucesivamente tres categorías de bacterias cuyas funciones son: 1) hidrólisis de polímeros (celulosa, lípidos, proteínas); 2) producción de ácidos volátiles (principalmente acético), CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>; y 3) generación de

metano. El rendimiento en peso es sólo del 27%, aunque el rendimiento energético es superior al 93%. Sin embargo, la naturaleza compleja de la materia procesada en los digestores y la baja eficiencia de conversión se traducen, por lo común, en rendimientos energéticos brutos del 20 al 50% (1).

**Plantas con hidrocarburos.** Hay una multitud de plantas que acumulan compuestos de gran interés energético o industrial como parte de su biomasa, razón por la que poseen notable valor práctico y pueden explotarse en gran escala con indudable beneficio. Se da, además, la circunstancia que la mayoría de estas plantas viven y se desarrollan en zonas áridas.

Entre este tipo de plantas se han identificado diversas especies que producen y acumulan hidrocarburos utilizables como combustibles o materias primas, tras una sencilla extracción. Determinadas especies de plantas típicas de las zonas áridas, representadas especialmente por las del género *Euphorbia*, acumulan hidrocarburos de peso molecular inferior al del caucho. El látex de estos vegetales presenta propiedades similares a las del petróleo, habiéndose estimado como posible para terrenos desérticos una producción anual del orden de veinte barriles (aprox. 3,2 m<sup>3</sup>) de "petróleo vegetal" por hectárea (1).

Además de las plantas que producen hidrocarburos, se han identificado muchas otras especies vegetales que contienen diferentes compuestos orgánicos mayoritarios de interés práctico, entre los que se incluyen, por ejemplo, los aceites lubricantes y combustibles.

**Microalgas.** Como la mayoría de los organismos clorofílicos, las microalgas poseen la facultad de llevar a cabo el proceso de la fotosíntesis utilizando agua como donador de electrones. Las microalgas presentan gran diversidad de tamaños, formas y estructuras, caracterizándose sus representantes más primitivos, las cianobacterias, por ser procariotas.

Por lo que se refiere a la conversión de la energía luminosa en energía química almacenada, las microalgas constituyen organismos fotosintéticos extraordinariamente eficientes, que alcanzan rendimientos de hasta el 5% y productividades de biomasa de 50 a 200 toneladas (peso seco) por hectárea y año, valores no sólo notablemente superiores a los de los cultivos agrícolas convencionales sino de los más elevados que se conocen (1).

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

Entre los diversos grupos de microalgas utilizables se destacan especialmente las cianobacterias fijadoras de nitrógeno atmosférico, ya que, en contraste con el resto de organismos fotosintéticos, no requieren compuestos nitrogenados para su desarrollo. Muchas cianobacterias filamentosas están provistas de heterocistos que pueden utilizar el N<sub>2</sub> presente en el aire para síntesis de su material celular.

Las posibilidades del empleo de las microalgas son muy diversas. La biomasa de las algas se puede emplear con fines energéticos, en cuyo caso la digestión anaeróbica para la producción de biogás con alto contenido de metano parece ser el proceso más adecuado, debido a que permite la utilización de materiales con alto contenido en agua.

Otra posibilidad para el aprovechamiento de la biomasa de algas es su utilización como materia prima para la extracción de compuestos, dado que en el interior de las mismas se puede almacenar cantidades considerables de algunas sustancias de especial interés, por ejemplo el alga verde *Botryococcus braunii*, cuyo contenido en hidrocarburos ligeros representa hasta el 75% del peso seco del organismo (4). También en estos casos, una vez extraído el compuesto de interés, el resto de la biomasa puede utilizarse para otros propósitos, tal como la producción de metano por digestión anaeróbica (1).

## Referencias

1. García Guerrero M, Losada M. Conversión biológica de la energía solar. *Mundo Científico* 26: 616-630, 1983
2. National Research Council. *Food, Fuel, and Fertilizer from Organic Wastes*. National Academy Press, Washington, 1981 cap 4.
3. Twidell J. Biomass energy. *Renewable Energy World* 1(3): 38-39, 1998
4. *The New Encyclopædia Britannica*. Vol. 13. Chicago, 1992, pp. 242-244

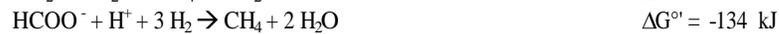
# METANOGENESIS

*Reacciones. Ecología. Rumen. Diversidad de la arqueobacterias metanogénicas.*

## Reacciones

El dióxido de carbono es común en la naturaleza y es un producto importante del metabolismo energético de los organismos quimioorganotróficos. Los procariontes reductores de CO<sub>2</sub> más importantes son los metanogénicos, un grupo de arqueobacterias anaeróbicas estrictas que emplean generalmente el H<sub>2</sub> como donante de electrones (1).

Hay por lo menos diez sustratos que se convierten en metano por la acción de una u otra bacteria metanogénica, todos los cuales liberan energía adecuada para la síntesis de ATP, incluyendo formiato (HCOO<sup>-</sup>), acetato (CH<sub>3</sub>COO<sup>-</sup>), metanol (CH<sub>3</sub>OH), metilmercaptano (CH<sub>3</sub>SH) y metilamina (CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub><sup>+</sup>) (2). Se los divide en tres grupos, uno comprende a los sustratos:

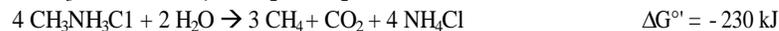


Los valores de energía libre se refieren a condiciones de 25°C, pH 7 y soluciones acuosas con actividad igual a 1 (3). El metano es formado por la reducción del dióxido de carbono debida al hidrógeno proveniente de varios sustratos usados por la bacteria o por el cultivo mixto con bacterias sintróficas. Otro sustrato es el acetato:



La conversión de acetato a metano aparece como un proceso ecológico muy importante en digestores de residuos y en medios anóxicos de agua dulce, donde no hay una competencia excesiva por el acetato con otras bacterias (4).

En los sustratos con un grupo metilo, éste se reduce a metano, siendo la reacción:



En estas reacciones, algunas moléculas del sustrato funcionan como donantes de electrones y se oxidan a CO<sub>2</sub>, mientras que otras se reducen y son por tanto aceptores de electrones. Durante el crecimiento sobre compuestos de metilo, el poder reductor también puede provenir del H<sub>2</sub>.



Algunos metanógenos crecen sobre otros alcoholes. El piruvato también suele actuar como donante de electrones para la reducción del CO<sub>2</sub> (2).

En los metanógenos la síntesis de ATP está relacionada con la fuerza impulsora de protones establecida en el paso terminal de la reducción (la conversión de CH<sub>3</sub><sup>-</sup> a CH<sub>4</sub>) cuya energía es capturada por la ATPasa transportadora de protones de la membrana (2).

## Ecología

Los metanógenos cuando crecen sobre H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>, son autótrofos quimiolitotrofos. Sin embargo, el proceso por el que se fija el CO<sub>2</sub> no es el ciclo de Calvin de los fotosintéticos sino la ruta del acetyl-CoA. La formación de metano está limitada a los ambientes anóxicos, pues sólo tiene lugar en ausencia de oxígeno.

A pesar de que la producción de metano está muy extendida, son pocos los compuestos de carbono que sirven como precursores directos de la metanogénesis. Por lo tanto, es un proceso que depende de la producción de esos compuestos por otros organismos, a partir de la materia orgánica compleja (1).

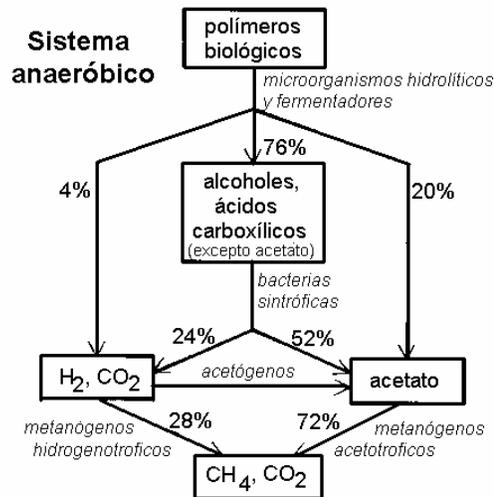
En muchos ambientes anóxicos los precursores inmediatos del metano son el H<sub>2</sub> y el CO<sub>2</sub> que se generan por las actividades de los fermentadores anaeróbicos. En el proceso general de producción de metano a partir de la fermentación de un polisacárido, como la celulosa, pueden intervenir hasta cinco grupos fisiológicos de procariotas (2).

Las bacterias celulolíticas rompen la molécula de celulosa de peso molecular elevado dando celobiosa (β-glucosa - β-glucosa) y en glucosa libre. Por acción de los fermentadores primarios, la glucosa origina una variedad de productos, entre los cuales se encuentran acetato, propionato, butirato, succinato, alcoholes, H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>. Todo el hidrógeno producido en los procesos fermentativos primarios es consumido inmediatamente por las bacterias metanogénicas, las acetogénicas o las reductoras de sulfato si éste se halla en alta concentración. Además el acetato puede ser convertido en metano por algunos metanógenos (1).

Los organismos clave en la conversión de compuestos orgánicos complejos en metano, son los fermentadores secundarios, especialmente las bacterias oxidantes de ácidos grasos que producen H<sub>2</sub>. Estos organismos utilizan ácidos grasos o alcoholes como fuente de energía en cultivos mixtos con un consumidor de H<sub>2</sub>. El nombre de estos organismos reflejan su dependencia de relaciones sintróficas (sintrofia: comiendo juntos) y el AG<sup>o'</sup> asociado a las conversiones de ácidos grasos es positivo,

pues las reacciones no se llevan a cabo con liberación de energía.

Pero la concentración real de reactantes y productos puede cambiar la energía libre disponible de una reacción. Las mediciones de H<sub>2</sub> en ecosistemas metanogénicos activos son generalmente <10<sup>-4</sup> atm (10 Pa) (2). Si la concentración de H<sub>2</sub> se mantiene muy baja mediante el retiro constante de dicho elemento por los metanógenos, el cambio de energía libre asociado a la oxidación de los ácidos grasos a acetato más H<sub>2</sub> por los sintrofos pasa a tener signo negativo.



**Figura 1.** Descomposición anaeróbica con producción de metano en un digestor (3, 5).

**Cuadro 1.** Principales reacciones de la conversión anóxica de compuestos orgánicos en metano (2)

Tipo de reacción	ΔG <sup>o'</sup> normal kJ/reacción	ΔG <sup>o'</sup> real kJ/reacción
<b>Fermentación</b>		
Glucosa → acetato, H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub>	- 207	- 319
Glucosa → butirato, H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub>	- 135	- 284
Butirato → acetato, H <sub>2</sub>	+ 48	- 17,6
Propionato → acetato, H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub>	+ 76,2	- 5,5
Benzoato → acetato, H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub>	+ 49,5	- 18
<b>Acetogénesis</b>		
H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> → acetato	- 105	- 7,1
<b>Metanogénesis</b>		
H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> → CH <sub>4</sub>	- 136	- 3,2
Acetato → CH <sub>4</sub>	- 31	- 24,7

Con excepción de la microbiota celulolítica, los restantes grupos microbianos dependen unos de otros y se observa una transferencia de hidrógeno entre especies compuesta de una serie de reacciones interdependientes, que generalmente termina en la formación de metano (1).

En la mayoría de los ecosistemas anóxicos, la etapa que limita la velocidad de la metanogénesis no es la etapa terminal de la formación de metano, sino las que intervienen en la producción de acetato e H<sub>2</sub>, ya que la velocidad de crecimiento de los oxidantes de ácidos grasos es en general muy lenta (2).

Los metanógenos están muy extendidos en la tierra a pesar de la anaerobiosis obligada y de su metabolismo especializado. Aunque el metano se produce en gran cantidad en los ambientes anóxicos como pantanos y charcos, o en el rumen, el proceso también ocurre en ambientes que normalmente podrían ser considerados aerobios como suelos de bosques o praderas donde se hallan microambientes anóxicos en el interior de las partículas de suelo.

**Cuadro 2.** Estimación de la liberación de metano (2)

Fuente	Emisión Mt/año	
<b>Biogénica</b>		
Rumiantes	80 – 100	
Termitas	25 – 150	
Esteros y charcos	70 – 120	
Pantanos y humedales	120 – 200	
Vertederos de basura	5 -70	
Océanos y lagos	1 – 20	
Tundra	1 – 5	
	302 – 665	81 – 86% del total
<b>Abiogénica</b>		
Minería del carbón	10 – 35	
Emisiones de gas natural	10 – 30	
Escapes industriales y gasoductos	15 – 45	
Combustión de biomasa	10 – 40	
Hidratos de metano	2 – 4	
Volcanes	0,5	
Automóviles	0,5	
	48 – 155	13 – 19% del total
<b>Total</b>	349 - 820	

La producción de metano por las arqueobacterias es superior a la obtenida de los pozos de gas natural, pero a diferencia de éstos el carbono puesto en juego es el de la biomasa reciclada. Los eructos de los rumiantes y el metano liberado en las zonas pantanosas son las principales fuentes. También se lleva a cabo la metanogénesis en el intestino de vertebrados e insectos que comen madera, por ejemplo las termitas. Se han encontrado metanógenos endosimbiontes de amebas y flagelados acuáticos de vida libre o localizados dentro del tubo digestivo de insectos (2).

La metanogénesis está más extendida en las aguas continentales y en los ambientes terrestres que en el mar. Esto puede explicarse por el hecho de que las aguas y sedimentos marinos contienen proporciones más bien altas de sulfato. Las bacterias reductoras de sulfato abundan en los sedimentos marinos y compiten de manera efectiva con las poblaciones metanogénicas por el acetato y el H<sub>2</sub> disponibles (6). Los principales precursores de metano en los ambientes marinos son los substratos metilados, como las metilaminas, que apenas son utilizados por los reductores de sulfato. La trimetilamina, un producto importante de excreción en animales marinos, es convertida rápidamente por los metanógenos (2).

## Rumen: un digestor natural

Los ruminantes son mamíferos herbívoros que poseen un órgano especial, el rumen, en cuyo interior se lleva a cabo la digestión de la celulosa y de otros polisacáridos vegetales mediante la actividad de poblaciones microbianas especiales pues estos animales carecen de las enzimas necesarias para digerir la celulosa.

El rumen tiene un tamaño relativamente grande: 100-150 litros en una vaca, 6 litros en una oveja. Se encuentra a una temperatura y una acidez constantes (39°C, pH 6,5). La naturaleza anóxica del rumen es un factor significativo para su funcionamiento. El estudio de la actividad microbiana en el mismo permite comprender el funcionamiento de los artefactos metanogénicos (1).

El material vegetal llega al rumen, o panza, mezclado con la saliva que contiene bicarbonato, y allí es sometido a un movimiento rotatorio durante el cual tiene lugar la fermentación microbiana. Esta acción peristáltica produce la suspensión del material celulósico lo que facilita la adherencia microbiana (2).

El alimento permanece en el rumen de nueve a doce horas. El fluido ruminal contiene gran cantidad de células microbianas, entre  $10^{10}$  y  $10^{11}$  bacterias por mL. Las bacterias y los hongos celulolíticos actúan produciendo el disacárido celobiosa y las unidades de glucosa. La glucosa liberada experimenta una fermentación bacteriana en la que se

forman ácidos grasos volátiles, principalmente acético, propiónico y butírico, y los gases dióxido de carbono y metano. Los ácidos grasos atraviesan la pared del rumen y pasan a la sangre. Desde allí van a los tejidos donde son utilizados como la principal fuente de energía. Además los microorganismos del rumen sintetizan aminoácidos y vitaminas esenciales para el animal (2).

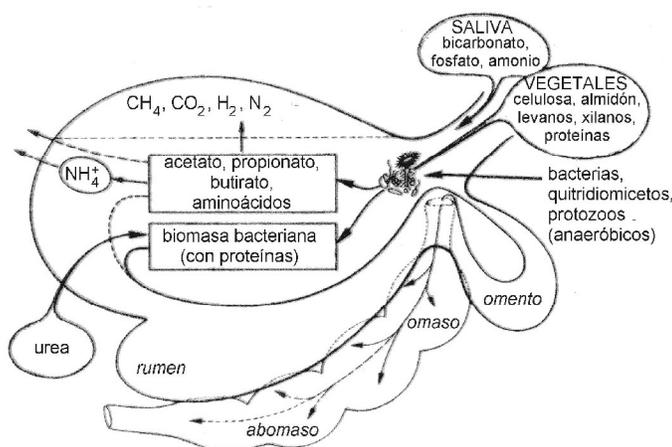


Figura 2. Esquema del rumen (1)

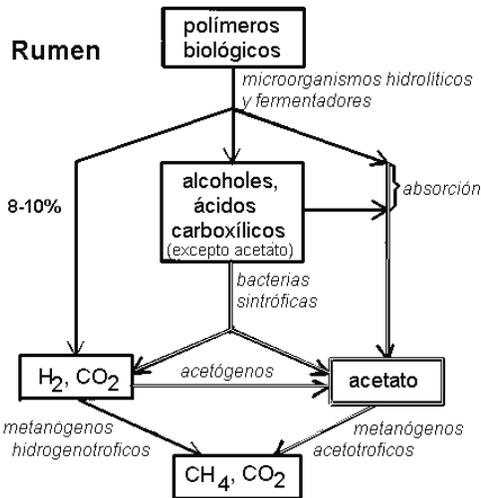
La masa de alimento pasa gradualmente a la redcilla donde se forman unas porciones llamadas rumias que regresan a la boca y son masticadas otra vez. Cuando esta masa sólida queda bien fragmentada, es engullida de nuevo, pero esta vez el material pasa directamente al libro y termina en el cuajar, que es un órgano más bien parecido al estómago pues las condiciones son ácidas, donde se inicia un proceso digestivo similar al de los otros animales no ruminantes que continúa en el intestino. Muchas de las células microbianas formadas en el rumen son digeridas y constituyen la principal fuente de proteínas y vitaminas del animal, dado que la hierba es un alimento deficiente en proteínas (2).

Las reacciones químicas que ocurren en el rumen requieren la actividad combinada de una variedad de microorganismos entre los que predominan las bacterias anerobias estrictas, dado que el potencial de reducción es de -0,4 V. La concentración de O<sub>2</sub> a ese potencial es  $10^{-22}$  M.

*Fibrobacter succinogenes* y *Ruminococcus albus* son las bacterias celulolíticas más abundantes del rumen, y también degradan xilano. *Fibrobacter* posee una celulosa periplásmica y permanece adherido a la fibrilla de celulosa mientras la digiere. *Ruminococcus* produce una celulosa que es secretada al rumen. Las bacterias *Ruminobacter amylophilus* y *Succinomonas amylolytica* que hidrolizan al almidón se encuentran en minoría, así como *Lachnospira multiparus* que digiere pectinas. Los

productos de fermentación de estas y otras bacterias son utilizados por otros microorganismos. El succinato se convierte en propionato y  $\text{CO}_2$ , y el lactato es transformado en acetato y otros ácidos por *Megasphaera* y *Selenomonas* (2).

El  $\text{H}_2$  producido en el rumen durante los procesos fermentativos nunca se acumula, ya que es utilizado rápidamente por los metanógenos (*Methanobrevibacter ruminantium*, *Methanomicrobium mobile*) para reducir  $\text{CO}_2$  a  $\text{CH}_4$ . Otra fuente de  $\text{H}_2$  y  $\text{CO}_2$  para los metanógenos es el formiato. La composición media de los gases acumulados en el rumen es aproximadamente 65%  $\text{CO}_2$  y 35%  $\text{CH}_4$ , y se expulsan al exterior por los eructos del animal. El acetato no llega a convertirse en metano dentro del rumen debido a que el tiempo de retención es demasiado corto para que puedan desarrollarse los metanógenos acetotróficos. Además las bacterias sintróficas degradadoras de ácidos grasos no abundan en el rumen dado que el tiempo de retención es corto y estos ácidos atraviesan la pared hacia la sangre del rumiante (1).

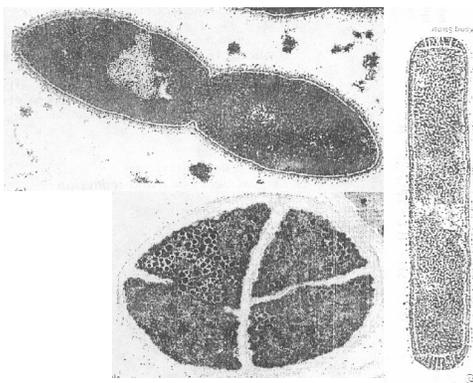


**Figura 3.** Descomposición anaeróbica en el rumen con producción de metano (5).

El contenido ruminal posee aproximadamente  $10^6$  protozoos por mL, principalmente ciliados. Muchos son anaerobios obligados, una característica poco frecuente entre los organismos eucarióticos. Los protozoos comen bacterias y ejercen algún control sobre densidad de las mismas en el rumen. También hay hongos anaeróbicos que alternan una forma flagelada y otra inmóvil. Degradan celulosa, hemicelulosas, pectinas y parcialmente lignina que es el compuesto que refuerza las paredes celulares de las plantas leñosas (1).

Una de las características principales del rumen es su constancia en distintas partes del mundo, en proporciones que varían según el tipo de alimentación. El cambio brusco de pasturas a cereales conduce a un desequilibrio en la composición microbiana que causa enfermedad o aún la muerte del animal, por el crecimiento explosivo de *Streptococcus bovis* que hidroliza almidón produciendo abundante ácido láctico y acidificando el rumen. Esta acidosis causa la eliminación de la microbiota normal (7).

### Diversidad de las arqueobacterias metanogénicas

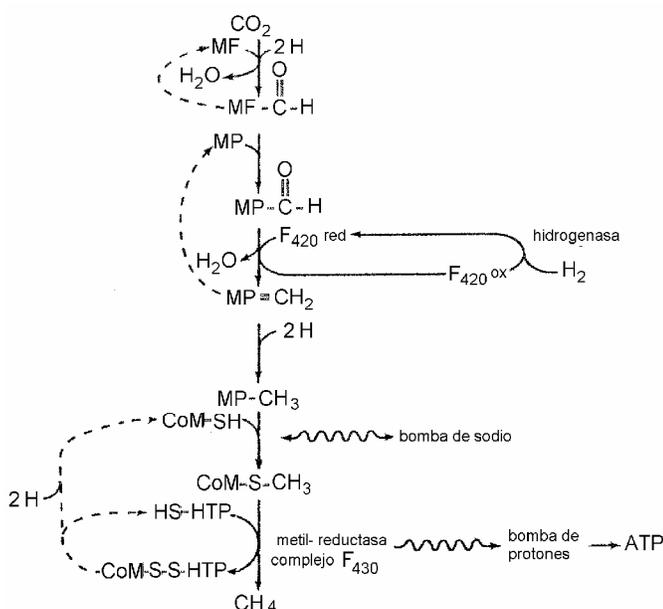


Se las clasifica en siete grupos principales que comprenden un total de 17 géneros. Se han observado bacilos cortos y largos, cocos con variada ordenación, células en forma de placas y filamentos; unos Gram positivos otros Gram negativos (7).

**Figura 4.** Aspecto de algunas bacterias metanogénicas (*Methanobrevibacter*, *Methanobacterium*, *Methanosarcina*) (2).

**Cuadro 3.** Características de las arqueobacterias metanogénicas (2).

Grupo	Género	Morfología	Sustratos
I	<i>Methanobacterium</i>	bacilos alargados	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> , HCOO <sup>-</sup>
	<i>Methanobrevibacter</i>	bacilos cortos	“ “ “
	<i>Methanosphaera</i>	cocos	CH <sub>3</sub> OH + H <sub>2</sub>
II	<i>Methanothermus</i>	bacilos	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> (reduce S <sup>o</sup> )
III	<i>Methanococcus</i>	cocos irregulares	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> , HCOO <sup>-</sup> , piruvato + CO <sub>2</sub>
IV	<i>Methanomicrobium</i>	bacilos cortos	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> , HCOO <sup>-</sup>
	<i>Methanogenium</i>	cocos irregulares	“ “ “
	<i>Methanospirillum</i>	espirilos	“ “ “
	<i>Methanoplanus</i>	placas	“ “ “
V	<i>Methanosarcina</i>	cocos grandes y en paquetes	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> , CH <sub>3</sub> OH, CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup>
	<i>Methanolobus</i>	cocos irregulares	CH <sub>3</sub> OH, metilaminas
	<i>Methanoculleus</i>	“ “	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> , HCOO <sup>-</sup> , alcoholes
	<i>Methanohalobium</i>	“ “	CH <sub>3</sub> OH, metilaminas
	<i>Methanococcoides</i>	“ “	“ “
	<i>Methanohalophilus</i>	“ “	“ “ , metilsulfuros
	<i>Methanotherix</i>	bacilos alargados y filamentos	CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup>
VI	<i>Methanopyrus</i>	bacilos en cadenas	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> (crece a 110°C)
VII	<i>Methanocorpusculum</i>	cocos irregulares	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> , HCOO <sup>-</sup> , alcoholes



**Figura 5.** Metanogénesis por reducción del CO<sub>2</sub> (2). (MF: metanofurano; MP: tetrahidro metanopterina; CoM: coenzima M; F<sub>420</sub> y F<sub>430</sub>: coenzimas; HS-HTP: 7-mercaptoheptanoil-treonina-fosfato)

El CO<sub>2</sub> es la principal fuente de carbono cuando crecen de forma autotrófica, sin embargo el crecimiento de casi todos ellos es estimulado por el acetato y en algunas especies por ciertos aminoácidos. Por otra parte, en los cultivos de laboratorio algunos metanógenos del rumen necesitan de una mezcla de ácidos grasos (2).

Todas las bacterias metanogénicas utilizan NH<sup>+</sup>

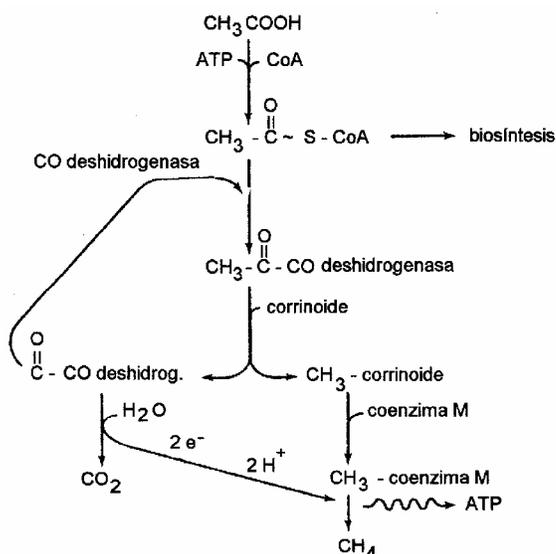
como fuente de nitrógeno, pero se sabe que algunas especies fijan N<sub>2</sub> (*Methanosarcina*, *Methanococcus*). El níquel, componente de la coenzima metanogénica F<sub>430</sub>, es requerido por todas estas bacterias y también está presente en las enzimas hidrogenasa y CO-deshidrogenasa. También requieren hierro y cobalto para su crecimiento. Los metanógenos tienen algunas coenzimas exclusivas, unas son portadoras de C<sub>1</sub> (metanofurano, metanopterina, coenzima M, F<sub>430</sub>) y otras intervienen en las reacciones de óxido-reducción como donantes de electrones (F<sub>420</sub> y 7-mercapto heptanoil treonina fosfato ó HS-HTP) (1).

La reducción del CO<sub>2</sub> por lo general depende del H<sub>2</sub>, pero el formiato, el CO e incluso el Fe<sup>o</sup> sirven como donantes de electrones. En el último caso, el Fe<sup>o</sup> es oxidado a Fe<sup>++</sup> y los electrones liberados se combinan con protones para formar H<sub>2</sub>, que es el

donador inmediato en la metanogénesis. También en unos pocos metanógenos los alcoholes pueden aportar electrones, por ejemplo, cuando el 2-propanol se oxida a acetona en algunas especies (1).

Durante la reducción, el metanofurano activa el  $\text{CO}_2$  que posteriormente es llevado a formilo. En la etapa siguiente el grupo formilo se transfiere del metanofurano a la metanopterina reducida. Después es deshidratado y reducido en dos etapas distintas al grado de metileno y metilo. El grupo metilo es transferido de la metanopterina a la coenzima M. La metilcoenzima M se reduce por el sistema de la metil reductasa, con la participación de  $\text{F}_{430}$  y HS-HTP que actúa como donador de electrones. El producto de la reacción además del metano es CoM-S-S-HTP. La CoM y el HS-HTP son regenerados por reducción con  $\text{H}_2$  (1). En condiciones normales la variación de energía libre durante la reducción de  $\text{CO}_2$  a metano con  $\text{H}_2$  es  $-131 \text{ kJ/mol}$ , pero debido a la influencia de la concentración de los reactantes en los ambientes naturales baja a cerca de  $-30 \text{ kJ/mol}$ . La concentración de  $\text{H}_2$  en las zonas metanogénicas no es mayor a  $10 \mu\text{M}$  (2).

La conservación de la energía se observa en la etapa terminal de la metanogénesis.



La reducción del complejo CoM-S-S-HTP es exergónica y está asociada con la extrusión de protones a través de la membrana, creando una fuerza propulsora de protón. La disipación del gradiente de protones por una ATPasa integrada al transporte de protones en la membrana, impulsa la síntesis de ATP durante la metanogénesis (1).

Los metanógenos autotróficos convierten el  $\text{CO}_2$  en material celular a través de las reacciones de la vía del acetil-CoA utilizada también por las bacterias homoacetogénicas y las reductoras de sulfato. Pero a diferencia de estas últimas los metanógenos integran las vías biosintética y bioenergética porque comparten los intermediarios comunes.

Figura 6. Metanogénesis a partir de acetato (2).

Las reacciones de la vía del acetil-CoA están estrechamente relacionadas con la producción de metano a partir de compuestos de metilo y acetato. Los compuestos de metilo como el metanol se catabolizan para dar corrinoide- $\text{CH}_3$ . Los corrinoideos son estructuras precursoras de compuestos como la vitamina  $\text{B}_{12}$ , que contienen un anillo corrina parecido a porfirina con un átomo central de cobalto. El complejo corrinoide- $\text{CH}_3$  dona el grupo metilo a la coenzima M (CoM) para dar  $\text{CH}_3$ -CoM, del cual se obtiene el metano por reducción con electrones derivados de la oxidación de otras moléculas de metanol a  $\text{CO}_2$  (2).

El crecimiento de metanógenos sobre compuestos de metilo también está ligado a la bomba de protones para la síntesis de ATP. Pero en ausencia de  $\text{H}_2$ , la generación de electrones necesarios para la reducción requiere que alguno de los substratos se oxide. Esto se produce por una bomba de sodio ligada a la membrana citoplasmática, que establece un gradiente de sodio a través de la misma y conduce a la oxidación de grupos metilo a  $\text{CO}_2$  (2).

El desarrollo de los metanógenos acetotróficos está también ligado a la vía del acetil-CoA que se usa directamente para la biosíntesis, pero también es fuente de energía. El acetato se activa a acetato-CoA que interacciona con la CO-deshidrogenasa, después de lo cual el grupo metilo del acetato se transfiere a la enzima corrinoide para dar  $\text{CH}_3$ -corrinoide. El grupo metilo se transfiere a la metanopterina reducida y después a la

coenzima M para dar CH<sub>3</sub>-CoM. La reducción a metano ocurre con los electrones generados de la oxidación del CO a CO<sub>2</sub> por la CO-deshidrogenasa (2).

## Metanógenos en las profundidades de la tierra

El basalto es una roca volcánica rica en hierro que está esencialmente desprovista de materia orgánica, pero en algunas formaciones de basalto de hasta 1.500 m de profundidad se han encontrado una gran cantidad de bacterias anaeróbicas quimiolitotróficas, que incluyen sulfatorreductores, metanógenos y homoacetógenos (8). Estos anaerobios comparten una gran apetencia por H<sub>2</sub>, que es el donador de electrones para sus correspondientes metabolismos productores de energía (2).

Metanogénesis:  $4 \text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$

Acetogénesis:  $4 \text{H}_2 + 2 \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + 4 \text{H}_2\text{O}$

Reducción de sulfato:  $4 \text{H}_2 + \text{SO}_4^{2-} + \text{H}^+ \rightarrow \text{HS}^- + 4 \text{H}_2\text{O}$

El hidrógeno del basalto parece originarse de la interacción, estrictamente química, del agua con el mineral de hierro de las rocas (9).

$2 \text{FeO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3$

## Metanógenos hipertermófilos

Los géneros *Methanopyrus*, *Methanococcus* y *Methanothermus* son quimiolitotróficos que obtiene su energía de la reacción  $4 \text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$ . El primero crece a temperatura superiores a 100°C (máxima 110°C) en sedimentos próximos a fuentes hidrotermales submarinas. El rango de temperatura óptima para crecimiento de los otros dos géneros, es 83 - 88°C (7). *Methanopyrus* crece rápidamente con un tiempo de generación menor a 1 hora. Contiene altas concentraciones de 2,3-difosfoglicerato cíclico como agente termo-estabilizador citoplasmático. Su presencia explica el origen de materiales semejantes a hidrocarburos en sedimentos oceánicos calientes.

Los simbioses metanógenos proporcionan su sustento a los animales que viven asociados simbióticamente con las almejas gigantes en las fuentes hidrotermales submarinas, mediante la oxidación de metano como fuente de energía (2).

## Referencias

1. Schlegel HG, Zaborosch C. General Microbiology. 2<sup>o</sup> edición. Cambridge University Press, UK, 1993.
2. Madigan MT, Martinko JM, Parker J. Brock - Biology of Microorganisms. 10<sup>o</sup> edición. Prentice Hall-Pearson Education Inc, Upper Saddle River, 2003.
3. Schink B. Energetics of syntrophic cooperation in methanogenic degradation. Microbiol. Mol. Biol. Reviews 61: 262-280, 1997.
4. Klass DL. Biomass for Renewable Energy, Fuels and Chemicals. Academic Press, San Diego, 1998, pp. 445-494.
5. Gustavsson M. Biogas Technology – Solution in search of its problem. Göteborg University, Göteborg, Suecia, 2000.
6. Magot M, Connan J, Crolet JI. Las bacterias de los yacimientos petrolíferos. Mundo Científico 151: 972-973, 1994.
7. Smith PH, Bordeaux FM, Wilkie A, Yang J, Boone D, Man RA, Chynoweth D, Jerger D. Microbial aspects of biogas production. En: Methane from biomass: a systems approach. Smith WH, Frank JR, Abelson PH, eds. Elsevier Applied Science Publishers, Barking, Essex, 1988.
8. Fredrickson JK, Onstott TC. Vida en las profundidades de la Tierra. Investigación y Ciencia 243: 22-28, 1996.
9. Stevens TO, McKinley JP. Lithoautotrophic microbial ecosystems in deep basalt aquifers, Science 270: 450-454, 1995.

# DIGESTORES ANAEROBICOS

Tipos. Materia prima. Biogas. Factores ambientales.

Diversos materiales orgánicos tales como residuos vegetales inmanejables, desechos agrícolas, estiércol, efluentes de las industrias de alimentos, bebidas, pulpado y papel, e industrias químicas, así como basura municipal o algunos vegetales cultivados, como camalotes o algas, pueden emplearse para producir un combustible gaseoso: el biogas (1).

Durante la bioconversión de materiales orgánicos a metano, las distintas etapas tienen distinta velocidad. La degradación de la celulosa ocurre en semanas, la de las hemicelulosas y proteínas en días y la de las moléculas pequeñas, como azúcares, ácidos grasos y alcoholes, en horas, pero la lignina no es degradada en la mayoría de los sistemas de digestión anaeróbica (2).

Un aumento en el interés sobre la contaminación ambiental hace de la digestión anaeróbica, el medio conveniente para tratar tanto los efluentes como los desechos sólidos (a pesar de las dificultades de operación) además de ser una fuente de energía. Un sistema de digestión anaeróbica puede ser evaluado en términos de costo de la materia orgánica transformada o del valor del producto.

Hasta 1990 en Europa se habían instalado digestores en granjas por un volumen total de 95.000 m<sup>3</sup> y en plantas industriales por 173.000 m<sup>3</sup>, con un equivalente anual en petróleo de 33.000 t. Desde entonces aumentaron constantemente los digestores que tratan desechos industriales (1). En la India hasta 1996 estaban en funcionamiento 2,6 millones de digestores familiares y después se instalaron unas 200.000 unidades por año (3).

El proceso de digestión anaeróbica difiere de otros tipos de fermentación en que no es necesario utilizar cultivos puros de microorganismos. Las diversas bacterias capaces de descomponer las sustancias orgánicas y de producir biogás están ampliamente distribuidas en la naturaleza y se encuentran, por ejemplo, en los excrementos animales y humanos. En condiciones adecuadas, estas bacterias pueden activarse y mantenerse indefinidamente con un manejo apropiado (4).

Para un tipo de carga dado, el tamaño del digestor está determinado por el contenido de sólidos del residuo y el tiempo de retención. Los residuos ricos en materiales insolubles, tales como papel, paja y otros lignocelulósicos, pueden requerir un tratamiento de días (o aún años en ciertos rellenos sanitarios) pero cuando el residuo es soluble se logra una reducción de hasta 95% con una carga diaria de 20 kg/ m<sup>3</sup> de digestor (5).

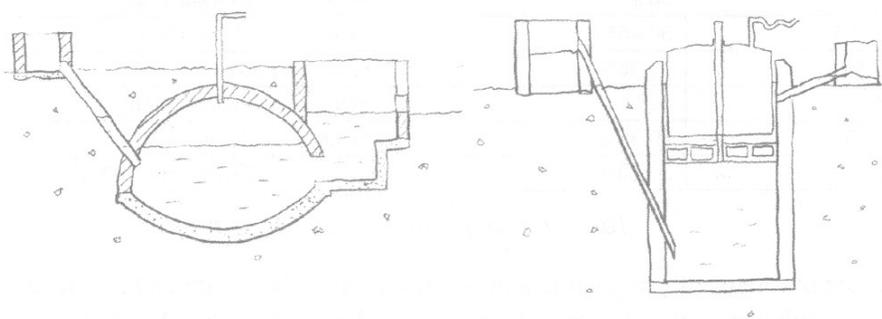
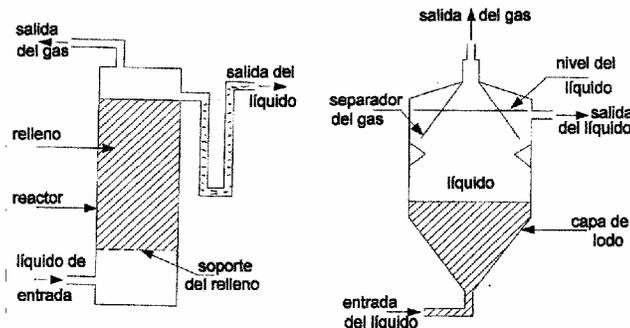


Figura 1. Esquema de los digestores de cúpula fija y móvil (3).

Se han desarrollado varios tipos de digestores. Los diseños principales son el modelo de cubierta flotante (India) y el de cúpula fija (China), y se consideran convencionales.

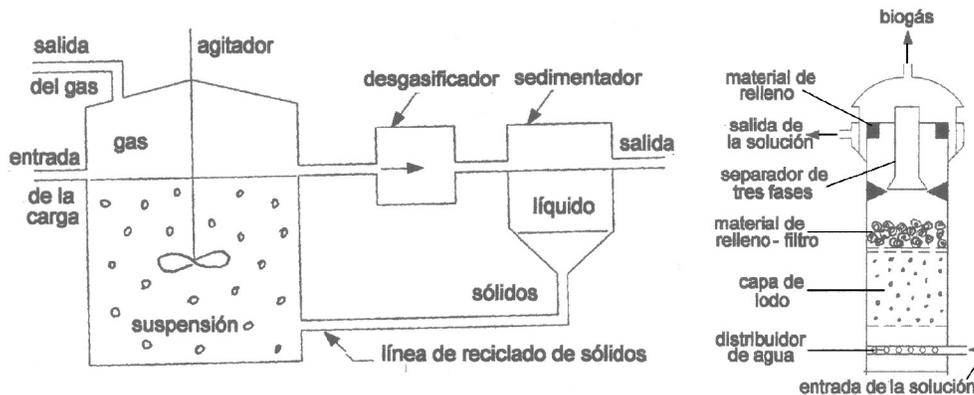
Para sistemas más grandes, el capital a invertir es tan alto que hace prohibitivo el uso amplio del biogás en la industria. En China, por ejemplo, se han construido tanques anaeróbicos de 3.600 m<sup>3</sup> para el tratamiento del líquido residual de la fermentación acetón-butílica y de 2.000 m<sup>3</sup> para el de la fermentación alcohólica (6). Otros tipos de reactores permiten el manejo de grandes cantidades de residuos por unidad de volumen y producen biogás a mayor velocidad, como el filtro anaeróbico (AF), el de capa de lodo anaeróbico con flujo ascendente (UASB) y el de contacto anaeróbico (ACD) (1).



**Figura 2.** Esquema del filtro anaeróbico (izquierda) y el digestor con flujo ascendente a través de una capa de lodo (UASB) (6).

El filtro anaeróbico es de alta eficiencia y se lo llena con diversos materiales, tales como ripio, piedra pómez, bolas o tubitos de porcelana porosa, material corrugado, bolillas huecas de plástico o bambú. Los microorganismos se adhieren a la superficie del relleno y crecen entre los huecos manteniéndose una gran cantidad de los mismos en el reactor. Esto es importante porque los metanógenos tienen un largo ciclo de multiplicación y son muy sensibles al ambiente. Cuando el filtro anaeróbico opera, la suspensión fluye continuamente a través de los huecos del relleno. En China se construyeron grandes filtros anaeróbicos, de 150 y 185 m<sup>3</sup>, para el tratamiento a alta temperatura de residuos solubles de destilería, lográndose una disminución del DQO de hasta 94% (6).

El UASB fue desarrollado en Holanda y es de alta eficiencia aunque tiene una estructura relativamente simple. No contiene relleno y generalmente no necesita agitación. Se emplea para aguas cloacales, líquidos residuales de la fermentación en la producción de alcoholes, aguas servidas de mataderos y de lavaderos de lana, entre otros. En su construcción se adopta un separador de tres fases: gas, líquido y sólido. Además del sistema de carga continua, se suele usar el de carga intermitente sin disminución de la eficiencia. Si bien no tiene el problema de la obstrucción como el filtro, es sensible a la calidad y carga del agua residual. La concentración de los sólidos suspendidos admitida es menor que en el caso del filtro anaeróbico (<4 g/L), pues sino los sólidos suspendidos ocupan y llenan la capa de lodo del reactor produciendo el desbordamiento de los gránulos activados (6).



**Figura 3.** Digestor anaeróbico de contacto (izquierda) y filtro anaeróbico con relleno parcial (6).

El filtro anaeróbico parcialmente relleno (UASB+AF) evita algunas de las debilidades de los sistemas anteriores. Está compuesto de múltiples secciones verticales de materiales de relleno en capas finas, que interceptan los sólidos suspendidos en las aguas residuales provocando su precipitación y descarga. Los microorganismos están adheridos al material de relleno y además en los espacios, ayudando a mejorar el efecto del tratamiento. Este sistema permite tratar aguas cloacales con alto contenido de sólidos suspendidos (6). Hay muchos modelos de digestores pero algunos no han salido de la escala piloto.

## Materia prima

Los materiales que se pueden usar para la generación de metano son muy diversos (7).

- ✓ residuos de cosechas: majoja de caña, malezas, paja, rastrojo de maíz y otros cultivos, forraje deteriorado;
- ✓ restos de origen animal: residuos de establos (estiércol, orina, paja de camas), camas de ponedoras, boñigas de cabras y ovejas, desperdicios de matadero (sangre, vísceras), desperdicios de pesca, restos de lana y cuero;
- ✓ residuos de origen humano: basura, heces, orina;
- ✓ residuos agroindustriales: tortas de oleaginosas, bagazo, salvado de arroz, desechos de tabaco y semillas, desperdicios del procesamiento de hortalizas y frutas, limos de la prensa en ingenios, residuos de té, polvo de fás desmotadoras e industria textil;
- ✓ mantillo forestal: ramitas, hojas, cortezas, ramas;
- ✓ restos de plantas acuáticas: algas marinas, camalotes.

En el cuadro siguiente se indica la digestibilidad de diversos vegetales expresada como el % de sólidos volátiles desaparecidos luego de una incubación de 48 hs con líquido ruminal diluido en buffer fosfato-bicarbonato a 39°C y otras 48 hs con pepsina-HCl a igual temperatura para hidrolizar parcialmente las proteínas de los microorganismos y del sustrato (2).

**Cuadro 1.** Digestibilidad de vegetales (2).

Material	Sólidos volátiles totales %	Sólidos volátiles digeridos %	Componentes de las paredes celulares %
Gramíneas	43,3 – 99,3	15,0 – 87,0	23,5 – 94,8
napierrgrass	93,0	49,3	78,2
sorgo	95,7	57,6	61,9
Repollos	79,0	80,9	32,9
Batatas	91,3	75,8	36,0
Plantas acuáticas			
emergentes	76,7 – 97,8	11,9 – 85,2	14,2 – 86,5
flotantes	69,7 – 91,8	12,0 – 83,0	37,4 – 80,5
camalotes	83,0	43,7	67,0
Algas marinas	19,7 – 74,5	21,0 – 83,4	20,3 -60,2
rojas	47,8	73,3	30,1
pardas	59,3	35,5	43,1
verdes	57,8	60,3	45,6

La digestión anaeróbica de madera no ha sido considerada técnicamente factible sin algún tipo de pretratamiento que aumente su biodegradabilidad. Los modelos predicen una reducción de sólo el 15% de materia orgánica (sólidos volátiles) para las maderas duras con un contenido de lignina del 25% del peso seco. En un digestor "batch" hubo una conversión significativa sólo después de 120 días. El mayor rendimiento alcanzado fue 0,32 m<sup>3</sup> de metano /kg SV con aserrín de álamo en un reactor con un volumen de cultivo de 2 L e incubado a 35°C en un periodo de 105 días (5).

También es posible la metanogénesis en suspensiones hipersalinas (NaCl 1,0 2,5 M) , especialmente si están enriquecidas con quitina/ a 35°C y pH 7,5, pues existen algunas cepas halófilas (5).

Una relación de carbono/nitrógeno de alrededor de 16/1 se considera óptima para una buena producción de gas y para una fermentación estable de los excrementos animales (4), aunque puede obtenerse biogás a valores mayores de C no debe superar la relación 30/1. En el cuadro siguiente se muestra la relación C/N de varios materiales residuales y en el que está a continuación se indican algunas características de las deyecciones animales (7).

**Cuadro 2.** Contenido en nitrógeno y relación carbono/nitrógeno en varios desperdicios (7)

Material	Nitrógeno %	C/N
<b>Residuos animales</b>		
orina	15-18	0,8
sangre	10-14	3
desperdicios de pescado	6,5-10	5,1
restos de matadero mezclados	7-10	2
dyecciones de aves de corral	6,3	...
boñigas de oveja	3,8	...
dyecciones de cerdos	3,8	...
bosta de caballo	2,3	25
estiércol vacuno	1,7	18
estiércol de corral, promedio	2,15	14
heces humanas	5,5-6,5	6-10
<b>Restos vegetales</b>		
desbroce de pasto tierno	4,0	12
desbroce de pastos mezclados	2,4	19
verdolaga	4,5	8
amaranto	3,6	11
cadillo	2,6	19
alfalfa	2,4 - 3,0	16-20
algas marinas	1,9	19
paja cortada	1,1	48
restos de lino	1,0	58
paja de trigo	0,3	128
aserrín podrido	0,25	208
aserrín fresco	0,1	511
<b>Residuos domésticos</b>		
basura	2,2	25
pan	2,1	...
peladura de papas	1,5	25
papel	0	...

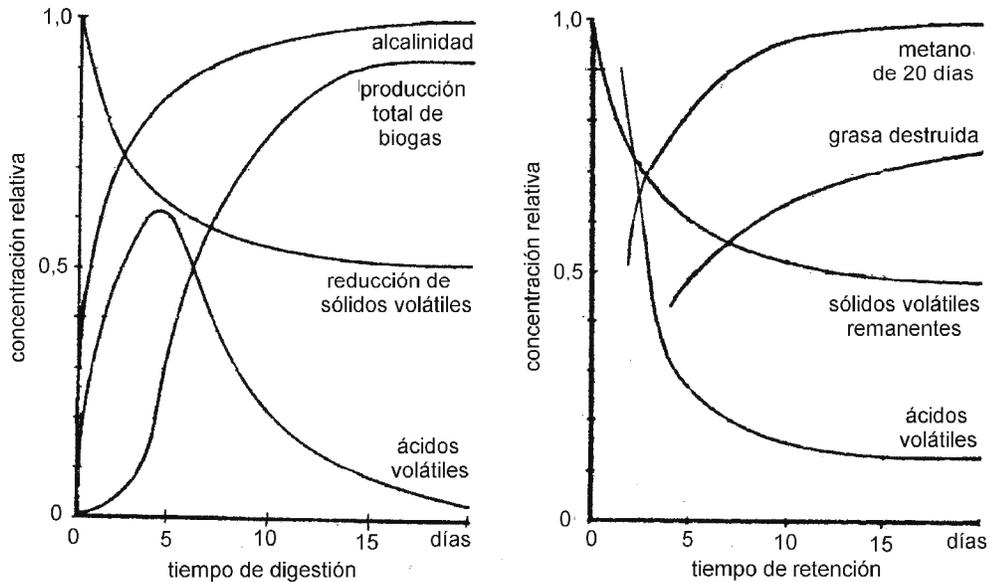
**Cuadro 3.** Características de los excrementos de animales (4).

Estiércol de	kg /100 kg peso animal vivo * día				
	bovinos	lecheras	ovinos	cerdos	ponedoras
Peso húmedo	4,6	9,4	3,6	5,1	6,6
Sólidos totales	0,7	0,89	1,07	0,69	1,67
Sólidos volátiles	0,65	0,72	0,91	0,57	1,22
Nitrógeno total	0,055	0,036	0,043	0,039	0,099

Se ha logrado una digestión satisfactoria con concentraciones mayores a 15% de sólidos, sin embargo en la práctica la gama es de 3-10% (4).

**Cuadro 4.** Opciones de recolección y manejo del estiércol en función de los sólidos totales (9).

% ST	0	5	10	15	20	25	30
tipo	líquido		semisólido			sólido	
manejo	bombeo		paleado			apilado	
uso	tal cual			agregar agua			
conviene	digestión anaeróbica					compostado al aire	
sistema	laguna cubierta	digestor agitado	digestor con flujo pistón				



**Figura 4.** Variación de los distintos parámetros en función del tiempo para un digestor de carga única o 'batch' y otro de carga continua (derecha) (10).

### Características del biogas

El contenido en metano puede ser reducido debido a la disminución de la actividad de las bacterias metanogénicas como resultado de la acumulación de ácidos por variaciones en la composición de la carga o la temperatura, o debido al envenenamiento por contaminantes tales como biocidas, fenoles o metales pesados. También se reduce la eficiencia por la disminución de la demanda química de oxígeno (DQO) de los residuos tratados (1). La DQO es la cantidad total de oxígeno (en mg) necesaria para oxidar completamente las sustancias orgánicas e inorgánicas contenidas en un litro de suspensión. La estabilidad del pH es fundamental y puede ser controlada por adición de álcali así como por el control de la composición y la velocidad de la alimentación.

Tanto el azufre orgánico (presente en algunos aminoácidos) y el inorgánico (presente en el yeso o generado por la neutralización con ácido sulfúrico de residuos como las melazas tratadas con cal) puede ser reducido a  $H_2S$ , un gas muy tóxico y altamente reactivo con los metales tales como hierro y cobre originando la corrosión. Esta reactividad hace que su contenido sea muy bajo en el gas de los rellenos sanitarios. Por otra parte el amonio liberado, por ejemplo durante la desaminación de las proteínas, permanece en solución (7).

El cuadro siguiente resume la composición promedio del biogas según la fuente. El valor calorífico varía entre 17-34 MJ/m<sup>3</sup> según el contenido de metano.

**Cuadro 5.** Composición del biogas derivado de diversas fuentes (1).

Gases	Desechos agrícolas	Lodos cloacales	Desechos industriales	Relleno sanitario	Propiedades
Metano	50 – 80%	50 -80 %	50 – 70%	45 – 65 %	Combustible
Dioxido de carbono	30-50%	20 – 50%	30 – 50 %	34 – 55 %	Ácido, asfixiante
Vapor de agua	saturación	saturación	saturación	saturación	Corrosivo, reduce valor calorífico
Hidrógeno	0 – 2 %	0 – 5 %	0 – 2 %	0 – 1 %	Combustible
Sulfuro de hidrógeno	100 –700 ppm	0 – 1 %	0 – 8 %	0,5 – 100 ppm	Corrosivo, tóxico, oloroso
Amoníaco	trazas	trazas	trazas	trazas	Corrosivo
Monóxido de carbono	0 – 1 %	0 – 1 %	0 – 1 %	trazas	Tóxico
Nitrógeno	0 – 1 %	0 – 3 %	0 – 1 %	0 – 20 %	Inerte
Oxígeno	0 – 1 %	0 – 1 %	0 – 1 %	0 – 5 %	Corrosivo
Orgánicos	trazas	trazas	trazas	5 ppm (terpenos, ésteres, hidrocarburos)	Corrosivo, oloroso

Los volúmenes de gas producido se suelen expresar como m<sup>3</sup> biogas/m<sup>3</sup> digestor o como m<sup>3</sup> biogas/kg DQO y difieren según el tipo de residuo, la concentración de sólidos volátiles (SV), la relación de carga, el tiempo de retención y el diseño del digestor. En general la producción oscila entre 1-5 m<sup>3</sup> biogas/m<sup>3</sup> digestor, o dicho de otra manera entre 0,3-0,5 m<sup>3</sup>/kg SV (1).

La condensación es con frecuencia un problema debido a que el digestor está generalmente más tibio que las cañerías por donde pasa. El agua también puede ser arrastrada como un aerosol en los sistemas agitados. En los pequeños sistemas es esencial una trampa de agua y puntos de drenaje de la misma. En los grandes sistemas puede ser necesario el enfriamiento para quitar el agua (7). El hidrógeno que suele hallarse en algunos rellenos sanitarios jóvenes, es un intermediario en el metabolismo anaeróbico. También algunas bacterias anaeróbicas pueden producir trazas de CO. La presencia de nitrógeno y/u oxígeno puede indicar una entrada accidental de aire y esto constituye un grave peligro debido al riesgo de explosiones. En los rellenos el oxígeno del aire atrapado es consumido por los microorganismos facultativos dejando el nitrógeno residual (1).

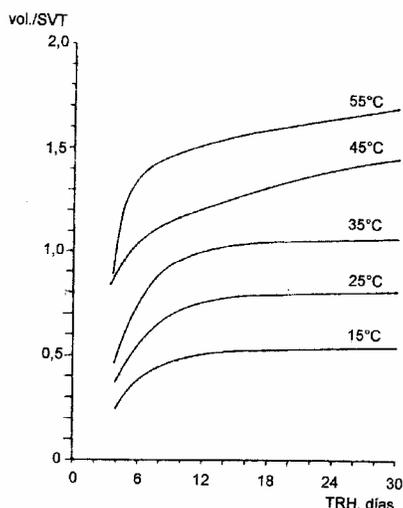
## Factores ambientales

Entre los factores ambientales de importancia vital para el funcionamiento de los digestores figuran: la temperatura, la concentración de sólidos, la concentración de ácidos volátiles, la formación de espuma, la concentración de nutrientes esenciales, las sustancias tóxicas y el pH (4).

Las metanobacterias sólo podrán desarrollarse cuando está tan avanzada la fermentación de los substratos primarios como almidón, celulosa o péptidos por acción de las bacterias anaerobias facultativas (por ejemplo *Escherichia*, *Enterobacter*, *Klebsiella* o *Bacillus* spp.), que se haya consumido todo el oxígeno disuelto, de manera que el potencial redox se sitúe en un valor suficientemente bajo, menor que -200 mV. Además, el pH no debe disminuir demasiado debido a los ácidos como el acético o el butírico producidos por los *Clostridium*, para no inhibir el crecimiento de los metanógenos sensibles (8).

Comúnmente la concentración de ácidos grasos volátiles no supera los 2 - 3 g/L, expresados como ácido acético. Si se sobrepasa este nivel, la formación de metano puede disminuir mientras que continúa la producción ácida y, la digestión cesará en dos o tres

días debido a que los metanógenos no pueden utilizar los ácidos a la misma velocidad con que se producen (4). El pH óptimo para la digestión está entre 7,0 y 7,2, aunque el rango satisfactorio va de 6,6 a 7,6. La digestión comienza a inhibirse a pH 6,5 (7).



Una vez que se ha estabilizado un digestor el lodo está bien amortiguado, es decir la concentración de protones no varía aún cuando se añaden cantidades relativamente grandes de ácido o álcali. Si esta capacidad de amortiguación se destruye y el pH disminuye, el digestor se "agria" o sea emite olores ácidos desagradables y cesa la metanogénesis (4). El CO<sub>2</sub> es soluble en agua y reacciona con los iones hidroxilo para formar bicarbonato. La concentración de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> es afectada por la temperatura, el pH y la presencia de otros materiales en la fase líquida y las condiciones que favorecen su producción a su vez aumentan el porcentaje de metano en la fase gaseosa (7)

**Figura 4.** Efecto de la temperatura sobre la producción de biogás, expresada como volumen en función de los sólidos volátiles totales según el tiempo de retención (TRH) (4).

La gama de temperatura para la digestión anaeróbica varía entre 10 y 60°C. Sin embargo las dos zonas óptimas son la mesófila (30-40°C) y la termófila (45-60°C). Casi todos los digestores funcionan dentro de los límites de temperaturas mesofílicas y la digestión óptima se obtiene a unos 35°C. La velocidad de digestión a temperaturas superiores a 45°C es mayor que a temperaturas más bajas. Sin embargo, dentro de esta gama de temperaturas, las bacterias son sumamente sensibles a los cambios ambientales y el mantenimiento de estas temperaturas elevadas resulta costoso y a veces difícil (4).

Por ejemplo, en un digestor donde los residuos permanecen 12 días, la producción de gas por unidad de sólidos volátiles totales añadidos diariamente es 20% mayor a 45°C que a 35°C (4). La digestión no sufre por un aumento de temperatura de unos cuantos grados. Pero una disminución repentina de sólo unos pocos grados puede detener la producción de metano sin afectar a las bacterias productoras de ácidos y esto conduce a una acumulación excesiva de ácidos provocando la falla del digestor (7)

En los climas cálidos, donde no existen temperaturas de congelación, los digestores pueden funcionar sin añadir calor pero hay que aumentar en cambio el tiempo de retención de los residuos en el digestor. La regulación de la temperatura puede lograrse haciendo circular agua caliente a través del contenido del tanque. La regulación de la temperatura en los digestores grandes por medio de termointercambiadores exige un equipo bueno y seguro y un mantenimiento continuo (4).

Las causas principales de una excesiva producción de ácidos volátiles son la elevada velocidad de carga, una baja temperatura y la formación de espuma. Ésta constituye una zona que favorece a los acetógenos. La sedimentación de los materiales fibrosos y la espuma se puede evitar mezclando el contenido del digestor, lo que también contribuye al proceso ya que establece condiciones uniformes (7).

La presencia de substancia tóxicas puede impedir el desarrollo bacteriano (4). Los antibióticos empleados en las explotaciones pecuarias llegan a los excrementos pero, como ocurre también con los antihelmínticos, no suelen afectar mayormente la digestión debido a la dilución con materiales no tóxicos. Las concentraciones de nitrógeno amoniacal deben ser inferiores a 1,5 g/L. Si bien es un amortiguador, su aumento puede llegar a impedir el proceso. También resultan tóxicas las sales de zinc, níquel y cobre, aunque este último puede ser necesario en ínfimas cantidades. Las sales de los elementos alcalinos y alcalino-térreos pueden ser estimulantes o inhibitorias según la concentración (7). Para una digestión óptima, todos los elementos esenciales en el metabolismo microbiano tienen que estar presentes en forma fácil de asimilar por las bacterias.

**Cuadro 6.** Efecto de la concentración de los cationes sobre la digestión anaeróbica (7).

Acción	Concentración g/L		
	Estimulante	Inhibitoria	Muy inhibitoria
Sodio	0,1 – 0,2	3,5 – 5,5	8
Potasio	0,2 – 0,4	2,5 – 4,5	12
Calcio	0,1 – 0,2	2,5 – 4,5	8
Magnesio	0,075 – 0,15	1,0 – 1,5	3

### Peligros potenciales

Además del gas, la digestión anaeróbica genera un efluente que puede ser usado como abono o para riego, según la cantidad de sólidos residuales o agua y el contenido de nitrógeno. Por otra parte juega un papel importante en el control de los olores de los residuos en las granjas o los rellenos sanitarios. La digestión mesofílica mata algunos patógenos tales como *Salmonella* y ciertos enterovirus durante un tiempo de retención de 20-30 días. Sin embargo, algunos parvovirus sobreviven aún en el rango termofílico. También la infectividad de los huevos de *Taenia saginata* es reducida en gran medida pero sobreviven los huevos de *Ancylostoma* sp. y *Ascaris suuiu*, aunque éstos desaparecen en el rango termofílico (1).

**Cuadro 7.** Eliminación de microorganismos durante la digestión anaeróbica (7).

Organismos	Temperatura, °C	Tiempo de residencia, días	Eliminación, %
Poliovirus	35	2	98,5
<i>Salmonella typhi</i>	22 – 37	6	99
<i>Salmonella</i> spp.	22 – 37	6 - 20	82 – 96
<i>Mycobacterium bovis</i>	30	...	100
Quistes de protozoos	30	10	100
<i>Ascaris</i> sp.	29	15	90

### Referencias

1. Coombs J. The present and future of anaerobic digestion. En: Anaerobic Digestión: A Waste Treatment Technology. Wheatley A, editor. Elsevier Science Publishers Ltd, Barking, Essex, 1990
2. Bjordal KA, Moore JE. Chemical characteristics and their relation to fermentability of potential biomass feedstocks. En: Methane from biomass: a systems approach. Smith WH, Frank JR, Abelson PH, eds. Elsevier Applied Science Publishers, Barking, Essex, 1988
3. Gustavsson M. Biogas Technology. Solution in search of its problem. Ph. Lic. Thesis. Göteborg University, Göteborg, Suecia, 2000
4. Taiganides EP. Biogas: recuperación de energía de los excrementos animales. Zootecnia 35: 2-12, 1980
5. Smith PH, Bordeaux FM, Wilkie A, Yang J, Boone D, Man RA, Chynoweth D, Jerger D. Microbial aspects of biogas production. En: Methane from biomass: a systems approach. Smith WH, Frank JR, Abelson PH, eds. Elsevier Applied Science Publishers, Barking, Essex, 1988
6. FAO/RAP. Rural energy: Medium and large scale biogas systems in the Asia-Pacific Region. RAP Bulletin, 1995
7. National Research Council Report. Methane Generation from Human, Animal, and Agricultural Wastes. National Academy of Sciences, Washington, 1977
8. Jagnow G, Dawid W. Biotecnología, Acribia, Zaragoza, 1991
9. U.S. EPA & ICF Inc. AgSTAR Handbook. <http://www.epa.gov/agstar/library/handbook.html>
10. Hernández Muñoz A. Depuración de Aguas Residuales. 3ª edición. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, 1990, cap. 10

# DIGESTORES RURALES

*Modelos. Criterios de diseño. Construcción. Operación. Seguridad. Accesorios.*

Diversos digestores convencionales que simulan la fermentación natural de la biomasa han sido diseñados en los últimos cien años, sin embargo la producción de metano en gran escala recién fue considerada en los años setenta. Hay una amplia variedad de digestores anaeróbicos de una sola etapa: los de tanque único, los agitados con o sin reciclado, los filtros anaeróbicos de flujo ascendente o descendente, los de lecho expandido anaeróbico, los de lecho fluidizado, los de manto de lodo anaeróbico con flujo ascendente y los de relleno con basura doméstica; que presentan una variedad casi ilimitada de regímenes operacionales.

La digestión ruminal está estratificada en dos sub-fases una líquida, y otra con alto contenido en sólidos donde la actividad metabólica y la concentración de intermediarios es mayor. Similarmente los digestores de dos fases tienen un mayor rendimiento en metano que los de una sola etapa. El número óptimo de fases para la conversión de la biomasa no ha sido establecido, pero debería ser grande para lograr la auto-regulación y control de los diversos parámetros (1).

## Modelo chino

Este digestor, cuyo esquema se muestra, tiene la cubierta fija y cuenta con la presión hidrostática auto-generada para distribuir el biogás (2). Las principales medidas para dimensionar el digestor se an a continuación.

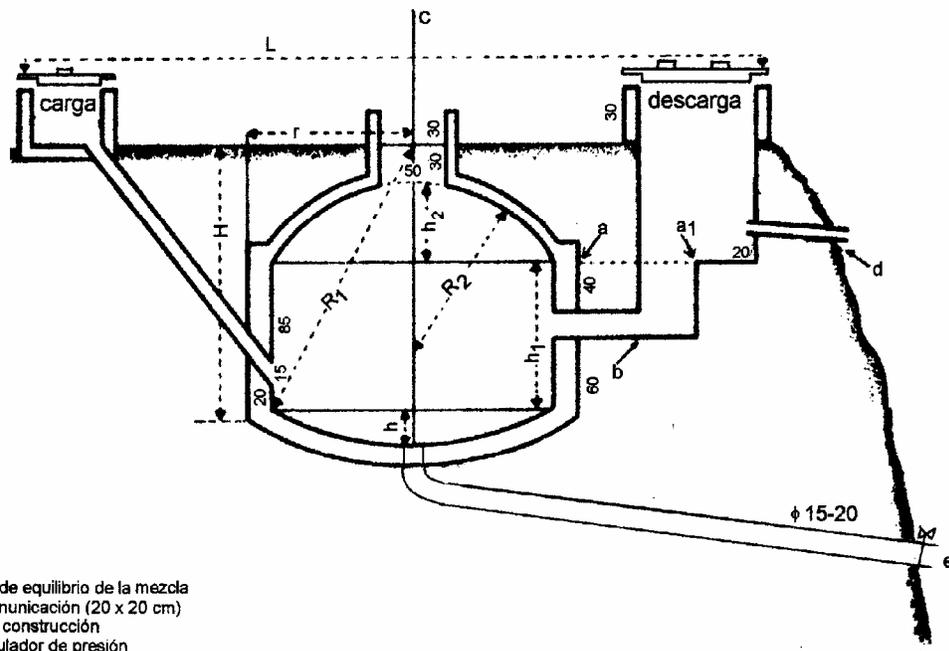


Figura 1. Esquema del modelo chino(3).

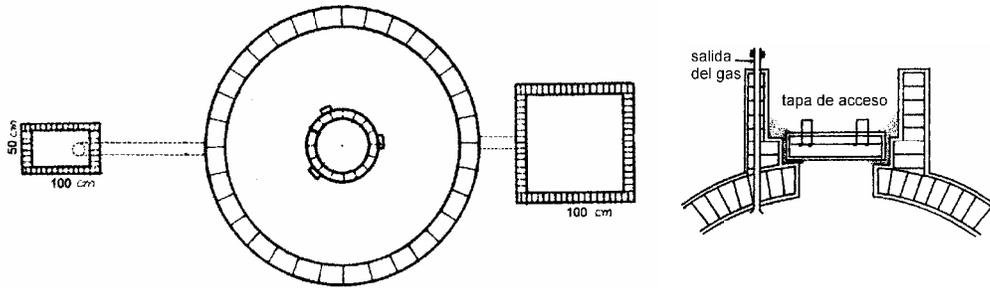


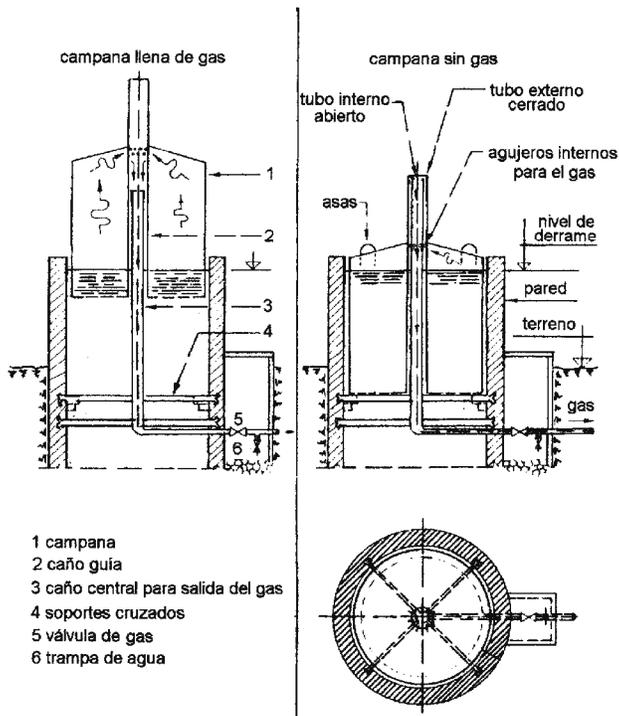
Figura 2. Planta del digester de la figura anterior y esquema de la tapa (3).

Cuadro 1. Medidas para dimensionar el digester de la figura 1 (3).

Volumen m <sup>3</sup>		Medidas en cm							
total	carga	L	r	H	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	H	h <sub>1</sub>	h <sub>2</sub>
7,60	6,14	660	120	220	255	150	30	120	60
9,84	7,78	680	130	230	266	160	32	130	70
12,46	9,72	700	140	240	296	170	35	140	80
14,80	11,23	720	150	250	321	180	37	150	90
19,01	14,51	740	160	260	346	190	40	160	100

Como se colecta el gas en el mismo digester, parte de la suspensión digerida es desplazada hacia un tanque de almacenamiento que está un nivel más alto. Este nivel sube con la producción y baja con el uso del biogas. La ventaja de este modelo consiste en la ausencia de una tapa metálica corroible, y la carencia de partes móviles.

### Modelo hindú



La figura muestra un esquema de este tipo de digester donde la campana colectora del gas es metálica y puede estar directamente sumergida en la suspensión para lograr el sellado, o bien en el aceite retenido entre las dos paredes concéntricas del tanque según el diseño. La descarga del líquido se hace por rebalse a través de un caño y la de sólidos por una abertura de inspección. La presión del gas depende del peso de la campana, por lo que suele colocarse bolsas de arena sobre la misma (4).

Figura 3. Esquema de un digester modelo hindú (5).

## Otros modelos



El artículo de van Brakel (6) resume los primeros digestores construidos en diversas partes del mundo y a grandes rasgos, son variantes de los dos descritos anteriormente. Uno de los más recientes es el que se esquematiza a continuación conveniente para zonas tropicales (7).

**Figura 4.** Esquema de un digestor hecho con una bolsa plástica (7).

## Construcción

Antes de comenzar la construcción de cualquier modelo, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- La instalación y mantenimiento debe ser socialmente aconsejable, técnicamente posible y económicamente justificable.
- El biogas substituirá a la leña, el carbón o algún derivado del petróleo y la digestión contribuirá a reducir la polución, proveyendo además un biofertilizante.
- El modelo elegido debe ser el conveniente para las condiciones climáticas locales.
- El proyecto debe ser elaborado según la materia prima disponible y la demanda de biogas diaria. También hay que tener en cuenta la existencia de otras fuentes alternativas de energía en la propiedad.
- La localización será la apropiada según la distancia de los puntos de consumo, la ubicación de la materia prima y la fuente de agua, la topografía del terreno, la textura del suelo y el nivel freático (3).

Los pasos principales de la construcción son: demarcación del terreno, excavación del cilindro, excavación del piso, excavación de las cámaras de carga y descarga, levantamiento de las paredes, construcción de la cúpula en el caso del modelo chino o de la campana en el hindú, construcción de las cámaras de carga y descarga, e impermeabilización (8).

**Cuadro 2.** Materiales de construcción y vida útil de dos digestores rurales (9).

Características	tipo de digestor	
	hindú	chino
capacidad de producción de biogas (m <sup>3</sup> / día)	2,8	2,8
factor de capacidad { % capacidad estimada)	75	75
materiales de construcción		
ladrillos (n°)	3.800	2.200
cemento y cal (ton)	0,97	0,43
arena y ripio (ton)	6,8	7,3
acero inoxidable (ton)	0,2	
vida útil del digestor (años)	10	15
de la campana (años)	5	
de las cañerías (años)	3	3
producción de biogas durante la vida útil (m <sup>3</sup> )	7700	11500

Los digestores hechos con piedras, ladrillos, cemento o acero inoxidable son durables, sin embargo este último material es muy costoso. El uso de materiales tales como goma o plástico, es riesgoso si no se evalúa correctamente su comportamiento, durabilidad y mantenimiento en las áreas rurales (8). Muchos materiales se han sugerido para la campana del modelo hindú, entre ellos plástico reforzado con fibra de vidrio y polietileno reforzado con una cesta de mimbre (9).

Aunque no se requiere gran cantidad de terreno para ubicar a un digestor doméstico (unos 25 m<sup>2</sup>) se deben tener en cuenta, además de los factores descriptos, la accesibilidad, la pendiente, las características del drenaje del suelo y la proximidad de árboles (9).

## Criterios de diseño

El principal objetivo del diseño de un digestor es alcanzar un alto contenido de biomasa dentro del mismo que permita una alta producción de biogas y una alta reducción de la DQO por unidad de volumen del digestor. Otro parámetro de la degradabilidad de los residuos es la demanda biológica de oxígeno (DBO) que es el consumo del oxígeno disuelto al cabo de 5 días a 20°C debido a la actividad metabólica de los microorganismos presentes. Tanto la DBO como la DQO son proporcionales al contenido de materia orgánica en la suspensión a degradar, pero la primera es más representativa de la digestibilidad de la misma. También puede usarse el valor de carbono orgánico total (COT) que se obtiene midiendo el CO<sub>2</sub> formado en la pirólisis (10).

Las consideraciones para el diseño de una planta de biogas en áreas rurales, incluyen la cantidad y el tipo de desperdicios disponibles, el tamaño de los trozos o partículas del mismo, el requerimiento de calefacción, la necesidad de agitación, la disponibilidad de materiales de construcción (11). Todos estos factores, excepto el último, son importantes para determinar la cantidad de gas a producir y su contenido en metano, pues bajo condiciones ambientales óptimas para la digestión, la cantidad de gas producido es proporcional a la cantidad de residuos agregados.

Los materiales que pueden ser degradados fácilmente se estabilizan más rápido que los resistentes, necesitando un tiempo de retención más corto y un digestor de menor tamaño. Las partículas pequeñas son mejor fermentadas que los trozos gruesos, por lo que es aconsejable picar bien materiales tales como paja, virutas, hojas, bagazo antes de agregarlos al digestor. También permiten que la suspensión fluya uniformemente reduciendo la formación de espuma y evitando el taponamiento de las cañerías de carga y descarga. La producción de gas aumenta por incremento del área expuesta al ataque bacteriano, reduciendo el tiempo de retención necesario (9).

Cuando las condiciones climáticas lo exigen, se debe calentar el digestor para acelerar el proceso, o sea reducir el tiempo de retención y a su vez el tamaño del digestor. Pero este paso requiere emplear parte del gas producido, disminuyendo la cantidad aprovechable para uso doméstico, a menos que se emplee otra fuente alternativa de energía mas ésta también tiene un costo de instalación y operación (11).

El volumen del digestor está dado por el volumen de la suspensión de los desperdicios agregados multiplicado por el tiempo de retención conveniente según el tipo y el tamaño de los desperdicios y la temperatura de operación.

El volumen de un digestor hindú está dado, según Prasad et al. (12), por la siguiente fórmula:

$$V = [CR (1+D) t_F]/Y \cdot d$$

donde: C es la capacidad deseada de la planta en biogas por día,

R es la relación estiércol vacuno húmedo/estiércol seco, comúnmente 5,

D es el peso de agua añadida a cada unidad de peso de estiércol,

t<sub>F</sub> es el tiempo de fermentación en días,

Y es el gas producido por unidad de peso de estiércol seco,

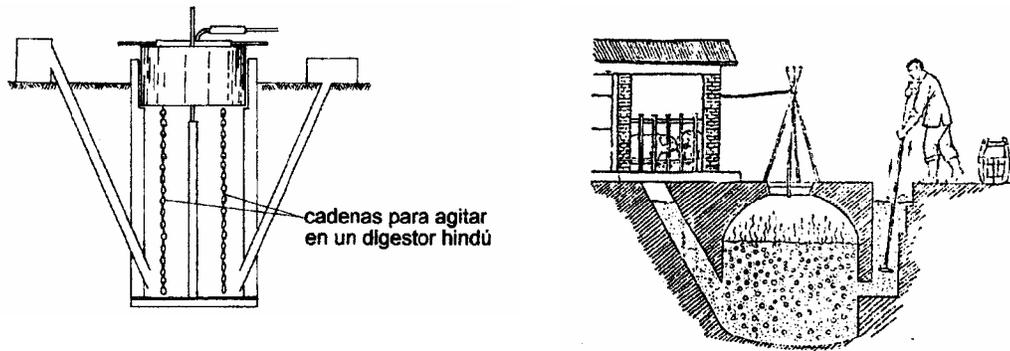
d es la densidad de la mezcla estiércol-agua.

Por ejemplo, si C = 2,8 m<sup>3</sup>/día, R = 5, D = 1,25; t<sub>F</sub> = 30 días, Y = 0,2 m<sup>3</sup>/kg, d = 1.102 kg/m<sup>3</sup>, el volumen del digestor es 4,3 m<sup>3</sup>. Sin embargo, suele ser sobredimensionado en un 40%.

El volumen del digestor V es proporcional a la relación t<sub>F</sub>/Y, por lo que un aumento en la temperatura de fermentación, dentro de cierto rango, aumenta el rendimiento del gas Y, permitiendo reducir el tiempo de retención t<sub>F</sub> o disminuir V (12).

El mezclado influye tanto como el tamaño de las partículas, pues expone nuevas superficies a la acción bacteriana y previene la disminución de ésta por agotamiento

puntual de los nutrientes o acumulación de metabolitos. Generalmente no es necesario agitar el contenido de los digestores domésticos cuando el tiempo de digestión es largo (50-60 días), sin embargo en las plantas que digieren grandes cantidades de residuos se incorpora un agitador para reducir el tamaño del tanque (13) o se hace recircular el biogas a presión (10).



**Figura 6.** Modo de agitar los pequeños digestores (2, 4).

La provisión de agua para los digestores es otro punto a tener en cuenta. Sobre la base de una relación estiércol húmedo/estiércol seco de 5:1 y de una relación estiércol húmedo /agua de 4 : 5, se necesitan 4.200 litros de agua diarios para el funcionamiento de un digestor que produce 126 m<sup>3</sup> de biogás diarios. Pero, la fracción líquida podría ser reciclada en aquellos casos en que el agua es escasa.

Por otra parte, la reducción de la relación agua/estiércol a la mitad ocasiona una disminución del 40% en la producción de gas. Sin embargo, cuando la temperatura de operación se eleva, por ejemplo de 15 a 27°C, aumenta la cantidad de gas en 100%. Entonces, es posible disminuir la cantidad de agua en los climas cálidos permitiendo un rendimiento aceptable del biogás.

Se puede estimar la demanda máxima de biogás suponiendo las necesidades durante cada hora del día para planificar el tamaño de la campana de un digestor hindú, pero en general se considera conveniente no sobrepasar el volumen del gas producido diariamente (12). Otras consideraciones, independientes del tamaño del digestor, incluyen: reducir los problemas de corrosión en el caso del modelo hindú, prevenir la contaminación de las fuentes de agua, elegir el mejor sistema de carga, seleccionar los materiales de construcción.

La corrosión es un problema serio por la exposición constante de las partes metálicas del sistema hindú al sulfuro de hidrógeno y los ácidos orgánicos, que ya están en el material o se forman durante la fermentación. Por lo tanto se deben cubrir con una pintura resistente (11). La ubicación de la zona de operación del digestor debe ser tal que no contamine la napa de agua, debido a la permeabilidad del suelo.

Las plantas de biogás con alimentación "batch" se construyen cuando es difícil de obtener los materiales diariamente, por ejemplo se utilizan para fermentar material vegetal grueso, tal como tallos de maíz o bagazo de caña de azúcar. A las dos semanas de carga comienza la producción de biogás y continúa por unos tres meses. Cuando cesa, se abre el digestor y se limpia. La suspensión remanente se extiende sobre tierras de cultivo como fertilizante. En los casos que se usa este sistema suele haber al menos dos digestores, de modo que haya siempre uno en operación (10).

Los digestores con mezclado y semicontinuos (alimentados diariamente) son eficientes cuando reciben lodos de albañal, pero pueden no resultar así en ambientes rurales debido a la variedad de la composición de la carga diaria. En los digestores con excrementos animales es necesario remover periódicamente la capa de espuma. Por otra parte, en los modelos en que la carga es horizontal (tipo flujo-tapón) suele haber menos problemas de formación de espuma que cuando es vertical (11).

Al diseñar una planta de biogas se debe considerar si conviene usar un digestor con uno (monofásico) o más compartimentos, o bien dos digestores operados en serie (bifásicos) para lograr un mayor grado de estabilización de los residuos y un incremento en la producción de gas. Esto puede ser innecesario en las pequeñas plantas, pues las encarece. En los digestores bifásicos de gran velocidad el primer tanque tiene por objeto establecer las condiciones óptimas para la metanogénesis mientras que el segundo tanque funciona como depósito de almacenamiento y estabilización de los sólidos (10).

Para establecer el potencial en biogas de un pequeño pueblo rural es necesario tener información exacta sobre el número de habitantes/ la cantidad de ganado, la producción diaria de estiércol y heces, la eficiencia en la recolección de los desechos, la disponibilidad de agua, el rendimiento teórico de gas por unidad de peso de estiércol y heces, la disponibilidad de residuos celulósicos fermentables, etc. La producción diaria posible de biogas se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$P = N_A X_A Y_A + N_P X_P Y_P + P_R Y_R$$

donde  $N_A$  es la cantidad de animales,

$N_P$  la población humana,

$X_A$  y  $X_P$  el promedio diario de estiércol y heces por animal y por persona,

$Y_A$  y  $Y_P$  el rendimiento de gas por unidad de peso de estiércol y heces,

$P_R$  el peso total diario de otros residuos disponibles,

$Y_R$  el rendimiento de gas por unidad de peso de los otros residuos disponibles (12).

Algunos parámetros en la ecuación anterior varían drásticamente de una región a otra, por ejemplo  $X_A$  depende del tamaño promedio del ganado y  $P_R$  es siempre diferente. Estos detalles son vitales para tomar las decisiones económicas y hacer el diseño de la planta de biogas.

Se supone un pueblo rural de 500 habitantes con 100 casas y 250 vacunos. Se considera que el valor promedio de estiércol seco es de 3,2 kg por animal por día, por lo que se espera un rendimiento de 800 kg de estiércol seco por día. Es razonable pensar que el 75% de este material puede ser recogido o sea 600 kg. El rendimiento de biogas a partir de la fermentación del estiércol es de 0,187 m<sup>3</sup> a 15°C y 0,374 m<sup>3</sup> a 27°C, por lo tanto en el pueblo se puede generar en invierno 112 m<sup>3</sup> de biogas por día.

Dado que las casas están más o menos alejadas una de otra, conviene que cada una tenga su propio digestor al que se conecta la letrina. Se producirá en total 14 m<sup>3</sup> de biogas por día sobre la base de 0,028 m<sup>3</sup>/persona\*día. La producción de biogas en el pueblo proveniente de estiércol vacuno y heces suma 126 m<sup>3</sup>/día, sin contar el que se puede obtener de residuos celulósicos, gallinaza, desechos de criaderos de cerdos y conejos, restos de matadero, etc (12).

## Operación

La carga inicial requiere una gran cantidad de materia prima que conviene reuniría mientras se esa construyendo el digestor. Dado que ya sufre una transformación antes de ser introducida se debe controlar el pH, así como asegurar el agregado de estiércol vacuno fresco u otro material que contenga los microorganismos necesarios, por ejemplo lodo de un digestor de aguas cloacales.

El éxito de un digestor depende de la radicación y mantenimiento de los organismos acidificantes y metanogénicos en forma equilibrada. Si el digestor acumula ácidos volátiles como resultado de una sobrecarga, la situación puede corregirse por la resiembra de organismos, la suspensión temporaria de la alimentación o el agregado de cal. Durante las primeras semanas el productor necesitará la asesoría técnica hasta que el sistema esté en régimen (3).

La temperatura tiene un significativo efecto sobre la digestión anaeróbica de los materiales orgánicos (ver gráfico de la página 30). Los digestores enterrados aprovechan las propiedades aislantes del suelo que los rodea. Pero en caso de los construidos sobre el suelo deben estar rodeados de anillos de hojas, aserrín paja, los que generarán calor durante el compostaje. Una vez transformados los materiales de estos anillos deben ser cambiados por residuos frescos. El material compostado aún podría contribuir a la mezcla

de alimentación del digestor (11). El rendimiento promedio en China, durante el verano, es de 0,2 m<sup>3</sup> de gas por día por m<sup>3</sup> del digestor mientras que en Sri Lanka aumenta a 0,5 m<sup>3</sup> de biogas diarios /m<sup>3</sup> (9). En general, la digestión óptima se obtiene a unos 35°C, pero una disminución repentina de sólo unos pocos grados puede detener la producción de metano sin afectar a las bacterias productoras de ácidos los que se acumulan, por lo tanto la temperatura tiene que regularse dentro de un margen estrecho de 2 a 5°C (10).

El operarlo que maneje diariamente el digestor deberá estar adiestrado en la tarea y poseer las instrucciones escritas. Entre las actividades diarias estarán las de tomar la temperatura ambiente y del agua, reunir y homogeneizar el material de la carga, reciclar el efluente, apreciar el olor y la presencia de insectos, y semanalmente controlar y corregir el pH. También controlará la seguridad en el uso del biogas. Identificará pérdidas, registrará la presión del gas, examinará los puntos de consumo, drenará el agua del tubo de gas, verificará el nivel de líquido del manómetro (3).

En los cuadros de las páginas 27 a 29 y la presente se describen las características de los diversos materiales que se usan, solos o mezclados, para cargar un digestor. Pueden emplearse varios métodos para el mezclado: a) mediante la carga diaria, b) por manipulación de los dispositivos de entrada y salida de manera que las operaciones de alimentación y descarga favorezcan el mezclado, c) por instalación de dispositivos de mezclado que puedan ser operados manualmente, d) introduciendo la suspensión como un chorro a presión, e) haciendo entrar la suspensión como un chorro tangencial al contenido del digestor. Si no se agita se puede reducir la estratificación usando un digestor de desplazamiento horizontal (11).

El efluente se retira con baldes o por drenaje en un terreno desnivelado. Puede ser usado directamente como fertilizante o bien secado para tener un abono sólido (3).

La velocidad de la degradación de un material orgánico refleja la interacción de la cantidad de biomasa microbiana activa por unidad de volumen y dicho material disponible para los microorganismos. La carga diaria para un digestor de lodos cloacales suele ser de 0,5-1,6 kg de sólidos volátiles totales (SVT) por m<sup>3</sup>, con un tiempo de retención de 30-90 días. En el caso de digestores hindúes con estiércol vacuno, es de alrededor de 0,5 kg sólidos volátiles por m<sup>3</sup>. En la India la carga de los digestores con heces humanas oscila entre 1 y 2 kg de sólidos volátiles por m<sup>3</sup> (11).

De la fórmula empleada para el cálculo del volumen del digestor hindú en la página 36, puede obtenerse la velocidad de carga L:

$$L = d / [R (1+D) t_p] = C / Y * V$$

En el ejemplo allí dado, L=3,25 kg/m<sup>3</sup> \* día, o sea se agrega en total 14 kg de estiércol seco por día (12).

**Cuadro 3.** Características del estiércol de cerdos y lecheras(14).

Características	Vacas lecheras		Cerdos
	promedio	rango	promedio
Sólidos totales	15,4 % estiércol	12,9 – 19,8 % estiércol	1700 mg/L
Sólidos volátiles	86,1 % ST	76,7 – 91,8 % ST	1000 mg/L
DQO total	149 g/L	81 – 284 g/L	1400 mg/L
DQO soluble	33 g/L	19 – 53 g/L	-
DBO <sub>5</sub> total	16,1 g/L	8,6 – 21,5 g/L	725 mg/L
DBO <sub>5</sub> soluble	9,3 g/L	4,6 – 14,4 g/L	-
COT	-	-	680 mg/L
pH	6,2	5,2 – 6,8	-
Nitrógeno total	2,8 % ST	2,6 – 2,9 % ST	200 mg/L
Amonio	-	-	100 mg/L
Nitrato	-	-	1 mg/L
Fosfato total	-	-	85 mg/L
Fósforo soluble	0,5 % ST	0,17 – 0,32 % ST	-
Potasio total	-	0,5 – 5 % ST	-

En el cuadro siguiente se indican algunas características del estiércol de varios animales dadas por otros autores.

**Cuadro 4.** Características de los excrementos referidos a 100 kg de peso vivo total (10).

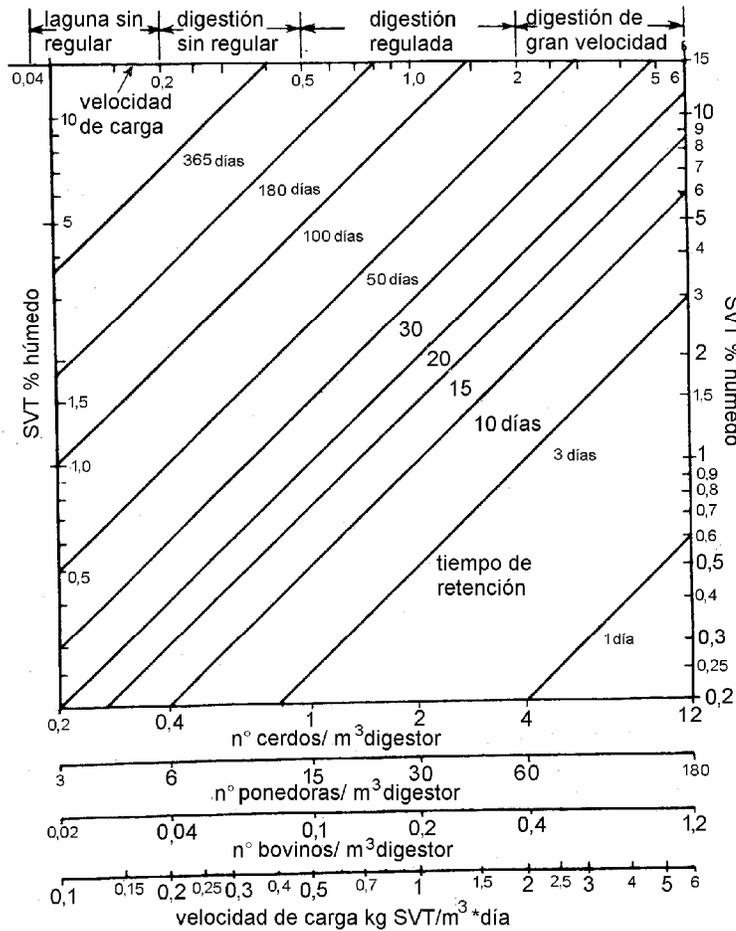
Característica	Símbolo	Unidad	Cerdos	Gallinas ponedoras	Bovinos engorde	Ovinos	Vacas lecheras
Excrementos húmedos	EH	kg/día*100 kg vivol	5,1	6,6	4,6	3,6	9,4
Orina	-	% de EH	45	0	29	50	31
Sólidos totales	ST	% de EH	13,5	25,3	17,2	29,7	9,3
		kg/día*100 kg vivo	0,69	1,67	0,70	1,07	0,89
Contenido de humedad	-	% de EH	86,5	74,7	82,8	70,3	90,7
Sólidos volátiles totales	SVT	% de ST	82,4	72,8	82,8	84,7	80,3
		kg/día*100 kg vivo	0,57	1,22	0,65	0,91	0,72
Nitrógeno total	N	% ST	5,6	5,9	7,8	4,0	4,0
		kg/día*100 kg vivo	0,039	0,099	0,055	0,043	0,036

**Cuadro 5.** Cantidad necesaria de diversos materiales para alimentar el digestor (9).

Material	kg/ día necesarios para producir		Condiciones ambientales
	1 m <sup>3</sup> de biogas/día	3,5 m <sup>3</sup> de biogas/día	
Pasto seco	1,6	5,6	-
Paja de maíz seca	1,2	4,3	-
Cáscara de arroz seca	1,6	5,6	-
Estiércol de cerdos	13	44	-
Estiércol de gallina	16	56	-
Excremento humano	14	49	-
Estiércol vacuno húmedo	12	41	Verano (aire: 30°C)
	28	98	25°C
	31	110	Invierno (aire 14°C)

Por otra parte un cultivo de camalote con una superficie acuática de 0,4 Ha permite cosechar 1.200 toneladas de material fresco en un año, equivalente a 60 toneladas de material seco, a partir del cual se puede obtener 11.300 m<sup>3</sup> de biogas al año o sea 31 m<sup>3</sup>/día en zona tropical (12).

Los digestores cargados a razón de 0,2-0,5 kg SVT/m<sup>3</sup> \*día, generalmente sin agitación, corresponden a las pequeñas instalaciones para granjas cuyo tamaño medio es de 10 m<sup>3</sup>. Cuando la velocidad de carga está entre 0,5 y 2 kg SVT/m<sup>3</sup> \*día se requiere un mezclado al menos intermitente y requiere una supervisión mayor que los anteriores. Los digestores cargados con 2 a 6 kg SVT / m<sup>3</sup> \*día son de gran velocidad y están agitados constantemente, dentro de este grupo están los construidos para el tratamiento de los lodos cloacales (10). Sin embargo, una concentración de sólidos de 3 a 10% es preferible tanto para la digestión de gran velocidad como para la regulada. La producción de gas puede aumentar hasta 40% cuando se duplica la concentración de sólidos del estiércol bovino pero reducirse en casi 60% si se trata del excremento de aves de corral por la formación de amoníaco (10).



**Figura 7.** Relación entre el estiércol producido por un número de animales diversos y la velocidad de carga del digestor respecto al tiempo de retención y el % de sólidos volátiles totales en la carga. Se considera que las gallinas pesan 2 kg, los porcinos 60 kg y los vacunos 500 kg cada uno (10).

De acuerdo a este gráfico, si un digestor chino tiene un volumen de  $10 \text{ m}^3$  y funciona con un tiempo de retención de 30 días, la carga total diaria puede ser de 10 kg de SVT (aproximadamente  $12,5 \text{ kg}$  de sólidos totales) lo que corresponde al estiércol producido por 2 vacunos de 500 kg y se suspende en agua para lograr una

concentración de 3% de SVT. Según los cuadros de la página anterior los 2 bovinos excretan  $32,7 \text{ kg}$  de estiércol que contiene  $6,5 \text{ kg}$  de SVT, o sea una concentración de casi 20 %, por lo que se debe agregar unos  $180 \text{ kg}$  (aprox.  $180 \text{ L}$ ) de agua, y la cantidad de gas producida a  $25^\circ\text{C}$  es de  $1,2 \text{ m}^3$ .

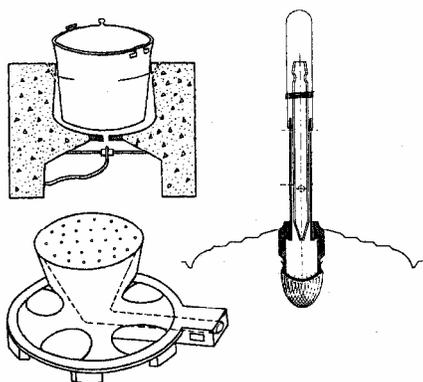
## Uso del biogás

En el ambiente doméstico el biogás se usa para iluminar y cocinar  $\{2\text{-}6 \text{ m}^3$  por hora). También suele emplear para calefacción de ambientes mediante un caldera, esto es común en la industria y la agricultura, rindiendo unos  $5,3 \text{ kW}$  por  $\text{m}^3$ . Como puede ser purificado y comprimido se puede utilizar en un vehículo, pero dependerá de la disponibilidad y precio de los combustibles líquidos convencionales ya que  $1 \text{ m}^3$  de biogás equivale a  $0,8 \text{ L}$  de nafta.

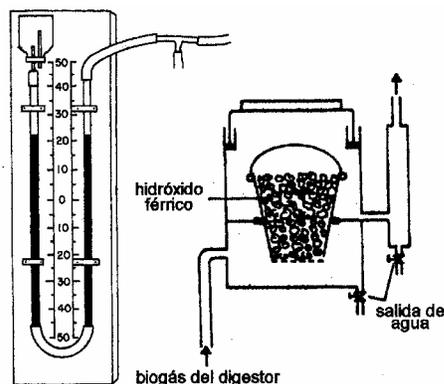
La necesidad de biogás en el pueblo del ejemplo de la página 38, se estima entre  $670$  y  $1065 \text{ kW/día}$ , lo que equivale a  $126,5\text{-}201,2 \text{ m}^3$  biogas/día. Este consumo se distribuiría en  $200\text{-}900 \text{ kW/día}$  ( $37,8\text{-}170 \text{ m}^3$ /día) para cocinar,  $70 \text{ kW/día}$  ( $13,2 \text{ m}^3$ /día) para iluminación,  $75\text{-}200 \text{ kW/día}$  ( $14,2\text{-}37,8 \text{ m}^3$ /día) para los equipos de bombeo,  $20\text{-}50 \text{ kW/día}$  ( $3,8\text{-}9,4 \text{ m}^3$ /día) para un taller, y el resto en otros usos. Por lo tanto, con sólo el biogás proveniente de las excretas se cubrirían los requerimientos mínimos, siempre y cuando se utilizaran los residuos con un criterio comunitario (12).

## Seguridad

La regulación y utilización del biogás comprende la instalación de los siguientes accesorios: arrestallamas, válvula de seguridad por exceso de presión, válvula de seguridad por exceso de vacío, conexión flexible a la salida del digestor en el modelo hindú especialmente, manómetro de columna de agua, llave esclusa para cortar el suministro al realizar tareas de mantenimiento, trampa depuradora de  $H_2S$ , trampa de condensado de agua, válvula reguladora de la presión del gas (8).



**Figura 8.** Accesorios para el uso del biogás: fogón, lámpara, quemador y arrestallamas (8)



**Figura 9.** Manómetro de agua y depurador del biogás (8).

Independientemente del tamaño del digestor, es necesario colocar un manómetro de agua. Si la presión es negativa por haberse retirado más efluente que la alimentación agregada, no se debe abrir los puntos de consumo de gas para evitar la llegada de aire al interior. Además se debe intercalar un arrestallamas en la cañería.

Como el metano es explosivo cuando está mezclado con 5-15% v/v de aire. La primera cantidad de gas producido debe ser venteadada pues generalmente está mezclada con aire, luego sólo habrá biogás en la cúpula del digestor chino o la campana del hindú. Por otra parte cuando se detiene un digestor para retirar los lodos se debe ventilar bien el interior pues el biogás es asfixiante (13).

La eliminación del sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) se hace principalmente para prevenir la corrosión por los residuos de la combustión. En el ambiente rural se suele usar el proceso catalítico seco con  $Fe(OH)_3$ , y el catalizador se puede regenerar varias veces. La remoción de parte del  $CO_2$  es necesaria para usar el biogás como combustible y se requiere  $1\text{ m}^3$  de agua fría por hora para tratar  $60\text{ m}^3$  de biogás diarios (11)

## Referencias

1. Smith PH, Bordeaux IM, (Soto M, Shiralipour A, Wilkie A, Andrews JF, Ide S, Barnett MW. Biological production of methane from biomass. En: Methane From Biomass: A Systems Approach. Smith W.H., Frank JR, Abelson PH, eds. Elsevier Applied Science, London, 1988, pp. 291-334.
2. Van Buren A. A Chinese Biogas Manual. Intermediate Technology Publications, London, 1979
3. da Silva NA. Construção e operação de biodigestor modelo chinês. Energía. Fontes Alternativas. 3(14): 31-56, 1981
4. Chiranjivi C. Design analysis of small-scale anaerobic digesters in India. En: Energy from Biomass and Wastes. White & Me Grew, editores. IGT, Chicago, 1978, pp. 449-464.
5. National Research Council Report. Food, Fuel, and Fertilizer from Organic Wastes. National Academy Press, Washington, 1981, pp.64-92.
6. Van Brakel J. Biogas before 1970: a review. Tropical Science 22: 105-148, 1980

7. Rodriguez L, Preston TR. Biodigester installation manual. University of Agriculture and Forestry, Vietnam (<http://www.fao.org/waicent/faoinfo/agricult/aga/agap/frg/r.../manual.html>)
8. FAO/UNDP. China: Azolla propagation and small scale biogas technology. FAO Soil Bulletin 41: 21-65, 1978
9. Santerre MT, Smith KR. Measures of appropriateness: The resource requirements of anaerobic digestion (biogas) systems. World Development 10: 239-261, 1982
10. Taiganides KP. Biogas: recuperación de energía de los excrementos animales. Zootecnia 35:2-12, 1980
11. National Research Council Report, Methane Generation from Human, Animal, and Agricultural Wastes. National Academy of Sciences, Washington 1977, pp.74-101.
12. Prasad CR, Krishna Prasad K, Reddy AKN. Biogas plants: prospects, problems and tasks. Economic and Political Weekly Special number august 1974, 1347-1364
13. FAO/UNDP. China recycling of organic wastes in agriculture, Chapter 4. Biogas technology and utilization. FAO Soil Bulletin 40: 47-63, 1977
14. Thomas R, Law JP. Properties of waste waters. En: Soils for Management of Organic Wastes and Waste Waters. Elliott LF et al., eds. American Society of Agronomy, Madison, 1977, pp. 46-72

# DIGESTORES DE RESIDUOS INDUSTRIALES

Tipos de residuos. Tratamiento. Reactores. Control de la digestión.

La aplicación de un tratamiento anaeróbico a las aguas residuales industriales es una tecnología ampliamente aceptada debido a que los costos son más baratos que los procedimientos alternativos, especialmente cuando se trata de efluentes concentrados, e incluso en algunos países se ha subsidiado esta práctica. Mediante la digestión anaeróbica los costos de eliminación de efluentes pueden llegar a ser reducidos hasta en un 80% (1).

## Residuos de las industrias alimentarias

Las industrias más beneficiadas con la digestión anaeróbica son las cervecerías, destilerías, fábricas de almidón y dulces, y usinas lácteas. La higiene y el control de calidad necesarios conducen a la formación de una gran cantidad de efluentes y no hay oportunidad de reciclaje alguno. Si bien los constituyentes son biodegradables, hay numerosas dificultades en la práctica principalmente debido a la fluctuación en el tipo y cantidad de desperdicios a tratar, además de la presencia de detergentes y desinfectantes. Por lo general hay una deficiencia en nitrógeno que se acentúa cuando la concentración de material degradable es alta (2).

**Cuadro 1.** Concentración de los efluentes generados en la industria alimentaria (1).

Industria	DBO g/L	Industria	DBO g/L
láctea	0,5 – 0,75	quesería	1,5 – 2,5
destilería	1,5 – 2,0	cervecería	0,5 – 1,5
maltería	2,0 – 3,0	conservera	0,1 – 1,3
pollería	0,6	matadero	1,0 – 2,0

Las usinas lácteas suelen estar en zonas rurales. Una planta procesadora de 500 m<sup>3</sup> de leche genera un volumen similar de efluentes por lavado de tanques, cañerías e instalaciones. Los productos de limpieza muy alcalinos elevan el pH a niveles tóxicos para la digestión anaeróbica, siendo necesario almacenar el efluente en un vaciadero para balancearlo. El bajo contenido de sólidos de los efluentes (DQO 0,1 a 2,25 g/L) de la industria láctea favorecen el uso de los filtros anaeróbicos (1).

El efluente de la producción de almidón suele tener una DQO entre 15 y 25 g/L, con alta proporción de sólidos coloidales. Si la degradación se produce en una sola etapa se usa un digestor tipo 'UASB' o de contacto, pero es conveniente un tratamiento en dos etapas con una hidrólisis previa (3).

La industria azucarera es rural y estacional. El efluente, con una DQO de 15 g/L, se deteriora rápidamente generando ácidos, razón por la cual se debe agregar cal. Los microorganismos en el digestor anaeróbico flocculan alrededor de la cal, además ésta promueve la decantación en el proceso por contacto. Una desventaja de la cal es su acumulación reduciendo el espacio del digestor para la biomasa activa. También se emplean digestores que permiten una concentración de sólidos relativamente alta, tal como el de contacto o el UASB. Muchos de los residuos de la fabricación de dulces tiene

grandes valores de DQO, entre 5 y 10 g/L. Las aguas servidas son ácidas, comúnmente calientes y suelen requerir nutrientes adicionales para su digestión (1).

Las cervecerías suelen estar en predios urbanos con la opción de descargar las aguas residuales en las alcantarillas. Las aguas residuales tienen menos sólidos que las de la industria láctea, con una DQO de 0,5 a 1,5 g/L y el pH es neutro. La digestión anaeróbica es un medio de pretratamiento antes de verterlas al albañal (2).

Los efluentes de las destilerías suelen tener 10 g/L de sólidos y una DQO de 10 a 60 g/L. Como en el caso de las cervecerías parte de los desperdicios pueden emplearse como forraje y fertilizante. Una pequeña destilería produce unos 500 m<sup>3</sup> de efluente semanales mientras que una grande puede generar 10.000 m<sup>3</sup> por semana. Las aguas residuales reciben primero un tratamiento aeróbico debido a la acidez y luego pasan a los digestores anaeróbicos con agitación o a los filtros anaeróbicos (3).

La industria de procesamiento de hortalizas y frutas es generalmente rural y estacional. Los efluentes están diluidos, excepto en el caso del procesamiento de papas y arvejas que genera una gran cantidad de almidón soluble siendo los digestores convenientes el UASB o el de contacto. Las aguas servidas del procesamiento de arvejas tiene una DQO de alrededor de 4 g/L.

Los efluentes de los frigoríficos contienen grasa, sangre y heces, además de materiales difíciles de degradar como los pelos y también llevan altas concentraciones de desinfectantes tal como hipoclorito. Son residuos difíciles de tratar y se utilizan reactores que permiten una concentración de sólidos alta con un tiempo de retención largo (1).

## Residuos de otras industrias

La industria papelera emplea madera, bagazo u otros restos celulósicos y usa unas 40 toneladas de agua por tonelada de papel producido. Se pierde de 1,5 a 2% de fibra con los efluentes por lo que éstos suelen ser reciclados. El tratamiento anaeróbico es afectado por los detergentes, sulfuros y pesticidas, mientras que la biodegradabilidad de lignina es muy baja. Los efluentes tienen una DQO entre 10 y 20 g/L (2).

La industria textil y la farmacéutica suelen tratar las aguas residuales aeróbicamente, pero también pueden ser digeridas anaeróbicamente aunque, en ocasiones, se produce un 'shock' tóxico debido a la presencia de sulfatos, solventes clorados y agentes tensoactivos, o porque los sólidos no son biodegradables (1).

## Tratamiento de los efluentes

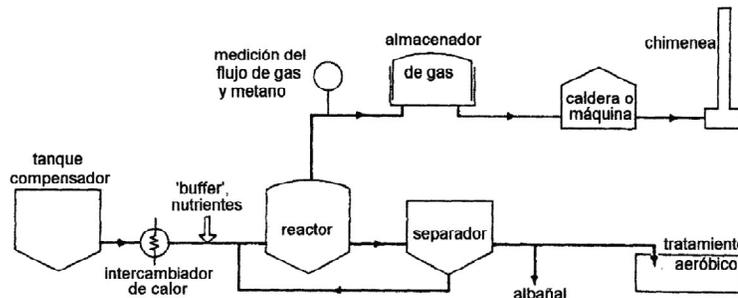
Para establecer la posibilidad de poner en marcha un digestor es necesario comprender los procesos de producción, así como la cantidad y las características físicas y químicas de los efluentes generados con el fin de conocer:

- las pérdidas de producto y materiales crudos en cada unidad del proceso,
- el costo de la eliminación de los efluentes,
- el costo del material desechado como un porcentaje del valor agregado,
- el costo de tratamientos alternativos, y
- los procedimientos de control posibles (2).

En el caso de algunos efluentes existen suficientes datos para el diseño de una planta de tratamiento anaeróbico pero, para muchos otros es necesario hacer ensayos de digestibilidad en el laboratorio aunque nunca se pueda simular totalmente las condiciones a escala real (4). El problema encontrado con más frecuencia en los efluentes industriales comparados con los domésticos, es la carencia de algunos nutrientes, la variabilidad de sus características y la presencia de sustancias tóxicas (2).

Las aguas residuales son una compleja mezcla de materiales disueltos y suspendidos, y un tratamiento completo incluye la combinación de varias etapas (fig. 1). El tratamiento biológico es la etapa principal en la remoción de la materia orgánica y puede actuar tanto sobre materiales disueltos como suspendidos, pero es más efectivo separar los sólidos decantables. La mayoría de los procesos anteriores a la digestión son diseñados para proteger la etapa biológica de 'shocks', bloqueo con sólidos o perjuicios por materiales

inertes. Los procesos posteriores tienen como finalidad la separación de la biomasa activa. También se requiere equipamiento auxiliar para el control de temperatura, pH y manejo del biogás (1).



**Figura 1.** Tratamiento anaeróbico de las aguas residuales industriales (1).

El cribado permite quitar los detritos que pueden causar oclusiones y daños en el equipo aunque no

aumenten la carga de contaminantes en el digestor, tales como plumas, trapos, cuerdas, película plástica, cartón y otros materiales de empaque. Las cribas comúnmente tienen aberturas de 4 a 5 mm. Algunos efluentes requieren además otro filtro con aberturas gruesas de 25 a 50 mm. Es importante la colocación de cribas aún para aguas residuales aparentemente libres de sólidos gruesos, tales como las de usinas lácteas, debido a que los restos de material de empaque pueden dañar el equipo mecánico de bombeo. En la industria de alimentos el cribado permite separar material para forraje o bien para desecharlo hacia el relleno sanitario (2).

En el caso de algunas aguas residuales, como las del procesamiento de papas o remolacha azucarera, es necesario separar los restos de suelo por ejemplo, mediante circulación a una baja velocidad de 0,3 m/s que permite sedimentar la arena mientras que el material orgánico permanece en suspensión.

Con frecuencia el flujo y la concentración de un efluente cambian rápidamente en el curso del tiempo y pueden aparecer componentes poco degradables, o que tienen un pH o una temperatura extremos. En tales casos se suele recoger el efluente en un tanque compensador que suaviza los cambios rápidos de las aguas residuales y es un punto útil para controlar el pH o agregar los nutrientes faltantes. Dado que este tanque tiene mezclador se suele producir una espuma que debe ser quitada antes de incorporar el material al digestor. El subdimensionamiento del tanque compensador y el equipo asociado, es un problema común en el tratamiento de los efluentes industriales. El tanque debe tener una capacidad correspondiente al 75 ó 100% del flujo diario. Además este tanque permite realizar, si es necesario, una hidrólisis previa a la digestión anaeróbica.

La decantación y la flotación son más baratos que el tratamiento biológico y la separación de sólidos permite reducir el tamaño del digestor anaeróbico. La primera es útil para las partículas mayores que 10 mm y la segunda para las menores. Con estos procedimientos se puede remover entre el 30 y 50% de la carga orgánica total y el 60 a 70% de los sólidos suspendidos en un efluente de cervecería o uno del procesamiento de hortalizas. El tanque de decantación suele ser diseñado para tener un flujo ascendente uniforme de 2 a 3 m/h y un tiempo de retención de 2 a 4 horas, siendo alimentado por un tambor difusor para evitar la turbulencia. También es necesario un mecanismo que raspe el lodo acumulado en las paredes del tanque y permita empujarlo y recogerlo en una tolva central, de donde se lo saca periódicamente. Arriba del raspador se coloca un desviador de la espuma que recoge el material flotante y lo remueve a través de una ranura (1).

El tratamiento biológico de grasas y aceites depende de su dispersión para permitir el contacto con los microorganismos. Generalmente tienden a separarse de la corriente principal del efluente y las grasas al solidificar pueden bloquear al digestor. El contenido máximo no deben sobrepasar los 0,2 g/L de efluente. Las aguas residuales con detergentes pueden emulsionar los aceites y reducir la separación (3).

## Reactores anaeróbicos

El digestor anaeróbico de contacto (ver pág. 26) permite la separación física por

decantación o filtración, de los microorganismos del efluente del digestor y su reciclado mediante una entrada por el fondo del reactor. La decantación suele estar asistida por desgasificación y enfriamiento. Este reactor fue desarrollado para lodos cloacales municipales, pero ha sido aplicado al tratamiento de las aguas residuales de la industria de la remolacha azucarera, destilerías, y otras industrias agroalimentarias. Es útil para aguas servidas con un contenido relativamente alto de sólidos. Necesita un buen mezclado para asegurar la uniformidad del sustrato y la concentración de microorganismos. El uso de un mecanismo del tipo de paletas inmerso en el digestor es difícil de mantener. También se puede mezclar recirculando el contenido por bombeo o introduciendo el biogás comprimido por la base del reactor (5).

**Cuadro 2.** Características típicas de operación de varios tipos de digestores (1,6)

Tipo de reactor	Parámetros	Condiciones típicas
Digestor anaeróbico de contacto	Carga	0,5 - 2,5 kg DQO m <sup>3</sup> /día
	Tiempo de retención	1 - 5 días
	Remoción de DQO	80 - 90%
	Concentración de sólidos	5 - 10 g/L
Filtro anaeróbico	Carga	2 - 10 kg DQO m <sup>3</sup> /día
	Tiempo de retención	10 - 50 hs
	Remoción de DQO	70 - 80%
	Conc. sólidos en alimentación	1 g/L
UASB	Carga	2 - 5 kg DQO m <sup>3</sup> /día
	Tiempo de retención	8 - 50 hs
	Remoción de DQO	70 - 90%
Digestor de lecho fluidizado	Carga	2 - 50 kg DQO m <sup>3</sup> /día
	Tiempo de retención	0,5 - 24 hs
	Remoción de DQO	70 - 80%

La velocidad de flujo en el tanque de decantación debe ser menor que 0,5 m/h, y mejor si hay una etapa de prefloculación / desgasificación. La decantación ha sido reemplazada en algunos casos por filtración por membranas, las que mostraron una larga duración (1).

Las dificultades asociadas con la decantación y reciclado de los microorganismos llevó a una alternativa conocida como filtro anaeróbico (ver pág. 26), donde las bacterias están inmovilizadas sobre un soporte. Se suele observar bloqueo y canalización en este sistema, especialmente si el efluente contiene grasa, materia orgánica insoluble o alta concentración de sólidos (3).

El proceso de adhesión de las bacterias al soporte ocurre en dos etapas:

- atracción electrostática de la superficie con el resguardo dado por las rugosidades de la superficie frente a la fuerza de cizalla del líquido,
- unión permanente por las secreciones extracelulares.

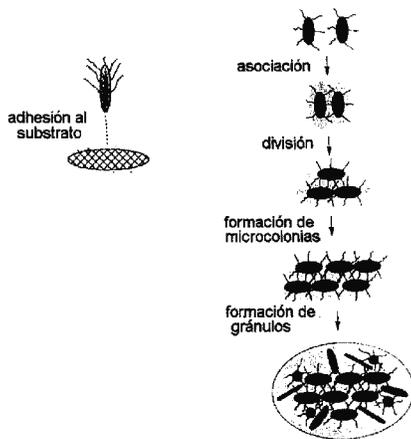
Se observan tres tipos de materiales dentro de un filtro anaeróbico:

- sólidos finos de 1 - 10 µm en equilibrio por la velocidad del fluido hacia arriba,
- gránulos de microorganismos floculados y sólidos en los intersticios del soporte,
- bacterias firmemente adheridas a los contornos del soporte (1).

El filtro anaeróbico es en realidad del tipo flujo-pistón y la mayor efectividad del tratamiento tiene lugar en la zona más activa próxima a la entrada de las aguas residuales, pues hay un gradiente de actividad y concentración de sustrato a través de la altura del digestor. Se suele emplear filtros anaeróbicos para tratamiento de residuos solubles en destilerías, usinas lácteas, procesamiento de caucho y cañamo, etc. (3).

Los problemas debido a la oclusión del relleno de los filtros anaeróbicos condujeron al digestor con flujo ascendente a través de una capa de lodo granular de alta densidad (UASB) que puede ser retenido dentro del reactor a pesar del desprendimiento del gas y la velocidad de flujo del efluente (7) (ver pág. 26). Los gránulos tienen una forma esférica con un diámetro entre 0,14 y 5 mm. El contenido de sustancias inorgánicas varía de 10 a

90% del peso seco de los gránulos, dependiendo sobre todo de la composición del agua residual. Los principales componentes de sus cenizas son calcio, potasio e hierro. Los polímeros extracelulares (polisacáridos, proteínas) producidos por las bacterias son importantes para la estructura y mantenimiento de los gránulos, y su contenido varía entre 0,6 y 20% de los sólidos volátiles suspendidos. El sistema UASB es el más usado para la digestión de efluentes industriales (8).

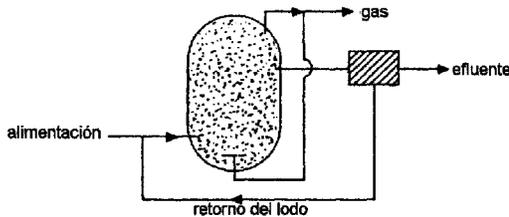


**Figura 2.** Formación de los gránulos microbianos (8).

Los metanógenos acetoclásticos *Methanothrix* y *Methanosarcina* son importantes en la iniciación de los gránulos. También están presentes bacterias que utilizan hidrógeno y formiato como *Methanobacterium* y *Methanobrevibacter*, así como microcolonias de bacterias sintróficas (*Syntrophobacter*, *Syntrophomonas*) acompañadas de bacterias reductoras de sulfato (*Desulfovibrio*, *Desulfolobus*). La organización interna de los distintos grupos de bacterias en los gránulos depende

de la composición del efluente y la vía metabólica dominante. El desarrollo inicial de una biopelícula o un gránulo ocurre en cuatro etapas:

- transporte de células a la superficie de un material inerte no colonizado o de otras células,
- adsorción reversible inicial al sustrato por fuerzas fisicoquímicas,
- adhesión irreversible de las células al sustrato por los apéndices microbianos y/o polímeros pegando las células al sustrato, y
- multiplicación de las células y desarrollo de los gránulos (8).



**Figura 3.** Esquema del digestor de lecho anaeróbico expandido (1).

Las dificultades en la separación de los microorganismos en los reactores completamente mezclados y la pérdida de granulación o el bloqueo en los reactores del

tipo flujo-pistón, llevaron a una combinación de ambos conocida como lecho fluidizado o expandido donde las bacterias están adheridas a las pequeñas partículas de soporte que son expandidas y mezcladas por el reciclado del gas y los lodos.

La expansión del lecho alcanza a 20-25% del volumen del reactor. La mayoría incorporan placas de distribución perforadas o conos invertidos pues, a diferencia de los otros sistemas completamente mezclados, el diseño de la distribución es crítico para la fluidización del lecho. La relación de reciclado mínima está regida por la densidad de las partículas y es necesaria una relación de velocidad mínima de 1,2 - 1,5. También se requieren continuos ajustes en la bomba de reciclado para compensar los cambios en la densidad de la biomasa activa. Comúnmente se incorpora una zona para clarificación por incremento del diámetro superior en un 20-25%. La formación de espuma es un problema con ciertas aguas residuales que contienen proteínas, por lo cual suele agregarse un agente antiespumante o se coloca arriba una rejilla para evitar la pérdida de partículas.

Las partículas que soportan a los microorganismos pueden ser naturales, como carbón o arena, o de distintos tipos de plásticos. La efectividad del lecho fluidizado se atribuye a que las partículas transportadoras son más pequeñas que las del filtro anaeróbico y así no se producen atascamientos, pero existe el riesgo de la pérdida de biomasa activa por cambios súbitos en la densidad o por el gas reinyectado. La concentración de biomasa es mayor que en otros reactores y alcanza valores de 10 a 40 g sólidos volátiles /L (1).

## Equipamiento auxiliar

El proceso anaeróbico trabaja mejor a 35-37°C y pH neutro. Muchas aguas residuales, especialmente las del procesamiento de alimentos, son tibias pero no suelen tener la temperatura correcta, por lo que se requiere alguna forma de calentamiento. Los serpentines internos favorecen la formación de espuma. Los intercambiadores externos, de placas o en rejilla, son más eficientes en efluentes sin sólidos en suspensión. Las camisas y los tubos calentadores son más comunes (9).

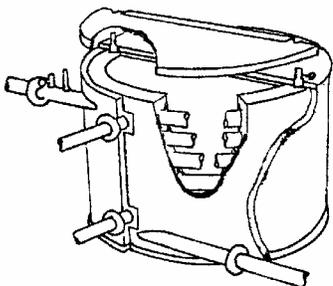


Figura 4. Esquema de un intercambiador externo de calor (9).

Generalmente el propósito es usar el biogás a medida que se produce ya que el almacenamiento es caro, sin embargo es necesario para contrarrestar las fluctuaciones biológicas en la producción por lo que se suele almacenar unas 5 a 10 hs en los amplios espacios superiores de algunos digestores o en las campanas flotantes de acero o plástico pues con el fin de emplearlo en calentadores y máquinas solo se necesita poca presión de agua (150 mm). La forma más barata y efectiva de usar el biogás es por combustión directa pues tiene un valor calorífico que depende de la proporción de metano. Si el gas contiene agua y ácido sulfhídrico se emplean quemadores de cerámica adaptados a la baja velocidad de la llama que comúnmente es de 0,3 m/s. También se usa en máquinas de ignición a chispa y alta compresión generando fuerza motriz (10 a 100 kW), a su vez el calor del agua de enfriamiento puede ser recuperado para entibiar el digestor (9).

La decantación es esencial luego de la digestión por contacto anaeróbico, pero también puede emplearse después de otros digestores para recuperar sólidos o microorganismos. Todo depende del tipo de aguas servidas y de las disposiciones oficiales (1).

Dado que el proceso anaeróbico ocurre a un bajo potencial redox (-350 mV) los compuestos orgánicos con nitrógeno y azufre suelen generar amonio, aminos y sulfuros cuyo olor, DQO y toxicidad impiden su vertido a los cursos de agua. En estos casos se requiere un proceso de aireación o volcado a lagunas de oxidación (1).

## Control de la digestión

Debido a que 5 a 15% de metano en el aire es explosivo, las plantas anaeróbicas deben estar separadas de otras áreas de la fábrica tanto como sea posible y cercadas. Todo equipo eléctrico deberá estar al menos a 3 m del digestor y el tanque almacenador de gas. La concentración de metano en el local para bombas e instrumentos se comprueba mediante un medidor de seguridad y la de sulfuro de hidrógeno, que es tóxico a 100 ppm, por una alarma específica. Las cañerías y el digestor llevan arrestallamas (9).

Pocos efluentes industriales tienen un pH suficientemente regulado o un balance adecuado de los nutrientes para los microorganismos del digestor. La medición retrospectiva de DBO, COT o DQO no es conveniente para una rápida acción correctora de la concentración de sólidos volátiles en el digestor. La alternativa es la utilización de sensores que permitan la predicción indirecta e integrada de las características del efluente a tratar. El problema asociado con el monitoreo mediante sondas en el reactor o insertadas en tuberías, es comprobar la confiabilidad de los datos debido al crecimiento microbiano y la acumulación de otros sólidos. Las sondas deberían estar en tanques abiertos, por ejemplo la de la alimentación en la caja de aforo usada para medir el flujo. El análisis del gas es el indicador más útil del funcionamiento. El metano puede ser medido por espectroscopía infrarroja, conductividad térmica o calorimetría. Una vez obtenida una producción continua de gas y conocido su contenido en metano, cualquier desviación indicará problemas en el digestor (1).

La medición de turbiedad da una información sobre los sólidos suspendidos en el agua residual. En los efluentes de fermentaciones y lechería pueden constituir hasta el 50% del substrato orgánico. Se puede usar un turbidímetro junto con otras sondas para determinar la carga orgánica entrante. También se suele usar en la industria una sonda de iones amonio para las aguas desechadas con alto contenido en nitrógeno orgánico pues hay una interrelación entre el amoníaco y el contenido de sólidos volátiles.

La conductividad se usa comúnmente en el análisis de aguas para determinar la concentración de sales solubles, pero solamente en unos pocos efluentes puede ser útil. La temperatura, el pH y el flujo son parámetros importantes en la determinación de la estabilidad del proceso total. El pH se mide antes y después de ajustes que suelen hacerse en algunos efluentes. Se toman varias medidas del flujo para determinar:

- el efluente crudo a compensar,
- la alimentación del digester,
- el reciclado de biomasa activa,
- el gas producido.

Los datos suelen ser recogidos y procesados por una microcomputadora via una interfase apropiada. El mismo sistema puede ser usado para controlar la velocidad de alimentación, el reciclado y las adiciones (1).

Los ácidos carboxílicos acumulados por un desbalance entre acidogénesis y metanogénesis son neutralizados por las sales reguladoras de pH presentes en el efluente, además una cantidad variable de bicarbonato se genera a partir del CO<sub>2</sub>. Cuando se agota la capacidad 'buffer' del sistema se acumulan ácidos no disociados y baja el pH. Una medida de laboratorio importante es la apreciación de esa capacidad reguladora mediante la determinación de la alcalinidad parcial debida a bicarbonato por titulación a pH 5,75, que es de 1 g/L en condiciones de estabilidad. La alcalinidad total se obtiene por titulación con un ácido a pH 4,0 y la intermedia debida a ácidos volátiles, por titulación entre 5,75 y 4,3. Se observa una relación de alcalinidad intermedia /parcial de 0,1 a 0,3 durante el buen funcionamiento del digester. La concentración normal de ácidos carboxílicos en un digester con buena operación es menor que 0,1 g/L, principalmente ácido acético. Cuando se altera la digestión aumenta la concentración de los ácidos propiónico y butírico (10).

Las medidas de actividad biológica están limitadas por el consumo de tiempo y la complejidad. Son útiles la identificación de sustancias tóxicas o las deficiencias en nutrientes cuando no es crítico el tiempo (6), pero hay tres pruebas básicas:

- la que se realiza para los residuos no conocidos con el fin de determinar la producción de gas por peso de DQO removida o peso de biomasa (sólidos solubles volátiles) del efluente en comparación con el rendimiento obtenido a partir de substratos simples tales como acetato y extracto de levadura,
- la determinación de ATP, molécula de transferencia de energía en los sistemas biológicos que puede ser extraída y medida usando bioluminiscencia, es un indicador general de la actividad microbiana,
- la determinación de F<sub>420</sub>, una coenzima específica de la metanogénesis que puede ser medida en su forma oxidada por fluorescencia, es un indicador de la actividad de los metanógenos (1).

## Nutrientes y tóxicos

Los requerimientos nutritivos (DBO : nitrógeno : fósforo) de las bacterias en la digestión anaeróbica son 700 : 5 : 1. Solamente las aguas residuales de las fermentaciones están nutricionalmente balanceadas. El nitrógeno comúnmente debe ser agregado a los efluentes mientras que el fósforo está casi siempre en exceso. Por otra parte durante la digestión los compuestos nitrogenados liberan amonio que contribuye a la capacidad 'buffer' del substrato. Además para el crecimiento óptimo de los metanógenos es necesario las siguientes concentraciones de estos cuatro elementos: Fe 2nM, Co 10 nM, Ni 100 nM y Mo 10 nM.

Los desinfectantes clorados son muy tóxicos a bajas concentraciones (<1 mg/L) pero

son rápidamente absorbidos por los sólidos e inactivados. La mayoría de los detergentes sintéticos son degradados rápidamente pero si la concentración es mayor a 20 mg/L pueden afectar la digestión. Los compuestos de amonio cuaternario son persistentes y tóxicos a bajas concentraciones (aprox. 1 mg/L). Los solventes clorados y derivados son tóxicos a 1 mg/L y el efluente que contenga mayor cantidad debe ser excluido. La presencia de amoníaco, no de ion amonio, en concentraciones de 1 a 5 g/L como suele contener la gallinaza, resulta tóxica pero la acción es reversible. La toxicidad de los sulfatos se manifiesta a concentraciones mayores que 1 g/L, y la inhibición total ocurre por sobre 4,5 g/L. Por otra parte los metanógenos son resistentes a varios antibióticos comunes, pero son sensibles a los que afectan la síntesis de proteínas y lípidos y a los interfieren con la función de la membrana plasmática (1).

## Referencias

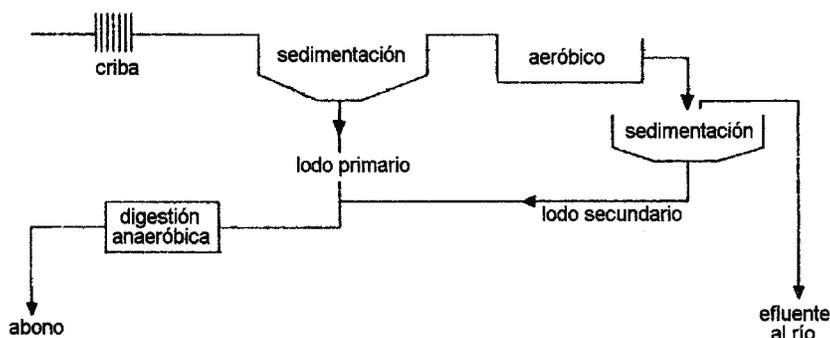
1. Wheatley AD. 1991. Anaerobic digestion: industrial waste treatment. pp.171-223 en: Anaerobic Digestion: A Waste Treatment Technology. Wheatley AD, editor. Elsevier Applied Science, London
2. Orford HE, Snow WB, Parsons WA. 1962 Desechos industriales. pp. 288-306 en: Enciclopedia de Tecnología Química. Tomo VI. Kirk RE, Othmer DF, Scott JD, Standen A, editores. UTEHA, México
3. FAO. 1995. Rural Energy: Medium and Large Scale Biogas Systems. RAP Bulletin. Bangkok
4. Pipyn P, Verstraete W. 1980. Waste classification for digestibility in anaerobic systems. Pp. 151-160 en: Anaerobic Digestión. Stafford DA, Wheatley BI, Hughes DE, editores. Applied Science Publishers, London
5. Pfeffer JT. 1980. Anaerobic Digestión Processes. pp. 15-35 en: Anaerobic Digestión. Stafford DA, Wheatley BI, Hughes DE, editores. Applied Science Publishers, London
6. Bjorndal KA, Moore JE. 1988. Chemical characteristics and their relation to fermentability of potential biomass feedstocks. pp. 355-365 en: Methane from Biomass. A Systems Approach. Smith WH, Frank JR, Abelson PH, editores. Elsevier Applied Science, London.
7. Lettinga G, van Velsen L, de Zeeuw W, Hobma SW. 1980. Anaerobic treatment of industrial pollution. pp. 167-186 en: Anaerobic Digestión. Stafford DA, Wheatley BI, Hughes DE, editores. Applied Science Publishers, London
8. Schmidt JE, Ahring BK. 1996. Granular sludge formation in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors. Biotechnology and Bioengineering 49: 229-246.
9. Mosey FE. 1980. Sewage treatment using anaerobic digestion. pp. 205-235 en: Anaerobic Digestión. Stafford DA, Wheatley BI, Hughes DE, editores. Applied Science Publishers, London
10. Noone GP. 1991. The treatment of domestic wastes. pp. 138-170 en: Anaerobic Digestion: A Waste Treatment Technology. Wheatley AD, editor.

# DIGESTORES DE RESIDUOS URBANOS

*Aguas cloacales. Separación de lodos, carga, calentamiento, mezclado y control. Basura doméstica. Digestores. Operación.*

## Aguas cloacales

Las aguas cloacales urbanas contienen un 99% de agua y la cantidad diaria por persona es 0,3 a 0,5 m<sup>3</sup>. Debido al gran volumen y la baja concentración de materia orgánica fermentable, la separación de los sólidos (lodos) y su digestión es esencial antes del vertido en suelos o cursos de agua. La digestión anaeróbica mesofílica (30-35°C) es común en las ciudades donde se practica un tratamiento completo de las aguas cloacales, pero en las regiones cálidas no requiere calentamiento adicional (1).



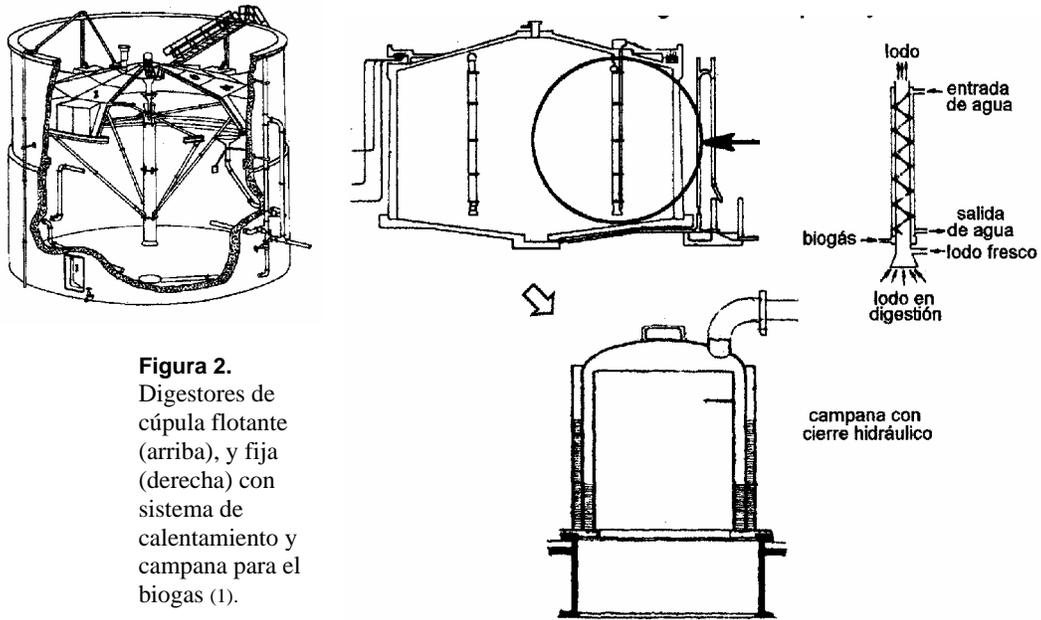
**Figura 1.** Esquema del tratamiento de las aguas cloacales urbanas (3)

**Cuadro 1.** Análisis promedio de las aguas cloacales (2).

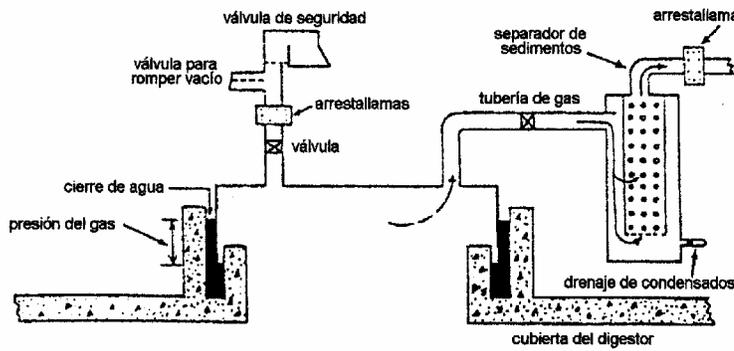
Demanda química de oxígeno (DQO) total	1.400 mg/L	Sólidos solubles totales (SST)	275 mg/L
DQO filtrado	400 “	Cenizas	22 % SST
Demanda biológica de oxígeno (DBO) total	400 “	Sólidos solubles volátiles (SSV)	220 mg/L
Nitrógeno total	175 “	pH	7,6
Amonio	75 “	Alcalinidad total	7,5 meq/L
Fósforo total	30 “	Ácidos grasos volátiles	2 meq/L
Fosfatos	25 “		

## Digestores y accesorios

La digestión puede hacerse en una o dos etapas. Hay una gran variación en las dimensiones, el tiempo de retención, la forma de mezclado, el tipo de calentamiento, y el método de carga y descarga de los distintos modelos de reactores usados para el tratamiento de las aguas residuales urbanas. Todo ello trae como consecuencia una gran diversidad en la eficiencia de la producción de biogás (1).

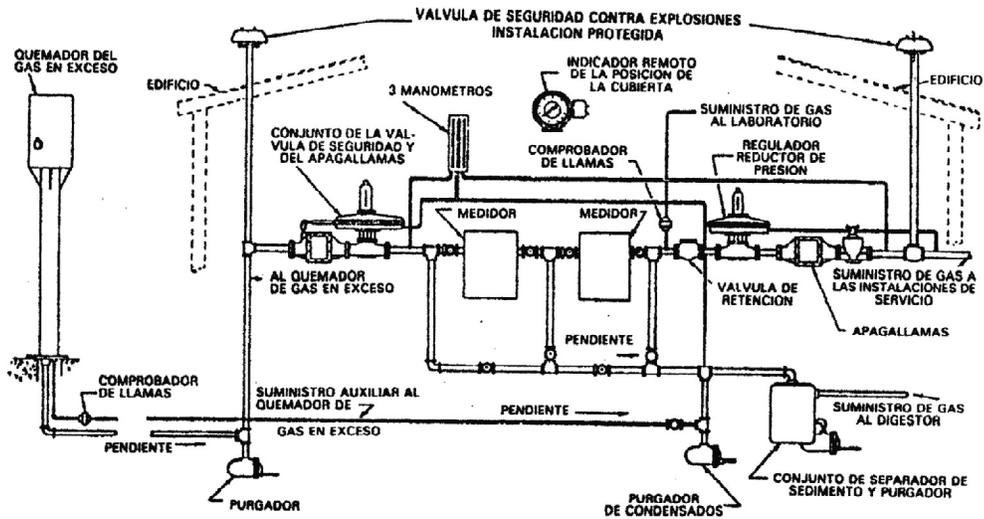


**Figura 2.** Digestores de cúpula flotante (arriba), y fija (derecha) con sistema de calentamiento y campana para el biogás (1).



**Figura 3.** Cierre hidráulico en la cúpula del digestor (4).

**Figura 4.** Esquema de los accesorios instalados en la tubería de gas (4).



El tanque de digestión se equipa con tuberías de extracción de 20 cm de diámetro mínimo, pues la pérdida de carga es de 12,5%. El lodo se extrae por el centro cónico del tanque. El gas es trasladado al tanque o la campana de almacenamiento en los casos de reactores de cubierta fija. El cierre de agua de la cubierta móvil se puede romper cuando la carga del digestor es excesiva o la extracción del gas es demasiado lenta.

La válvula de seguridad por exceso de presión y la de vacío son colocadas en la misma tubería. La válvula de seguridad consta de un plato con arandelas de peso calibrado y debe igualar la presión proyectada para el tanque. La presión del gas se establece normalmente entre 15 y 30 cm de columna de agua. El vacío se crea cuando la extracción del lodo o la del gas es demasiado rápida. La entrada en funcionamiento de la válvula que rompe el vacío es peligrosa porque permite la mezcla del biogás con el aire.

El arrestallamas es una caja con 50-100 placas de metal corrugado con agujeros. Si aparece alguna llama en la tubería del gas, éste se enfriará por debajo del punto de ignición al pasar a través de los deflectores, pero podría seguir pasando con poca pérdida de carga.

El separador de sedimentos es un cilindro de 30 a 40 cm de diámetro y 60 a 90 cm de longitud, equipado con un deflector interior perforado y un drenaje del líquido condensado cerca del fondo. Está situado comúnmente en la parte superior del digestor. El agua condensada se recoge en el punto más bajo del sistema de cañerías mediante un purgador manual o automático.

En varios puntos del sistema se instalan manómetros y reguladores de presión. Antes del quemador de gas en exceso se instala un regulador de presión. Suele ser del tipo de diafragma y normalmente está tarado a 20 ó 30 cm de columna de agua por ajuste de la tensión del muelle sobre el diafragma. Los medidores de gas pueden ser de diverso tipo. También suele haber una tubería para tomar muestras que penetra en el tanque de digestión a través de la zona de gas y está sumergida unos 30 cm en el lodo (4).

## Separación de los lodos

Esta etapa se realiza porque los digestores que trabajan con mayor contenido de sólidos son más pequeños y fáciles de mezclar y calentar, aunque se alarga el tiempo de retención. Hay una variedad de procesos para separar los sólidos de las aguas cloacales, tales como centrifugación, floculación química, prensado y filtración, pero la sedimentación es el más simple y efectivo. Las características del lodo también cambian durante la sedimentación debido a la acción microbiana y es necesario agitar para liberar el agua y cualquier gas formado. Prácticamente este paso dura dos días, en tanques con una profundidad de 3 a 4 m y un agitador de peines a una velocidad de 0,1 a 1 rpm (3).

La sedimentación en los tanques primarios puede ser mejorada por el control de la velocidad de remoción de los lodos mediante una bomba peristáltica o de doble diafragma (1). El sedimento primario constituye hasta el 30% de la carga orgánica de las aguas cloacales. El líquido sobrenadante recibe un tratamiento aerobio donde se genera una nueva biomasa que es separada en un segundo tanque de sedimentación. Ambos lodos se combinan para alimentar al digestor (3).

**Cuadro 2.** Características de los lodos provenientes de los tratamientos de las aguas cloacales (1)

Cantidades promedio	Lodo primario	Lodos primario + secundario
Volumen L/persona*día	0,3	1,86
sólidos secos g/persona*día	54	82
Sólidos totales %	7,53	4,48
Sólidos volátiles % ST	72,2	72,5

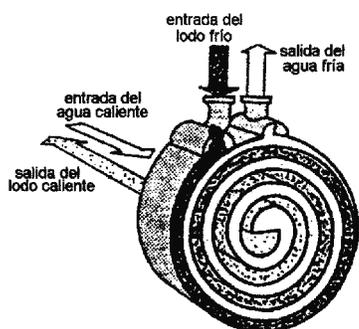
**Cuadro 3.** Composición de la mezcla de lodos primario y secundario (1).

Análisis	Concentración % ST	Análisis	Concentración %ST
Sólidos suspendidos	95	Celulosa	4
DQO	140	Hemicelulosas	3
Carbono orgánico	40	Lignina	6
Materia orgánica	60 - 80	Proteína	22 - 28
Grasas y aceites	7 - 35	Detergentes aniónicos	0,5 - 1,5

## Calentamiento

Hay muy pocos digestores de líquidos cloacales que operan en escala termofílica (50-65°C) aunque en teoría el proceso es más rápido a esas temperaturas. En su mayoría se usan para el tratamiento de efluentes industriales calientes (3).

Entre los intercambiadores de calor externos, el más simple es aquel que consiste en dos tubos concéntricos (ver pág. 54), por el de adentro (comúnmente con un diámetro de 100 mm) es bombeado el lodo y por afuera circula a contracorriente el agua caliente (60-70°C) (4). Otro tipo tiene ambos tubos enrollados en espiral (ver fig). Como el lodo fluye por un trayecto curvo hay mayor turbulencia y un efecto autolimpiante. Este último sistema aumenta la eficiencia del intercambio pero es más caro de construir y mantener. Generalmente se requiere 300-350 J\*m<sup>2</sup>/h y cierta flexibilidad para establecer la temperatura del agua y el área de intercambio, evitando el sobre-dimensionamiento (3).



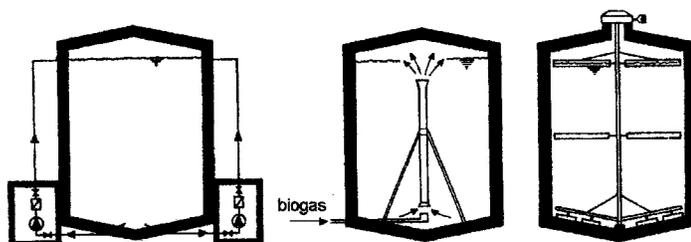
**Figura 5.** Esquema de un intercambiador en espiral (4).

La inyección directa de vapor dentro del digestor es el método más barato y seguro. El problema posible es el sobrecalentamiento local destruyendo los microorganismos, por lo que es esencial un buen mezclado. Antes de entrar el vapor es filtrado y pasa por las válvulas de reducción de presión y control de volumen, lo que permite regular la temperatura. La corrosión y las incrustaciones son los problemas a largo tiempo, si no se controla la calidad del agua (4).

Un método más simple es la circulación del lodo crudo a través de la llama de un quemador. Se requiere un equipo especial para evitar la corrosión, bombear el lodo y controlar la temperatura (3).

## Mezclado

Es necesario para dispersar el material entrante de modo de favorecer el contacto entre el sustrato y los microorganismos, eliminando zonas 'muertas' y una estratificación térmica. Hay tres tipos de mezclado: por recirculación del lodo, por recirculación del gas a través del lodo, y por mezclado mecánico interno.



**Figura 6.** Esquema del mezclado por recirculación de lodos (izquierda) o biogás, y agitación mecánica (derecha) (3).

La recirculación de los lodos, ya sea mediante bombeo mecánico convencional o por una bomba aspirante externa, suele generar cortocircuitos y zonas 'muertas' y no conviene como único método de mezclado (3). La recirculación del gas se logra comprimiéndolo, después que pasa por una trampa de condensación, y liberándolo en varios puntos de la base del digestor para producir turbulencia, o por debajo de la superficie de la suspensión a través de un tubo vertical. Esto último provoca la succión de la suspensión fresca como si fuera una bomba aspirante. La recirculación del gas por burbujeo en la base del digestor da buena dispersión y baja espuma.

El agitador mecánico interno puede estar montado en las paredes, o bien en el techo del reactor. En este caso los lodos son succionados a través de un tubo fijo y dispersados en la superficie del contenido del digestor, lo que contribuye a evitar la formación de espuma (4).

El grado de mezclado se mide por dos parámetros, uno el tiempo (de volteo) que toma recircular todo el volumen del digestor y otro, el tiempo (de dispersión) necesario para que un marcador agregado alcance una concentración de equilibrio dentro del digestor. La energía requerida para el mezclado depende del tamaño y forma del digestor, el sistema de mezclado y la concentración de sólidos (3).

## Operación

Los lodos frescos se introducen por un lado de la parte superior del digestor y el sobrenadante se extrae por el contrario. La entrada debe ser directa a la zona de mezcla para conseguir un contacto rápido entre substrato y microorganismos. En función de la carga diaria, los digestores se clasifican en convencionales si reciben 0,45 a 1,12 kg SSV/m<sup>3</sup> y de alta carga si entra 1,6 a 6,4 kg SSV/m<sup>3</sup> (4).

Cuando la carga es continua se logra una producción pareja de gas, en cambio la producción 'batch' forma oleadas de grandes cantidades que encarecen el almacenamiento. Pero la carga continua requiere que el lodo sea cribado antes de agregarlo al digestor y un sistema de cañerías diseñado para minimizar el atascamiento (3)

**Cuadro 4.** Carga en digestores convencionales (4).

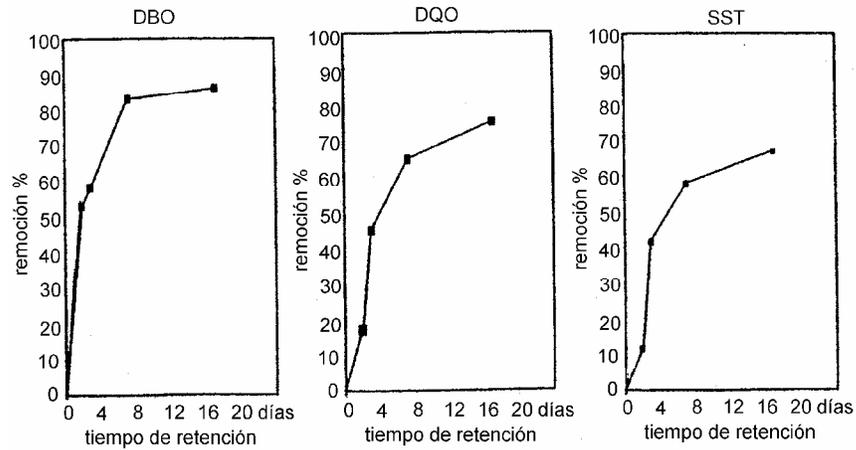
Digestión			Carga kg SSV/m <sup>3</sup> *día
En una etapa	Sin calefacción		0,4
	Con calefacción	25°C	1,0
		32°C	1,2
En dos etapas	Lodo primario	Sin calefacción ni agitación	0,5
		Con calefacción y agitación	2,0

**Cuadro 5.** Valores de operación en digestores de alta carga (4).

Digestor		único	primario	secundario
Temperatura	°C	30 - 35	30 - 35	
Tiempo de retención	días	10 - 20	10 - 25	3 - 8
Carga	kg SSV/m <sup>3</sup>	2 - 8	1,5 - 6,0	0,5 - 2
DQO	kg/m <sup>3</sup> *día	1 - 6	1 - 6	
Biogas	m <sup>3</sup> /kg SSV eliminado	0,38 - 0,39	0,75 - 1,10	
DQO eliminado	%	75 - 95	80 - 95	

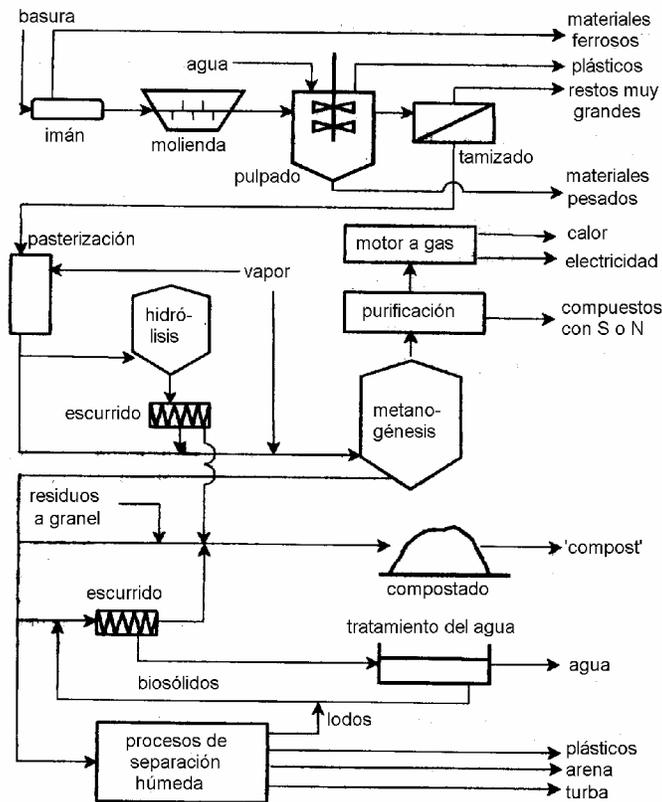
Como se observa en la figura 7 con un tiempo de retención por encima de 10 días poco se mejora la eficiencia de la digestión, además reduciendo el tiempo de permanencia de los lodos en el digestor se disminuye el volumen de éste (3).

Para el control sólo la temperatura, la producción de gas y la calidad del lodo merecen un monitoreo continuo (3).



**Figura 7.** Reducción de las demandas biológica y química de oxígeno, y de los sólidos solubles totales durante el transcurso de la digestión anaeróbica (2).

### Basura doméstica



La fracción orgánica de los residuos sólidos domésticos puede ser digerida en condiciones anaeróbicas, una vez separada en las plantas de tratamiento como se resume en la figura 8, al igual de los desechos frutihortícolas de los mercados.

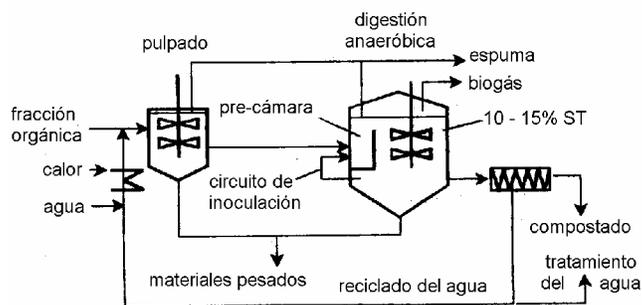
Alrededor del 90% de las plantas a escala real para la digestión de la basura orgánica emplean una sola etapa y la mitad de éstas operan en condiciones húmedas. La eficacia del tratamiento en una etapa para la mayoría de los residuos orgánicos es casi igual a la de los sistemas con dos etapas, siempre que el reactor haya sido bien diseñado y opere bajo condiciones controladas (5).

**Figura 8.** Esquema global del procesamiento de la basura urbana (5).

**Cuadro 6.** Operaciones unitarias, productos y normas de calidad que pueden estar implicados en una planta de digestión anaeróbica de sólidos orgánicos (5)

Operaciones unitarias		Productos reusables	Normas o criterios
<b>Pre-tratamiento</b>	Separación magnética	Metales ferrosos	Impurezas orgánicas
	Reducción de tamaño		Fragmentación de papel, cartón y bolsas
	Pulpado con separación por gravedad	Materiales inertes pesados como los de construcción	Impurezas orgánicas
	Tambor de tamizado	Fracción gruesa, plásticos	Valor calorífico
	Pasterización		Eliminación de gérmenes
<b>Digestión</b>	Hidrólisis		
	Metanogénesis	Biogas	Normas sobre compuestos de azufre y nitrógeno
	Valorización del biogas	Electricidad Calor	150-300 kW.h/ton 250-500 kW.h/ton
<b>Post-tratamiento</b>	Ecurrido mecánico		Cantidad de agua
	Estabilización aeróbica	'Compost'	Normas sobre mejora del suelo
	Tratamiento del agua	Agua	Normas sobre uso del agua
	Separación en húmedo	Arena	Impurezas orgánicas
		Turba	Normas sobre sustrato para macetas Valor calorífico

Los residuos sólidos orgánicos son molidos hasta la consistencia de pasta, tamizados y suspendidos en agua para alcanzar una concentración de 10 a 15 % de sólidos totales. Durante el pre-tratamiento hay una pérdida de 15 a 25% de los sólidos volátiles. En el digestor hay una tendencia a la separación de tres capas. Los compuestos pesados se acumulan en el fondo del digestor y pueden dañar al sistema de agitación así como a las bombas, mientras que la espuma flota impidiendo un mezclado efectivo, por lo cual hay que extraer periódicamente ambas capas (5).



**Figura 9.** Esquema de la digestión 'húmeda' de la fracción orgánica de la basura urbana en una sola etapa (5).

**Cuadro 7.** Ventajas y desventajas del tratamiento en una sola etapa húmeda (5).

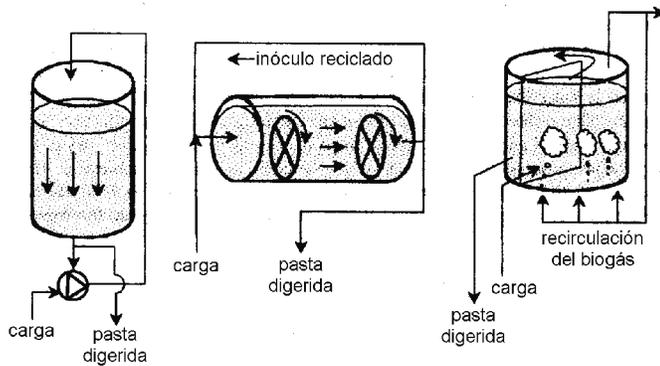
Criterios	Ventajas	Desventajas
Técnicos	Inspirados en procesos conocidos	Formación de cortocircuitos
		Fases sumergida y flotante
		Abrasión con arena
		Pre-tratamiento complicado
Biológicos	Dilución de inhibidores con agua	Muy sensible al shock por carga de inhibidores que se distribuyen inmediatamente por el digestor
		Pérdida de SV junto con materiales inertes y plásticos
Económicos y ambientales	El equipo para manejar los lodos es más barato	Alto consumo de agua
		Alto consumo de energía para calentar grandes volúmenes

En el sistema llamado ‘seco’ el contenido de sólidos totales en el reactor alcanza a 20 – 40 %, por lo que la manipulación, el mezclado y el pre-tratamiento tienen diferencias fundamentales con los del sistema húmedo. El transporte de los residuos es llevado a cabo con cintas transportadoras o bombas especialmente diseñadas para materiales muy viscosos y, en general, el equipamiento es más resistente y caro. El único pre-tratamiento necesario es la eliminación de impurezas mayores de 40 mm por tamizado o trituración. Los materiales inertes que pasan el tamiz no pueden ser eliminados como el caso anterior y este sistema es conveniente para residuos con 25% p/p de tales impurezas.

Debido a la alta viscosidad, los residuos fermentados se mueven como flujo-pistón por el digestor, contrariamente al sistema húmedo que usa reactores completamente mezclados. Al menos tres diseños son adecuados, donde el mezclado se logra por inyección de biogas a presión, recirculación de lodos o por la rotación lenta de discos o paletas. En los dos primeros el volumen no suele sobrepasar los 3.300 m<sup>3</sup> y la altura es menor a 25 m. En cuanto al reactor horizontal permite el trabajo de varias unidades en paralelo llegando a procesar 15.000 a 25.000 toneladas/año (5).

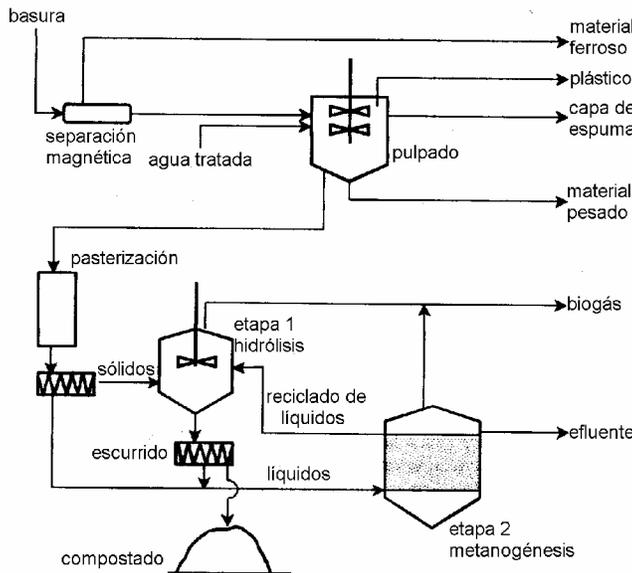
**Cuadro 8.** Ventajas y desventajas del sistema ‘seco’ en una etapa (5).

Criterios	Ventajas	Desventajas
Técnicos	Sin partes móviles dentro del reactor	Los residuos húmedos (<20% ST) no pueden ser tratados solos
	Resistentes (no es necesario sacar plásticos y materiales inertes)	
	No hay cortocircuitos	
Biológicos	Menos pérdida de SV en el pre-tratamiento	Poca posibilidad de diluir los inhibidores con agua
	Mayor carga orgánica	
	Dispersión limitada de los picos fugaces en la concentración de inhibidores	
Económicos y ambientales	Pre-tratamiento más barato y reactores más chicos	Equipamiento más resistente y caro para el manejo de los residuos
	Higienización completa	
	Poco gasto de agua	
	Menores requerimientos de calor	



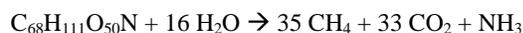
**Figura 10.** Distintos tipos de digestores usados en el sistema 'seco': con recirculación de lodos, horizontal con mezclado mecánico y con inyección de biogás (5).

La figura siguiente es un esquema del sistema de dos etapas húmedas para el tratamiento de la fracción orgánica de la basura doméstica que incluye una etapa de hidrólisis de los sustratos y un reactor del tipo filtro anaeróbico con una carga de 10 kg SV/m<sup>3</sup>\*día. Las partículas gruesas remanentes de la corta etapa de hidrólisis que aún contienen polímeros biodegradables no alimentan al digestor por lo que se reduce el rendimiento de biogás en un 20 – 30% (5).



**Figura 11.** Esquema del diseño en dos etapas húmedas (5)

También se produce biogás en los rellenos sanitarios cuya composición precisa depende de la edad del relleno y su exposición al agua. La porción biodegradable de la basura urbana es descompuesta primero por la actividad microbiana que aprovecha el aire atrapado dentro del relleno. La cubierta de suelo agregada diariamente provee los microorganismos necesarios para esta fase. Una vez agotado el oxígeno comienzan los procesos de reducción biológica de nitratos y sulfatos, mientras los microorganismos fermentadores y sintróficos generan ácido acético, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub> que serán aprovechados por los metanógenos. Luego, ya agotados los materiales fácilmente degradados, sigue una fase llamada de maduración donde la producción de biogás es más lenta. La metanogénesis ocurre solamente cuando el contenido de agua de la basura excede el 50% (6). Los residuos biodegradables que se transforman rápidamente tienen una composición aproximada C<sub>68</sub>H<sub>111</sub>O<sub>50</sub>N, por lo tanto:



% en peso	27,6	71,6	0,8
% en volumen	50,8	47,8	1,4

El rendimiento de gas en el relleno es, en este caso, 0,88 m<sup>3</sup>/kg de material biodegradable y comúnmente hay 1 kg de fracción orgánica cada 4,9 kg de basura por lo que se forma 0,18 m<sup>3</sup> biogas/kg basura.

El tiempo para que la mitad de la fracción degradable se transforme en biogas es aproximadamente de 1 año para los restos de alimentos, 5 para los residuos del jardín y 15 para los cartones. La proporción anual de producción de metano (k) se expresa como la inversa del número de años durante los cuales se libera biogas, si se espera que sea de 20 años  $k = 1/20 = 0,05$ . La cantidad total de gas producido en un año determinado puede ser estimada por la ecuación:

$$Gas_t = R_0 V (e^{-kc} - e^{-kt})$$

donde  $R_0$  (m<sup>3</sup>/kg) es el rendimiento de gas total generado por kg de basura,

$V$  (kg/año) es la velocidad del relleno,

$t$  es el número de años desde que se inició el relleno sanitario,

$c$  es el número de años desde que se cerró el relleno y

$k$  (1/años) es la proporción anual de producción de metano (6).

Si por ejemplo un relleno sanitario que recibe 100.000 toneladas por año, correspondientes a la basura originada por una población de 130.000 habitantes, se encuentra en el quinto año de operación y se espera cerrarlo al cabo de 10 años, es posible que produzca en el corriente año:

$Gas_5 = 0,18 \text{ m}^3/\text{kg} * 10^8 \text{ kg} * (e^{-0,05*0} - e^{-0,05*5}) = 0,18 * 10^8 (1 - e^{-0,25}) \text{ m}^3 = 3,7 * 10^6 \text{ m}^3$   
siempre y cuando las condiciones ambientales favorezcan la metanogénesis y no haya una gran cantidad de inhibidores entre la basura doméstica.

## Referencias

1. Mosey FE. Sewage treatment using anaerobic digestion. En: Anaerobia Digestión. Stafford DA, Wheatley BI, Hughes DE, editores. Applied Science Publishers, London, 1980, pp. 205-235
2. van Buren JCL, Frijns JAG, Lettinga G. Wastewater Treatment and Reuse in Developing Countries. Wageningen Agricultural University.
3. Noone GP. The treatment of domestic wastes. En: Anaerobia Digestión: A Waste Treatment Technology. Wheatley AD, editor, Elsevier Applied Science, London, 1991, pp.139-170
4. Hernández Muñoz A. Depuración de Aguas Residuales. 3ª edición. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 19, cap. 10
5. Vandevivere P, De Baere L, Verstraete W. Types of anaerobic digesters for solid wastes. Cap. 4 en: Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Wastes. Álvarez Mata J, ed. IAWQ Sponsored Book, Universidad de Barcelona.
6. Environment Australia. Methane Capture and Use: Waste Management Workbook. Commonwealth of Australia, 1998 (<http://www.greenhouse.gov.au/pubs/methane/>)

# PRODUCCIÓN DE ETANOL

*Materias primas. Pre-tratamientos. Fermentación. Destilación. Purificación.*

La invención del motor de combustión interna de cuatro ciclos en 1877 por Otto y del de dos ciclos en 1979 por Benz implicaron pruebas con etanol y otros líquidos orgánicos. Entre la primera y segunda guerras mundiales, los europeos emplearon mezclas de naftas con 10 a 30% de alcohol etílico anhidro. En 1931 la Argentina recomendaba un combustible con 30% de etanol y 70% de nafta, y Brasil establecía el agregado de 5% de alcohol a la nafta importada. El “Programa Nacional do Alcool de Brasil” se expandió en 1975 con el uso de gasohol que contenía 10% de etanol, pero esta proporción fue creciendo hasta ser en 1982 de 22%. En 1979 comenzaron construir nuevos motores adaptados al uso de etanol hidratado (95%) y en 1995 un 35% de los vehículos de pasajeros de ese país así como unos 4 millones de automóviles funcionaban con este combustible (1).

El Programa Alconafta argentino tuvo una vida efímera aunque el etanol sea un aditivo conveniente, en una proporción del 15%, para mejorar el índice de octano del combustible. El índice de octano es una medida de la resistencia a la autoinflamación y se determina con relación a una mezcla de iso-octano muy resistente (índice 100) y heptano muy autoinflamable (índice 0) (2).

Los alcoholes de bajo peso molecular, especialmente el etanol, son los aditivos y combustibles para motores que pueden ser producidos directamente por la conversión microbiana de la biomasa. Si se dispone de abundante cantidad de residuos con azúcares, almidón o celulosa a muy bajo costo, se los puede transformar a través de la fermentación. Las etapas son:

- Recolección y entrega de la materia prima en la planta productora de alcohol, la que dispone de suficiente espacio de almacenamiento para compensar las irregularidades de la provisión.
- Pretratamiento y transformación del material crudo en un sustrato fermentable. Las melazas residuales de la industria azucarera requieren poco más que una simple dilución, pero los materiales amiláceos o celulósicos deben ser sometidos a una hidrólisis ácida o enzimática (proceso llamado sacarificación).
- Fermentación de los mono y disacáridos, seguida de la recuperación y purificación del alcohol por destilación.
- Tratamiento de los residuos de la fermentación o los efluentes, para recuperar subproductos que pueden ser usados como forraje, abono o para la obtención de energía (3).

## Materias primas

### Residuos azucarados

Hay varios procesos industriales que producen residuos ricos en mono y disacáridos, aunque a veces resulta antieconómica la transformación a etanol.

**Cuadro 1.** Residuos con azúcares fermentables (3).

Producto primario	Residuos	Azúcares presentes	ton residuos/ton producto primario
Queso	Lactosuero	Lactosa 4,5 – 5%	12
Pulpa de papel	Licor sulfítico	Hexosas, pentosas 2%	18
Azúcar	Melazas	Sacarosa, glucosa, fructosa 55%	0,3

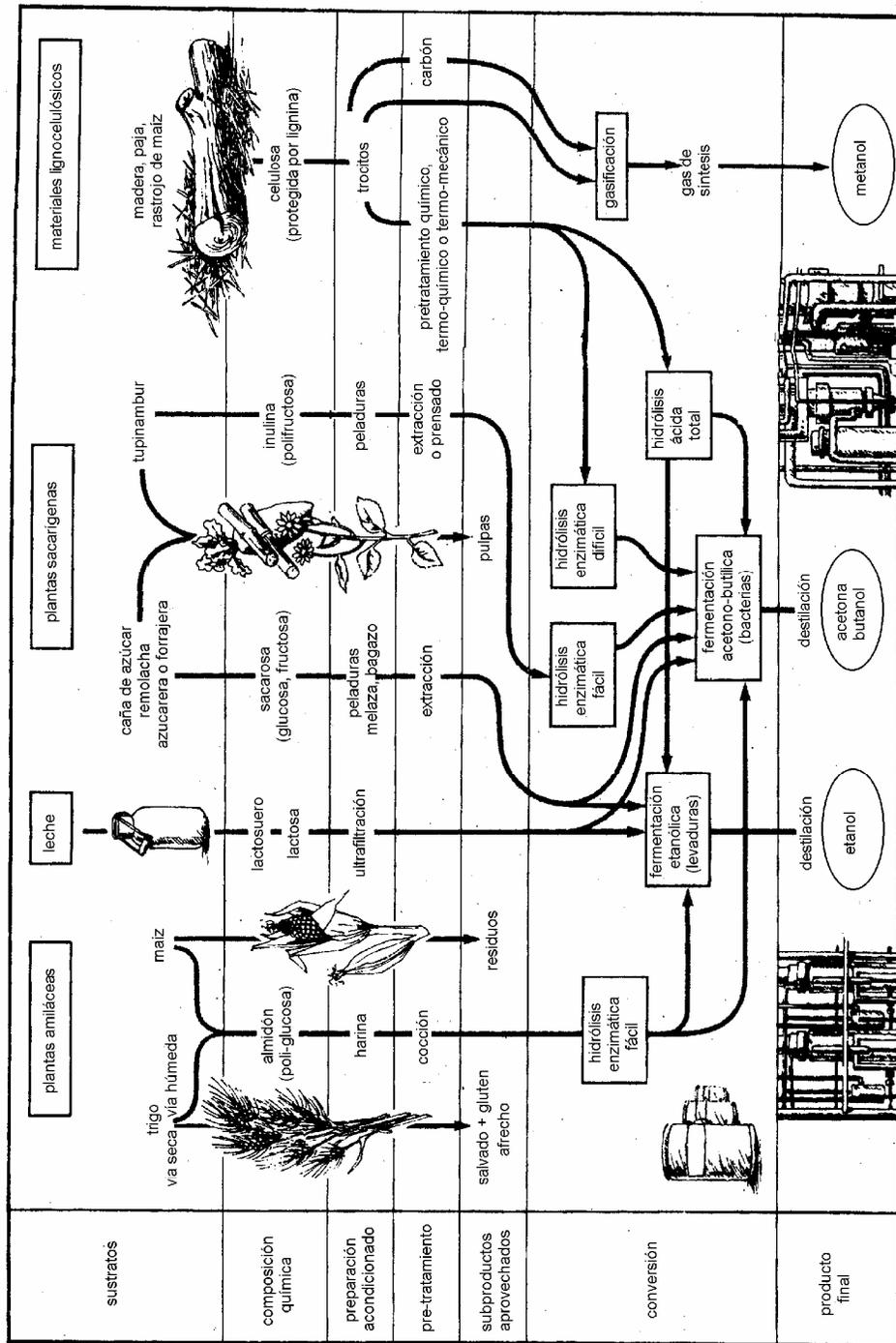


Figura 1. Principales posibilidades de obtención de biocombustibles líquidos a partir de residuos vegetales (2)

El factor más importante es la disponibilidad de la materia prima para operar a pleno durante la mayor parte del año, sea el material crudo, los subproductos o los residuos que pueden ser almacenados sin sufrir deterioro como las melazas y los granos. Los residuos de frutas y otros materiales percederos solo están disponibles en una época del año.

La caña de azúcar es el cultivo conveniente para la producción de alcohol porque tiene un alto rendimiento por hectárea. Cuando se cosecha la caña, las hojas se cortan y abandonan en el campo y los colmos se transportan al ingenio o destilería donde se lavan para la remoción de barro y piedras. Luego se trituran y muelen obteniéndose el jugo de caña que se puede emplear directamente, pero comúnmente se usan las melazas residuales generadas durante la producción del azúcar refinado (4). Estas melazas contienen aproximadamente 55% p/p de azúcares libres, principalmente sacarosa 35 a 35% y 15 a 20 % de azúcar invertido (glucosa + fructosa) (1). Cuando se emplean melazas el rendimiento es de 245 L de alcohol por ton (5).

**Cuadro 2.** Componentes principales de la caña de azúcar (4).

Componentes	% del colmo en peso
Sacarosa	12 – 16
Azúcares reductores (grucosa y fructosa)	0,2 – 1,5
Azúcares totales (en % de glucosa)	13 – 17
Fibra	9 – 13
Humedad	70 - 79

Las melazas se diluyen y acidifican, y se agregan sales de amonio o urea y nutrientes menores si son necesarios. A veces hay separar el hierro que está presente en cantidades suficientemente altas como para inhibir el crecimiento de las levaduras. (1).

**Cuadro 3.** Rendimiento de las materias primas en la producción de etanol (5).

Cultivo	Rendimiento ton/ha*año	Etanol L/ton	Etanol L/ha*año
Sorgo dulce	45 - 80	60 - 80	1.750 – 5.300
Remolacha azucarera	15 - 50	90	1.350 – 5.500
Remolacha forrajera	100 - 200	90	4.400 – 9.350
Caña de azúcar	50 - 90	70 - 90	3.500 – 8.000

## Residuos amiláceos

**Cuadro 4.** Rendimiento de las materias primas en la producción de etanol (5).

Cultivo	Rendimiento ton/ha*año	Etanol L/ton	Etanol L/ha*año
Maíz	1,7 – 5,4	360	600 – 1.944
Sorgo	1,0 – 3,7	350	350 – 1.295
Mandioca	10 – 65	170	1.700 – 11.050
Batata	8 – 50	167	1.336 – 8.350

Los granos amiláceos contienen 10 a 12% de amilosas solubles en agua caliente y 80 a 90% de amilopectinas insolubles en agua. Se muelen en molino a martillo o de otro tipo para descascararlos y exponer el almidón que se pulveriza hasta el grado de tamiz malla 40. La harina se suspende en agua con agitación. Si se procede a la molienda húmeda del maíz suelen obtenerse varios subproductos como germen, gluten y aceite.

La pasta amilácea se neutraliza y agrega la alfa-amilasa de bacterias termofílicas u otros microorganismos. Se calienta hasta una temperatura óptima (cerca de 93°C con la enzima de bacterias) durante 15 minutos a unas pocas horas para que se produzca la ruptura de las paredes celulares y las uniones entre los polímeros (licuefacción). La mezcla de mono, di y oligosacáridos es luego acidificada y tratada con glucoamilasa a

60°C para lograr la hidrólisis completa. Se agrega sales de amonio o urea, compuestos de fósforo y potasio y el agua aporta los micronutrientes necesarios para el crecimiento de la levadura (1).

### Residuos lignocelulósicos

Los pretratamientos pueden modificar a los materiales lignocelulósicos por:

- desfibración,
- solubilización y remoción de las hemicelulosas,
- reducción del grado de polimerización de la molécula de celulosa y/o
- alteración de la lignina (6).

Los materiales de diferente origen varían en el comportamiento frente a la hidrólisis enzimática debido a que las porciones cristalinas de la celulosa son más difíciles de degradar que las amorfas. El pretratamiento mecánico en un molino a bolas aumenta la superficie del sustrato y la explosión con vapor, adicionado o no de SO<sub>2</sub> o NaOH, mejora el acceso de la enzima a la celulosa (7).

Las hemicelulosas al hidrolizarse producen pentosas que solo son fermentadas por algunos microorganismos.

### Fermentación alcohólica

La fermentación es llevada a cabo por las levaduras en soluciones de 10 a 20% p/p de azúcar con pH entre 4 y 5, y a una temperatura entre 20 a 38°C durante 2 a 3 días para producir etanol en una concentración entre 8 y 10%. El filtrado del cultivo es destilado recogiendo una solución con 50 a 60% de alcohol y redestilado para obtener el azeótropo con 95% (95,5°GL). Finalmente el azeótropo es codestilado con benceno para obtener etanol anhidro. La masa de levaduras se puede recuperar para forraje (3).

Como las materias primas constituyen hasta el 70% del costo final del etanol, se trata de obtener un alto rendimiento transformando la casi totalidad de los azúcares en alcohol a partir de materiales de bajo costo. El costo de los fermentadores representan la mayor fracción de los costos de capital y la productividad esta limitada por la inhibición debida al producto y la dificultad de retener altas concentraciones de microorganismos (6).

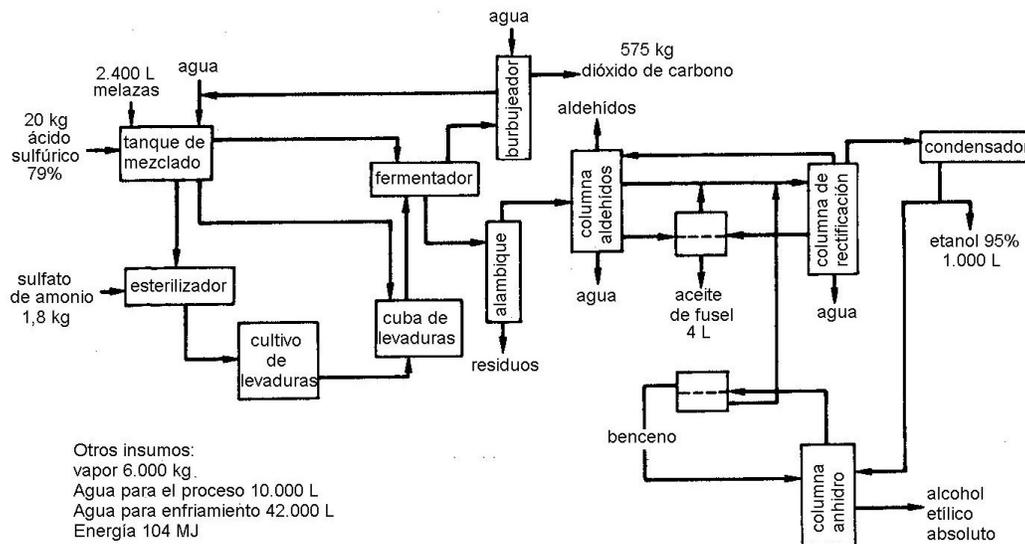


Figura 2. Esquema de la fermentación de melazas (3)-

El reciclado de la levadura en las operaciones ‘batch’ tiene sus ventajas pero la capacidad de operación en un modelo continuo requiere un equipo más pequeño con menores costos de operación y menos gasto de energía. Por ejemplo las levaduras pueden

ser inmovilizadas en perlas de alginato de calcio u otro soporte y usadas en un sistema de lecho fluido para fermentar los carbohidratos (7).

Los microorganismos comúnmente usados son levaduras, por ejemplo *Saccharomyces cerevisiae* para las melazas y almidones hidrolizados, y *Pichia stipitis* para materiales celulósicos hidrolizados, pero también suele emplearse la bacteria *Zymomonas mobilis* para fermentar las hexosas (1).

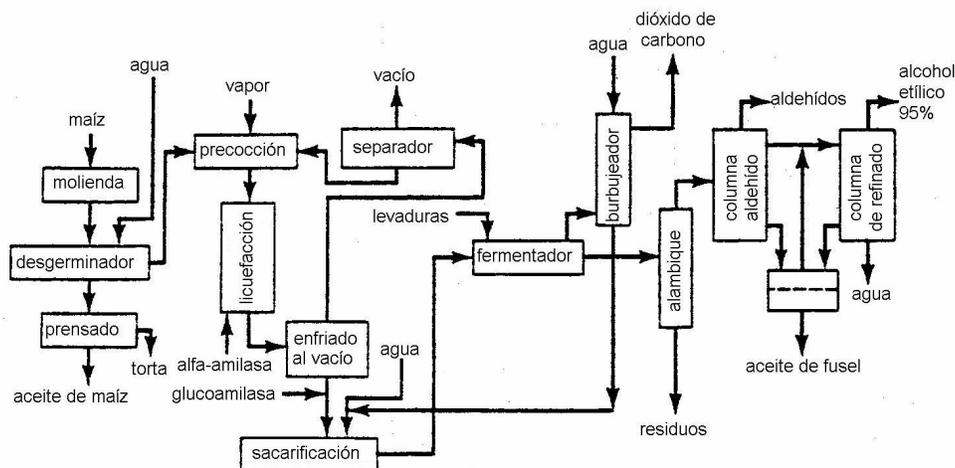


Figura 3. Esquema de la obtención de etanol a partir de maíz (1).

Los ingenios y destilerías cuentan con unidades generadoras de electricidad y vapor abastecidas por el bagazo de caña que sobra tras la extracción del jugo. Si bien el procesamiento de la caña de azúcar dura medio año, se puede extender el período de funcionamiento de las destilerías empleando sorgo u otro cultivo (4).

Cuadro 5. Balance energético en la producción de etanol (5).

Cultivo	Rendimiento de la cosecha ton/ha*año	Alcohol producido L/ha*año	Energía MJ/ha*año				balance
			gastada		producida		
			agrícola	industrial	alcohol	residuo	
Caña de azúcar	54	3.564	17.313	45.246	78.437	73.220	+ 89.307
Mandioca	14,5	2.523	10.765	37.166	55.525	-	+ 7.594
Sorgo dulce	62,5	5.165	33.560	69.036	113.671	79.956	+ 91.031

## Levaduras

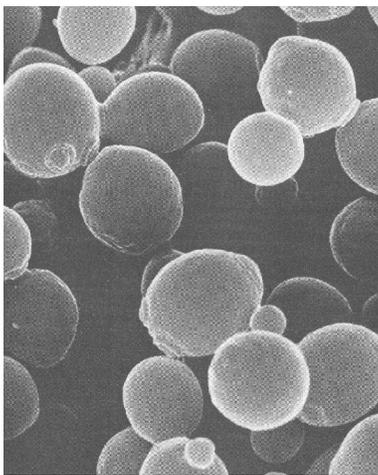
Las levaduras son hongos unicelulares que tienen forma esférica, ovoide, elipsoide o cilíndrica. Se multiplican por brotación y a separarse cada brote queda una escara en la pared de la célula madre. También suelen presentar una reproducción sexuada donde dos células haploides se conjugan formando un cigoto que de inmediato en algunas especies, o mucho tiempo después y sólo en condiciones especiales en otras, sufre una meiosis generando las ascosporas haploides (8).

Las levaduras pueden oxidar en aerobiosis los monosacáridos, como la glucosa y la fructosa, hasta dióxido de carbono y agua formando ATP, NADH y radicales carbonados intermedios en la biosíntesis celular. Algunas son aerobias estrictas pero otras en condiciones de anaerobiosis pueden fermentar los azúcares produciendo etanol, aunque

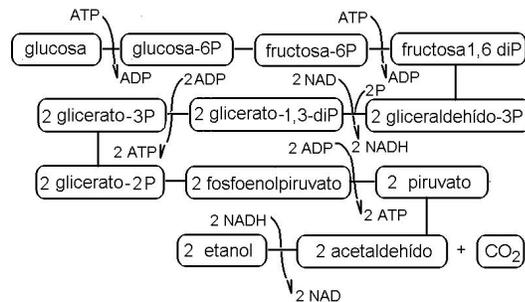
esta vía metabólica produce mucho menos ATP. Las levaduras usadas industrialmente consumen como máximo un 10% de sustrato por vía oxidativa, pues prefieren la fermentación. Entre ellas se encuentran especies de *Saccharomyces*, *Schizosaccharomyces*, *Brettanomyces* y *Candida*, las que consumen rápidamente la glucosa. Pero otras utilizan lentamente el 70% del azúcar en aerobiosis, como las especies de *Candida*, *Hansenula*, *Kluyveromyces* y la mayor parte de *Pichia*.

Para que los azúcares penetren en la células es necesario un transportador en la membrana citoplasmática. Los disacáridos, como la sacarosa, son hidrolizados en el exterior de la membrana.

La glicólisis es el conjunto de reacciones que permiten pasar de la glucosa a piruvato con la formación de 2 ATP y 2 NADH. En anaerobiosis el piruvato es descarboxilado hasta acetaldehído y luego reducido a etanol con gasto del NADH generado en la primera etapa. En algunas levaduras simultáneamente hay una pequeña producción de ácido acético, como en el caso de *Brettanomyces* y *Zygosaccharomyces bailii*, y en otras de glicerol, por ejemplo en especies de *Saccharomyces*. Pocas levaduras fermentan xilosa produciendo etanol, como *Pachysolen tannophilus*, *Pichis stipitis* y *Candida shehatae* (9).



**Figura 4.** Aspecto de la levadura *S. cerevisiae* al microscopio electrónico de barrido (8).



**Figura 5.** Fermentación alcohólica (9).

## Referencias

1. Klass DL. 1998. Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemicals. Academic Press, SanDiego.
2. Gaudemaris G de, Arlie J-P, Guibert J-C. 1986. Los carburantes de sustitución. Mundo Científico 58: 548-558.
3. National Research Council Report. 1981. Food, Fuel, and Fertilizer from Organic Wastes. National Academy Press, Washington.
4. Moreira JR, Goldemberg J. 1981. El programa del alcohol en Brasil. Investigación yCiencia 61: 96-104.
5. National Research council Report. 1983. Alcohol Fuels. Optios for Developing Countries. National Academy Press, Washington.
6. Cunningham RE, López GD. 1994. Etanol de Lignocelulósicos. Tecnología y perspectivas. Programa CYTED. Universidade de Santiago de Compostela.
7. Philippidis GP. 1996. Cellulose bioconversion technology. Pp. 253-285 en: Handbook on Bioethanol. Wyman CE, ed. Taylor & Francis, Washington.
8. Rose AH. 1981. Producción microbiológica de alimentos y bebidas. Investigación y Ciencia 62 : 66-76.
9. Leveau J.Y, Bouix M. 2000. Microbiología Industrial. Acribia, Zaragoza.

# BIODIESEL y BIOFUEL

*Definiciones. Historia. Materias primas. Transesterificación química y enzimática. Propiedades. Beneficios ambientales. Producción. Motores para biodiesel y biofuel.*

## Definiciones

El biodiesel es definido por la American Society for Testing and Materials como los ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de larga cadena derivados de las fuentes lipídicas renovables. Es producido por la reacción de un aceite vegetal o una grasa animal con un alcohol en presencia de un catalizador, para dar glicerina y los ésteres.

Es un combustible alternativo, biodegradable y no tóxico, que puede ser usado puro o mezclado con gasoil, en los motores de ignición por compresión. Sus propiedades físicas y químicas en relación a la operación de los motores diesel, son similares al combustible derivado del petróleo (1).

El biofuel es aceite vegetal puro, usado como biocombustible en algunos motores desarrollados para tal fin. Los aceites puros, aún los más refinados, no convienen para los motores diesel de alto rendimiento con un bajo perfil de emisiones (2).

Rudolf Diesel desarrolló el motor que lleva su nombre en 1895 con la intención de hacerlo funcionar con una variedad de combustibles, incluyendo los aceites vegetales, y mostró su motor en la Exposición Mundial de París en 1900 usando aceite de maní (3).

La primera iniciativa para el desarrollo del biodiesel comenzó en Sudáfrica en 1981, continuó en Austria en 1982 y fue seguido por Alemania y Nueva Zelanda. El primer tipo de este combustible producido comercialmente fue el éster metílico del aceite de colza, posteriormente se emplearon otras materias primas, incluyendo todos los aceites vírgenes y residuales, así como las grasas vegetales y animales (4).

## Materias primas

El aceite de colza (*Brassica napus*) o nabo silvestre (*Brassica rapa*) es la fuente del 80% del biodiesel (especialmente en Europa), el aceite de girasol de más del 10%, seguido por el aceite de soja (éste en EE.UU.). El aceite de colza tiene alrededor del 60% de ácido oleico monoinsaturado y un nivel de ácidos grasos saturados (ácidos palmítico y esteárico) menor que 6%. Otras materias primas son las mezclas de múltiples aceites vegetales para la producción en pequeña escala, además del aceite de lino, el de palma en Malasia y el de *Jatropha curcas* en Nicaragua (4).

El mejoramiento de la tecnología permite el uso de fuentes de bajo costo provenientes de materiales residuales para la producción del biodiesel MFS (multi-feed-stock), por ejemplo el aceite de fritura usado o el sebo bovino de baja calidad. Sin embargo, cualquiera sea la materia prima, el producto final debe cumplir con las pruebas específicas de calidad del biodiesel normalizado (3).

El aceite es líquido a la temperatura ambiente debido a un mayor porcentaje de ácidos grasos insaturados en cambio las grasas son sólidas a la misma temperatura. Las moléculas de aceites y grasas consisten en glicerol combinado con tres ácidos grasos de cadena larga. Si un ácido graso tiene una doble ligadura entre carbonos se dice insaturado y si no la posee, saturado. Los ácidos mono-insaturados tiene una sola doble ligadura y los poli-insaturados varias. La viscosidad de los aceites es debida a la estructura molecular.

Los aceites son obtenidos comercialmente de numerosas fuentes. En algunos casos es un subproducto, por ejemplo los aceites de maíz y algodón, pero en otros es el producto principal, como en el caso de los de girasol y palma. El cuadro 1 muestra las fuentes más importantes de los aceites vegetales y los porcentajes del contenido de los mismos en los frutos y semillas con la humedad natural (5).

**Cuadro 1.** Contenido de lípidos en frutos o semillas de algunas plantas (5).

Vegetales	% aceites	Vegetales	% aceites
Aceitunas	15	Melón	45
Algodón	20 – 25	Nabo y colza	35 – 45
Coco (copra)	65	Palma	45
Girasol	30 – 40	Ricino	45 – 50
Maíz	5 – 10	Sésamo	45 – 50
Maní	40 – 45	Soja	15

Se suele clasificar a los aceites según la parte del vegetal extraído:

- aceites de frutos, ej. oliva, palma, palta, etc.
  - aceites de semillas, ej. maíz, ricino, algodón, uva, girasol, nabo, etc.
- o según la insaturación:

- aceites no secantes, ej. oliva, maní, nabo, etc.
- aceites semisecantes ej. algodón, maíz, girasol, etc. que en general no contienen ácido linoléico
- aceites secantes: uva, lino, etc. (2)

En general los aceites contienen glicéridos de los ácidos oleico ( $C_{18}$ ) y palmítico ( $C_{16}$ ), así como también linoleico. La excepción es el aceite de palma que contiene principalmente glicéridos de los ácidos palmítico y otros saturados ( $C_{12}$ - $C_{14}$ ), y oleico. Las semillas de melón contienen ácido erúico así como las del nabo silvestre. El aceite de soja contiene glicéridos de los ácidos linoleico >50%, oleico 30%, linoléico 2-4% y saturados 12-15%, y el de algodón de los ácidos oleico 45-50%, linoleico 25-30% y saturados (palmítico, esteárico) 20-30% (5).

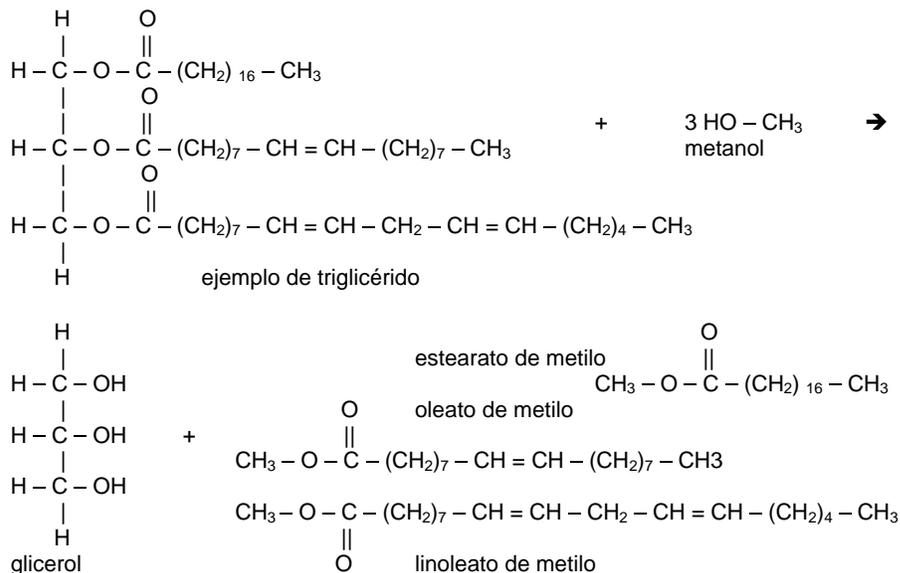
**Cuadro 2.** Características de algunos ácidos grasos presentes en los aceites (5).

Ácidos grasos	Nombre	n° átomos C	n° doble ligaduras
saturados	palmítico	16	0
	esteárico	18	0
mono-insaturados	oleico	18	1
	erúico	22	1
poli-insaturados	linoleico	18	2
	linoléico	18	3
	araquidónico	20	4
hidroxilados	ricinoleico	18	2

Algunas de reacciones importantes de los aceites y grasas son las siguientes:

- ✓ Se pueden introducir dos átomos de yodo en cada doble-ligadura. Cuanto mayor es el índice de yodo más propenso es el aceite a la polimerización.
- ✓ Se pueden hidrolizar los aceites o grasas hirviendolos en álcali, o bien por acción de catalizadores biológicos (enzimas). produciendo glicerol y sales de los ácidos grasos.
- ✓ Los aceites se pueden dispersar como pequeñas gotas en el agua. Este sistema se llama emulsión. No es estable y a menos que se añada un agente emulsificante, se separan las dos fases.
- ✓ Cuando un ácido graso insaturado se mantiene en contacto con el aire por algún tiempo ocurre enranciamiento. La cadena del ácido insaturado se corta generando nuevos ácidos con distintas propiedades. La luz y la temperatura aceleran el proceso (5).

## Transesterificación



**Figura 1.** Transesterificación con metanol.

La transesterificación es la reacción entre un aceite vegetal y un alcohol, catalizada por ácidos, álcalis o enzimas, para dar los ésteres alquílicos de los ácidos grasos y glicerol. El metanol es el alcohol comúnmente usado como se muestra en la figura 1, y un exceso del mismo desplaza el equilibrio hacia la derecha en presencia de un álcali (1).

Cuando el sistema es catalizado por álcalis (hidróxido y metóxido de sodio o potasio) se suele usar una temperatura próxima al punto de ebullición del alcohol (por ejemplo 65°C en el caso de metanol) y una relación de 6 moles de alcohol a 1 de aceite. En estas condiciones se convierte a ésteres metílicos entre el 90-98% del aceite en 45-90 minutos. Después de la reacción se hace un lavado con agua a 50°C para obtener un biodiesel de 99% de pureza con un alto rendimiento (1).

El sistema catalizado por álcalis es sensible a los contaminantes de los reactantes, como el agua y los ácidos grasos libres. Los aceites residuales de fritura tienen alrededor del 2% de ácidos grasos libres y deben ser pretratados (1). La presencia de agua puede causar la saponificación de los ésteres y los ácidos grasos libres pueden reaccionar con el catalizador alcalino dando jabones y agua. Los jabones forman emulsiones que crean dificultades en la recuperación y purificación del biodiesel (6).

La transesterificación catalizada por ácidos no es sensible a los ácidos grasos libres pero es más lenta. La reacción de metanol y aceite de soja en relación molar 30:1, con ácido sulfúrico (1% respecto al aceite) y a una temperatura de 65°C, tarda 70 horas para convertir más del 90% del aceite. La reacción de aceites residuales requiere un exceso de metanol y el triple de ácido sulfúrico, a una temperatura de 70°C en un reactor agitado, para convertir el 97% del aceite en 6 horas. Se usa hexano como solvente de extracción de los ésteres metílicos (1).

La transesterificación del aceite catalizada por enzimas requiere un tiempo de reacción más largo que en presencia de álcalis, pero se obtienen conversiones mayores que 95% para alcoholes primarios C<sub>1</sub>-C<sub>4</sub> tanto en sistemas acuosos como no acuosos. Se han empleado lipasas de *Burkholderia cepacia*, *Candida antarctica*, *Candida rugosa*, *Pseudomonas fluorescens*, *Rhizomucor miehei*, *Rhizopus oryzae* y de otros organismos (*Bacillus* sp., *Fusarium heterosporum*) productores de lipasas tolerantes a los solventes (7). El cuadro 3 compara dos métodos para la producción de biodiesel.

**Cuadro 3.** Comparación entre los procesos catalizados por álcalis y enzimas para la producción de biodiesel (7).

Proceso catalizado por	álcali	lipasa
Temperatura de reacción	60 – 70°C	30 – 40°C
Ácidos libres en la materia prima	productos saponificados	ésteres metílicos
Agua en la materia prima	interfiere con la reacción	No influye
Rendimiento en ésteres metílicos	normal	más alto
Recuperación de glicerol	difícil	fácil
Purificación de ésteres metílicos	lavados repetidos	ninguno
Costo del catalizador	barato	relativamente caro

### Propiedades del biodiesel

Los ésteres metílicos, por ejemplo del aceite de nabo silvestre (RME = rape methyl ester) o de ácidos grasos de otras fuentes (FAME = fatty acid methyl ester) son combustibles convenientes para los motores diesel pues las propiedades son muy próximas a las del gasoil, según se expone en el cuadro 4. Hay diferencias ligeras pero aceptables en la densidad y la viscosidad, y en general el biodiesel tiene un mayor número de cetano. Éste es indicativo de la capacidad de un combustible para entrar en ignición cuando se comprime en presencia de oxígeno. El cetano tiene la fórmula siguiente:  $\text{CH}_3 - (\text{CH}_2)_{14} - \text{CH}_3$  y el número es la calidad de un combustible expresado como el porcentaje de cetano en una mezcla de cetano y 1-metilnftaleno de igual comportamiento.

La ausencia de azufre en los aceites vegetales es la razón para una baja emisión de  $\text{SO}_x$  por parte del motor. El alto punto de inflamación del biodiesel lo más hace seguro que el derivado del petróleo (4). El biodiesel contiene oxígeno y por tanto el valor calorífico es un 7% menor que el del gasoil (8).

**Cuadro 4.** Propiedades del biodiesel comparadas con las del gasoil (FAME: ésteres metílicos de ácidos grasos; RME: ésteres metílicos de aceite de *B. rapa*) (4).

Propiedades	Unidades	Gasoil EN 590:1993	FAME DIN E51.606:1997	RME	Biodiesel ASTM D 6751
densidad a 15°C	kg/m <sup>3</sup>	820-860	875-900	...	...
viscosidad a 40°C	mm <sup>2</sup> /s=cSt	2,00-4,50	3,5-5,0	...	1,9-6,0
punto de inflamación	°C	> 55	> 110	...	> 130
azufre	% peso	< 0,20	< 0,01	...	< 0,05
número de cetano		> 49	> 49	...	> 47
contenido de oxígeno	% peso	0,0	...	10,9	...
valor calórico	MJ/dm <sup>3</sup>	35,6	...	32,9	...
grado de eficiencia	%	38,2	...	40,7	...
agua y sedimento	% vol.	...	...	...	< 0,050
ceniza sulfatada	% peso	...	...	...	< 0,020
corrosión de lámina cobre		...	...	...	< n°3
residuo carbonoso	% peso	...	...	...	< 0,50
acidez	mg KOH/g	...	...	...	< 0,80
glicerina libre	% peso	...	...	...	< 0,020
glicerina total	% peso	...	...	...	< 0,240
contenido de fósforo	% peso	...	...	...	< 0,001
temperatura de destilación	°C	...	...	...	< 360

El biodiesel producido con algunos aceites, como el de soja, se refrigera para que forme pequeños grumos (invernalización) y luego se filtra con el fin evitar problemas operativos en tiempo frío. Por otra parte el biodiesel requiere una manipulación y un

almacenamiento especiales para evitar la oxidación, aunque ésta no disminuya la calidad del combustible (9).

En varios países se produce industrialmente biodiesel en gran escala y es un sector de rápido crecimiento. El término biodiesel está restringido a un combustible estandarizado, para conservar la reputación de un producto de alta calidad y lograr una amplia aceptación del mismo por la industria automotriz, el comercio de los combustibles y los usuarios (2). La primera norma fue desarrollada por Austria en 1991 (ON C 1190) y asegura una alta calidad del combustible mediante pruebas sobre las propiedades del producto, tales como el rendimiento del motor, la reducción de las emisiones indeseables, la biodegradabilidad y la toxicidad. Las especificaciones posteriores permiten un rango más amplio de triglicéridos provenientes de aceites vírgenes o reciclados y grasas de origen vegetal o animal, siempre y cuando aseguren los requisitos de alta calidad del biodiesel (4). Otros países continuaron con normas similares, por ejemplo Francia e Italia en 1993, la República Checa en 1994, Suecia en 1996 (SS 15 54 36) y Alemania DIN E 51.606 para los ésteres metílicos de los ácidos grasos. En 1998 surgió la norma CEN-TC 19 apoyada por la Comisión Europea y varias fábricas de automotores garantizaron que sus vehículos pueden funcionar con biodiesel estandarizado (3).

## Beneficios ambientales

El biodiesel permite una reducción de 99% en  $\text{SO}_x$ , 20% en CO, 32% en hidrocarburos, 50% en hollín y 39% en partículas, pero hay un ligero incremento en la emisión de  $\text{NO}_x$  (6). El  $\text{CO}_2$  producido por la combustión proviene de una fuente vegetal y es reciclado durante la fotosíntesis de otras plantas, mientras que el gasoil proviene de una fuente fósil (1).

Los óxidos de nitrógeno resultan de la oxidación del nitrógeno atmosférico a las altas temperaturas alcanzadas dentro de la cámara de combustión del motor. Este incremento es atribuido al mayor contenido de oxígeno de la mezcla combustible y una mejor combustión. Se puede reducir la emisión de  $\text{NO}_x$  atrasando el punto de encendido y retardando la velocidad de llama en la cámara de combustión, pero esto trae como consecuencia un aumento en la emisión de hidrocarburos, CO y partículas. El retraso en el punto de encendido del motor puede ser combinado con el uso de convertidores catalíticos para lograr una reducción de la emisión de  $\text{NO}_x$  e hidrocarburos (4).

El biodiesel tiene muy baja toxicidad pues es un derivado de los aceites vegetales, con bajos riesgos para los organismos de agua dulce, tales como truchas y algas, lo que constituye una ventaja en el caso de un derrame accidental. Además posee una biodegradabilidad de más del 90% dentro de las tres semanas (8).

## Producción

La mayor planta elaboradora de biodiesel a partir de todo tipo de aceites y grasas reciclados está en Kentucky (EE.UU.), aunque son pocas las fábricas que procesan aceites residuales obteniendo un biodiesel estandarizado. En Alemania la producción de biodiesel en 1998 fue de 85.000 ton y en 2000 sobrepasó las 350.000 ton (3).

En Europa se incentivó a los granjeros a destinar un 15% de la tierra para cultivar oleaginosas no alimenticias, pero luego se redujo la superficie a 5% poniendo en riesgo de desaparecer a la incipiente industria. Sin embargo, al incorporarse los países de Europa Central a la Comunidad Europea se aumentó la producción agrícola con este fin (4). Otro hecho favorable fue la disponibilidad de los aceites y grasas residuales después de la prohibición de su empleo en la alimentación animal. Las estrategias son determinadas por las tasas locales y las exenciones nacionales (3).

El alto costo del biodiesel es el mayor obstáculo en su comercialización ya que el gasoil cuesta en EE.UU. casi lo mismo que el aceite de soja (1). El biodiesel es usado en Francia mezclado con gasoil en una proporción del 5% y distribuido a través de los sistemas existentes, para evitar construir una costosa infraestructura separada. En EE.UU. se agrega 20% de biodiesel al gasoil, y esta mezcla usada en combinación con un

convertidor catalítico obtuvo la certificación EPA para el programa de ómnibus urbanos. En Alemania y Austria está disponible el biodiesel puro para usarlo en áreas especiales, tales como las ciudades con riesgo de smog o donde el agua subterránea podría ser contaminada (4).

### Motores para biodiesel

El biodiesel puede substituir al gasoil en un motor de combustión interna pues no ocasiona una significativa reducción de la potencia ni limitaciones en las condiciones de empleo (10). En 1980 se inició un proyecto de adaptar motores de manera que puedan funcionar indistintamente con gasoil o biodiesel, modificando el sistema de inyección de manera que incrementara por sí mismo la cantidad de biodiesel inyectada y anticipara la inyección en uno o dos grados, trabajando con la misma carga mecánica, lo que permitió sacar al mercado unos tractores en los que la pérdida de potencia producida por el empleo del biodiesel era de alrededor del 3,5%, y en ningún caso superaba el 5% (2).

En diferentes ensayos realizados utilizando biodiesel con ómnibus y tractores sin sufrir ningún tipo de transformación, se obtuvieron pequeñas variaciones en la potencia desarrollada, por ejemplo en el motor Mercedes hay una caída del 3%. Pero el consumo específico aumentó en todos los casos alrededor del 12%, en parte debido a que el poder calorífico del biodiesel de colza es un 6,8% menor (2). Por otra parte, la mayor viscosidad del biodiesel hace que se reduzcan las pérdidas por fugas, aumentando la presión de alimentación (10). Las tuberías de teflón blindado y de caucho fluorado son resistentes para conducir al biodiesel con temperatura elevada. Algunos revestimientos son atacados, por ejemplo las resinas epoxi, pero las pinturas acrílicas son resistentes al biodiesel (2).

### Motores para biofuel

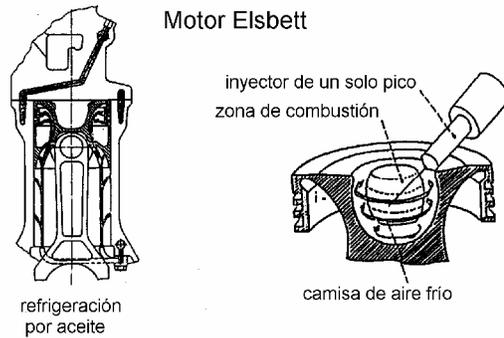
Las diferencias de los aceites vegetales con el gasoil son grandes en cuanto a viscosidad, pero pequeñas en lo que se refiere a densidad, poder calorífico y número de cetano. El cuadro 5 muestra las características de algunos aceites vegetales.

Los aceites vegetales no resultan adecuados para el uso en motores sin precámara de inyección debido a la mayor viscosidad. En los motores con precámara, donde se produce la inyección, la primera fase de la combustión se realiza con un exceso de combustible y escasez de oxígeno, lo que dificulta la formación de óxidos de nitrógeno. En la segunda fase, la combustión se realiza en la cámara principal a presión y temperatura bajas. El exceso de aire y el efecto de turbulencia generado favorece la combustión completa con bajas emisiones de residuos tóxicos (2).

**Cuadro 5.** Características de los aceites vegetales en comparación con gasoil (2, 10).

Aceite de	colza	soja	girasol	algodón	maiz	Gasoil
densidad (kg/m <sup>3</sup> )	914	914	918	912	915	815
viscosidad a 20°C (cSt = mm <sup>2</sup> /s)	77,8 39,2 25,7 ...	... 65,4 ... 7,6	... 58,5 ... ...	... 50,1 ... ...	... 46,3 ... ...	4,3 4,2 2,2 ...
punto de fusión (°C)	0/-2	-12/-29	...	...	...	-12
número de cetano	37,6	38	37,1	48,1	37,6	52
residuo carbonoso (%)	0,25	...	...	...	...	0,15
valor calorífico (MJ/kg)	37,6	39,6	39,5	39,6	37,8	43,3

Otra adaptación de los motores para poder utilizar aceites vegetales consiste en la incorporación de una bomba impulsora del combustible tipo émbolo y un sistema de precalentamiento del aceite, mediante la colocación de un intercambiador de calor en el depósito que emplea el aceite para la refrigeración del motor (2). Se puede también utilizar biodiesel en motores provistos de un sistema de precalentamiento del combustible (hasta 60°C) antes de que llegue a la cámara inyectora (10). En el sistema dual se utiliza gasoil o biodiesel para el arranque hasta que los gases de escape calienten el aceite y disminuya la viscosidad, en ese momento se cierra la alimentación con diesel y se da paso al aceite vegetal, pero antes de parar el motor hay que actuar en sentido inverso (2).



**Figura 2.** Esquema del motor Elsbett (2).

Un motor especialmente concebido para el uso de aceites vegetales fue diseñado por Elsbett cuyo esquema se muestra en la figura 2. Este motor intercambia muy poco calor con el medio, evitando entre el 25 y 50% de las pérdidas de energía a través del sistema de refrigeración. Carece de un sistema de enfriamiento convencional y posee mínimas canalizaciones entre la tapa y el bloque por donde circula el mismo aceite de la lubricación. Esto permite trabajar a una mayor temperatura con más rendimiento termodinámico, haciendo a este motor prácticamente independiente del tipo de combustible. Al lograr un núcleo que trabaja a 1.300°C en la cámara de combustión especial, sirve de combustible cualquier líquido que ingrese a través del par de inyectores y tenga alto poder calorífico. Es un motor limpio porque quema la totalidad del combustible que ingresa, desapareciendo las emisiones de CO, hidrocarburos y partículas de carbón, a cualquier régimen de trabajo. Trabaja con una eficiencia térmica que está en el orden del 40% superior a los motores Diesel convencionales (2).

El motor Elsbett posee pistones articulados con una parte superior de fundición nodular de acero (para conseguir un mayor aislamiento térmico y acústico) dentro de la cual está excavada la cámara de combustión de forma esferoidal y una parte inferior de aleación de aluminio que sirve sólo de guía y lubricación. La cabeza protege a los segmentos porque se dilatan de igual manera al ser ambos de acero. Lleva uno o dos inyectores por cilindro, de un solo agujero autolimpiante con una dirección de inyección tangencial a la cámara lo que permite una perfecta nebulización y mezcla aire-combustible previniendo los depósitos carbonosos. El circuito de lubricación-enfriamiento lleva un pequeño radiador de aceite. La tapa de cilindros tiene una pequeña cámara anular en cada cilindro para circulación del propio aceite de lubricación. Al no haber cámara de agua esta tapa no lleva juntas (2).

La forma esferoidal de la cámara de combustión, la mínima superficie de las paredes de esa cámara, un régimen de alta turbulencia favorecido por la posición de los inyectores y un exceso de aire respecto al necesario para la mezcla estequiométrica, generan una estratificación de la carga, de manera que fluye con un movimiento en espiral de fuera hacia dentro, lo que conlleva la presencia de un exceso de aire en el exterior frente a la parte central. Esto determina dos zonas térmicamente distintas por diferencias de calor y de densidad, un núcleo de combustión que puede llegar a los 1.300°C y una parte en contacto con el pistón que no supera los 650°C, normales para cualquier motor. No obstante, la estructura esferoidal de fundición tiene muy baja dilatación y conductividad térmica. La temperatura final de los gases de escape es sólo levemente superior a la de los motores Diesel convencionales. La parte externa más fría se forma con un 30% del aire que ingresa en exceso y ayuda a aislar el foco de calor interno, en el que se produce la combustión, con una menor concentración de aire, reduciendo la emisión de los óxidos de nitrógeno (2).

El motor Elsbett funciona con un buen rendimiento termodinámico y menor consumo, cuando la viscosidad del combustible varía entre 2 y 45 cSt a 40°C. También es posible transformar un motor convencional anulando la cámara de agua del bloque, cambiando la tapa de cilindros y los pistones, y además agregando un pequeño radiador de aceite (2).

**Cuadro 5.** Emisiones tóxicas durante el funcionamiento del motor Elsbett (2).

Contaminantes	Emisiones del motor Elsbett g/ km	Límites g / km
hidrocarburos	0,18 - 0,2	...
CO	1,25 - 1,45	7,4
NO <sub>x</sub>	1,38 - 1,55	...
hidrocarburos + NO <sub>x</sub>	1,49 - 1,58	1,97
partículas	0,111 - 0,118	0,27

### Referencias

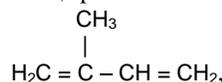
1. Zhang Y, Dubé MA, McLean DD, Kates M. 2003. Biodiesel production from waste cooking oil : 1. Process design and technological assessment. *Bioresource Technology* 89: 1-16.
2. Agejas Domínguez LA. 1996. Biocombustibles. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid
3. Tickell J, Tickell K. 1999. The Veggi Van. A hands-in story of biodiesel. *Renewable Energy World*, nov., pp. 74-99
4. Körbitz W. 1998. From the field to the fast lane-biodiesel. *Renewable Energy World* nov., pp. 32-37.
5. Muller HG. 1988. An introduction to tropical food science. Cambridge University Press, Cambridge.
6. Vincent G, Martínez M, Aracil J. 2004. Integrated biodiesel production: a comparison of different homogeneous catalysts systems. *Bioresource Technology* 92: 297-305.
7. Fukuda H, Kondo A, Noda H. 2001. Biodiesel fuel production by transesterification of oils. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 92: 405-416.
8. von Wedel R. 1999. Technical Handbook for Marine Biodiesel. National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy
9. Dunn RO. 1998. Effect of winterization on fuel properties of methyl soyate. TEKTRAN, U.S. Departement of Agriculture
10. Ramadhas AS, Jayaraj S, Muraleedharan C. 2004. Use of vegetable oils as I.C. engine fuels. *Renewable Energy* 29: 727-742.

# HIDROCARBUROS VEGETALES

Terpenos. Algas. Plantas.

## Terpenos

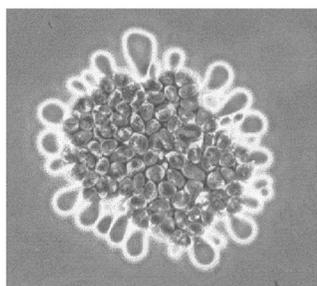
Los terpenos son hidrocarburos cíclicos y acíclicos, productos secundarios del metabolismo vegetal derivados del isopreno



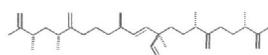
presentes principalmente en los aceites volátiles y las resinas, cuyas estructuras son múltiplos de  $\text{C}_5\text{H}_8$ . Los terpenoides son los alcoholes, aldehídos, cetonas y otros derivados que poseen el mismo esqueleto carbonado. Muchos son insaturados. Se clasifican según el número de unidades de isopreno en hemiterpenos ( $\text{C}_5$ ), monoterpenos ( $\text{C}_{10}$ ), sesquiterpenos ( $\text{C}_{15}$ ), diterpenos ( $\text{C}_{20}$ ), triterpenos ( $\text{C}_{30}$ ) y politerpenos (1).

## Algas

*Botryococcus braunii* es un alga colonial que crece principalmente en agua dulce y con frecuencia se las ve flotando sobre la superficie de aguas estancadas debido a la gran cantidad de hidrocarburos, localizados extracelularmente en la matriz de la colonia dentro de glóbulos. En la fase de reposo o senescente contiene hidrocarburos hasta el 86% del peso seco (2). Cuando se los extrae con hexano tienen color anaranjado debido a los carotenoides que lo acompañan. Después de eliminados los pigmentos queda un líquido viscoso claro compuesto por isoprenoides inusuales: dos triterpenoides tetrametilados lineales isoméricos, botriococceno e isobotriococceno ( $\text{C}_{34}$ ) en la relación 9:1. En la fase verde del alga se encontraron otros seis hidrocarburos olefínicos lineales con la fórmula general  $\text{C}_n\text{H}_{2n-2}$  y uno con la fórmula  $\text{C}_n\text{H}_{2n-4}$ . Cuando la colonia parda es inoculada en un medio de cultivo fresco, el botriococceno desaparece dentro de la primera semana y aparecen los hidrocarburos característicos de la fase exponencial verde, que solo alcanzan al 20% del peso seco (3).



*Botryococcus braunii*



botriococceno

**Figura 1.** Aspecto de una colonia de *B. braunii* y fórmula de uno de los compuestos que excreta (4).

Existen pruebas de algunos tipos de esquistos bituminosos y carbón de turba de Escocia, Sudáfrica y Australia, se originaron a partir de algas que crecían en los lagos de los tiempos antiguos. Si estos depósitos se examinan bajo el microscopio es posible ver restos similares a las colonias de *Botryococcus* (5). Éste forma parte de la microflora de los lagos del noroeste argentino (6).

## Plantas

Muchas plantas, la mayoría de las cuales viven y se desarrollan en zonas áridas, acumulan hidrocarburos utilizables como combustibles o materias primas tras una sencilla extracción. Algunas especies de los géneros *Euphorbia* y *Asclepia* poseen un látex con hidrocarburos. Los *Pittosporum* son árboles con frutos ricos en monoterpenos, entre los

que se destacan  $\alpha$ -pineno y mirceno. Los árboles brasileños del género *Copaifera* contiene sesquiterpenos cíclicos y los frutos de *Eucalyptus* son ricos en mono y sesquiterpenos (7).

La llareta (*Azorella compacta*) hoy casi extinguida, fue usada como combustible por los pueblos andinos desde antiguo y entre 1915 cuando la mina de cobre de Chuquicamata fue abierta, hasta 1958 se quemaron medio millón de toneladas. Esta umbelífera semiesférica crece 1 cm cada 20 años y se estima que una planta de 1,6 m de alto y 3 m de diámetro tiene unos 2.400 años de vida. Se encuentra entre 3.800 y 5.200 m de altura en el sur del Perú, noreste de Chile y noroeste de Argentina. El valor calorífico de la llareta es equivalente a la mitad del calor obtenible de igual peso de carbón bituminoso (8).

## Referencias

1. Guignard JL. 1974. Abrégé de Biochimie végétale. Masson et Cie., Paris.
2. Brown AC, Knights BA, Conway E. 1969. Hydrocarbon content and its relationship to physiological state in the green alga *Botryococcus braunii*. *Phytochemistry* 8: 543-547.
3. Knights BA, Brown AC, Conway E. 1970. Hydrocarbons from the green form of the freshwater alga *Botryococcus braunii*. *Phytochemistry* 9: 1317-1324.
4. Madigan MT, Martinko JM, Parker J. 2003. Brock - Biology of Microorganisms. 10<sup>o</sup> ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
5. Lee RE. 1980. Phycology. Cambridge University Press.
6. Tracanna BC. 1985. Algas del noroeste argentino. Opera Lilloana 35, Instituto Lillo, Tucumán.
7. Calvin M. 1984. Renewable fuels for the future. *Journal of Applied Biochemistry* 6: 3-18.
8. Wickens GE. 1995. Llareta (*Azorella compacta*, Umbelliferae): a review. *Economic Botany* 49: 207-212.

# Índice

- Aceites 71-73
- Aguas cloacales
  - separación de lodos 57
  - tratamiento 55
- Alcohol
  - fermentación 68
- Algas
  - hidrocarburos 79
- Antena de pigmentos 8
  - Transferencia de energía 8
- ATP sintasa 11
- Basura
  - procesamiento 60
- Biodiesel
  - beneficios ambientales 75
  - definición 71
  - motores para 76
  - producción 76
  - propiedades 74
- Biofuel
  - definición 71
  - motores para 76
- Biogas
  - características 32
  - uso 44
  - seguridad 45
- Biomasa
  - aprovechamiento 16
  - húmeda 17
  - producción 5
  - seca 16
- Carotenoides 8
- Carotenos 7, 9
  - espectro de absorción 7
- Ciclo de Calvin 12
- Ciclo de Hatch & Slack 13
- Clorofila 7
  - espectro de absorción 6, 7
  - excitación 9
- Cloroplastos 9
- Conversión biológica 5
- Digestibilidad de vegetales 30
- Digestión anaeróbica
  - control 52
  - de basura 61-64
  - eliminación patógenos 35
  - en relleno sanitario 63
  - factores ambientales 33
  - influencia de cationes 35
  - materia prima 30
  - nutrientes 54
  - parámetros 32, 60
  - residuos industriales 48
  - temperatura 34
  - tóxicos 54
- Digestores
  - agitación 40
  - carga 40, 42, 43, 59
  - construcción 38
  - cúpula fija 28
  - cúpula móvil 28
  - de aguas cloacales 55
  - de basura ‘húmeda’ 61, 63
  - de basura ‘seca’ 62
  - de contacto 29, 50
  - de lecho expandido 51
  - de lecho fluidizado 50
  - diseño 39
  - equipo auxiliar 45, 52, 56
  - excrementos 44
  - filtro anaeróbico 29, 50
  - industriales 50
  - modelo bolsa 38
  - modelo chino 36
  - modelo hindú 37
  - operación 41, 50, 59
  - producción de metano 21
  - rurales 36-44
  - tipos 28
  - UASB 29, 50
  - volumen 39
- Dióxido de carbono
  - en atmósfera 15
  - reducción 12, 14
- Efluentes industriales
  - tratamiento 48
- Energía solar 5
- Espectro electromagnético 6
- Etanol
  - fermentación 68
  - materias primas 65
  - producción 65 -70
- Excrementos
  - características 31, 42, 43
  - manejo 32
  - recolección 32
- Flujo de protones 11
- Fotobiología 6
- Fotosíntesis 7-14
- Fotosistemas 10
- Grasas 71
- Levaduras 69
- Lodos cloacales
  - calentamiento 58

- mezclado 58
- separación 57
- Metano
  - fuentes 22
- Metanobacterias
  - ecología 20
  - morfología 24
- Metanogénesis
  - de acetato 26
  - de las profundidades 27
  - en digestores 23
  - en rumen 24
  - hipertermófilos
  - reacciones 20, 21
  - reducción de CO<sub>2</sub> 25
  - temperatura 34
- Microalgas 18
- Plantas
  - C<sub>3</sub> 12
  - C<sub>4</sub> 14
- hidrocarburos 18, 79
- suculentas 14
- Relleno sanitario 63
- Residuos
  - amiláceos 67
  - azucarados 65
  - basura doméstica 60-64
  - contenido de N 31
  - industriales 47-54
  - lignocelulósicos 68
  - relación C/N 31
  - urbanos 55
- Rumen
  - fermentaciones 23
- Síntesis de
  - almidón 13
  - sacarosa 13
- Terpenos 79
- Tilacoides 9
- Xantófilas 9

This document was created with Win2PDF available at <http://www.daneprairie.com>.  
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.