

5. Rumen y biogas

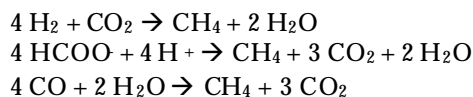
La combinación del reciclado de residuos animales con el cultivo de abonos verdes pueden proporcionar el nitrógeno necesario para la tierra agrícola. El reciclado puede hacerse mediante digestión anaeróbica, pues el contenido relativo de nitrógeno es mayor en el estiércol digerido que en el fresco. El lodo remanente en el digestor es una alternativa para mejorar los suelos hortícolas (1). Además este proceso permite obtener metano, un combustible gaseoso. La metanogénesis ocurre naturalmente en el rumen de los herbívoros.

El aumento del interés popular para contrarrestar la polución ambiental hace de la digestión anaeróbica el medio conveniente para tratar tanto los efluentes líquidos como los desechos sólidos, además de constituir una fuente alternativa de energía.

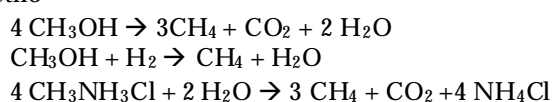
5.1. Metanogénesis

El dióxido de carbono es común en la naturaleza y es un producto importante del metabolismo energético de los organismos quimioorganotróficos. Los procariotas reductores de CO₂ más importantes son los metanógenos, un grupo de arqueobacterias anaeróbicas estrictas que emplean generalmente el H₂ como donante de electrones (2). Hay por lo menos diez sustratos que se convierten en metano por la acción de uno u otro metanógeno, todos los cuales liberan energía adecuada para la síntesis de ATP, incluyendo formiato, acetato, metanol, metilmercaptano y metilamina (3). Se los divide en tres clases:

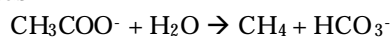
Substratos del tipo CO₂



Sustratos con grupo metilo



Substrato de acetotróficas



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. 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 (2).

En muchos ambientes anóxicos los precursores inmediatos del metano son el H₂ y el CO₂ que se generan por las actividades de los organismos fermentadores. 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 (3). Las bacterias celulolíticas rompen la molécula de celulosa, de peso molecular elevado, en

celobiosa y glucosa libre. Por acción de los fermentadores primarios, la glucosa origina ácidos orgánicos, alcoholes, H_2 y CO_2 . Todo el hidrógeno producido 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 otros metanógenos (2).

Etapas de la digestión anaeróbica

- Hidrólisis de los polímeros complejos
 - Acidogénesis por fermentación de los monómeros produciendo acetato, propionato, butirato, succinato, alcoholes, H_2 y CO_2
 - Acetogénesis por fermentación secundaria generando acetato, H_2 , CO_2
 - Metanogénesis a partir de H_2 , CO_2 , acetato
-

Los organismos clave en la conversión de compuestos orgánicos complejos a metano son los fermentadores secundarios, especialmente las bacterias oxidantes de ácidos grasos o alcoholes que producen H_2 , pues utilizan estos compuestos como fuente de energía en cultivos mixtos con un consumidor de H_2 a través de una relación sintrófica (sintrofia = comiendo juntos). La energía libre asociada a las conversiones de los ácidos grasos es positiva, pero si la concentración de H_2 se mantiene muy baja debido al consumo constante por los metanógenos pasa a tener signo negativo lo que determina su factibilidad. En la mayoría de los ecosistemas anóxicos, la acetogénesis limita el proceso global porque la velocidad de crecimiento de los microorganismos intervinientes es generalmente muy lenta (3).

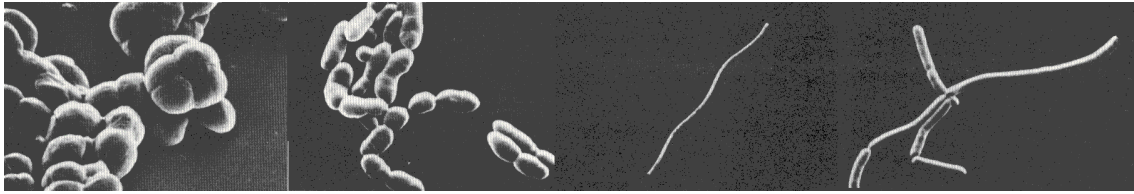
Los metanógenos están muy extendidos en la tierra a pesar de su metabolismo especializado. Aunque la producción de metano se produce en gran cantidad en los ambientes claramente anaeróbicos como pantanos, zonas encharcadas o rumen, el proceso también se lleva a cabo en lugares como los suelos de bosques o praderas que podrían ser considerados aerobios, debido a la formación de microambientes anóxicos en el interior de las partículas de suelo (4).

La magnitud de la producción de metano por las arqueobacterias es superior a la obtenida anualmente de los pozos de gas natural. Las principales fuentes son los eructos de los rumiantes y el gas liberado en las zonas pantanosas. También se lleva a cabo la metanogénesis en el intestino de los vertebrados y de los insectos que comen madera como las termitas. Se han encontrado metanógenos viviendo como endosimbiontes de amebas y flagelados de vida libre acuática o albergados en el tubo digestivo de invertebrados (3).

La metanogénesis se observa con más frecuencia en los ambientes terrestres y las aguas continentales que en el mar, debido a las proporciones más bien altas de sulfato presentes en aguas y sedimentos marinos donde las bacterias reductoras de sulfato compiten con las poblaciones metanogénicas por el acetato y el H_2 disponibles (4). En el océano los principales precursores de metano son las metilaminas apenas utilizadas por los reductores de sulfato, como la trimetilamina que es un producto importante de excreción en los animales marinos (3).

5.2. Arqueobacterias metanogénicas

Se clasifica a las metanobacterias en siete grupos principales que comprenden un total de 17 géneros. Hay bacilos cortos y largos, cocos con variada ordenación, células en forma de placas y metanógenos filamentosos. Unos son Gram positivos, otros Gram negativos (5).



Cuando los metanógenos crecen de forma autotrófica, el CO_2 es la principal fuente de carbono, sin embargo el crecimiento de casi todos ellos es estimulado por el acetato y en algunas especies por ciertos aminoácidos. En cultivos de laboratorio algunos metanógenos del rumen necesitan de una mezcla de ácidos grasos (3).

Todos los metanógenos utilizan NH_4^+ como fuente de nitrógeno y algunas especies fijan N_2 (*Methanosarcina*, *Methanococcus*). El níquel es un componente de una coenzima metanogénica y está además presente en las enzimas hidrogenasa y CO -deshidrogenasa. Estos organismos también requieren hierro y cobalto para su crecimiento. Tienen algunas coenzimas exclusivas que son portadoras de C_1 o intervienen en las reacciones de óxido-reducción como donadores de electrones (2).

La reducción del CO_2 por lo general depende del H_2 , pero el formiato, el CO e incluso el Fe^0 sirven como donadores de electrones. El Fe^0 es oxidado a Fe^{++} y los electrones liberados se combinan con los protones para formar H_2 , que es el donador inmediato en la metanogénesis. También los alcoholes pueden aportar electrones en unos pocos casos (2).

En condiciones normales la variación de energía libre durante la reducción de CO_2 a metano con H_2 es -131 kJ/mol , pero debido a la influencia de la concentración de los reactantes en los ambientes naturales baja a cerca de -30 kJ/mol . La concentración de H_2 en las zonas metanogénicas no es mayor a 10 mM (3).

La etapa terminal de la metanogénesis es la de conservación de la energía. La reducción está asociada con la extrusión de protones a través de la membrana, creando una fuerza motriz de protones. La utilización del gradiente de protones mediante una ATPasa integrada a la membrana, impulsa la síntesis de ATP (2). Las metanobacterias autotróficas convierten el CO_2 en material celular a través de la vía del acetyl-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 intermediarios comunes. Las reacciones de la vía del acetyl-CoA también están estrechamente relacionadas con la producción de metano a partir de compuestos de metilo o acetato.

El crecimiento de metanobacterias sobre compuestos de metilo también está ligado a la bomba de protones para la síntesis de ATP, pero en ausencia de H_2 la generación de los electrones necesarios 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 CO_2 (3).

5.3. Rumen

Los rumiantes son mamíferos herbívoros que poseen un órgano especial en cuyo interior se lleva a cabo la digestión de celulosa y otros polisacáridos mediante la actividad microbiana, porque estos animales carecen de las enzimas necesarias para digerirlos.

El rumen tiene un tamaño relativamente grande, con una capacidad de 100 a 150 litros en una vaca o 6 litros en una oveja, y se encuentra a una temperatura y acidez constantes (39°C , pH 6,5). La naturaleza anóxica del rumen es un factor significativo

para su funcionamiento (2). El forraje llega al rumen o panza, mezclado con la saliva que contiene bicarbonato y allí es sometido a un movimiento rotatorio durante el cual ocurren las fermentaciones. Esta acción peristáltica facilita la adherencia microbiana al material celulósico suspendido (3).

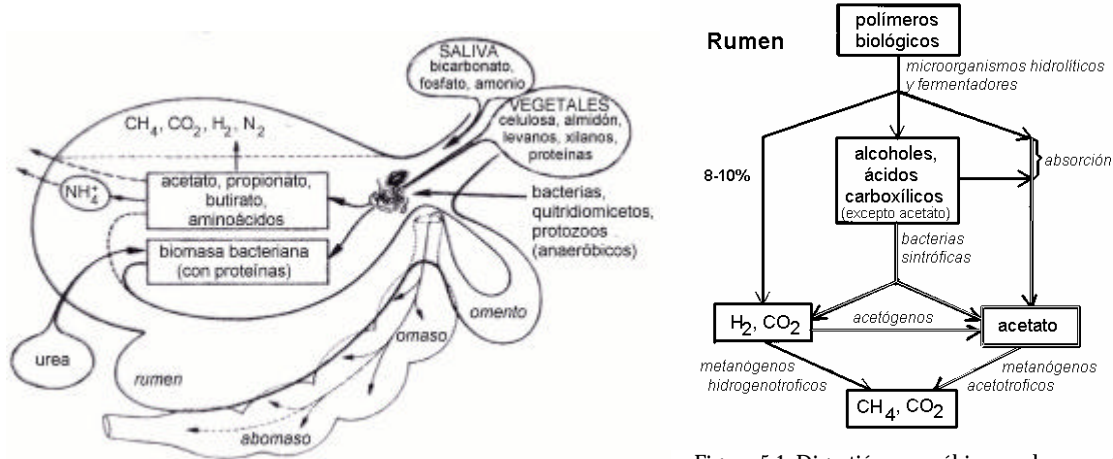


Figura 5.1. Digestión anaeróbica en el rumen (3)

El alimento permanece en el rumen de nueve a doce horas. El fluido ruminal contiene gran cantidad de células, entre ellas 10^{10} a 10^{11} bacterias /mL. Las bacterias y los hongos celulolíticos actúan produciendo el disacárido celobiosa y glucosa. Ésta experimenta una acción bacteriana en la que se forman principalmente los ácidos acético, propiónico y butírico, dióxido de carbono y metano (figura 1). 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 (3).

La masa de forraje pasa gradualmente a la redécilla 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 pasa directamente al libro y termina en el cuajar, donde las condiciones son ácidas y allí se inicia un proceso digestivo que continua 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 pastura es un alimento deficiente en proteínas (3).

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_2 a ese potencial es 10^{-22} M.

Fibrobacter y *Ruminococcus* son las bacterias celulolíticas más abundantes del rumen, pero también degradan xilano. *Fibrobacter* posee una celulasa periplásmica (entre la membrana citoplasmática y la membrana externa) por lo que debe permanecer adherido a la fibrilla de celulosa mientras la digiere, en cambio *Ruminococcus* produce una celulasa que es secretada. Los *Ruminobacter* y *Succinomonas* amilolíticos se encuentran en minoría, así como *Lachnospira* que digiere pectinas. Los productos de fermentación de estas y otras bacterias son utilizados por otros microorganismos. El succinato se convierte en propionato y CO_2 , y el lactato es fermentado a acetato y otros ácidos por *Megasphaera* y *Selenomonas* (3).

El H_2 producido en el rumen durante los procesos fermentativos nunca se acumula, ya que es utilizado rápidamente por los metanógenos (*Methanobrevibacter*, *Methanomicrobium*) para reducir CO_2 a CH_4 . Otra fuente de H_2 y CO_2 es el formiato. La

composición media de los gases acumulados en el rumen es aproximadamente 65% CO₂ y 35% CH₄, 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 organismos acetotróficos y además las bacterias sintróficas degradadoras de ácidos grasos no abundan. Los ácidos atraviesan la pared del rumen hacia la sangre del animal (2).

El contenido ruminal posee aproximadamente 10⁶ protozoos /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 (2).

Las condiciones ambientales del rumen son constantes para cada 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 (5).

5.4. Digestores anaeróbicos

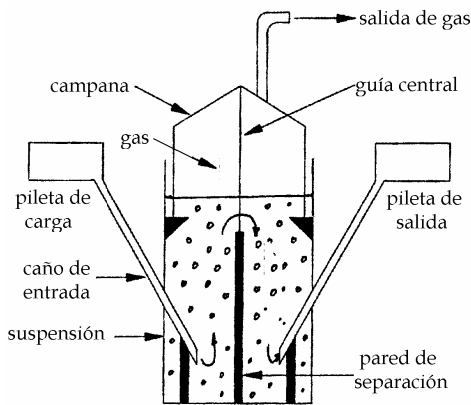


Figura 5.2. Digestor con campana flotante (6)

Para producir biogas se pueden emplearse diversos materiales orgánicos tales como residuos vegetales, estiércol, basura doméstica, camalotes, algas, efluentes de las industrias de alimentos, bebidas, pulpado y papel, y químicas (6).

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 (7).

El proceso en un digestor difiere de otros tipos de fermentaciones en que no es necesario utilizar cultivos puros de microorganismos. Las diversas bacterias capaces de descomponer las sustancias orgánicas y producir biogás están ampliamente distribuidas en la naturaleza. Se encuentran, por ejemplo en los excrementos animales y humanos. Estas bacterias pueden activarse y mantenerse indefinidamente con un manejo adecuado (8).

El tamaño del digestor está determinado por el contenido de sólidos y el tiempo de retención del residuo para un tipo de carga dado. Los materiales insolubles, tales como papel, paja y otros lignocelulósicos, pueden requerir un tratamiento de días (o aún años en ciertos rellenos sanitarios) mientras que puede lograrse hasta una reducción del 95% con una carga diaria de 20 kg / m³ de digestor cuando el residuo es soluble (5).

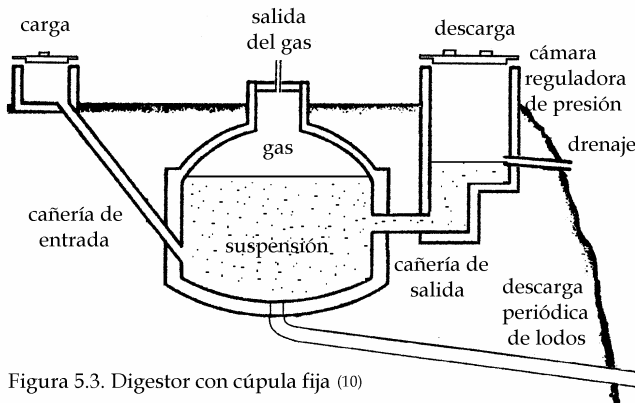


Figura 5.3. Digestor con cúpula fija (10)

Hay una amplia variedad de diseños pero los digestores de una sola etapa con campana fija o flotante (figuras 2 y 3) son los más usados en ambientes rurales. El estiércol digerido es recuperado como un lodo con 10 a 12% de sólidos y un sobrenadante con 2 a 3% de sólidos.

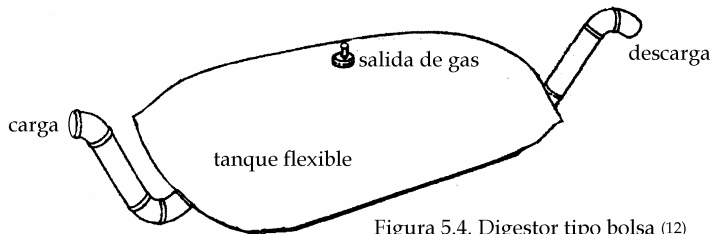


Figura 5.4. Digestor tipo bolsa (12)

La digestión ruminal está estratificada en dos sub-fases una líquida, y otra con alto contenido en sólidos donde es mayor la actividad metabólica y la concentración de intermediarios. Similarmente los digestores de dos fases tienen un mejor rendimiento en metano que los de una sola (9).

El digestor de campana fija cuyo esquema se muestra en la figura 3, tiene la cubierta inmóvil y cuenta con la presión hidrostática autogenerada para distribuir el biogás. Como se colecta el gas en el mismo digestor, parte de la suspensión digerida es desplazada hacia un tanque de almacenamiento cuyo nivel sube con la producción y baja con el uso del gas. La ventaja de este modelo consiste la ausencia de partes móviles corroíbles (10).

En la figura 2 se da el esquema de un digestor con campana colectora de gas flotante, que puede estar directamente sumergida en la suspensión o bien en el aceite retenido entre las dos paredes concéntricas del tanque para lograr el sellado. 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 (6). El digestor tipo bolsa que se muestra en la figura 4, es útil en las regiones subtropicales y tropicales (11).

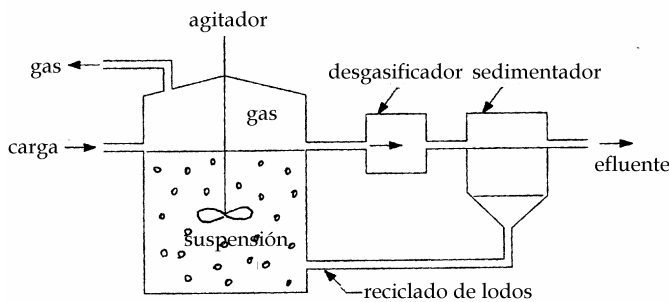


Figura 5.5. Digestor de contacto anaeróbico (11)

Otros tipos de reactores permiten el manejo de grandes cantidades de residuos por unidad de volumen generando biogás a mayor velocidad, como el de contacto anaeróbico (figura 5) (12).

Otros tipos de reactores permiten el manejo de grandes cantidades de residuos por unidad de volumen generando biogás a mayor velocidad, como el de contacto anaeróbico (figura 5) (12).

5.5. Residuos

Los materiales que se pueden usar para la generación de metano son muy variados, por ejemplo:

- residuos de cosechas: maloja de caña de azúcar, malezas, paja, rastrojo de míz y otros cultivos;
- residuos de origen animal: desechos de establos (estiércol, orina, paja de camas), camas de gallinas 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 prensas de ingenios azucareros, residuos de té, polvo de las desmotadoras e industria textil;
- mantillo forestal: ramitas, hojas, cortezas;
- plantas acuáticas: camalote, algas marinas (14).

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 y se emplea como medida indirecta de la cantidad de sustrato transformable. Otra manera de expresar la cantidad de sustrato disponible es mediante los valores de sólidos totales (ST) que es el material remanente después de evaporar a 103-105°C o de sólidos volátiles (SV) que es el material orgánico descompuesto a 550 ± 50°C (13).

Otro parámetro de la digestibilidad de los residuos es la demanda biológica de oxígeno (DBO) que es el consumo de oxígeno, en mg/L de suspensión, durante la degradación por microorganismos durante 5 días a 20°C. 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 degradabilidad de la misma. También puede usarse el valor de carbono orgánico total (COT) que se obtiene midiendo el CO₂ formado en la combustión (8).

En el cuadro siguiente se muestra la digestibilidad de algunos 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 (7).

Digestibilidad de algunos vegetales (7)		
Material	Sólidos volátiles totales	Sólidos volátiles digeridos
	% peso seco	% SVT
Gramíneas	43,3 - 99,3	15,0 - 87,0
<i>Brassica</i> sp.	54,6 - 89,8	33,5 - 93,8
Batatas	69,0 - 97,7	41,0 - 98,7
Camalotes	69,7 - 88,1	12,0 - 80,1
Algas marinas	19,7 - 74,5	21,0 - 83,4

La digestión anaeróbica de madera no es técnicamente factible sin algún tipo de pretratamiento que aumente su biodegradabilidad (5). En el recuadro siguiente se muestra la relación C/N de varios materiales residuales.

Contenido de nitrógeno y relación C/N en varios residuos (14)					
animales	C/N	%N	vegetales	C/N	%N
Desperdicios de pescado	5,1	6,5-10	Heno	12	4
de matadero	2	7-10	Amaranto	11	3,6
Orina	0,8	15-18	Alfalfa	16-20	2,4-3
Sangre	3	10-14	Paja	48	1,1
Estiércol equino	25	2,3	Algas marinas	19	1,9
Estiércol vacuno	18	1,7	Restos de lino	58	1,0
Estiércol de corral	14	2,15	Paja de trigo	128	0,3
Heces humanas	6-10	5,5-6,5	Aserrín	511	0,1
			domésticos		
			basura	25	2,2
			peladura papas	25	1,5

Una relación carbono/nitrógeno de 16/1 se considera óptima para una buena producción de gas y para una fermentación estable de los excrementos animales (8), aunque puede obtenerse biogás a valores mayores no se debe superar la relación 30/1 (14). A continuación se indican algunas características de las deyecciones animales.

Características de excrementos animales (8)				
	Kg/100kg peso vivo/día			
	Peso húmedo	Sólidos totales	Sólidos volátiles	N total
Bovinos de carne	4,6	0,70	0,65	0,055
Cerdos	5,1	0,69	0,57	0,039
Gallinas ponedoras	6,6	1,67	1,22	0,099
Ovinos	3,6	1,07	0,91	0,043
Vacas lecheras	9,4	0,89	0,72	0,036

Los volúmenes de gas producido suelen expresarse como m³ biogas/m³ digestor o como m³ biogas/kg DQO o DBO y difieren según el tipo de residuo, la concentración de sólidos volátiles, la relación carga/volumen del digestor, el tiempo de retención de los residuos dentro del digestor y el diseño del mismo. En general la producción oscila entre 1 y 5 m³ biogas/m³ digestor, o dicho de otra manera entre 0,3 y 0,5 m³/kg SV (6).

5.6. Características del biogas

El cuadro siguiente resume la composición promedio del biogas según la fuente. El valor calorífico varía entre 17 y 34 MJ/m³ según el contenido de metano.

Composición del biogas derivado de diversas fuentes (6).					
Gases	Desechos agrícolas	Lodos cloacales	Desechos industriales	Rellenos sanitarios	Propiedades
Metano	50 - 80%	50 - 80%	50 - 70%	45 - 65%	combustible
CO ₂	30 - 50%	20 - 50%	30 - 50%	34 - 55%	ácido, asfixiante
Vapor agua	saturación	saturación	saturación	saturación	corrosivo
Hidrógeno	0 - 2%	0 - 5%	0 - 2%	0 - 1%	combustible
H ₂ S	100 - 7000ppm	0 - 1%	0 - 8%	0,5 - 100ppm	corrosivo,olor,tóxico
Amoníaco	trazas	trazas	trazas	trazas	corrosivo
CO	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	5ppm	corrosivos,olores

La condensación del vapor es con frecuencia un problema debido a que el biogas está generalmente más tibio que las cañerías por donde pasa. Es esencial una trampa de agua y puntos de drenaje en la tubería (14).

El hidrógeno es un intermediario en el metabolismo anaeróbico y algunas bacterias 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. El oxígeno es consumido por los microorganismos facultativos dejando el nitrógeno residual (6). Tanto el azufre orgánico, presente por ejemplo en algunos aminoácidos, y el inorgánico pueden ser reducidos a H₂S, 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 (14).

5.7. Factores ambientales

Entre los factores ambientales importantes 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 (8).

Las metanobacterias sólo pueden multiplicarse cuando está avanzada la fermentación de los substratos primarios por acción de las bacterias anaerobias facultativas (por ejemplo *Escherichia*, *Enterobacter*, *Klebsiella* o *Bacillus* spp.) y se haya consumido todo el oxígeno disuelto, de manera que el potencial redox haya alcanzado en un valor menor que -200 mV. Además, el pH no debe bajar demasiado, debido a los ácidos producidos por los *Clostridium*, para no inhibir el crecimiento de los metanógenos (15).

Comúnmente la concentración de ácidos grasos volátiles no supera los 2 a 3 g/L, expresados como ácido acético. Si se sobrepasa este nivel, 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 (8). 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 (14). Una vez que se ha estabilizado un digestor el lodo está bien amortiguado, es decir la concentración de protones no varía aún cuando se añadan cantidades relativamente grandes de ácido o álcali. Si esta capacidad de amortiguación se destruye y el pH disminuye cesa la metanogénesis (8).

El CO₂ es soluble en agua y reacciona con los iones hidroxilo para formar bicarbonato. La concentración de HCO₃⁻ es afectada por la temperatura, el pH y la presencia de otros materiales en la fase líquida. Las condiciones que favorecen la producción de bicarbonato aumentarán a su vez el porcentaje de metano en la fase gaseosa (14).

La gama de temperatura para la digestión anaeróbica tiene dos zonas óptimas una mesófila (30 - 40°C) y otra termófila (45 - 60°C). Casi todos los digestores funcionan dentro de los límites de temperaturas mesófilas 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 las bacterias son sumamente sensibles a los cambios ambientales especialmente una disminución repentina de sólo unos pocos grados (8).

En la figura 6 se ven las relaciones típicas que existen entre la producción de gas y la temperatura con diferentes tiempos de retención. 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.

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. La regulación de la temperatura puede lograrse haciendo circular agua caliente a través del tanque por medio de termointercambiadores (8).

Las causas principales de una excesiva producción de ácidos volátiles son la elevada velocidad de carga, una baja temperatura y la formación de espuma que constituye una zona favorable para los acetógenos. La sedimentación

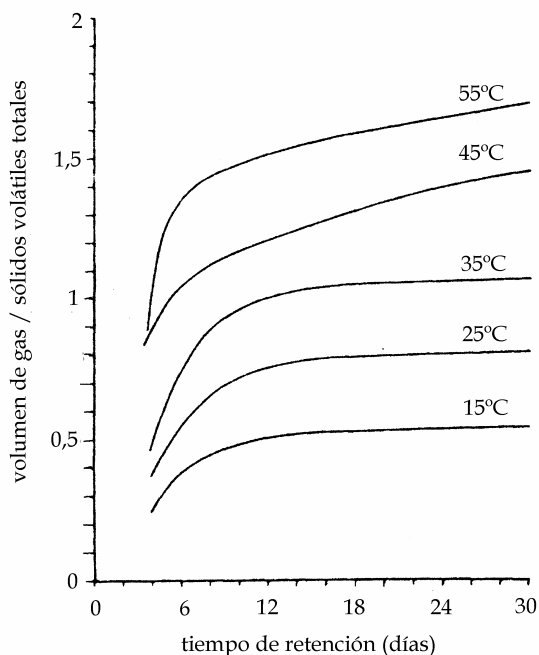


Figura 5.6. Influencia de la temperatura sobre la producción de biogas (8)

de los materiales fibrosos y la espuma se puede evitar mezclando el contenido del digestor (14).

Para una digestión óptima, tienen que estar presentes todos los elementos esenciales en forma fácil de asimilar por las bacterias. Se han logrado resultados satisfactorios con concentraciones mayores a 15% de sólidos, sin embargo en la práctica la gama es de 3 a 10% (8). Los requerimientos nutritivos de DBO : nitrógeno : fósforo en la digestión anaeróbica están en la relación 700 : 5 : 1. Solo los estiércoles están nutricionalmente balanceadas. Además para el crecimiento óptimo de los metanógenos es necesario la presencia de cuatro elementos en concentraciones muy bajas: Fe 2nM, Co 10 nM, Ni 100 nM y Mo 10 nM (6).

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. Los metanógenos son sensibles a los antibióticos que afectan la síntesis de proteínas o lípidos y a los interfieren con la función de la membrana citoplasmática.

La concentración de nitrógeno amoniacal debe ser inferior a 1,5 g/L si es mayor, como suele ocurrir con la gallinaza, resulta tóxico. Si bien es un amortiguador, su aumento puede llegar a impedir el proceso de digestión. También son tóxicas las sales de zinc, cobre y níquel, aunque este último es necesario en ínfimas cantidades. Las sales de los elementos alcalinos y alcalino-térreos pueden ser estimulantes o inhibitorias según la concentración como se observa en el cuadro siguiente (14).

Cación	Efecto de la concentración de algunos cationes (14)		
	estimulante	Concentración g/L inhibitoria	muy inhibitoria
Sodio	0,1 – 0,2	3,5 – 5,5	8,0
Potasio	0,2 – 0,4	2,5 – 4,5	12,0
Calcio	0,1 – 0,2	2,5 – 4,5	8,0
Magnesio	0,075 – 0,15	1,0 – 1,5	3,0

Los desinfectantes clorados son muy tóxicos aún a bajas concentraciones (<1 mg/L) pero son rápidamente absorbidos por los sólidos e inactivados. La mayoría de los detergentes sintéticos son degradados fácilmente pero si la concentración es mayor que 20 mg/L pueden afectar la digestión. Los compuestos de amonio cuaternario son persistentes y tóxicos a bajas concentraciones (1mg/L). Los solventes clorados y derivados son tóxicos en concentraciones de 1 mg/L. 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 (6).

5.8. Criterios de diseño y construcción

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 materia orgánica por unidad de volumen del digestor. 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 producción, 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 los residuos y la fuente de agua, la topografía del terreno, la textura del suelo y el nivel freático (16).

Las consideraciones dependientes del tamaño para el diseño de una planta de biogás en áreas rurales incluyen: la cantidad y el tipo de desperdicios disponibles, las dimensiones de los trozos o partículas, el requerimiento de calefacción, la necesidad de agitación, la disponibilidad de materiales de construcción (14).

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 estabilizarán 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 se debe picar bien los materiales tales como paja, virutas, hojas, bagazo antes de agregarlos, para que la suspensión fluya uniformemente evitando el taponamiento de las cañerías de carga y descarga, y reduciendo la formación de espuma (8).

Cuando las condiciones climáticas lo exigen, se debe calentar el digestor para reducir el tiempo de retención y a su vez el tamaño del mismo. Pero este paso requiere emplear parte del gas producido, disminuyendo la cantidad aprovechable para uso doméstico, y añadiendo un costo de instalación y operación (14).

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 de campana flotante está dado por la siguiente fórmula (17):

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

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

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

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

t_F 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.

El volumen del digestor **V** es proporcional a la relación **t_F/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_F** o disminuir **V** (11).

Por ejemplo, si **C**=2,8 m³/día, **R**=5, **D**=1,25; **t_F**=30 días, **Y**=0,2 m³/kg, **d**=1102 kg/m³, el volumen del digestor sería 4,3 m³. Sin embargo, suele ser sobredimensionado en un 40% (17).

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), aunque suele ser conveniente incorporar un agitador (18).

La provisión de agua para los digestores es otro punto a tener en cuenta, por ejemplo sobre la base de una relación estiércol húmedo/estiércol seco de 5 : 1 y de una relación estiércol húmedo/agua de 4 : 5, se necesita 62,5 litros de agua diarios cada 10 kg de estiércol seco. 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%, por lo que es posible disminuir la cantidad de agua en los climas cálidos permitiendo un rendimiento aceptable del biogás (17).

Se puede estimar la demanda máxima de biogás suponiendo las necesidades durante cada hora del día para planificar el tamaño de la campana flotante, pero en general se considera conveniente no sobrepasar el volumen del gas producido diariamente.

La corrosión es un problema serio por la exposición constante de las partes metálicas 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 (15). 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 discontinua 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 al menos uno esté en operación (8).

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) como el de bolsa, suele haber menos problemas de formación de espuma que cuando es vertical (9).

Para establecer el potencial en biogás 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. (17).

La producción diaria posible de biogás 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 (17).

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 biogás.

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 biogás a partir de la fermentación del estiércol es de 0,187 m³/kg a 15°C y 0,374 m³/kg a 27°C, por lo tanto en el pueblo se puede generar en invierno 112 m³ de biogás 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 m³ de biogás por día sobre la base de 0,028 m³/persona/día. La producción total de biogás en el pueblo proveniente de estiércol vacuno y heces suma 126 m³/día, sin contar el que se puede

obtener de residuos celulósicos, gallinaza, desechos de criaderos de cerdos y conejos, restos de matadero, etc. (17).

5.9. Operación

	Cantidades de diversos materiales para cargar un digestor (17, 19)		
	kg/día necesarios para producir		
	1,0	3,5	m ³ biogas/día
pasto seco	1,6	5,6	
paja de maíz seca	1,2	4,3	
cáscarillade arroz seca	1,6	5,6	
camalote seco	5,3	18,6	
camalote húmedo	106	372	
estiércol de cerdos	13	44	
estiércol de gallinas	16	56	
estiércol de vacunos (25°C)	28	98	
“ “ “ (verano, aire a 30°C)	12	41	
“ “ “ (invierno, aire a 14°C)	31	110	

Estiércol de	Características de la suspensión de estiércol para cargar el digestor (20)			Cerdos Promedio (mg/L)
	Vacas Lecheras Promedio (rango)	Unidades		
Sólidos totales	15,4 (12,9 – 19,8)	% estiércol		1700
Sólidos volátiles	86,1 (76,7 – 91,8)	% sólidos totales		1000
DQO total	149 (81 – 284)	g/L		1400
DBO ₅ total	16,1 (8,6 – 21,5)	g/L		725
DBO ₅ soluble	9,3 (4,6 – 14,4)	g/L		
COT				680
pH	6,2 (5,2 – 6,8)	unidades		
Nitrógeno total	2,8 (2,6 – 2,9)	% sólidos totales		200
Amonio				100
Nitrato				1
Fósforo soluble	0,25 (0,17 – 0,32)	% sólidos totales		
Fosfato total				85
Potasio total	(0,5 – 5)	% sólidos totales		

En los recuadros anteriores se indican los requerimientos diarios de algunos residuos para alimentar al digestor y las características del estiércol diluido de vacas lecheras y de cerdos.

La carga inicial requiere una gran cantidad de materia prima que conviene reunirla mientras se está 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 (16).

La temperatura tiene un significativo efecto sobre la digestión anaeróbica de los materiales orgánicos. Los digestores enterrados aprovechan las propiedades aislantes del suelo que los rodea. Pero en caso de los construídos sobre el suelo deben estar

rodeados de anillos de hojas, aserrín o 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 (14). El rendimiento promedio en China, durante el verano, es de 0,2 m³ de gas por día por m³ del digestor mientras que en Sri Lanka aumenta a 0,5 m³ de biogás diarios por m³ del digestor (19).

El operario 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 biogás. 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 (16).

Pueden usarse varios métodos para el mezclado de los diversos materiales que se usan para cargar un digestor:

- mediante la carga diaria,
- por manipulación de los dispositivos de entrada y salida de manera que las operaciones de alimentación y descarga favorezcan el mezclado,
- por instalación de dispositivos de mezclado que puedan ser operados manualmente,
- introduciendo la suspensión como un chorro,
- haciendo entrar la suspensión como un chorro tangencial al contenido del digestor.

Si no se hace agitación se puede reducir la estratificación usando un digestor de desplazamiento horizontal (14). 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 (16).

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 estiércol vacuno es de alrededor de 6,5 kg sólidos volátiles por m³ (9).

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

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

En el ejemplo dado, L=3,25 kg/m³ * día, o sea se agregaría en total 14 kg de estiércol seco por día (17).

Los digestores cargados a razón de 0,2-0,5 kg SVT/m³ por día, generalmente sin agitación, corresponden a las pequeñas instalaciones para granjas cuyo tamaño medio es de 10 m³. Cuando la carga es mayor que 0,5 kg SVT/m³ día se requiere un mezclado al menos intermitente y una supervisión mayor que los anteriores (8).

5.10. Seguridad

Además de gas, la digestión anaeróbica genera un efluente que, según los sólidos residuales y el contenido en nitrógeno o en agua, puede ser usado como abono o para riego. Por otra parte juega un papel importante en el control de los olores de los residuos en las granjas o las tierras de relleno. La digestión mesofílica mata organismos 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 suum*, aunque éstos desaparecen en el rango termofílico (6).

Desaparición de microorganismos entéricos durante la digestión anaeróbica (14)			
Organismos	Temperatura °C	Tiempo de residencia días	desaparición %
<i>Salmonella</i> spp.	22 – 37	6 – 20	82 – 96
<i>Salmonella typhi</i>	22 – 37	6	99
<i>Mycobacterium bovis</i>	30	...	100
Poliovirus	35	2	98,5
Quistes de protozoos	30	10	100
<i>Ascaris</i> sp.	29	15	90

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 ventada pues generalmente está mezclada con aire. Luego sólo habrá biogás en la cúpula fija o campana móvil del digestor. Por otra parte cuando se detiene un digestor para retirar los lodos se debe ventilar bien el interior pues el biogás es asfixiante (18).

El cierre de agua de la cubierta móvil se puede romper cuando la alimentación del digestor es excesiva o la extracción del gas es demasiado lenta. El vacío se crea cuando la extracción del gas es muy rápida. La válvula de seguridad consta de arandelas de peso calibrado que debe igualar a la presión proyectada para el digestor. La presión del gas se establece normalmente entre 15 y 30 cm de columna de agua. El arrestallamas es una caja de placas de metal corrugado con agujeros. Si se produjera alguna llama en la tubería del gas, éste se enfriará por debajo del punto de ignición, pero podría seguir pasando (13).

La eliminación del sulfuro de hidrógeno 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 $\text{Fe}(\text{OH})_3$, y el catalizador se puede regenerar varias veces. El CO_2 puede ser removido en parte con agua fría (14).

Referencias

- Smil V. Abonos nitrogenados. *Investigación y Ciencia* 252: 64 – 70, 1997
- Schlegel HG, Zaborosch C. *General Microbiology*. 2° edición. Cambridge University Press, UK, 1993
- Madigan MT, Martinko JM, Parker J. *Brock Biology of Microorganisms*. 10° ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, 2003
- Fredrickson JK, Onstott TC. Vida en las profundidades de la Tierra. *Investigación y Ciencia* 243: 22-28, 1996
- Smith PH, Bordeaux FM, Wilkie A, Yang J, Boone D, Mah 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
- Wheatley A, editor. *Anaerobic Digestion: A Waste Treatment Technology*. Elsevier Science Publishers Ltd, Barking, Essex, 1990. cap. 1, 5
- Bjorndal 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
- Taiganides EP. Biogas: recuperación de energía de los excrementos animales. *Zootecnia* 35: 2-12, 1980
- Van Buren JCL, Frijns JAG, Lettinga G. *Wastewater treatment and reuse in developing countries*. Wageningen Agricultural University, 1995
- Van Buren A. *A Chinese Biogas Manual*. Intermediate Technology Publications, London, 1979
- BOSTID Report. Food, Fuel, and Fertilizer from Organic Wastes. National Academy Press, Washington, 1981, pp. 64-92.
- FAO/RAP. Rural energy: Medium and large scale biogas systems in the Asia-Pacific Region. RAP Bulletin, 1995

13. Hernández Muñoz A. Depuración de Aguas Residuales. 3ª edición. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, 1988, cap. 10
14. BOSTID Report. Methane Generation from Human, Animal, and Agricultural Wastes. National Academy of Sciences, Washington, 1977
15. Jagnow G, Dawid W. Biotecnología. Acribia, Zaragoza, 1991
16. da Silva NA. Construção e operação de biodigestor modelo chinês. Energia. Fontes Alternativas. 3 (14): 31-56, 1981
17. Prasad CR, Krishna Prasad K, Reddy AKN. Biogas plants: prospects, problems and tasks. Economic and Political Weekly, special number august 1974, 1347-1364
18. FAO/UNDP. China recycling of organic wastes in agriculture, Chapter 4. Biogas technology and utilization. FAO Soil Bulletin 40: 47-63, 1977
19. Santerre MT, Smith KR. Measures of appropriateness: The resource requirements of anaerobic digestion (biogas) systems. World Development 10: 239-261, 1982
20. 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