

DIGESTIÓN ANAERÓBICA: OBTENCIÓN DE BIOGÁS

Segunda edición

Autor: Daniel Oscar Bennardi

Introducción

Los bioprocesos utilizados para estabilizar los residuos orgánicos se basan en una digestión de tipo aeróbica (compostaje, lombricultura) o de tipo anaeróbica.

La **digestión anaeróbica** es el proceso en el cual microorganismos (bacterias) descomponen la materia orgánica biodegradable (biomasa) **en ausencia de oxígeno gaseoso**.

Se efectúa en reactores llamados **biodigestores**. Se obtiene un gas combustible llamado **biogás** (también llamado gas de los pantanos, puesto que en ellos se produce una biodegradación de residuos vegetales semejante a la que ocurre en los biodigestores) y un residuo o efluente estabilizado que puede usarse como **biofertilizante**.

Ventajas de la digestión anaeróbica

Cuando los residuos orgánicos se someten a una degradación aeróbica, se generan productos como CO_2 y H_2O . Gran parte de la energía se pierde y se libera a la atmósfera.

En cambio en los procesos anaeróbicos las pérdidas de energía son aproximadamente veinte veces menores que en los aeróbicos. Y por otro lado se transforman los residuos orgánicos en productos con valor agregado. El biogás constituye una fuente de energía renovable.

Composición del biogás

El biogás está constituido por una mezcla de metano (CH_4), en una proporción que oscila entre un 50% y un 70% en volumen, y dióxido de carbono (CO_2), de 30 a 50%. Además contiene pequeñas cantidades de otros gases como hidrógeno (H_2), nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2), vapor de agua y ácido sulfhídrico (H_2S).

Etapas del proceso anaeróbico

El proceso anaeróbico es muy complejo y está integrado por múltiples reacciones, muchas de las cuales ocurren en forma simultánea, involucrando diferentes tipos de microorganismos. El proceso bioquímico consta de cuatro etapas (Figura 1):

Hidrólisis: la biomasa está formada por polímeros orgánicos, macromoléculas orgánicas (lípidos, proteínas, carbohidratos). Por medio de enzimas segregadas por los microorganismos (amilasas, proteasas, lipasas) son hidrolizadas para dar moléculas de menor peso molecular (ácidos grasos de cadena larga, glicerol, péptidos, aminoácidos, oligosacáridos).

La velocidad de la hidrólisis depende de tamaño de las partículas y del porcentaje de materiales lignocelulósicos.

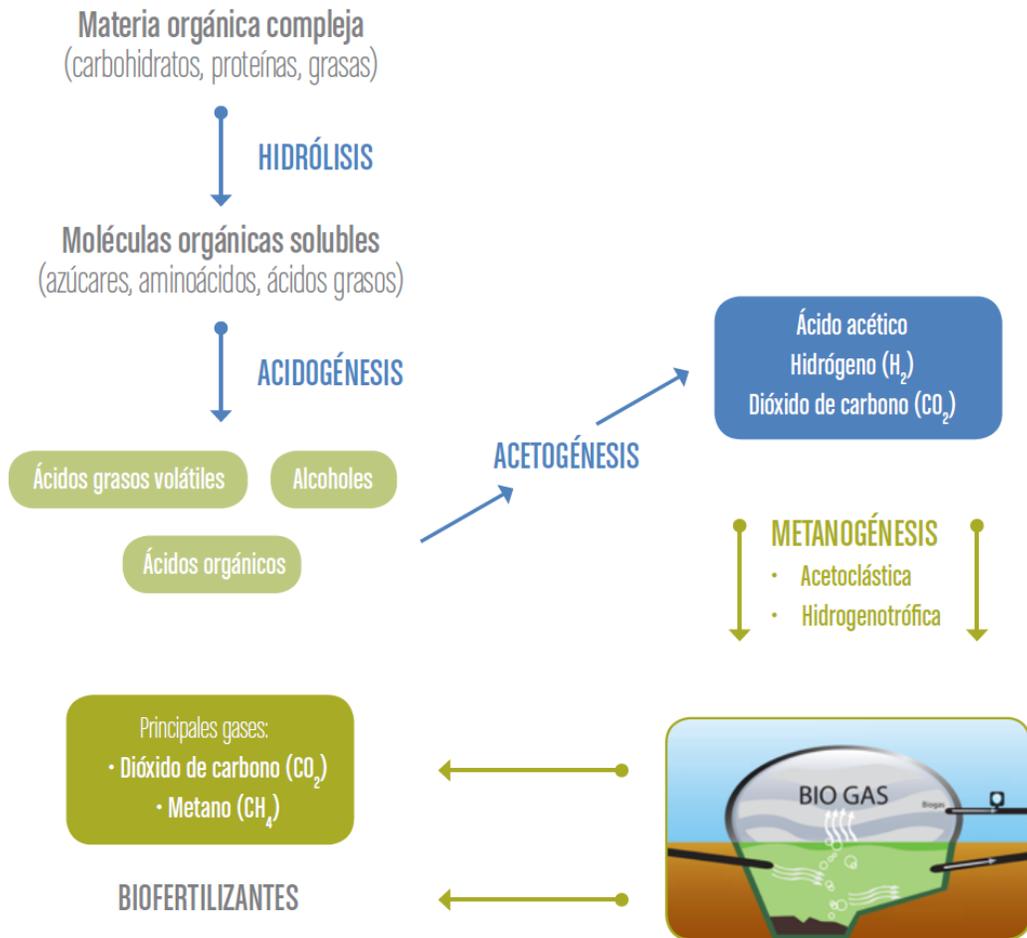
Acidogénesis (fermentación): las bacterias generadoras de ácido (fermentativas) convierten los productos de la etapa anterior en ácidos carboxílicos de cadena corta, de bajo peso molecular (ácidos acético, propanoico, butanoico). Además se forman subproductos como alcoholes, amoníaco, dióxido de carbono, ácido sulfhídrico, hidrógeno.

Acetogénesis: por medio de las bacterias acetogénicas, los ácidos carboxílicos de bajo peso molecular y otros productos formados en la etapa anterior se transforman en ácido acético, CO_2 y H_2 .

Metanogénesis: las bacterias productoras de metano (metanogénicas) transforman el ácido acético y otros productos de las etapas anteriores en CH_4 y CO_2 . Esta transformación se da a partir de dos reacciones:



Figura 1. Etapas de la digestión anaeróbica en un biodigestor, con producción de biogás y biofertilizante.



Fuente: FAO, 2019

Principales factores que afectan la producción de biogás

La calidad y la cantidad del biogás producido dependerán de:

1) Tipo de materia prima

Los residuos orgánicos que se pueden someter a una digestión anaeróbica pueden ser de origen vegetal, animal, agroindustrial, forestal, doméstico, excrementos humanos y animales (Tabla 1).

Tabla 1. Residuos orgánicos de diversos orígenes.

Residuos de origen animal	estiércol, orina, guano, camas, residuos de mataderos (sangre y otros), residuos de pescados.
Residuos de origen vegetal	malezas, rastrojos de cosechas, pajas, forraje en mal estado.
Residuos de origen humano	heces, basura, orina.
Residuos agroindustriales	salvado de arroz, orujos, cosetas, melazas, residuos de semillas.
Residuos forestales	hojas, vástagos, ramas y cortezas.
Residuos de cultivos acuáticos	algas marinas, jacintos y malezas acuáticas.

Fuente: Varnero y Arellano, 1991.

El proceso microbiológico no solo requiere de fuentes de carbono y nitrógeno sino que también deben estar presentes sales minerales o nutrientes (fósforo, potasio, hierro, cobalto, molibdeno, selenio, calcio, magnesio, zinc, cobre, manganeso, tungsteno y boro).

Las residuos vegetales con alto contenido de lignina no son directamente aprovechables y por lo tanto deben someterse a tratamientos previos (cortado, macerado, compostado) a fin de liberar las sustancias factibles de ser transformadas de las incrustaciones de lignina.

2) Relación carbono/nitrógeno de las materias primas

El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas. El carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de nuevas células. Estas bacterias consumen treinta veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación óptima de estos dos elementos en la materia prima se considera en un rango de 30:1 hasta 20:1.

La descomposición de materiales con alto contenido de carbono, con una relación C/N superior a 35:1, ocurre más lentamente porque la multiplicación y desarrollo de bacterias es bajo, por la deficiencia de nitrógeno. Sin embargo el período de producción de biogás es más prolongado. En cambio, con una relación C/N menor que 8:1 se inhibe la actividad bacteriana debido a la formación de un excesiva cantidad de amoníaco, el cual en grandes cantidades es tóxico e inhibe el proceso.

En la tabla 2 puede verse la relación C/N para residuos animales y vegetales.

Cuando no se tiene un residuo con una relación C/N inicial apropiada, es necesario realizar mezclas de materiales en las proporciones adecuadas para obtener la relación C/N óptima.

Tabla 2. Valores promedios aproximados de la relación carbono/nitrógeno de algunos residuos disponibles en el medio rural.

Materiales	% C	% N	C/N
Residuos animales			
Bovinos	30	1.30	25:1
Equinos	40	0.80	50:1
Ovinos	35	1.00	35:1
Porcinos	25	1.50	16:1
Caprinos	40	1.00	40:1
Conejos	35	1.50	23:1
Gallinas	35	1.50	23:1
Patos	38	0.80	47:1
pavos	35	0.70	50:1
Excretas humanas	2.5	0.85	3:1
Residuos vegetales			
Paja trigo	46	0.53	87:1
Paja cebada	58	0.64	90:1
Paja arroz	42	0.63	67:1
Paja avena	29	0.53	55:1
Rastrojos maíz	40	0.75	53:1
Leguminosas	38	1.50	28:1
Hortalizas	30	1.80	17:1
Tubérculos	30	1.50	20:1
Hojas secas	41	1.00	41:1
Aserrín	44	0.06	730:1

Fuente: Varnero y Arellano, 1991.

3) Temperatura

Para que se inicie el proceso anaeróbico se necesita una temperatura mínima de 4 a 5 °C y no se debe sobrepasar una máxima de alrededor de 80 °C.

Según la temperatura de trabajo, los biodigestores y los bioprocesos pueden agruparse dentro de tres grupos principales:

- Psicrófilicos: por debajo de 25 °C
- Mesófilicos: entre 25 y 45 °C
- Termófilicos: más de 45 °C

En la tabla 3 puede verse que a mayor temperatura menor es el tiempo del proceso de degradación de la biomasa.

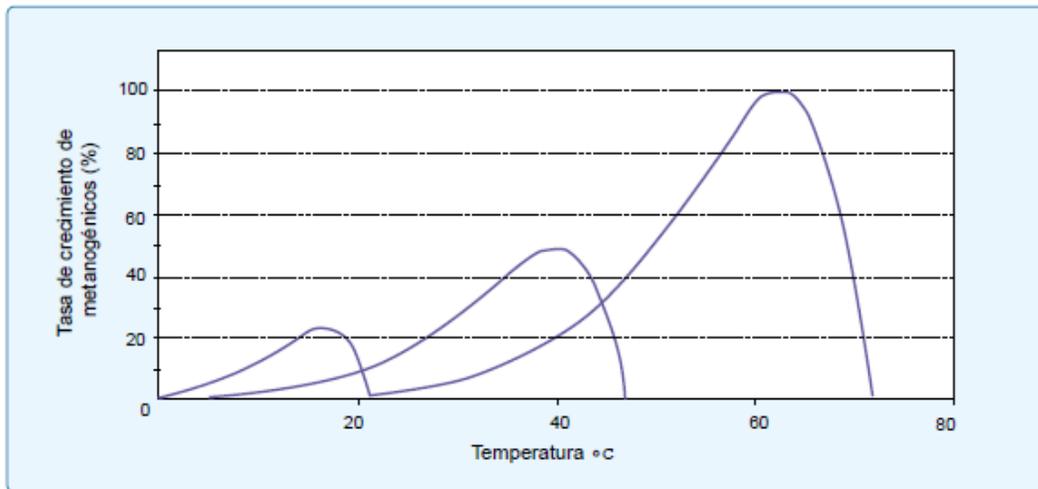
Tabla 3. Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaeróbica

Fermentación	Mínimo	Óptimo	Máximo	Tiempo de fermentación
Psicrophilica	4-10 °C	15-18°C	20-25°C	Sobre 100 días
Mesophilica	15-20 °C	25-35°C	35-45°C	30-60 días
Thermophilica	25-45°C	50-60°C	75-80°C	10-15 días

Fuente: Lagrange, 1979.

En la figura 2 se observa que a medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos. Esto posibilita que se acelere el proceso de digestión, dando lugar a mayores producciones de biogás.

Figura 2. Tasa de crecimiento relativo de microorganismos psicrofílicos, mesofílicos y termofílicos.



Fuente: Speece (1996)

Asimismo se deberá tener en cuenta que, como el proceso no genera calor, en algunos biodigestores la temperatura deberá ser lograda y mantenida mediante energía exterior (lo cual implica mayores costos).

Las variaciones bruscas de temperatura en el digestor pueden provocar la desestabilización del proceso pues afecta la actividad de las bacterias. Por ello, para garantizar una temperatura homogénea en el digestor, es imprescindible un sistema adecuado de agitación y un controlador de temperatura.

4) Tiempo de retención hidráulico

Se denomina así al tiempo que debe permanecer la biomasa dentro del digestor para completar su degradación.

Este parámetro sólo puede ser claramente definido en los biodigestores discontinuos o batch donde el tiempo de retención hidráulico coincide con el tiempo de permanencia del material biodegradable dentro del digestor. En los digestores continuos y semicontinuos el tiempo de retención se define como el valor en días del cociente entre el volumen del digestor y el volumen de carga diaria.

El tiempo de retención hidráulico está íntimamente relacionado con dos factores: el tipo de material biodegradable y la temperatura del proceso. La selección de una mayor temperatura implicará una disminución en los tiempos de retención requeridos, y consecuentemente serán menores los volúmenes de reactor necesarios para digerir un determinado volumen de material. Con relación al tipo de material biodegradable, generalmente los residuos vegetales con mayor proporción de carbono retenido en moléculas resistentes como la celulosa demandarán mayores tiempos de retención para ser totalmente digeridos.

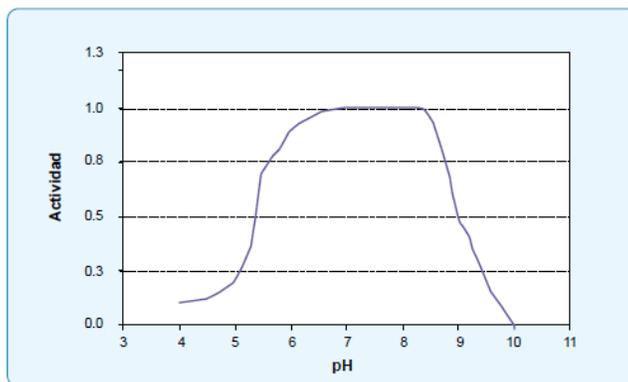
5) Velocidad de carga orgánica

Es el volumen de material biodegradable cargado al digestor por unidad de tiempo. Depende también del tipo de material biodegradable y la temperatura de trabajo del biodigestor.

6) Rangos de pH

Es fundamental controlar este factor ya que la actividad de las bacterias metanogénicas es altamente dependiente del pH (Figura 3). Para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente, el pH no debe ser inferior a 6 ni superior a 8. Siendo el pH neutro el ideal.

Figura 3. Dependencia del pH de la actividad metanogénica.



Fuente: Speece (1996)

Debido a los efectos buffer que producen los compuestos bicarbonato-dióxido de carbono (HCO_3^- - CO_2) y amonio-amoniaco (NH_4^+ - NH_3), el proceso en sí mismo tiene capacidad de regular diferencias en el pH del material biodegradable que se introduce en el biodigestor. De todos modos, para el caso de ser necesario el ajuste del pH, pueden realizarse mezclas de materiales a degradar. Otra forma es agregar sustancias como cal, bicarbonato de sodio.

7) Contenido de sólidos

Todo el material a degradar está compuesto de agua y una fracción sólida llamada sólidos totales. El porcentaje de sólidos totales contenidos en la mezcla con que se carga el digestor es un factor importante a considerar para asegurar que el proceso se efectúe satisfactoriamente. La movilidad de las bacterias metanogénicas se ve crecientemente limitada a medida que se aumenta el contenido de sólidos y por lo tanto puede verse afectada la eficiencia y producción de gas.

El contenido de sólidos totales depende del tipo de digestor. Experimentalmente se ha demostrado que una carga en digestores continuos y semicontinuos no debe tener más de un 8% a 12 % de sólidos totales para asegurar el buen funcionamiento del proceso.

Para calcular el volumen de agua que se debe mezclar con la materia prima para dar la proporción adecuada de sólidos totales, es necesario conocer el porcentaje de sólidos totales de la materia prima fresca. En la tabla 4 se observa que en los residuos animales el contenido de sólidos es más variable que en los vegetales.

8) Inclusión de inoculantes: promotores de la metanogénesis (inoculantes biológicos)

Consiste en la inclusión de un determinado porcentaje de material proveniente de otro biodigestor rico en bacterias metanogénicas que se encuentran en plena actividad, con lo cual puede incrementarse la velocidad de producción de biogás.

9) Agitación – Mezclado

Es importante que el biodigestor tenga un buen sistema de agitación y mezclado para uniformar la densidad bacteriana, evitando así la formación de espacios “muertos” sin actividad biológica que reducirían el volumen efectivo del reactor. Además se previene la formación de costras, espumas y sedimentos.

Tabla 4. Datos promedios sobre el contenido de sólidos totales de diversos residuos.

Materias primas	% Sólidos totales
Residuos animales	
Bovinos	13.4 – 56.2
Porcinos	15.0 – 49.0
Aves	26.0 – 92.0
Caprinos	83.0 – 92.0
Ovejas	32.0 – 45.0
Conejos	34.7 – 90.8
Equinos	19.0 – 42.9
Excretas humanas	17.0
Residuos vegetales	
Hojas secas	50.0
Rastrojo maíz	77.0
Paja trigo	88.0 – 90.0
Paja arroz	88.8 – 92.6
Leguminosas (paja)	60.0 – 80.0
Tubérculos (hojas)	10.0 – 20.0
Hortalizas (hojas)	10.0 – 15.0
Aserrín	74.0 – 80.0

Fuente: Varnero y Arellano, 1991.

10) Tóxicos e inhibidores de la metanogénesis

La presencia de metales pesados, antibióticos, desinfectantes, insecticidas, detergentes, una elevada concentración de ácidos carboxílicos de cadena corta pueden inhibir la digestión anaeróbica. También una elevada concentración de amoníaco mata las bacterias metanogénicas.

Poder calorífico

El poder calorífico del biogás aumenta con la proporción de metano. Podemos hacer una comparación del poder calorífico del biogás con el gas natural y el propano:

- Biogás (CH₄ (65%) – CO₂ (35%)): 7,0 Kwh/ m³
- Gas natural: 10 Kwh/ m³
- propano: 26 Kwh/ m³

Usos del biogás

El biogás puede ser empleado como combustible para la producción de calor, iluminación y generación de electricidad.

Producción de calor e iluminación: el uso más simple del biogás es para la obtención de energía térmica (calor). En aquellos lugares donde los combustibles son escasos, los sistemas pequeños de biogás pueden proporcionar la energía calórica para actividades básicas como cocinar, calentar agua y calefacción. Los sistemas de pequeña escala también se pueden utilizar para iluminación.

Generación de electricidad: en generadores de combustión interna, sistemas de generación de calor y electricidad en forma conjunta, turbinas de vapor (caldera), turbinas de gas y celdas de combustible.

Celda de combustible: dispositivo electroquímico que convierte la energía química en energía eléctrica en forma directa, a diferencia de los otros métodos de generación de electricidad (que convierten la energía química en energía térmica, esta en energía mecánica y esta en energía eléctrica). De ahí que el rendimiento o eficiencia energética sea mayor, además de no producirse CO₂ al no haber combustión (que implica menor impacto medioambiental). En el ánodo se oxida una sustancia combustible (como el H₂) y en el cátodo se reduce una sustancia oxidante (el O₂ del aire). El biogás debe ser transformado o enriquecido en H₂ antes de su utilización en las celdas de combustible; este proceso se conoce con el nombre de reformado del biogás y se realiza a altas temperaturas (mayor a 700°C) pues es endotérmico.

Purificación o acondicionamiento del biogás

El acondicionamiento del biogás consiste en la eliminación de algunos de sus componentes. Esto es importante por dos razones principales:

- (1) para aumentar el poder calorífico del biogás
- (2) cumplir los requerimientos de algunas aplicaciones del biogás (motores, calderas, celdas de combustible, vehículos, etc.).

Para la mayoría de las aplicaciones más simples del biogás tales como calentadores, motores de combustión interna o sistemas generadores, la remoción del CO₂ no es necesaria. La extracción del CO₂ incrementa el poder calorífico y genera un gas (llamado biometano) de

calidad similar a la del gas natural. Existen diferentes maneras de eliminarlo. Mediante el uso de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) puede removerse completamente el CO_2 y el H_2S .

Este último, en combinación con el vapor de H_2O en el biogás crudo, es muy corrosivo para los motores y sus componentes. A concentraciones por encima de 100 ppm en volumen, el H_2S es también muy tóxico. El carbón activado puede utilizarse para remover el H_2S convirtiéndolo en azufre elemental (S). Otra forma de eliminarlo es mediante el uso de soluciones de NaOH. En instalaciones domiciliarias, un método muy empleado en la remoción del H_2S es hacerlo reaccionar con virutas de hierro. Estas tienen que estar oxidadas, de lo contrario su reacción con el H_2S es más lenta.

El biogás que sale del digester está saturado con vapor de agua. A medida que este se enfría se condensa en las cañerías, y si no se lo evacua adecuadamente pueden bloquearse los conductos con agua. Por esta razón las cañerías de distribución deben ser instaladas con una pendiente mínima del 1% hacia un recipiente denominado trampa de agua donde esta se almacena y se extrae.

Biofertilizante

Como subproducto después de la generación de biogás, se obtiene un material estabilizado, conocido como bioabono. Este puede presentarse de dos formas: líquido (biol) y sólido (biosol), dependiendo del tipo de digester (continuo, semicontinuo o discontinuo).

Bibliografía utilizada

1-FAO. 2019. *Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores*. Colección Documentos Técnicos N° 12. Buenos Aires.

2-MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF. 2011. *Manual de Biogás*. FAO. Santiago de Chile.

3- Hilbert, J. 2011. *Manual para la producción de biogás*. INTA-Castelar.

4-Lagrange, B. 1979. *Biomethane. Principes, Techniques, Utilisation*. Vol.2 . Edisual / Energies Alternatives.

5-Varnero, M.T. y Arellano, J. 1990. *Aprovechamiento racional de desechos orgánicos*. Ministerio de Agricultura (FIA). Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Informe Técnico. Santiago, Chile.

6- Speece, R. E. 1996. *Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatments*. Archae Press, Nashville, TN, USA.