



CURSO OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE SISTEMAS DE BIODIGESTIÓN DE PEQUEÑA Y MEDIANA ESCALA

UNIDAD II: BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA

PROCESO DE BIODIGESTIÓN

A lo largo de la historia, el hombre ha utilizado la tecnología de la biodigestión aún cuando no comprendía completamente los fenómenos que la conformaban. Hay evidencias en diferentes situaciones y con distintos objetivos:

- ✓ Tratamiento de aguas y residuos industriales: Estabilización de efluentes y producción de energía.
- ✓ Tratamiento de líquidos cloacales: Higiene y protección ambiental. Producción de energía.
- ✓ Tratamiento de basura y rellenos sanitarios: Protección ambiental, tratamiento de residuos. Producción de energía.
- ✓ En el sector rural: Producción de energía. Fertilización de suelos y eliminación de contaminación por estiércol.

De hecho, este proceso ocurre dentro de los estómagos de los rumiantes y en los intestinos de los seres humanos.

La **biodigestión anaeróbica** es un proceso biológico complejo donde un consorcio de bacterias y hongos degrada la materia orgánica en ausencia de oxígeno y en condiciones de oscuridad, transformándola en biogás y un efluente líquido. Permite el tratamiento de estos residuos y efluentes, eliminando olores desagradables y disminuyendo notoriamente el impacto ambiental del descarte de estos, al bajar la carga de materia orgánica. Los dos productos mayoritarios de la biodigestión son aprovechables: Biogás como fuente de energía y Biofertilizante para enmienda de suelos.

En la digestión anaerobia más del 85% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 15% de la energía en crecimiento bacteriano. La Figura I representa la diferencia del balance energético entre la digestión aeróbica y anaeróbica. Se observa claramente cómo esta última transforma la mayor parte de la energía en gas.

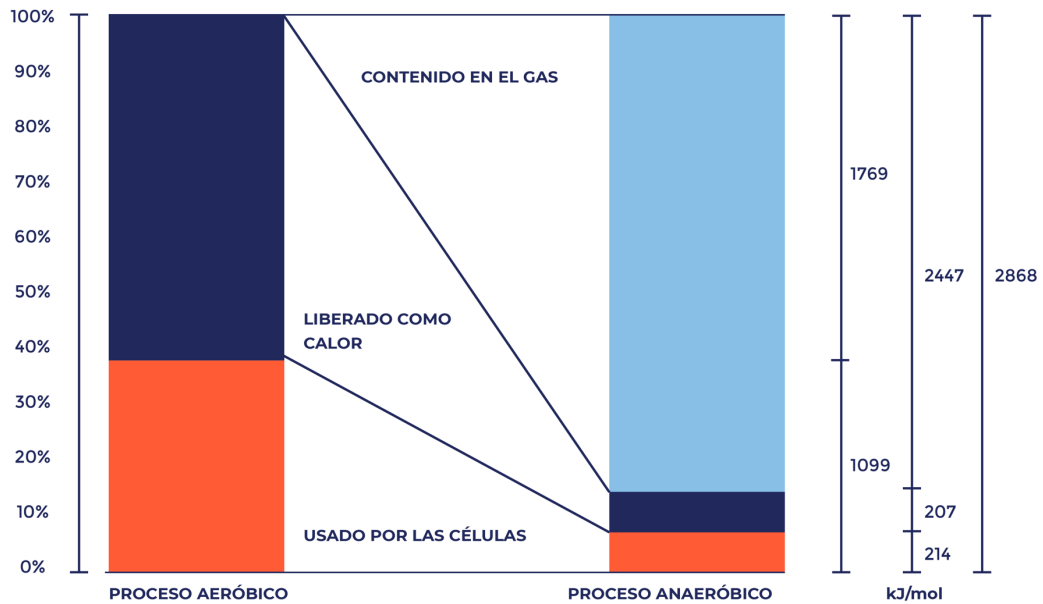


Figura I: Balance energético de la digestión aeróbica y anaeróbica de la glucosa (1)

A continuación, enunciaremos algunos beneficios ambientales de la digestión anaeróbica:

- ✓ En los establecimientos agropecuarios, permite una gestión mejorada de nutrientes, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y a la captura y uso de biogás.
- ✓ Cuando los residuos orgánicos se someten a una degradación aeróbica, se generan compuestos de bajo poder energético como CO_2 y H_2O . En el caso de la digestión anaeróbica se generan moléculas de alto poder energético como metano y alcoholes, los cuales pueden ser utilizados por el hombre como fuente de energía.
- ✓ Permite tener gas a disposición diariamente en establecimientos y hogares que están fuera de la red de distribución de gas natural.
- ✓ Produce una significativa reducción de la presión sobre los rellenos sanitarios: El tratamiento anaeróbico contribuye a la protección de las aguas subterráneas, reduciendo el riesgo de lixiviación de nitratos. Por otra parte, la digestión anaeróbica elimina el problema de emisión de olores molestos, como por ejemplo, el olor a amoníaco, producto de la acumulación de excretas y orina sin tratar.

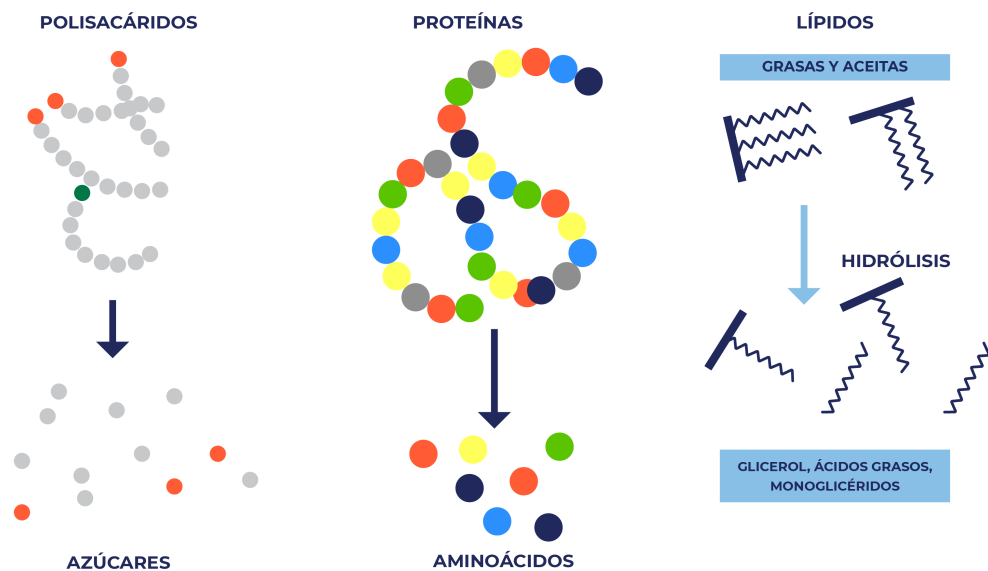
FASES DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA

Pero... ¿Quiénes hacen el trabajo? Tanto en los estómagos e intestinos de animales como en los biodigestores, la digestión es llevada a cabo por microorganismos. Principalmente son bacterias, pero también participan algunos hongos, los cuales se especializan en degradar las fibras presentes en los alimentos (2). Existen trabajos que demuestran que se puede optimizar la biodigestión mediante pretratamientos con hongos del rumen o adicionándolos para determinados sustratos (3). En cuanto a las bacterias, existen tres tipos de comportamiento frente a la presencia del oxígeno: las bacterias aeróbicas obligadas (que sólo pueden vivir en presencia de oxígeno); las bacterias aeróbicas facultativas (que pueden vivir en presencia o ausencia de oxígeno) y las bacterias

anaeróbicas estrictas (sólo pueden vivir en ausencia de oxígeno, ya que este es tóxico para ellas). En un biodigestor sólo encontraremos ejemplares de las últimas dos.

La biodigestión se divide en cuatro etapas, que ocurren simultáneamente (4):

1. **Hidrólisis:** éste es el primer paso necesario para la degradación anaeróbica de sustratos orgánicos complejos, ya que la materia orgánica polimérica no puede ser utilizada directamente por los microorganismos a menos que se hidrolicen en compuestos solubles, que puedan atravesar la pared celular. La hidrólisis de estas moléculas complejas es llevada a cabo por las enzimas extracelulares e intracelulares de los microorganismos aerobios facultativos. Así, las biomoléculas complejas serán degradadas para dar lugar a sus elementos componentes, como por ejemplo:



Entre estas moléculas, las proteínas son muy importantes porque son los principales nutrientes para la división celular, y ayudan a que la cantidad de bacterias aumente. Los azúcares y los lípidos son importantes, pero son más que nada utilizados como fuente de energía.

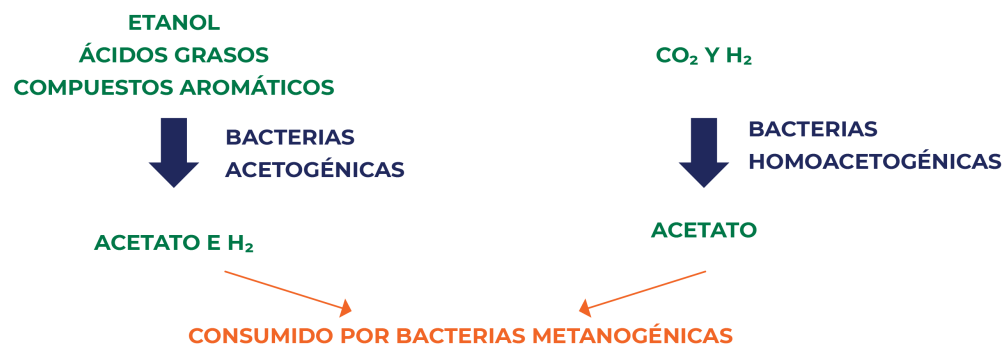
Esta etapa de hidrólisis suele ser media. La velocidad de degradación va a depender de varios factores, como la temperatura, el pH, el tamaño de las partículas, la composición bioquímica del sustrato, etc. Podemos acelerarla con algún pretratamiento específico, por ejemplo, triturar el sustrato antes de introducirlo al biodigestor.

2. **Etapa fermentativa o acidogénica:** Durante esta etapa tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas (acético, fórmico, H_2) y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol principalmente) que serán oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa



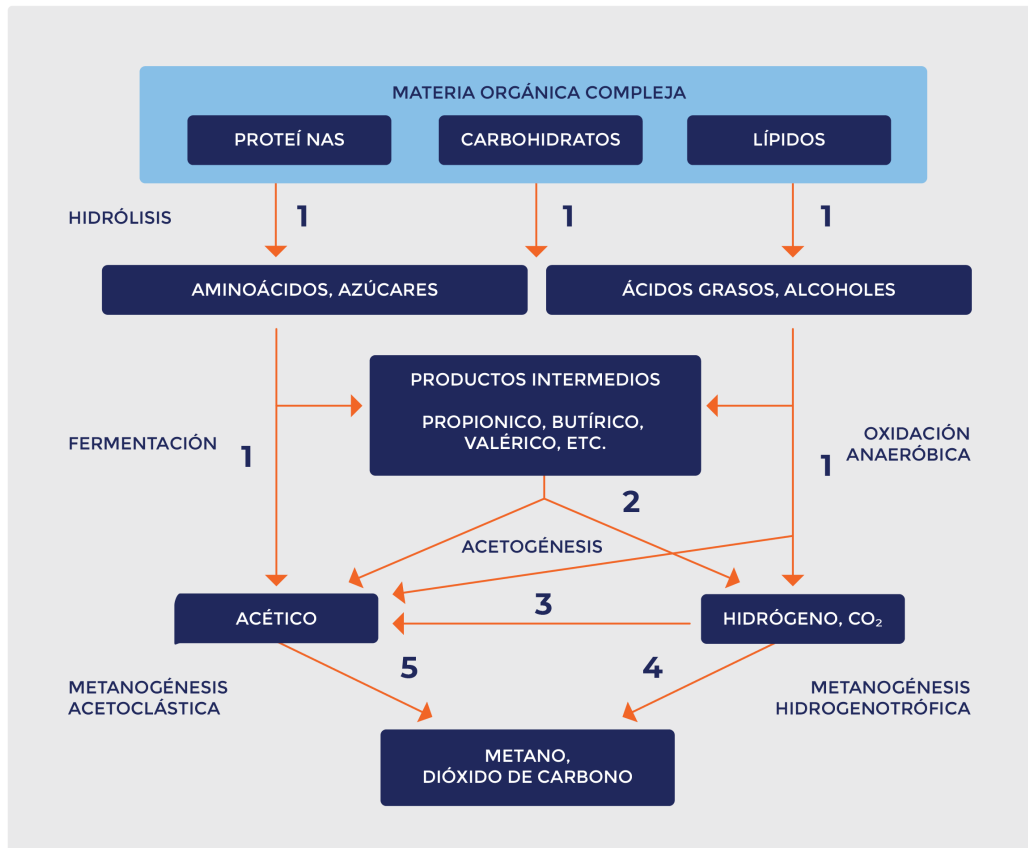
del proceso. Este grupo de microorganismos, se compone de bacterias facultativas y anaeróbicas obligadas, eliminan cualquier traza de oxígeno disuelto en el sistema.

3. **Etapla acetogénica:** En esta etapa intervienen dos tipos de microorganismos con dos vías metabólicas diferentes, pero tienen el mismo fin: generar acetato que pueda ser consumido por las bacterias metanogénicas.
 - Las bacterias acetogénicas transforman algunas moléculas (etanol, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos) en acetato e hidrógeno.
 - Las bacterias homoacetogénicas también generan acetato, pero lo hacen consumiendo CO_2 y H_2 . El hecho de que consuman H_2 , permite mantener bajas presiones parciales de este gas.



4. **Etapla metanogénica:** Un amplio grupo de bacterias **anaerobias estrictas** completan el proceso de digestión anaeróbica formando el metano a partir de los compuestos que excretaron los microorganismos en las etapas anteriores. Se pueden establecer dos grandes grupos de microorganismos, en función del sustrato principal que metabolizan: Los hidrogenotróficos, que consumen H_2/CO_2 transformándolos en metano (producen el 30% del CH_4); y los acetoclásticos que generan metano a partir de ácido fórmico, metanol, algunas aminas (producen el 70% del metano). Estas bacterias son muy sensibles a los cambios de temperatura y pH, por lo cual es la etapa más importante y delicada de la biodigestión, además de ser una de las más lentas.

A continuación, presentamos un resumen de todo el proceso de biodigestión(4):



(PAVLOSTATHIS Y GIRALDO-GÓMEZ, 1991)

Los números indican la población bacteriana responsable del proceso:

1. bacterias fermentativas;
2. bacterias acetogénicas que producen hidrógeno;
3. bacterias homoacetogénicas;
4. bacterias metanogénicas hidrogenotróficas;
5. bacterias metanogénicas acetoclásticas.

La digestión anaerobia húmeda se puede llevar a cabo con uno o más residuos con las únicas premisas de que sean líquidos, contengan material fermentable, y tengan una composición y concentración relativamente estable. La co-digestión es una variante tecnológica que puede solucionar problemas o carencias de un residuo, si son compensadas por las características de otro.

FACTORES QUE CONDICIONAN EL PROCESO MICROBIOLÓGICO

Con el fin de ser operadores de biodigestores, es necesario comprender el proceso de biodigestión en profundidad. Para esto es esencial saber cuáles son los factores que influyen en el proceso, de qué manera lo hacen y cuáles son los más importantes. Vamos a analizar a continuación algunos de ellos.

- ✓ Naturaleza y composición bioquímica del sustrato: Para la biodigestión podemos usar diferentes sustratos, teniendo en cuenta que cada uno va a tener diferentes aportes energéticos para las bacterias y, por lo tanto, van a generar distintas cantidades de biogás.

Para el crecimiento microbiano son necesarios, además de la fuente de carbono, nutrientes como azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores. Dentro de la inmensa cantidad de posibilidades de sustratos, presentamos una tabla básica indicando sustratos permitidos y prohibidos a ser usados para biodigestión anaeróbica:

|  SUSTRATOS PROHIBIDOS |  SUSTRATOS RECOMENDABLES |
|--|---|
|  HUESOS |  RESTOS DE CAFÉ |
|  BOLSAS |  RESTOS DE YERBA MATE |
|  LATAS |  RESTOS DE COMIDAS |
|  PAPELES |  LÁCTEOS |
|  CARTÓN |  RESTOS DE CARNES (SIN HUESOS) |
|  PLÁSTICOS |  ALIMENTOS EN MAL ESTADO |
|  TIERRA |  AZÚCARES Y DULCES |
|  VIDRIO |  PAN, PASTAS, HARINAS Y GRANOS |
|  METAL |  CÁSCARAS Y RESTOS DE FRUTAS Y VERDURAS |
|  CERÁMICAS |  ESTIÉRCOL Y ORINA DE ANIMALES |
|  RESIDUOS QUE CONTENGAN QUÍMICOS ¹ |  RESIDUOS DE COCINA |
|  RESIDUOS QUE CONTENGAN ANTIBIÓTICOS ² |  RESIDUOS DE GRANJA |

¹ INSECTICIDAS, LAVANDINA, LÍQUIDOS DE LIMPIEZA, AGUAS DE LAVADO, ETC.
² COMO EL CONTENIDO EN ESTIÉRCOL DE ANIMALES TRATADOS RECIENTEMENTE



Recomendaciones Importantes respecto a la alimentación y elección de sustratos:

- Debemos intentar que el sustrato sea constante, que tenga siempre la misma composición, para así mantener una producción alta y continua de biogás.
- Las bacterias son muy sensibles al sustrato. Si voy a realizar un cambio en el sustrato (alimento de las bacterias) tengo que planificarlo y hacerlo muy gradual. Por ejemplo, hago un cambio en el 10-20% de la composición y mantengo esa proporción 7-10 días y luego aumento nuevamente la proporción. Caso contrario, si hacemos cambios bruscos de alimentación, podemos detener el proceso. Sería como un caso de “indigestión”. Para verlo con un ejemplo; si como siempre verduras y un día como carne, me va a doler la panza porque me va a costar digerir algo que no estoy acostumbrado a comer. Al biodigestor le pasa lo mismo.
- Si el sustrato que poseo no es muy rico en nutrientes puedo hacer mezclas, pero esa mezcla la tengo que mantener en el tiempo.
- Las sustancias con alto contenido de lignina (madera, troncos pequeños) no son directamente aprovechables y de ser introducidos al digestor, flotarán produciendo una costra en la superficie y pueden tapar los conductos de entrada y salida. En conclusión, recomendamos evitar colocar trozos de madera y troncos en el biodigestor.
- Agregado de agua: Las bacterias viven en medio líquido, así que debemos asegurar estas condiciones. El sustrato debe tener entre 6-8 % de sólidos totales. El agua que usemos para diluir puede ser reutilizada de otro proceso (como el lavado del tambo) pero no debe contener detergentes, sales, ni metales pesados en grandes cantidades.

Como se dijo previamente, cada sustrato tiene un “potencial de generación de biogás”, que es la cantidad de biogás generado (en litros u otra unidad de volumen) por cada unidad de alimento (medida en kilos u otra medida de masa), es decir: “m³biogás/kg sustrato”. Depende mayormente del contenido energético del mismo. A continuación, se presenta una tabla con las cantidades aproximadas de biogás que se genera a partir de 1 kg de sustrato en condiciones mesofílicas (4,5):



| RESIDUO | POTENCIAL DE GENERACIÓN DE BIOGÁS (LITROS BIOGÁS / KG SÓLIDO FRESCO) |
|-------------------------|---|
| FORSU | 100 |
| PURÍN DE CERDO | 60 |
| ESTIÉRCOL VACUNO | 30 |
| DESECHOS DE HUERTA | 50 |
| ESTIÉRCOL DE AVES | 80 |
| ESTIÉRCOL CAPRINO/OVINO | 50 |
| ESTIÉRCOL EQUINO | 40 |
| ESTIÉRCOL DE CONEJO | 60 |
| HECES HUMANAS | 60 |

Como recomendación final, para evitar sedimentación dentro del digester sugerimos siempre introducir estiércol (o sustrato) libre de material inorgánico, como piedras y tierra, ya que estas no son degradadas por las bacterias y permanecen en el biodigestor, restando volumen útil de trabajo. Además, es importante realizar una adecuada mezcla del sustrato con agua buscando la mayor homogeneidad posible antes de ingresarlo al reactor.

- ✓ Relación carbono/nitrógeno del sustrato: El carbono y el nitrógeno son los principales nutrientes que necesitan las bacterias para vivir. El carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de nuevas células. Por lo tanto, ambos nutrientes deben estar equilibrados, por lo que la relación óptima C/N en el sustrato está en el rango de 30:1 hasta 20:1. En sustratos con una relación C/N > 35:1 la biodigestión ocurre más lentamente, porque la multiplicación y desarrollo de bacterias es bajo, por la falta de nitrógeno, pero el período de producción de biogás es más prolongado.

En sustratos con una relación C/N < 8:1 se inhibe la actividad bacteriana debido a la formación de un excesivo contenido de amonio, el cual en grandes cantidades es tóxico e inhibe el proceso. Cuando no se tiene un residuo con una relación C/N inicial apropiada, podemos realizar mezclas de materias. Para calcular dicha mezcla, contamos con la siguiente fórmula:



$$K = \frac{C1*Q1 + C2*Q2 +Cn*Qn}{N1*Q1 + N2*Q2 +Nn*Qn}$$

K = C/N de la mezcla de materias primas.

C = % de carbono orgánico contenido en cada materia prima.

N = % de nitrógeno orgánico contenido en cada materia prima.

Q = Peso fresco de cada materia, expresado en kilos o toneladas.

A continuación, presentamos una tabla mostrando los valores aproximados de la relación carbono/nitrógeno de algunos de los sustratos más comunes (4):

| RESIDUO | RELACIÓN C/N |
|-------------------------|--------------|
| FORSU | 27:1 |
| PURÍN DE CERDO | 16:1 |
| ESTIÉRCOL VACUNO | 25:1 |
| DESECHOS DE HUERTA | 17:1 |
| ESTIÉRCOL DE AVES | 23:1 |
| ESTIÉRCOL CAPRINO/OVINO | 35:1 |
| ESTIÉRCOL EQUINO | 50:1 |
| ESTIÉRCOL DE CONEJO | 23:1 |
| HECES HUMANAS | 3:1 |

- ✓ Niveles de sólidos totales y sólidos volátiles: Toda la materia orgánica está compuesta de agua y una fracción sólida llamada **sólidos totales** (ST). Matemáticamente podemos mostrarlo así:

%ST: porcentaje de Sólidos Totales = gramos de Sólidos Totales /100 g de mezcla

El porcentaje de sólidos totales contenidos en la mezcla con que se carga el digestor es muy importante, ya que la movilidad de las bacterias 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. Experimentalmente se ha demostrado que una carga en digestores continuos no debe tener más de un **6% a 12 %** de sólidos totales para asegurar el buen funcionamiento del proceso, a diferencia de los digestores discontinuos, que funcionan entre un 40 a 60% de sólidos totales. En la unidad III veremos cómo calcular la dilución al realizar la carga.



Los Sólidos Volátiles (S.V.) son aquella porción de sólidos totales que se libera de una muestra, volatilizándose cuando se calienta durante dos horas a 600°C. Los SV contienen componentes orgánicos, los que teóricamente deben ser convertidos a metano. La expresión matemática de los mismos es:

%SV: porcentaje de Sólidos Volátiles = gramos de Sólidos Volátiles /100 g de ST

Para saber calcular las mezclas, debemos saber cuál es el contenido de sólidos de nuestros sustratos, para lo cual contamos con la siguiente tabla (5):

| RESIDUO | % ST | % SV |
|-----------------------------------|-------|------|
| ESTIÉRCOL VACUNO | 18-20 | 83 |
| ESTIÉRCOL PORCINO | 18 | 80 |
| ESTIÉRCOL AVIAR PARRILLEROS | 53 | 66 |
| ESTIÉRCOL AVIAR PONEDORAS | 35 | 90 |
| DESECHOS DE HUERTA | 11 | 94 |
| DESECHOS CON ALMIDÓN O AZUCARADOS | 18 | 94 |
| FORSU | 19,6 | 90,6 |
| SORGO GRANÍFERO | 96 | 98 |

- ✓ **Temperatura:** Los procesos anaeróbicos, al igual que muchos otros procesos biológicos, son fuertemente dependientes de la temperatura. La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados que, a su vez, dependen de la temperatura. A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión, dando lugar a mayores producciones de biogás (4). La temperatura de operación de un biodigestor es uno de los principales parámetros de diseño de este, por diversas razones que analizaremos.

En primer lugar, la temperatura está íntimamente relacionada con los tiempos que debe permanecer la biomasa dentro del digestor para completar su degradación (Tiempo de retención Hidráulica, TRH). **A medida que se aumenta la temperatura disminuyen los tiempos de retención y en consecuencia se necesitará un menor volumen de reactor para digerir una misma cantidad de biomasa.**

Como se dijo previamente, las bacterias metanogénicas son extremadamente sensibles a la temperatura, por lo que variaciones bruscas de temperatura en el digestor pueden gatillar la desestabilización del proceso. Por ello, para garantizar una temperatura homogénea en el digestor, es recomendable contar con un sistema adecuado de agitación y/o un controlador de temperatura o aislación. Como regla general, la actividad biológica se duplica cada incremento en 10°C dentro del rango de temperatura óptima.



Existen tres rangos de temperatura con los que se puede trabajar con organismos anaeróbicos (1):

| FERMENTACIÓN | MÍNIMO | OPTIMO | MÁXIMO | TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO (TRH) |
|--------------|------------|------------|------------|--------------------------------------|
| PSICROFÍLICA | 4 - 10 °C | 15 - 18 °C | 20 - 25 °C | MÁS DE 100 DÍAS |
| MESOFÍLICA | 15 - 20 °C | 25 - 35 °C | 35 - 45 °C | 30 - 60 DÍAS |
| TERMOFÍLICA | 25 - 45 °C | 50 - 60 °C | 75 - 80 °C | 10.15 DÍAS |

Fermentación Psicrófila

Hasta el momento, el rango psicrófilo ha sido poco estudiado y, en general, se plantea como poco viable debido al gran tamaño del reactor necesario.

Fermentación Mesofílica

La digestión anaerobia mesofílica es el sistema más utilizado, ya que tiene una operación más estable y una tasa de producción de biogás media. Este tipo de digestión es el más recomendable para una escala pequeña-mediana. Para lograr mayores temperaturas de una manera sencilla y económica se puede enterrar el biodigestor por debajo de la superficie (mínimo 25 cm) donde la temperatura es del 20°C, o se puede aislar térmicamente con algún material.

Por último, es importante tener en cuenta que, en un biodigestor mesofílico, al disminuir la temperatura (por la estación del año) disminuirá la actividad biológica en el interior del biodigestor, y por lo tanto la producción de biogás. Para contrarrestar esto, se deberá disminuir la cantidad de la alimentación en un 40 % aproximadamente.

Fermentación termófila

El interés en la digestión termófila se desarrolló en base a que las temperaturas más altas reducen los patógenos y proporcionan velocidades de reacción más rápidas. La digestión termófila anaeróbica en general es más eficiente en la producción de biogás, pero se asocia con un **mayor costo** de diseño y mantenimiento. El proceso de biodigestión no genera calor, por lo que, si queremos trabajar a mayor temperatura que la ambiente, la misma deberá ser lograda y mantenida mediante energía exterior.

El cuidado en el mantenimiento también debe extremarse a medida que aumentamos la temperatura, dada la mayor sensibilidad que presentan las bacterias termofílicas a las pequeñas variaciones térmicas. Sus principales ventajas son la **mayor producción de biogás**, menor volumen de reactor, mayor destrucción de patógenos y mejor deshidratación de los biosólidos digeridos. Como desventajas podemos nombrar el elevado costo energético y la gran sensibilidad a una falla en el sistema de calefacción. Debemos tener en cuenta también que será conveniente precalentar el sustrato antes de introducirlo en el mismo, para reducir las variaciones de temperatura.



- ✓ Nivel de acidez (pH): Los microorganismos metanogénicos son mucho más sensibles a las variaciones de pH que los otros organismos de la comunidad microbiana anaeróbica. El pH óptimo de trabajo del biodigestor se encuentra en el rango entre 6.8 y 7.4, siendo el pH neutro (7) el ideal. Para que el proceso de biodigestión se desarrolle satisfactoriamente, el pH no debe bajar de 6.0 ni subir de 8.0. Esto es porque el valor del pH en el digestor no sólo determina la producción de biogás sino también su composición.

Una de las consecuencias de que se produzca un descenso del pH a valores inferiores a 6 es que el biogás generado es muy pobre en metano y, por tanto, tiene menores cualidades energéticas. Los valores de pH bajos reducen la actividad de los microorganismos metanogénicos, provocando la acumulación de ácido acético e H_2 . Al aumentar la presión parcial de H_2 , las bacterias que degradan el ácido propiónico serán severamente inhibidas, causando una excesiva acumulación de ácidos propiónico y butírico, lo cual disminuirá la producción de ácido acético, generando una mayor disminución del pH. Si la situación no se corrige, el proceso eventualmente fallará.

Por otra parte, el pH afecta a los diferentes equilibrios químicos existentes en el medio, pudiendo desplazarlos hacia la formación de un determinado componente que tenga influencia en el proceso. Este es el caso de los equilibrios ácido-base del amoníaco y del ácido acético: Al aumentar el pH se favorece la formación de amoníaco que, en elevadas concentraciones, es inhibidor del crecimiento microbiano y a valores de pH bajos se genera mayoritariamente la forma no ionizada del ácido acético, que inhibe el mecanismo de degradación del propionato.

El pH se puede medir fácilmente con indicadores comerciales como:





- ✓ Presencia de compuestos inhibidores del proceso: El proceso de digestión anaeróbica es inhibido por la presencia de sustancias tóxicas en el sistema. Estas sustancias pueden formar parte de las materias primas que entran al digestor o pueden ser subproductos de la actividad metabólica de los microorganismos anaeróbicos. Nombraremos algunos de los principales inhibidores y limitantes de la biodigestión:
- Metales pesados (suelen estar presentes en el agua)
 - Antibióticos
 - Detergentes
 - Desinfectantes (debemos tener cuidado al realizar limpieza en el tambo, etc, si se reutiliza el agua)
 - Amoníaco (en caso de que el pH suba)
 - Falta de micronutrientes (metales necesarios para el metabolismo bacteriano)

BIOGÁS

El producto más importante de la biodigestión es el biogás. Este gas está compuesto mayormente por metano (55-70%) y por otros gases, como CO₂. La cantidad de metano que tenga el gas dependerá de varios factores, pero sobre todo del sustrato con que se alimente el biodigestor. Adicionalmente, como dentro del biodigestor hay cerca de un 90% de agua, el gas sale saturado de vapor de agua, por lo cual es necesario tomar medidas para que la misma no se acumule y obstruya los conductos (se detallará en la unidad III).

Dependiendo del sustrato con que alimentemos nuestro digestor, pueden formarse altas cantidades de H₂S (ácido sulfhídrico), que es el producto del metabolismo anaeróbico del azufre. El problema con este gas es que tiene un olor muy desagradable (a huevo podrido) y es sumamente corrosivo. Existen métodos muy sencillos y económicos para eliminar este gas que detallaremos más adelante.

Estas características hacen que el biogás no pueda comprimirse a altas presiones así tal cual sale del biodigestor, por lo cual debemos trabajar a bajas presiones. En la unidad siguiente detallaremos los posibles usos y acondicionamiento del biogás. La siguiente tabla muestra las principales características del biogás(4).



| | |
|----------------------------|---|
| COMPOSICIÓN | 55 - 70% METANO (CH ₄) 30 - 45% DIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂) TRAZAS DE OTROS GASES |
| CONTENIDO ENERGÉTICO | 6.0 - 6.5 kW h m ⁻³ |
| EQUIVALENTE DE COMBUSTIBLE | 0.60 - 0.65 L PETRÓLEO/m ³ BIOGÁS |
| LÍMITE DE EXPLOSIÓN | 6 - 12% DE BIOGÁS EN EL AIRE |
| TEMPERATURA DE IGNICIÓN | 650 - 750 C (CON EL CONTENIDO DE CH ₄ MENCIONADO) |
| PRESIÓN CRÍTICA | 74 - 88 atm |
| TEMPERATURA CRÍTICA | -82.5 °C |
| DENSIDAD NORMAL | 1.2 kg m ⁻³ |
| OLOR | HUEVO PODRIDO (EL OLOR DEL BIOGÁS DESULFURADO ES IMPERCEPTIBLE) |
| MASA MOLAR | 16.043 kg kmol ⁻¹ |

FUENTE: DEUBLEIN Y STEINHAUSER (2008)

TECNOLOGÍAS DE BIODIGESTIÓN

Como ya hemos descripto, hay diversas formas de digerir materia orgánica. Retomando, hasta ahora hemos hablado de biodigestión húmeda (es decir, donde el interior del biodigestor contiene aproximadamente más de 90% de agua), y que puede ser mesofílica o termofílica. Adicionalmente, existe otro proceso que no hemos desarrollado todavía, la biodigestión seca (que también puede ser meso o termofílica). Todos estos conceptos se analizarán en detalle en esta sección.

- **Digestión mesofílica:** La digestión mesofílica es la que ocurre a temperaturas moderadas (25-35 °C), en climas como el de nuestra provincia de Santa Fe equivale a un biodigestor que opere en el exterior, en un lugar donde reciba luz solar, sin calefacción externa. Como ya se dijo, podemos optimizar este sistema de manera simple y económica enterrando el biodigestor a 25 cm de profundidad, para alcanzar la temperatura estable que hay debajo de la tierra (20°C).

También se puede construir un invernadero sencillo para mantener el calor que el sol le provee o aislarlo térmicamente rodeándolo con algún material aislante. Existen pruebas muy exitosas de este tipo de digestores en pequeña escala.

Como es de esperarse, el biodigestor no funcionará de la misma manera en invierno que en verano. La temperatura externa afecta la temperatura interna del biodigestor, y por lo tanto, la velocidad del crecimiento y metabolismo de las bacterias. En verano producirá aproximadamente el doble de biogás que en invierno. Esto debemos tenerlo en cuenta al momento de diseñar nuestro digestor y dimensionarlo (ver unidad III).



Además, pensemos que si las bacterias van a funcionar más lento, vamos a tener que darles menos alimento (sustrato) ya que sino habrá un desbalance dentro del digester. ¿Qué quiere decir esto? Ya se explicó que la etapa más lenta de la biodigestión es la última, la metanogénesis, la cuál es también la más sensible a la temperatura. Y la primera etapa de hidrólisis es bastante rápida, la cual se encarga de generar los ácidos orgánicos que serán alimento de las otras bacterias del consorcio.

Entonces, si sobrealimentamos nuestro biodigestor en invierno (es decir, lo alimentamos igual que en verano) el sustrato se hidrolizará y convertirá en ácidos mucho más rápidamente que lo que las metanogénicas pueden utilizarlos, causando la acidificación del biodigestor y deteniendo todo el proceso. Esta es la razón por lo que es sumamente importante calcular bien la alimentación del biodigestor en cada estación (ver unidad III).

En la unidad III veremos diferentes diseños de biodigestores, y veremos que es muy sencillo construir un digester mesofílico. Para ilustrar con un ejemplo, un exalumno de este curso construyó su propio biodigestor mesofílico en su tambo, para tratar el estiércol de las vacas.

El biodigestor comenzó siendo un tanque de 1000L, para luego transformarse en dos digestores en serie, de 1000L cada uno. EL gasógeno está separado del reactor, formado por dos tanques de 200L uno invertido dentro del otro. El digester fue construido mayormente con elementos reciclados o reutilizados.

En la siguiente figura se muestran los reactores (A), el sistema de carga (B) y el gasógeno lleno que está alimentando un generador de electricidad (C). En el apartado (D) se muestra otro digester construido por los alumnos de este curso, que actualmente está siendo alimentado con desechos de comedores comunitarios de nuestra ciudad.



- Biodigestión termófila: Es la biodigestión que ocurre a altas temperaturas, entre 50 y 60 °C. Este tipo de digestión presenta grandes ventajas para las grandes instalaciones donde el volumen del material a digerir es muy grande.

Esto se debe a que trabajar a mayores temperaturas permite una mayor velocidad de degradación y, por lo tanto, menor tiempo de retención y menor tamaño del reactor. Como desventajas principales podemos nombrar el consumo energético que se necesita para calificarlo y además el hecho de que una mínima variación de temperatura en el reactor (por cualquier malfuncionamiento) causa una profunda desestabilización del



proceso, lo cual es difícil de revertir. Además, el uso de estos reactores que son de operación continua, con agitación y calefacción, es mucho más complejo que los mesofílicos; y es mucho más difícil la puesta en marcha, ya que necesitan mucho tiempo para estabilizarse.

Existe una gran discusión sobre la mejor opción de biodigestión: mesofílica o termofílica. Algunos trabajos sostienen que la digestión termofílica permite tener mejor calidad de biogás y de digestato, pero los análisis y reportes no son concluyentes y no se pueden comparar fácilmente (6). Aún así, se sabe que la digestión termofílica permite obtener digestatos que cumplen las normas requeridas por los estados sobre el contenido de DQO de los efluentes, y estos se deshidratan más rápido debido a que salen a alta temperatura. Pero esto no es siempre así, ya que dependiendo del sustrato con que se alimenta el biodigestor, muchas veces los digestatos tienen componentes indeseables al generarse en ambientes termofílicos (como exceso de amonio) que dificultan su secado y disposición final.

La digestión mesofílica plantea un funcionamiento estable, tal vez menos rendidor y con un reactor más grande, con un costo energético mucho menor y una menor complejidad en la operación. En conclusión, siempre debemos evaluar las dos posibilidades al momento de diseñar un biodigestor, teniendo en cuenta todas las variables (sustrato, aplicaciones del biogás y el digestato, etc.) para tomar la mejor decisión.

- **Biodigestión seca:** El proceso de fermentación en seco permite la producción de metano a partir de materia orgánica apilable con un alto contenido de materia seca, que no requiere ser convertida en un sustrato líquido bombeable (7). Este método hace posible la fermentación de residuos biológicos con hasta un 50% de contenido de sólidos totales. Como podemos deducir, el hecho de que se llame “seca” no quiere decir que no tenga agua en absoluto, ya que sin ella los microorganismos que harán la digestión no pueden vivir.

La forma más común de funcionamiento de estos es en forma discontinua o Batch (aunque luego veremos que existe un método semicontinuo), y básicamente consiste en colocar los residuos en un galpón o tanque hermético, previa inoculación con un digestato que ya ha sido fermentado. Luego se cierra en el tanque (o galpón) y se fermenta en condiciones herméticas.

Se inocula continuamente con materia bacteriana mediante recirculación del líquido de percolación, que se pulveriza sobre la materia orgánica en el digestor. Este líquido se recoge mediante orificios que tiene el suelo o base del digestor y se recircula. Durante el proceso de fermentación, no es necesario mezclar, bombear o agitar dentro del digestor, ni se agrega material adicional.



El líquido de percolación excesivo se recoge en un sistema de drenaje, se almacena temporalmente en el tanque de percolación y luego se vuelve a rociar sobre la biomasa en el digestor (8). Las diferentes etapas de degradación (es decir, hidrólisis, formación de ácido y metano) tienen lugar en el mismo digestor.

Existen dos diseños principales de biodigestores:

1. Los digestores tipo garaje, que son cámaras herméticas a los gases, de hormigón, y pueden llenarse y vaciarse con cargadores de ruedas o palas frontales. Para equalizar la producción de biogás y tener un flujo continuo, al menos tres digestores deben funcionar juntos en grupo. La fermentación se puede hacer a temperatura mesofílica o termofílica. La temperatura dentro de los digestores aislados se puede regular a través de pisos y paredes calientes, explotando así toda el área de contacto entre el sustrato de fermentación y el digestor.

Los tubos de calefacción se integran en el piso y las paredes de cemento durante la construcción. Además, un intercambiador de calor calienta el líquido de percolado para retroalimentarlo. Como es de esperarse, una parte de la materia orgánica es lavada y va al tanque de agua de percolado. Por lo tanto, en este tanque también se produce biogás. Es necesario calcular bien el tamaño del tanque, teniendo en cuenta un dispositivo para capturar el biogás que se genere. (8)

La ventaja de la tecnología seca es que no es necesaria la mezcla constante de la biomasa, eliminando las unidades de bombeo y agitación. El sustrato de fermentación rara vez requiere un tratamiento previo. No necesita agregado de agua.

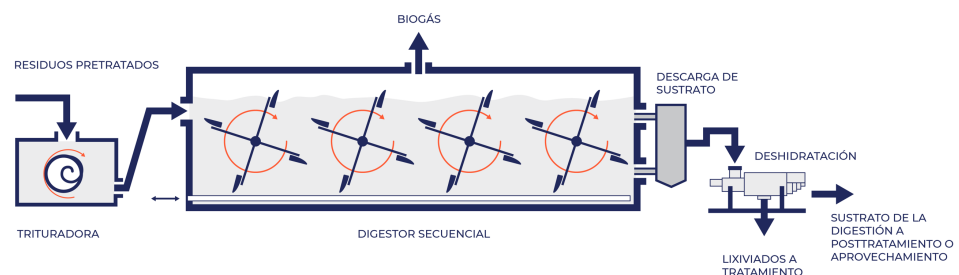
Por lo tanto, la tecnología es mucho más simple y robusta que la de las plantas de fermentación húmeda. Los digestores secos no tienen partes móviles. Por lo tanto, los costos de desgaste son bajos, al igual que los costos de mantenimiento y de personal. El consumo de energía del proceso también es mínimo, lo que facilita el tratamiento de la biomasa con alto contenido de materia seca y sustancias interferentes.



2. Los digestores de tipo semicontinuo, que consiste en tubos de gran diámetro dotados de agitadores que movilizan la materia orgánica de manera de que fluyan a través de ellos. Los residuos se trituran antes de ingresar al silo y son conducidos por los agitadores, los cuales evitan también la formación de la capa flotante. Al igual que en el diseño anterior, se puede realizar el proceso de manera termofílica o mesofílica. Los silos pueden ser verticales u horizontales.

El flujo secuencial permite el control del tiempo de residencia de la masa y asegura la higienización en el proceso termófilo. El proceso es variable referente a contenido de sólidos totales (hasta 40% ST) y se minimiza el agua recirculada en la planta. El digester horizontal maximiza la superficie de salida de biogás. En caso de ser necesario, se puede variar tanto la altura de carga del digester como el tiempo de retención de la materia orgánica para equilibrar diferencias en la recepción de residuos.

La recirculación de lodos que se retiran a la salida permite una estabilización del proceso biológico y la re-inoculación continua de la materia fresca que ingresa. El piso móvil transporta los sedimentos en el digester y asegura que no se acumulen elementos inertes en el digester (como tierra y arena). La utilización de un sistema modular permite ampliaciones posteriores de la planta de manera sencilla. Se puede agregar una etapa de precompostaje que funciona como pulmón y estabilización del sistema, facilitando una alimentación quasi-continua del reactor.





Ahora que analizamos los dos tipos de biodigestión, los invito a pensar... ¿Cuál es mejor? ¿La biodigestión seca o la húmeda? Como siempre, todo va a depender del residuo a tratar, de la disponibilidad que tengamos de agua, y de muchos otros factores. Un trabajo reciente realiza una comparación entre ambas tecnologías (8), y concluyen que las plantas de digestión anaeróbica húmeda tienen un balance energético más ventajoso y un mejor rendimiento económico en comparación con las plantas de biodigestión seca.

Sin embargo, las plantas de digestión seca ofrecen varios beneficios importantes, incluyendo una mayor flexibilidad sobre el tipo de materia prima que se utiliza, tiempos de retención más cortos, menor uso de agua y una gestión más flexible y oportunidades de marketing para el producto final que se obtiene.

En general, las plantas de digestión húmeda son más rentables en términos de coste de capital específico por tonelada de residuos tratados y por m³ de biogás producido; y también tienen mayor productividad de biogás que las plantas de biodigestión seca. A su vez, existen ciertas ventajas económicas proporcionadas por los sistemas secos relacionados con los costos del sistema de recolección de los residuos, evitando la necesidad de infraestructura adicional para el tratamiento de residuos verdes y comercialización el producto final.

De hecho, esta tecnología permite tratar el estiércol recogido del campo, con restos de tierra y madera, ya que estos no obstruyen ningún sistema de cañerías, aunque sí reducen el volumen útil del reactor. La energía necesaria para calefaccionar el digestor en procesos húmedos es de alrededor del 30% de la energía total producida, mientras que el proceso seco necesita alrededor del 10% de energía producida para calefacción.

El volumen de agua en el proceso también tiene un efecto sobre el tamaño requerido del reactor, por lo que la fermentación seca requiere un reactor más pequeño para la misma cantidad de sólidos. Por último, la digestión seca no produce aguas residuales; el efluente tiene un bajo contenido de agua, la cual se evapora rápidamente, facilitando el uso, transporte y venta de este.



En conclusión, la elección del sistema de digestión (húmeda, seca, meso o termofílica) va a depender de numerosos factores que deberemos analizar a conciencia. Por ejemplo, si el residuo a tratar es estiércol que se recoge lavando una ladera de cemento, convendrá la digestión húmeda; pero si se deben tratar residuos domiciliarios, probablemente la seca.

En lo que queda de este curso nos centraremos en la digestión húmeda debido a que la mayoría de los biodigestores existentes en nuestra provincia de pequeña o mediana escala utilizan esta tecnología. Y también porque la mayor parte están en el sector rural y son alimentados con residuos húmedos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Kusch, S.; Oechsner, H.; Kranert, M. & Jungbluth, T. (2009). Methane generation from the recirculated liquid phase in batch operated anaerobic dry digestion. In: Bulletin UASVM Agriculture, **66**, No.2, Print ISSN 1843-5246; Electronic ISSN 1843-5386, pp. 110-115
2. T. Bauchop (1931) The anaerobic fungi in rumen fiber digestion, Agriculture and Environment **6**, Issues 2–3, 339-348.
3. Elif Yıldırım, Orhan Ince, Sevcan Aydin, Bahar Ince (2017) Improvement of biogas potential of anaerobic digesters using rumen fungi. Renewable Energy **109**, 346-353.
4. María Teresa Varnero Moreno. Manual de Biogás FAO. Santiago de Chile, 2011. ISBN 978-95-306892-0.
5. Eduardo Groppelli, Orlando Giampaolli (2015) Biodigestores, una propuesta sustentable. Universidad Nacional del Litoral. Editorial Cátedra.
6. Getachew D. Gebreeyessus and Pavel Jenicek (2016). Thermophilic versus Mesophilic Anaerobic Digestion of Sewage Sludge: A Comparative Review. Bioengineering 2016, **3**, 15.
7. Sigrid Kusch, Winfried Schäfer and Martin Kranert (2011). Dry Digestion of Organic Residues, Integrated Waste Management - Volume I, Mr. Sunil Kumar (Ed.), ISBN: 978-953-307-469-6, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/integrated-waste-management-volume-i/dry-digestion-of-organic-residues>
8. Angelonidi Eleni and Stephen R. Smith (2015). A comparison of wet and dry anaerobic digestion processes for the treatment of municipal solid waste and food waste. Water and Environment Journal **29**, 549–557.

INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA

1. Planta de biodigestión seca en Rosario: <https://www.conclusion.com.ar/sin-categoria/rosario-tendra-un-nuevo-centro-ambiental-de-tratamiento-de-residuos-2/07/2017/>