



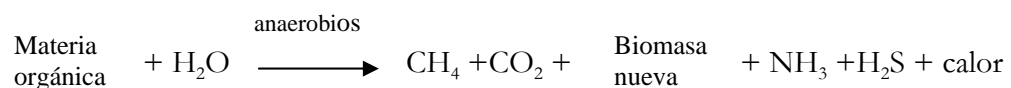
CAPÍTULO V. DIGESTIÓN ANAEROBIA

5.1. Introducción

La aplicación de procesos anaerobios a los lodos residuales de las tecnologías de tratamiento de aguas, se ha incrementado considerablemente, esto se debe a que las circunstancias no son las mismas que hace 10 años. El daño provocado al medio ambiente por los combustibles fósiles y nucleares es un tema que está captando más atención, tanto a nivel científico, gubernamental como a nivel poblacional. Simultáneo a los esfuerzos por preservar y sanear el medio ambiente, cada día aumenta el interés puesto en tecnologías que obtienen energía a partir de fuentes renovables, que pretenden, además, integrar al proceso líneas de reciclaje de efluentes, a fin de obtener procesos limpios.

Los tratamientos anaeróbicos ofrecen ventajas económicas atractivas, lo cual se fundamenta en la posibilidad de tratamiento de residuos con altas cargas en instalaciones compactas, la producción limitada de lodos, requerimientos nutricionales reducidos y un balance energético positivo.

La digestión anaerobia es un proceso complejo que puede ser descrito en función de diversas variables interrelacionadas. Por definición, la digestión anaeróbica es: “el uso de microorganismos, en ausencia de oxígeno, para la estabilización de materiales orgánicos mediante su conversión a metano y otros productos inorgánicos incluyendo dióxido de carbono”:



En este capítulo se revisarán los fundamentos teóricos y cuantitativos para la modelación de un proceso anaerobio. Así mismo se estudiará el funcionamiento y las

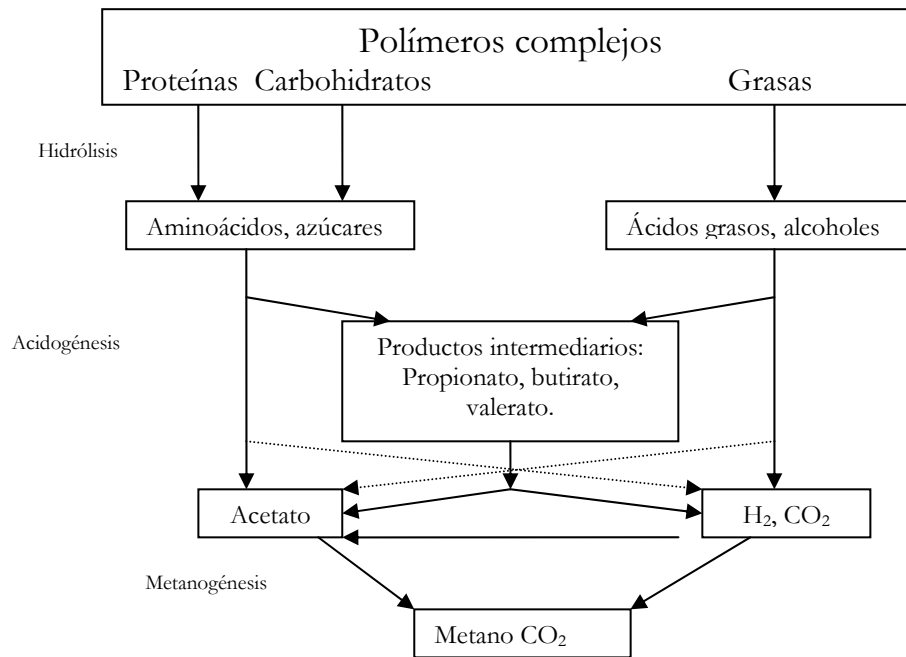


instalaciones físicas necesarias para llevar a cabo un proceso de digestión anaerobia convencional.

5.2. Microbiología del proceso

Durante la digestión, las moléculas complejas (polisacáridos, proteínas, lípidos y lignina) se descomponen en moléculas más pequeñas para dar como productos finales metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Este proceso consta de 3 etapas, en cada una de las etapas un conjunto de reacciones son llevadas a cabo por una compleja población de microorganismos presentes en el digestor, cada una de las cuales cataliza sólo un cierto número de estas reacciones. La mayoría de los microorganismos oxidan determinados compuestos orgánicos a fin de obtener energía para su crecimiento y utilizan compuestos carbonados específicos para sintetizar sus componentes celulares. Los productos finales de un grupo de microorganismos suelen ser el alimento del grupo siguiente, de forma que a lo largo del proceso existe un delicado balance que es necesario mantener para que la reacción se desarrolle correctamente.

Como se mencionó previamente el proceso de digestión anaerobia ha sido dividido en tres etapas de acuerdo a la actividad metabólica predominante y a sus productos finales. La primera etapa es la hidrolítica, la segunda es la acidogénica, y la tercera etapa se centra en el proceso de metanogénesis. Los procesos anaerobios se caracterizan por tener consorcios bacterianos muy complejos, pero las principales interacciones se dan entre el reino Bacteria y el Archaea. El proceso (ver Fig.3.1) inicia con la hidrólisis de la materia orgánica compleja, carbohidratos, grasas y proteínas que se encuentran en solución o suspendidas, son transformadas en sus unidades básicas es decir azúcares (carbohidratos simples), ácidos grasos y aminoácidos por el metabolismo de bacterias hidrolíticas y la acción de las enzimas extracelulares, liberándose también CO_2 y H_2 en el proceso.



Fuente: Bibliografía [4]

Fig. 3.1 Etapas en la producción de metano a partir de materia orgánica

Estas bacterias son facultativas por lo que consumen el oxígeno que pueda haber dentro del digestor contribuyendo a la formación de condiciones anaerobias. Crecen rápidamente, tardando en doblarse un mínimo de 30 minutos y pueden subdividirse en:

- Celulolíticas hemicelulolíticas
- Aminolíticas
- Proteolíticas
- Lipolíticas

La transformación a partículas más sencillas se da a fin de que el alimento se encuentre en su forma soluble y pueda pasar a través de la pared celular y la membrana (ver Fig.3.2). Una vez que se tienen estas unidades, comienza la segunda etapa, la pared celular de las bacterias acidogénicas actúa como un tamiz y deja las partículas más grandes en el exterior, mientras que la membrana selecciona y guía el material dentro y fuera del interior de la célula. No todos los sólidos orgánicos pueden ser degradados y no todos entran a la



célula. Estos materiales constituyen la fracción no biodegradable de los lodos y son llamados sólidos inertes.

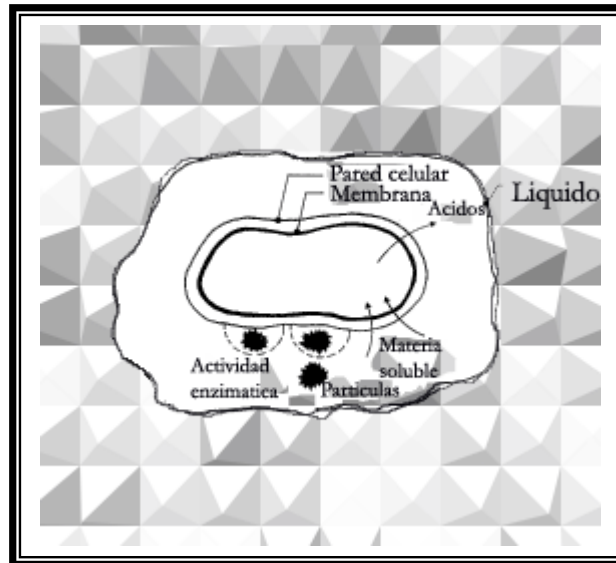


Fig. 3.2 Actividad celular de una bacteria formadora de ácido

Las bacterias fermentativas usan la materia orgánica soluble para obtener energía y dejan como productos intermediarios hidrógeno y ácidos orgánicos, llamados ácidos volátiles o ácidos grasos, los de mayor relevancia se enlistan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Principales ácidos grasos durante la digestión

Ácidos orgánicos importantes

Ácidos volátiles

- Ácido acético
- Ácido propiónico
- Ácido n-butírico
- Ácido isobutírico

Ácidos no volátiles

- Ácido láctico
- Ácido piruvico
- Ácido succínico

Éstos ácidos orgánicos son series de cadenas cortas de ácidos grasos y varían en longitud, desde el ácido fórmico con un solo carbón por mol, hasta el ácido octanóico que

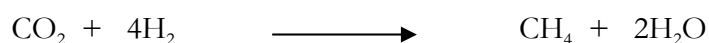


cuenta con ocho átomos de carbono por mol. Los ácidos volátiles son muy solubles en sus formas ionizadas y están presentes como especies disueltas.

Los ácidos grasos serán oxidados parcialmente por otro grupo de bacterias llamadas acetogénicas, quienes producirán cantidades adicionales de hidrógeno y ácido acético. La producción de los ácidos volátiles completa la primera etapa del proceso de digestión y es llamada comúnmente acidogénesis. En un reactor estable, los ácidos orgánicos serán utilizados a la misma tasa a la que son producidos. Según Wesley Eckenfelder (2000) la concentración de ácidos volátiles se mantendrá entre 20 y 200 mg/l dependiendo de la carga que se este introduciendo al reactor. Las bacterias que participan en esta etapa son facultativas y el tiempo máximo de doblaje es de 1.5 – 5 días.

La tercera etapa de la digestión anaerobia es la metanogénesis. Tanto el ácido acético como el hidrógeno son la materia prima para el crecimiento de las bacterias más importantes del proceso es decir, las metanogénicas (anaerobias estrictas), este tipo de bacterias son los únicos microorganismos capaces de catabolizar anaeróbicamente el ácido acético y el hidrógeno para dar productos gaseoso cuyos componentes fundamentales son el metano y el dióxido de carbono.

Según los precursores que tenga este proceso se lleva a cabo por dos rutas, en la primera el hidrógeno es usado como donador de electrones, mientras que el HCO_3^- es el aceptor para formar metano y agua.



En la segunda vía el acetato se rompe (CH_3COO^-) y forma metano a través de la reacción acetoclástica.



En la tabla 3.2 se muestran algunas de las principales bacterias involucradas en el proceso de digestión anaerobia.



Es importante mencionar y entender que la estabilización de la materia orgánica no se da en la primera etapa, la estabilización se realiza únicamente durante la metanogénesis. Las etapas de hidrólisis y fermentación (acidogénica) son las más rápidas debido a que la energía que se obtiene de estos procesos es mayor que la que se obtiene de la generación de metano, lo cual impacta directamente en la velocidad de crecimiento. Esto es cierto para aquellos residuos que no contengan altas concentraciones de material lignocelulítico (en cuyo caso la etapa limitante sería la hidrolítica).

Tabla 3.2 Bacterias involucradas en la digestión anaerobia

Etapa	Género/Especie	Población mesofílica en lodos residuales
Hidrolíticas acidogénicas	<i>Butyrivibrio, Clostridium, Ruminococcus, Acetovibrio, Eubacterium, Peptococcus, Lactobacillus, Streptococcus</i> <i>etc.</i>	10 ⁸ -10 ⁹ por ml
Acetogénicas Homoacetogénicas	<i>Acetobacterium, Acetogenium, Eubacterium, Pelobacter, Clostridium, etc.</i>	≈10 ⁵ por ml
Reductores de protones estrictos	<i>Metanobacillus omelionskii, Syntrophobacter wolini, Syntrophomonas wolfei, Syntrophus buswellii, etc.</i>	
Metanogénicas	<i>Methanobacterium (muchas especies), Methanobrevibacter (muchas especies), Methanococcus (muchas especies), Methanomicrobium (muchas especies), Methanogenium (muchas especies), Methanospirillum hungatei, etc.</i>	≈10 ⁸ ml

Fuente: Bibliografía [4]

Dentro de cualquier proceso de metanogénesis es de vital importancia mantener bien equilibradas las poblaciones de bacterias acidogénicas y las metanogénicas. La concentración de ácidos orgánicos y el pH dentro del reactor deben ser monitoreados diariamente. Los ácidos orgánicos son un indicador clave del desempeño del proceso así como la capacidad de buffer, es así que estos dos parámetros nos brindan información suficiente para mantener en balance a los productores y a los consumidores de ácido.



5.3. Productos de la digestión anaerobia

Al final del proceso de digestión obtenemos biogás y lodos digeridos en el caso de que se trate de un proceso de digestión anaerobia de alta carga, que se caracteriza por llevar un régimen de mezclado completo, sin embargo, si se trata de un proceso de digestión convencional también obtendremos una capa de nata y una de sobrenadante.

5.3.1. Gas

El biogás es la mezcla de gas producido por bacterias metanogénicas que transforman material biodegradable en condiciones anaerobias. Está compuesto de 60 a 80% de metano, 30 a 40% de dióxido de carbono y trazas de otros gases, como nitrógeno, ácido sulfhídrico, monóxido de carbono e hidrógeno (*ver tabla 3.3*). Un metro cúbico de metano a temperatura y presión normales tiene un poder calorífico neto de 35800 kJ/m³, el biogás tiene un poder calorífico de aproximadamente 22,400 kJ/m³.

Tabla 3.3 Características del biogás

Componente	Porcentaje
Metano	60 - 80
Gas Carbónico	30 - 40
Hidrógeno	5 - 10 %
Nitrógeno	1 - 2 %
Monóxido de Carbono	0 - 1.5
Oxígeno	0.1
Ácido Sulfhídrico	0 - 1
Vapor de agua	0.3
Características del Metano	
Densidad	1.09 kg/m ³
Solubilidad en agua	Baja
Presión crítica	673.1 Psia
Temperatura crítica	82.5 °C
Poder calorífico	22400 kJ/m ³



5.3.2. Lodos digeridos

Después de la capa en la cual tiene lugar la digestión se encuentra la zona de lodos digeridos que se compone de aquellos sólidos inorgánicos y volátiles que son de difícil degradación.

Las características de un lodo bien digerido son las siguientes:

- Debe ser sencillo de separar de la fase líquida
- La cantidad de sólidos digeridos que salen del proceso debe ser mucho menor a la que entró debido a que durante la degradación parte de ellos se transformaron en gases, ácidos líquidos y agua.
- Debe tener una apariencia aterronada
- Debe tener un color oscuro, si aparecen manchas o coloraciones verdes, es indicativo de que los lodos no están bien digeridos.
- No deben presentar mal olor
- La concentración de sólidos volátiles presentes deberá ser entre un 40-60% menor que la concentración a la entrada.

5.4. Factores que afectan la Digestión Anaerobia

Las bacterias metanogénicas responsables de la conversión final de la materia orgánica a un producto estable, son muy sensibles a las condiciones dentro del digestor. Por lo que disminuirán su actividad si éstas no son mantenidas a niveles óptimos. Existen 5 factores que regulan la digestión: las bacterias presentes, la carga de alimentación, el mezclado, las condiciones ambientales y los materiales inhibitorios o tóxicos. A continuación revisaremos todos estos factores, así mismo se analizarán los equipos necesarios para brindar condiciones óptimas para el crecimiento de las bacterias metanogénicas.



5.4.1. Bacterias

Los lodos crudos que entran al reactor contienen las bacterias necesarias para lograr la estabilización. Por lo que es necesario que durante la operación se mantenga el mayor número posible dentro del proceso para realizar el trabajo de biodegradación, evitando remover más lodo digerido del necesario. En tanques sencillos, el líquido sobrenadante es desplazado por el lodo crudo entrante, mientras que el lodo digerido debe ser removido bajo estricto control. En aquellos casos en los que la población bacteriana no es suficiente se puede conseguir lodo digerido de otras instalaciones e inocularlos a fin de mantener una concentración de biomasa activa adecuada.

Esta concentración deberá estar considerada dentro de la carga de alimentación al reactor, ya que es un factor importante a considerar.

5.4.2. Carga de Alimentación

Dentro de los parámetros del lodo crudo que deben medirse a la entrada del reactor están: la concentración (que es la concentración de sólidos en un determinado volumen de agua); la cantidad de sólidos volátiles (que indica la cantidad de material que puede ser usado como alimento por las bacterias e indirectamente la cantidad de arena). El factor de carga orgánica y el tiempo de retención hidráulico que se relaciona con el crecimiento bacteriano y su descarga.

Existen otros puntos de muestreo, como los flujos de recirculación, el sobrenadante y los lodos digeridos, que también son importantes ya que a través de ellos es posible recabar información del proceso.

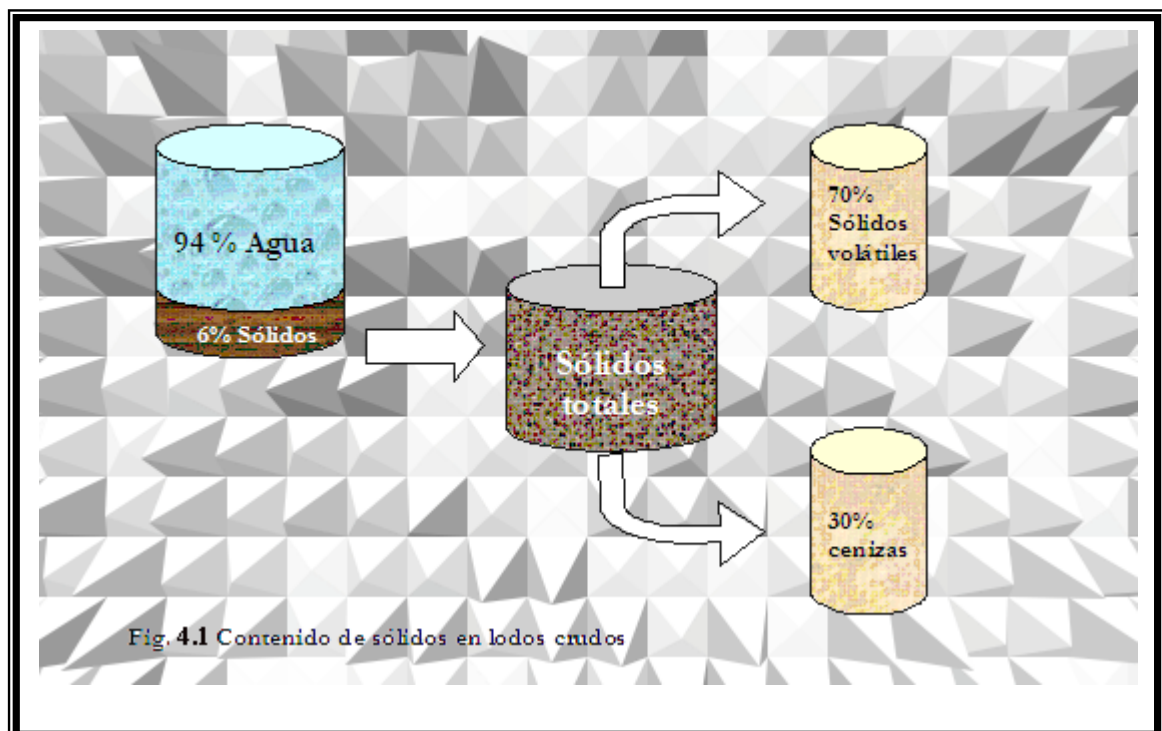
La concentración de los lodos se determina mediante la prueba de sólidos totales. Esta prueba elimina el contenido de agua de una muestra pesada y por diferencia se determina el porcentaje de sólidos presentes. La muestra deberá ser tomada de un punto en



donde exista una buena agitación para que sea representativa, ya sea de lodo crudo, de lodos digeridos, etc.

De la concentración de sólidos totales que entran al digester solo un porcentaje esta disponible para la biodegradación, este porcentaje se determina mediante una prueba de sólidos volátiles. El remanente de la prueba de sólidos totales se somete a una temperatura de 550° C hasta obtener una ceniza blanca (que es el contenido de materia inorgánica presente), esta ceniza se pesa y se resta del peso de los sólidos totales, el resultado es la cantidad de sólidos volátiles. (Ver Fig. 4.1) De manera que la prueba sirve como un indicador de la carga orgánica de alimentación y para medir la eficiencia del digester.

Rittmann y McCarty mencionan que el contenido de sólidos volátiles dentro del digester debe ser aproximadamente mayor al 70%, de manera que la alimentación al reactor deberá monitorearse a fin de mantener un buen equilibrio.





Existen dos factores de carga distintos: el factor de carga orgánica y el de carga hidráulica. Que además de ser indicadores del proceso nos permiten evaluar la eficiencia del digestor. El factor de carga orgánica es la cantidad de alimento que entra como sólidos volátiles por día. Y se calcula como kilogramos de sólidos volátiles por día por metro cúbico por el volumen activo del digestor.

$$\text{Carga orgánica} = \frac{\text{Kg. lodo crudo/día} \cdot \% \text{ contenido sólidos volátiles}}{\text{volumen disponible del digestor}}$$

La carga hidráulica es el tiempo promedio en días que permanece el líquido dentro del digestor y esta relacionado con su capacidad.

La carga hidráulica (también conocido como tiempo de retención hidráulico) se calcula como sigue:

$$TRH = \frac{\text{Volumen del digestor, L}}{\text{Flujo de entrada, L/d}}$$

Este es el tiempo mínimo requerido para asegurar que la materia orgánica y la biomasa activa estén en contacto.

5.4.3. Mezclado

La estabilización de los lodos sólo puede llevarse a cabo si los 2 factores previamente descritos, bacterias y alimento, interaccionan. El mezclado permite mantener la mayor cantidad de alimento en contacto con las bacterias, reducir el volumen ocupado por materiales orgánicos e inorgánicos sedimentables y homogeneizar la temperatura y la concentración. Todo esto con el fin de acelerar el proceso de ruptura de sólidos volátiles y producción de metano. La agitación en la digestión anaerobia es menor que en los procesos



aerobios, ya que la tasa de crecimiento de las bacterias metanogénicas es menor y su contacto con el sustrato debe ser mayor.

El mezclado puede realizarse mediante el ascenso del gas hacia la superficie o mediante acción mecánica. En la naturaleza, conforme el gas es producido, se acumula, y finalmente se eleva arrastrando consigo pequeñas partículas de materia. Esta acción crea un efecto parecido al agua hirviendo lo cual produce un mezclado, este método se controla mediante la alimentación. Las condiciones que propician el mezclado natural son inestables, pero si se mantiene un estricto control se puede conseguir un método efectivo de mezclado a bajo costo.

Cuando el mezclado se realiza por medios mecánicos existen varios tipos de mezcladores que logran que los lodos estén en constante movimiento dentro del reactor, los sistemas de uso más frecuente incluyen la inyección de gas y la agitación mecánica.

Los sistemas de inyección de gas se clasifican en sistemas confinados (*Fig. 4.2 a.*) y en sistemas no confinados (*Fig. 4.2 b.*). En los sistemas no confinados el biogás se recoge en la parte superior y se comprime, posteriormente se introduce de nuevo al digestor por medio de difusores colocados en la parte inferior o mediante lanzas de inyección de gas dispuestas radialmente ancladas en la zona superior. Las burbujas de gas ascienden arrastrando consigo partículas de materia orgánica provocando el mezclado del contenido. Para estos sistemas en especial existe una relación entre el caudal de gas bombeado y la altura a la que llega la agitación, pudiendo dar lugar a la formación de depósitos en el fondo del digestor.

En los sistemas confinados (*ver Fig.4.2 b.*), el gas se comprime y se manda a dispositivos como son los sistemas de bomba de emulsión de gas y el sistema de émbolo de gas. En los sistemas de emulsión el gas se recolecta en la parte superior y posteriormente se manda a tuberías y lanzas sumergidas que se encuentran conectadas a un conducto de elevación que libera las burbujas y ascienden creando un efecto de emulsión tipo airlift.

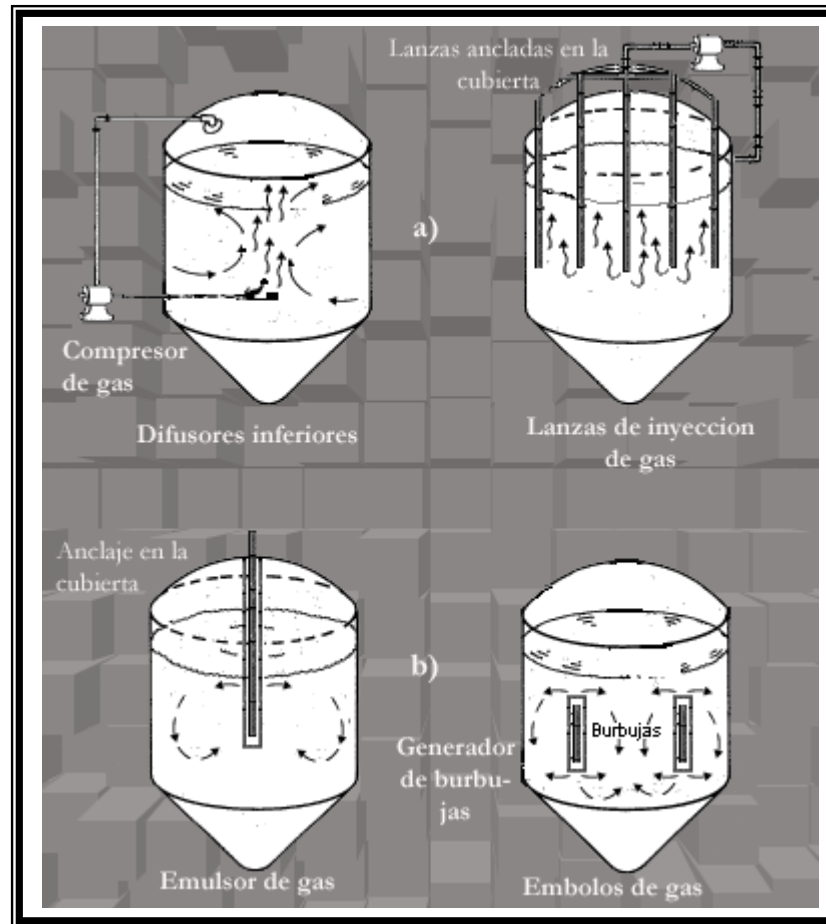


Fig. 4.2 Sistemas de inyección de gas confinados y no confinados

En los sistemas de émbolo de gas las burbujas son liberadas de manera intermitente por medio de un pistón o tubería cilíndrica. Las burbujas ascienden actuando como un émbolo que empuja los lodos hacia la superficie.

Los sistemas de agitación mecánica emplean turbinas o agitadores de baja velocidad, los elementos giratorios desplazan los lodos logrando el mezclado. Los sistemas de turbinas de baja velocidad trabajan con motores que van montados sobre la cubierta del digester y dos impulsores situados a diferentes profundidades dentro del digester. (ver Fig. 4.3).

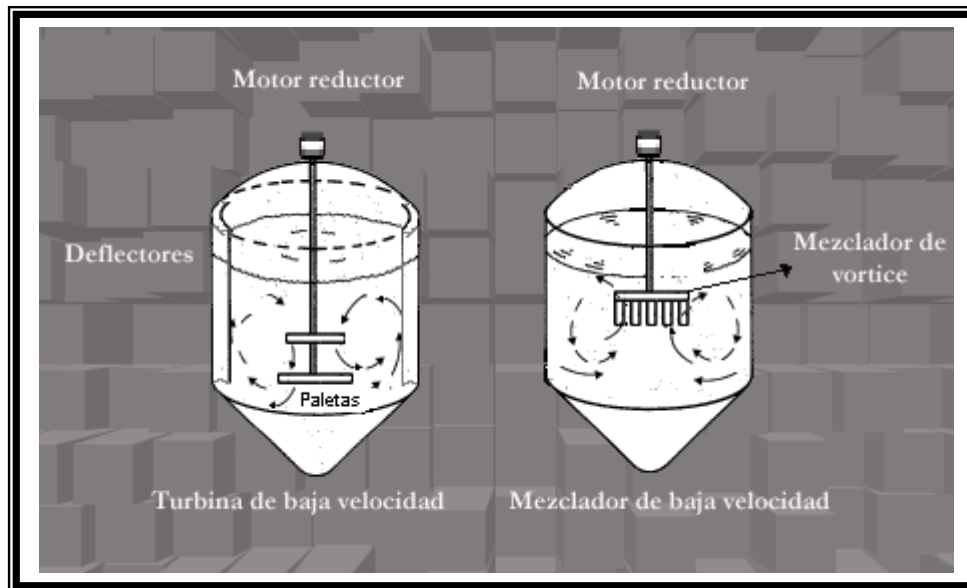


Fig. 4.3 Sistemas de mezclado de turbina y de agitación de baja velocidad

Otro método es la recirculación de los lodos (ver Fig. 4.4) por medio de bombas de cavidad progresiva o de pistón. La bomba se encuentra situada afuera del digestor y aunque resulta menos eficiente que los mezcladores mecánicos es una opción que se utiliza a menudo.

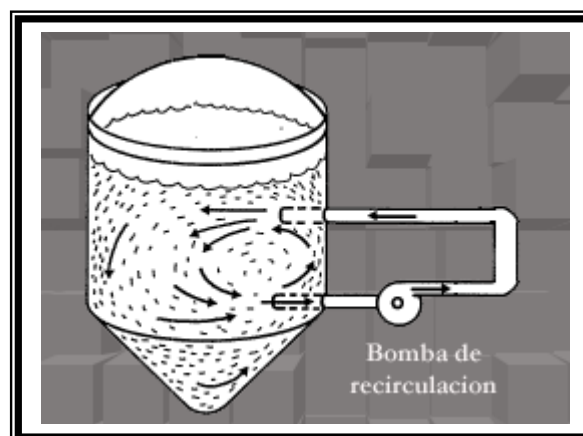


Fig. 4.4 Digestor simple con sistema de recirculación



5.4.4. *Condiciones anaerobias*

Las bacterias metanogénicas son anaerobias estrictas, por lo que incluso pequeñas cantidades de oxígeno resultan tóxicas para su metabolismo, las condiciones de anaerobiosis son mantenidas por medio de digestores cubiertos capaces de recolectar el biogás que se genera sin permitir el paso de aire. La cubierta de los digestores sirve para varios propósitos además de evitar el paso de oxígeno al reactor que además de afectar a la biomasa podría formar mezclas explosivas, también sirve de estructura para el equipo de mezclado, acceso al tanque, soporte de equipo de seguridad y sirve para la acumulación y la recolección del gas. Existen dos tipos principales de cubiertas: las fijas y las flotantes.

Las cubiertas fijas pueden ser de concreto unido a las paredes del digestor o de metal, estas últimas se mantienen en una sola posición por medio de pasadores anclados. En este tipo de digestores es muy importante mantener controlada la presión del gas ya que es posible que la cubierta se levante causando serios daños en la estructura y las paredes, así mismo se deben controlar los niveles del sobrenadante y el del líquido de entrada (*ver Fig. 4.5*). Los dispositivos destinados a la liberación de presión y vacío son cruciales para evitar este tipo de problemas.

Existen distintos arreglos para las cubiertas flotantes sin embargo la mayoría presentan las mismas características y los mismos problemas en el mantenimiento. Este tipo de cubierta se encuentra flotando en la superficie de los lodos, y suben o bajan según la producción y el uso. Estas cubiertas también pueden llegar a colapsarse debido a la formación de vacío. (Ver Fig. 4.5).

Dentro de las cubiertas flotantes también se encuentran las tipo gasómetro, estas cubiertas son capaces de subir y bajar de nivel hasta 2 metros por encima del nivel mínimo gracias a los rodetes y las guías que están entre la pared y la estructura de la cubierta.

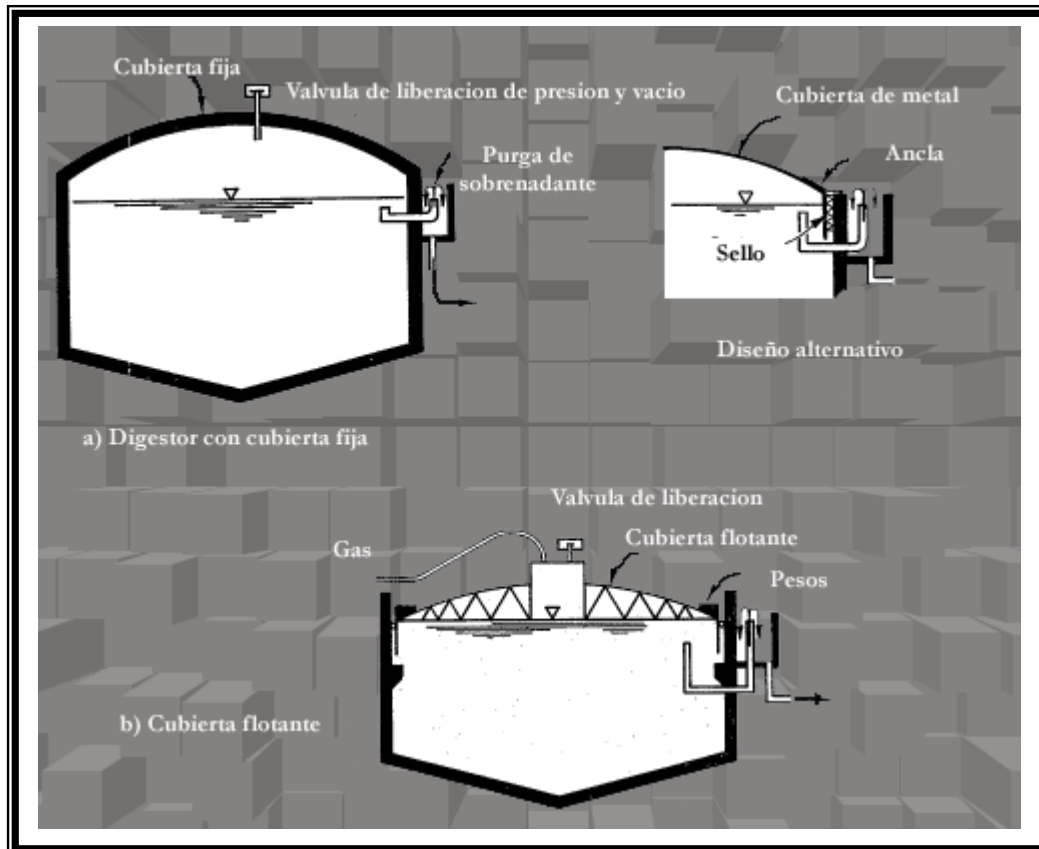


Fig. 4.5 Tipos de cubiertas para digestores anaerobios

En ellas se almacena el gas conforme es producido. También es necesario el monitoreo de la presión interna así como la remoción de nata que se acumule entre la cubierta y las paredes para facilitar el movimiento de la cubierta (ver Fig. 4.6).

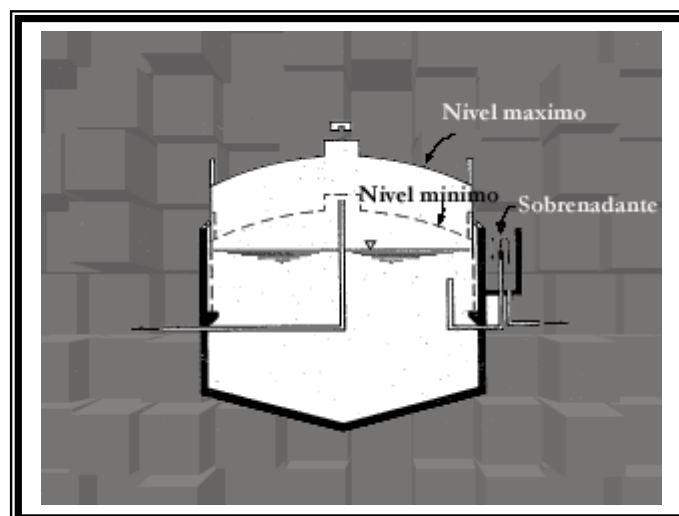


Fig. 4.6 Cubierta tipo gasómetro



5.4.5. *Temperatura*

La temperatura es uno de los factores ambientales más importantes que afectan el crecimiento y la supervivencia microbiana. Puede afectar a los microorganismos vivos de dos formas muy diferentes. A medida que la temperatura sube, las reacciones enzimáticas son más rápidas y el crecimiento se hace más rápido. Sin embargo, por encima de una cierta temperatura, las proteínas, ácidos nucleicos y otros componentes celulares pueden dañarse irreversiblemente. Por encima de este punto las funciones celulares paran. Por tanto, para cada microorganismo existe una temperatura mínima por debajo de la cual no existe crecimiento, una temperatura óptima a la cual el crecimiento es el más rápido posible y una temperatura máxima. Las bacterias metanogénicas trabajan óptimamente en un rango de 29-37 ° C y de 48-60 ° C, fuera de estos rangos la actividad metabólica se ve reducida en forma significativa. Por ejemplo la actividad es casi nula a temperaturas menores de 10° C. Cabe señalar que a pesar de que no existe actividad metabólica a estas temperaturas las bacterias no sufren daño alguno.

Las variaciones y los cambios abruptos de temperatura también logran afectar el metabolismo de los metanógenos, variaciones tan pequeñas como 3 grados centígrados por día, logran menguar su actividad metabólica, no así para los formadores de ácido que no son tan sensibles a estos cambios y continúan activos. Esto a la larga resulta en un aumento del pH ya que el consumo de ácidos es menor a su producción, y eventualmente, si no cambian las condiciones dentro del digestor podrían causarse efectos inhibitorios y finalmente la falla del proceso.

Las bacterias trabajan mejor a temperaturas constantes entre 32-36° C y una vez que se ha encontrado cual es la mejor de acuerdo a la producción de biogás y a la capacidad para mantener el pH en 7, ésta deberá ser mantenida aceptando variaciones de hasta 2° C. En la tabla 4.2 y la Fig. 4.7 se muestra la relación que existe entre la temperatura y el tiempo de digestión.



Tabla 4.2 Efecto de la temperatura en el tiempo de digestión

Temperatura ° C	Tiempo días
15	67.8
20	46.6
25	37.5
30	33.3
35	23.7
40	22.7
45	14.4
50	8.9
60	12.6

La digestión termofílica (48-60 °C) permite tiempos de retención mínimos, pero exige un gran control además de mayores costos por lo que no es aconsejable.

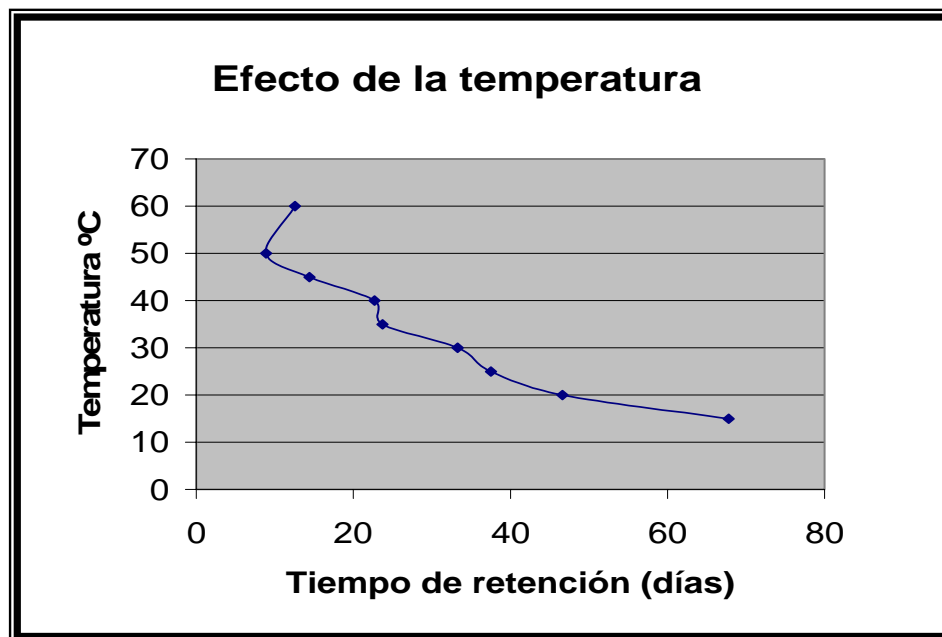


Fig. 4.7 Efecto de la temperatura en el tiempo de digestión

Es por esto que el sistema de calefacción de lodos es de vital importancia para el buen desempeño del proceso. La operación de los sistemas de calentamiento dependerá en gran manera de la localización geográfica, el tamaño del digestor, carga y en algunos casos el tipo de desechos industriales que vengán mezclados con el lodo. Existen diversos



métodos para mantener los lodos a temperaturas adecuadas, y se clasifican en sistemas de calefacción internos y externos.

Los sistemas más comunes de calefacción internos son aquellos en donde se emplean sistemas de combustión directa, inyección de vapor, y serpentines alrededor del digestor.

En la combustión directa se liberan flamas y gas caliente sobre los lodos a través de quemadores sumergidos (ver Fig. 4.8 a), también se puede lograr por medio de un quemador colocado dentro de un arreglo de tubería que permite calentar el interior del tubo y así el contenido del digestor (ver Fig. 4.8 b) los gases calientes son liberados por la parte superior del digestor.

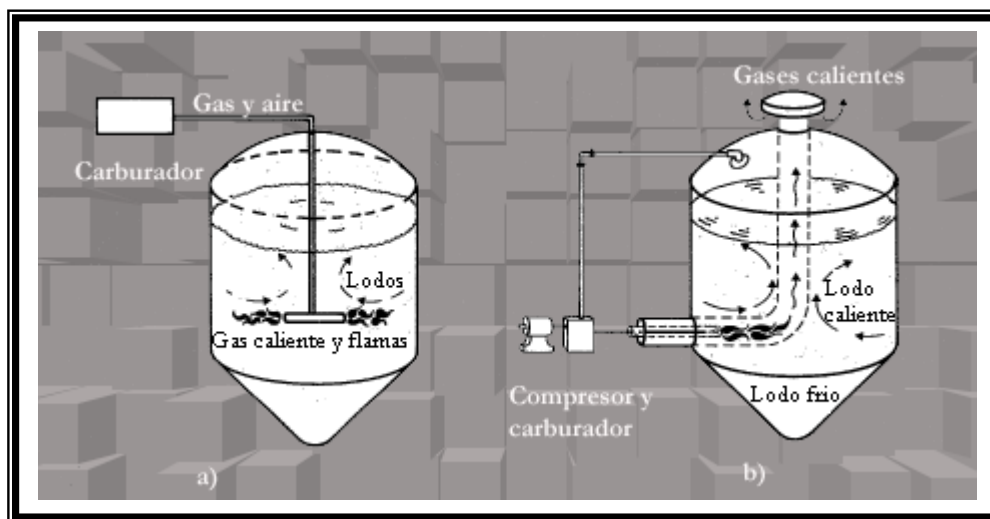


Fig. 4.8 Sistemas de calefacción a) Quemador sumergido interno
b) Quemador sumergido externo

En la inyección de vapor se emplea gas o cualquier otro combustible para la producción de vapor, (incluso el metano producto de la digestión), el vapor es llevado mediante tuberías por debajo de la superficie de los lodos o mediante puntos de inyección conectados a las líneas de alimentación de lodos. En algunos casos se han fabricado dispositivos que conectan las líneas de inyección de vapor con las líneas de salida de todas las válvulas (Andrew Wheatley, 1991). Este tipo de sistema introduce agua al contenido del



digestor por lo que se debe tener cuidado en la operación de los calentadores y en la alimentación de agua. Este tipo de sistemas también se utilizan en tanques de precalentado, en donde se alimenta lodo crudo y una vez que se ha alcanzado la temperatura deseada se bombea hacia el digestor. Los lodos digeridos también pueden ser recirculados hacia el tanque de precalentado. Este sistema supone costos de mantenimiento muy altos.

Otra forma de mantener los lodos con una temperatura adecuada es mediante distintos dispositivos que se encuentran colocados dentro del digestor, puede ser tubería empotrada a las paredes del digestor (ver Fig. 4.9 a) o distintos tipos de intercambiadores de calor (ver Fig. 4.9 b,c). Usualmente se bombea agua caliente a través de los serpentines internos y es necesario un sistema de mezclado para mantener los lodos en circulación. En algunos casos la convección natural es el único medio para lograr el mezclado.

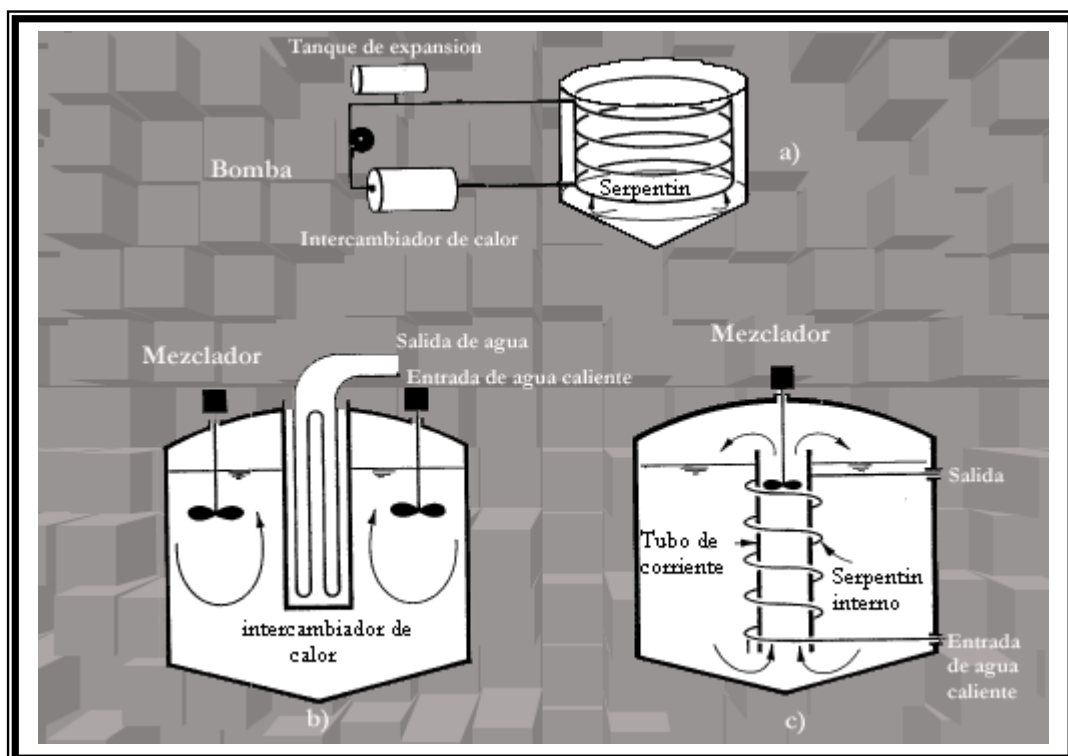


Fig. 4.9 Sistemas de calefacción intercambiadores de calor internos

Los sistemas externos de calefacción son muy parecidos a los descritos previamente en cuanto a las partes que los conforman, solo que se cuenta con la ventaja de que se encuentran fuera del digestor lo que hace mucho más versátil tanto el diseño como los



arreglos y su mantenimiento resulta más sencillo, a pesar de que el costo es más elevado se prefiere la instalación de sistemas externos sobre los internos. En este tipo de sistemas los lodos son transportados fuera del digestor hacia el intercambiador y de regreso a él. Los lodos crudos pasan por el intercambiador, ya sea de manera separada o combinados con los lodos digeridos. Andrew Wheatley menciona que para evitar pérdidas de calor debidas al transporte del agua, el corazón del intercambiador de calor deberá estar muy cerca del calentador, de esta manera los lodos serán bombeados hacia tuberías que se encuentran dentro de un baño de agua caliente o hacia un intercambiador de calor minimizando los costos energéticos (ver Fig. 4.10).

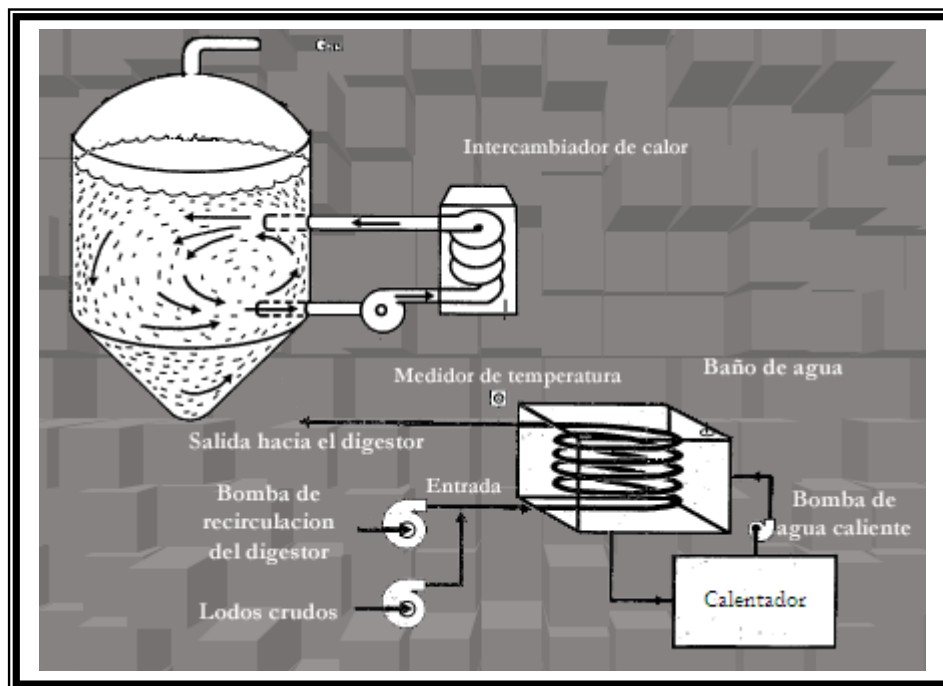


Fig. 4.10 Sistema de calefacción externo

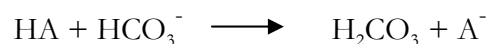
Es importante señalar que todos los sistemas de calentamiento de lodos deberán estar ligados directamente al sistema de mezclado para evitar sobrecalentamiento local o la esterilización de la biomasa, así como recibir mantenimiento y limpieza regularmente a fin de evitar problemas en el funcionamiento y la transferencia de calor.



5.4.6. pH

Así como existen rangos determinados de temperatura en los cuales el crecimiento microbiano es óptimo, también existen rangos de pH a los cuales los organismos se desarrollan con mayor facilidad, la única diferencia radica en el hecho de que normalmente los organismos presentan un pH óptimo muy bien definido. Los organismos que crecen a pH altos son los alcalófilos, los que crecen a pH bajos reciben el nombre de acidófilos, son pocos los microorganismos que sobreviven a estos pH, se necesitan estructuras celulares especiales capaces de soportar condiciones tan extremas, de manera que la mayoría de los microorganismos presentan pH óptimos equivalentes a los que se encuentran en los ambientes naturales, es decir, valores de pH de 5.9-7.8. Por ejemplo, los microorganismos encargados de llevar a cabo la etapa acidogénica durante la metanogénesis pueden trabajar a pH mayores a 5, en cambio los metanogénicos tienen un rango de pH óptimo de 6.6-7.6 y pueden soportar rangos de 6.4-7.8 (Kugelman y Chin, 1971), por debajo de 6.2 se inhibirá considerablemente la actividad de esta cepa.

El pH dentro del digestor está en función de la producción de ácidos volátiles y de la alcalinidad presente. La cantidad de lodos alimentados al digestor impacta directamente en la producción de ácidos volátiles, la biodegradación de la materia orgánica tiende a disminuir el pH, sin embargo este efecto es contrarrestado por la degradación de los ácidos volátiles y por la generación de un buffer de bicarbonato durante la formación de metano. De acuerdo a las reacciones de neutralización el bicarbonato y los ácidos grasos (HA) siguen esta ruta:



Es así que en condiciones estables la cantidad de ácidos generados será utilizada como alimento casi a la misma tasa a la que son producidos. Bajo condiciones estables el contenido de ácidos volátiles dentro del digestor oscilará entre 50 mg/L hasta 300 mg/L expresado como ácido acético. En caso de que el flujo de alimentación se mantenga



constante un balance entre las poblaciones podrá mantenerse fácilmente, sin embargo, si se presentan variaciones en el volumen de alimentación y grandes cantidades de materia orgánica de fácil descomposición son introducidas es muy probable que las poblaciones pierdan sus proporciones y los productores de ácido desplacen a los metanógenos. Si el balance de la digestión no es restaurado rápidamente la capacidad de buffer del sistema se ve sobrepasada provocando el descenso del pH. Estas condiciones disminuirán levemente la producción de ácido, mientras que la actividad metanogénica se detendrá por completo lo que provocará una acumulación de ácido dentro del digestor. Regresar el proceso a un estado estable puede tardar varias semanas o hasta meses debido al lento crecimiento de las bacterias metanogénicas, por lo que monitorear y evitar el descenso del pH se convierte en un paso crucial.

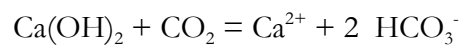
La capacidad de buffer del sistema se convierte en un punto clave también, ya que previene el desplome del proceso durante las variaciones en la alimentación y temperatura. Nuevamente las bacterias metanogénicas son las encargadas de generar suficiente material alcalino para neutralizar los ácidos volátiles, como resultado de su metabolismo bicarbonato, carbonatos y amoníaco son formados en cantidades suficientes para mantener el pH en un nivel constante cerca del neutro. Otra fuente de material alcalino lo forman todas aquellas sustancias buffer contenidas en los lodos crudos alimentados al digestor.

Una vez que el pH ha empezado a descender diversos materiales pueden agregarse al digestor. Cada uno de ellos posee ventajas y desventajas, la elección sobre cual usar dependerá de la disponibilidad, el costo y las preferencias en almacenamiento y manejo. El mezclado es muy importante durante la adición de cualquier material, a fin de prevenir que se localice en un lugar específico dentro del digestor.

Los materiales de uso más común son cal (Ca(OH)_2), bicarbonato de sodio (NaHCO_3), carbonato de sodio (Na_2CO_3), hidróxido de sodio (NaOH), amoníaco (NH_3), o bicarbonato de amonio (NH_4HCO_3). Debido a su bajo costo los más utilizados son el

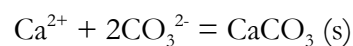
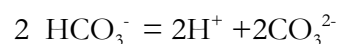


hidróxido de sodio, el amoníaco y la cal, sin embargo el uso de estos químicos implica riesgos considerables para la estabilidad del proceso que deben ser evaluados antes de introducirlos. Por ejemplo, la cal es el material más común debido a su disponibilidad, relativo bajo costo y facilidad en el manejo (se prefiere el uso de cal apagada Ca(OH)_2 sobre la cal viva CaO por el cuidado que la segunda implica en el manejo y dosificación) . Sin embargo es la sustancia que implica riesgos mayores, y no puede mantenerse control del pH una vez que se ha elevado por encima de 6.8 (Rittman, McCarty, 2001). Cuando la cal se agrega se remueve CO_2 del líquido del digestor formando así HCO_3^- necesario para aumentar la alcalinidad, la reacción se da de la siguiente manera:



Como puede apreciarse para la reacción es necesario el consumo de dióxido de carbono, esta es la reacción ideal cuando hay una buena dosificación, sin embargo si se agrega más cal de la necesaria se agotara el dióxido presente en la fase líquida lo que hará que el CO_2 presente en la fase gaseosa pase a la fase líquida alterando el equilibrio, este desequilibrio resulta en la creación de vacío debido a la reducción de la presión total del gas. Si no se hace nada para liberar esta presión el digestor podría colapsarse.

Un segundo costo para la formación de condiciones alcalinas mediante el uso de cal es la formación de $\text{CaCO}_3(\text{s})$.



A medida que la concentración del bicarbonato aumenta también aumenta la del carbonato de calcio, el cual al llegar a un cierto punto se precipita, este precipitado puede



estar en suspensión igual que el resto de las partículas o puede formar incrustaciones dentro del equipo, de manera que tiene que ser retirada cierta cantidad lo que resulta en la remoción de alcalinidad de bicarbonato también. Rittmann (2001) menciona que todas estas reacciones nocivas se presentan justo cuando se ha elevado el pH por encima de 6.8, si se continua agregando cal la concentración del CO_2 seguiría cayendo casi al 10% y el pH se incrementara hasta 8.0.

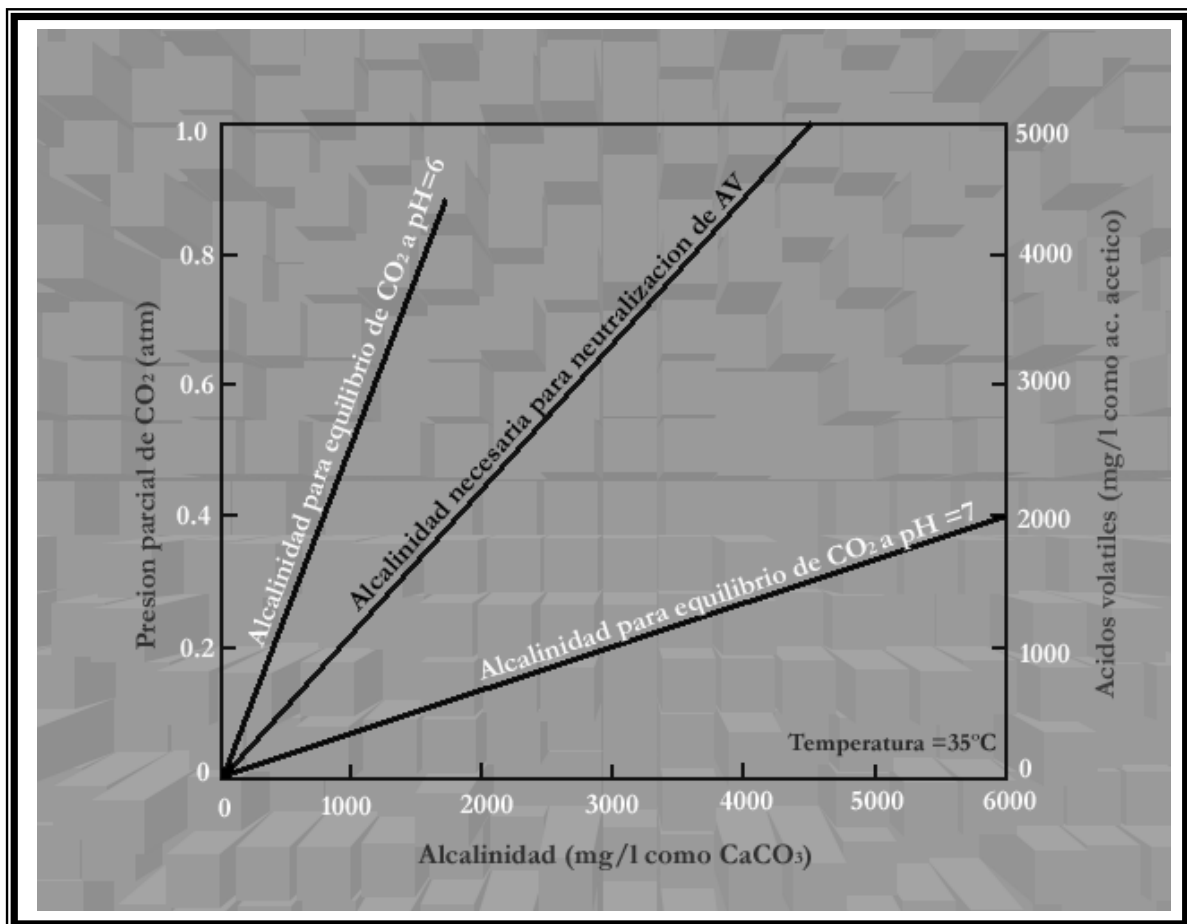


Fig. 4.11 Diagrama de diseño para alcalinidad

Cuando se adicionan hidróxidos o carbonatos al digestor se pueden evitar los problemas derivados de la formación de precipitados insolubles, sin embargo si se excede en la cantidad aplicada problemas de vacío se presentarán.

Cuando se usa bicarbonato de sodio se evitan muchos problemas mencionados previamente como el consumo de CO_2 , pero su costo es más elevado y el sodio puede



inhibir el proceso. Si es amoníaco el que va a usarse debe tenerse mucho cuidado en la dosificación ya que se presentarían problemas de toxicidad si se agrega demasiado.

Es así que la introducción de materiales alcalinos debe hacerse con mucho cuidado y pleno conocimiento de las reacciones secundarias que tienen lugar o mejor evitar su adición. Otra medida que se toma en caso de que la producción de ácidos se eleve consiste en inyectar agua al proceso para diluir tanto la carga orgánica como la concentración de ácidos formados hasta ese momento.

Los ácidos volátiles y la alcalinidad son medidos a fin de conocer el avance del proceso y así poder tener un control del mismo. Usualmente los resultados de las pruebas se expresan en forma de un cociente (Acidez/Alcalinidad). El digestor trabaja mejor cuando los AGV (ácidos grasos volátiles)/Alc (alcalinidad) es menor a 0.25, y algunos prefieren mantenerlo a 0.15 (Wheatley, 1990). Esto quiere decir que la alcalinidad es cuatro veces mayor que la acidez, un margen suficiente para amortiguar los efectos de una variación en la carga de alimentación.

5.4.7. Materiales Tóxicos o Inhibitorios

La digestión anaerobia como todos los procesos biológicos es susceptible a la acción de materiales y sustancias que en cantidades o concentraciones altas resultarían tóxicas o inhibitorias para la actividad microbiana. Usualmente los problemas de toxicidad se detonan cuando alguno de los siguientes compuestos se introduce al proceso:

- Hidrocarburos, derrames accidentales de algún derivado del petróleo como gasolina, diesel, grasas, aceites para motores, etc.
- Metales pesados, provenientes de las descargas de las industrias de la platería, joyería, curtidoras, etc.
- Sulfuros, provenientes de la metalurgia, minas de carbón, etc.



- Fenoles y resinas plásticas, residuos orgánicos en general, provenientes de la industria química, producción de pinturas, manufactura de muebles y producción de carbón y gas.
- Insecticidas y fungicidas.
- Amoníaco, en este caso el amoníaco se forma dentro del digestor cuando desechos con un alto contenido de proteínas son alimentados.

Es importante señalar que la toxicidad esta en función de la concentración, efectos de antagonismo y sinergismo, formación de complejos y aclimatación. La concentración es muy importante ya que muchos de estos compuestos sirven como estimuladores del proceso a bajas concentraciones. La tasa de crecimiento aumentará conforme la concentración se eleve hasta llegar a ser constante, y eventualmente disminuirá. En general cuando una sustancia se encuentra por debajo de su concentración límite servirá como estimulador, cuando ya haya sobrepasado este límite la actividad metabólica comenzará a mermar, y se dice entonces que la sustancia tiene un efecto tóxico, de esta forma, una sustancia puede ser considerada como sustrato o como tóxico dependiendo del rango en el que se encuentre su concentración (ver Fig. 4.12).

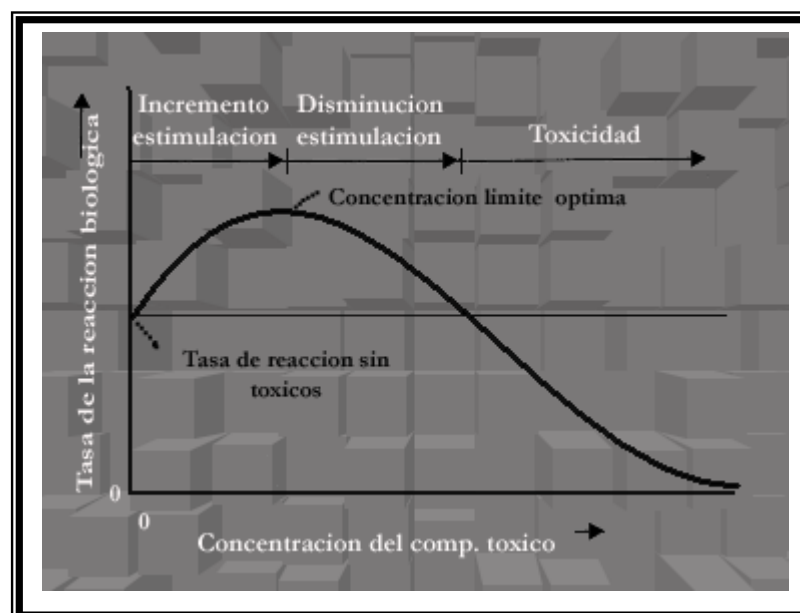


Fig. 4.12 Efecto de la concentración de un compuesto tóxico en la tasa de reacción biológica



Los efectos de antagonismo y sinergismo también están en función de la concentración. El antagonismo es la reducción del efecto tóxico de una sustancia por la presencia de otra. El sinergismo es el incremento en la toxicidad aparente de una sustancia por la presencia de otra en el medio ambiente. Estos efectos suelen presentarse entre sustancias que tienen una relación química.

La magnitud del efecto tóxico provocado por una sustancia puede minimizarse considerablemente si la concentración es aumentada lentamente. La mayoría de los microorganismos desarrollan cierta resistencia a materiales tóxicos siempre y cuando se les de tiempo suficiente para desarrollar estructuras que minimicen el impacto de dicho material, a este fenómeno se le llama aclimatación, en él las bacterias logran reacomodar las rutas metabólicas que se bloquean con la presencia del material tóxico.

En la naturaleza existen distintos tipos de cepas y algunas resultan ser menos sensibles que otras, por lo que el problema con los materiales tóxicos puede solucionarse si se inoculan cepas más resistentes.

Por estas razones es difícil establecer límites a los cuales un material resulta tóxico, no obstante se pueden establecer métodos para prevenir efectos nocivos o minimizarlos.

Una vez que se ha detectado un problema por la presencia de materiales tóxicos existen distintas vías que se pueden seguir para evitar el colapso del proceso, el objetivo de todas ellas será reducir la concentración del tóxico hasta los límites en donde no implique ningún riesgo para la biomasa. La primera medida es preventiva y consiste en remover el tóxico mucho antes de que entre al digestor, si se detecta o se sospecha de la presencia de algún material inhibitorio es posible retirarlo desde los clarificadores muchos pasos antes, esta medida implica conocer las actividades industriales de la región y tener caracterizado el flujo, además de conocer las concentraciones máximas y mínimas. Si esta opción resulta difícil de aplicar y el tóxico ya ha entrado al digestor entonces se podrá diluir su



concentración, la dilución puede llevarse a cabo mediante agua o con algún otro flujo (Ej. contenido de un digestor cercano).

Todos los materiales que producen un efecto tóxico deben estar disueltos en el contenido del digestor, al estar en solución los microorganismos pueden introducirlos en su metabolismo. Si la concentración disponible de la sustancia inhibitoria puede disminuirse con algún procedimiento como la formación de un complejo insoluble o un precipitado los microorganismos no podrán hacer uso de él minimizando los efectos dañinos. Por ejemplo, la toxicidad de algunos metales pesados como el cobre y el zinc puede ser removida mediante la adición de sulfuros, éstos forman un precipitado insoluble con los metales. Así mismo cuando la toxicidad es producida por un aumento en la concentración de los sulfuros, se pueden agregar metales y la formación del precipitado disminuirá la toxicidad.

Variaciones en el pH pueden cambiar la forma del compuesto tóxico alterando así su toxicidad, por ejemplo el amoníaco es tóxico en su forma primaria NH_3 si se consigue mantener el pH a niveles bajos, el equilibrio ácido base se dirigirá hacia la formación de NH_4^+ , la cual no representa ningún peligro para el metabolismo microbiano.

Existe también la posibilidad de agregar materiales que tengan un efecto contrario al producido por el compuesto tóxico, estos materiales reciben el nombre de antagonicos.

Otros métodos para controlar la toxicidad son específicos al tipo de contaminante que se presente, a continuación se tratan los más importantes.

5.4.7.1. Sales Alcalinas

Usualmente las aguas residuales industriales contienen concentraciones inhibitorias de sodio, potasio, calcio y magnesio, estas sales vienen disueltas y pueden causar alteraciones en el desempeño del digestor. Sin embargo en la mayor parte de los casos la concentración de estas sales se eleva hasta niveles tóxicos al tratar de corregir el pH, como se menciono previamente la adición de bicarbonato de sodio o cualquier otra base que



contenga sodio, magnesio, calcio o potasio puede inhibir el proceso debido a la alta concentración de la sal. En la siguiente tabla se enlistan los efectos de distintos cationes, así mismo se menciona la concentración a la cual son estimulantes o inhibitorios.

Tabla 4.3 Cationes comunes, concentraciones inhibitorias y estimulatorias

Catión	Estimuladorio mg/l	Inhibición Moderada mg/l	Inhibición Alta mg/l
Sodio	100-200	3500-5500	8000
Potasio	200-400	2500-4500	12000
Calcio	100-200	2500-4500	8000
Magnesio	75-150	1000-1500	3000

Fuente: MacCarty 2001

Las concentraciones estimulantes son deseables debido a las mejoras en el desempeño general del proceso. Un fenómeno asociado con la toxicidad de las sales es el efecto antagónico que tienen unos con otros, si alguno de estos elementos esta presente en concentraciones tóxicas puede ser controlado agregando algún otro catión, de igual forma si varios cationes se encuentran en concentraciones estimulantes podrán servir como medida de control si alguno se encuentra en concentración inhibitoria moderada.

Perry L. McCarty (1964) menciona que los antagonistas funcionan mejor cuando las sales son cloruros, en caso de que no estén disponibles o que sean demasiado costosas el mejor método es la dilución. También demostraron que 300 mg/l de potasio reducen al 80% los efectos tóxicos de 7000 mg/l de sodio. El efecto inhibitorio desaparecerá completamente si se agregan 150 mg/l de calcio, sin embargo la adición de calcio sin la presencia de sodio no servirá de nada.



5.4.7.2. Amoniac

El amoniac se produce durante la degradación anaerobia de compuestos con alto contenido proteico, normalmente se combina con CO_2 y agua para formar bicarbonato de amonio, lo que constituye un buffer dentro del sistema, sin embargo cuando la concentración de proteínas es muy alta la concentración de amoniac también se elevará hasta alcanzar efectos tóxicos. Esto es muy común en sistemas en donde se tratan residuos provenientes de la cría de ganado porcino.

El amoniac se encuentra en equilibrio con el ión amonio dentro del digestor, y aunque en la mayoría de los casos es el NH_3 el que causa los efectos nocivos, también se produce inhibición si el ión amonio se acumula.



A pH mayores de 7.4 el amoniac (NH_3) producirá inhibición si se encuentra en concentraciones entre 1500 y 3000 mg/l. Bajo estas condiciones la producción de ácidos volátiles se incrementará lo que hará que baje el pH y el efecto tóxico se reducirá. La concentración de ácidos volátiles permanecerá en niveles altos a menos que el pH se reduzca un poco más, para esto se agrega ácido clorhídrico (HCl) hasta alcanzar un pH igual a 7. Es importante señalar que si la inhibición es provocada por el ión amonio, no servirá de nada bajar el pH, por lo que la adición de HCl no tendrá ningún efecto, en este caso la única vía es la dilución del contenido de nitrógeno amoniacal.

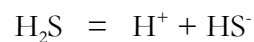
Cuando la concentración de amoniac ha rebasado los 3000 mg/l, es lo suficientemente tóxico como para producir un deterioro considerable sin importar el pH (Perry L. McCarty, 1964). El único método de control viable consiste en diluir el contenido del digestor ya sea agregando lodos crudos con bajas concentraciones de nitrógeno, retirando sobrenadante o agregando lodos digeridos.



5.4.7.3. Sulfuros

Los sulfuros que se encuentran en el proceso de digestión, tienen su origen en diversas fuentes, cantidades pequeñas de sulfuros vienen contenidas en las aguas domésticas, concentraciones mayores provienen de la actividad industrial (p. Ej. Ind. metalúrgica) y finalmente otra porción se suma durante la descomposición de las proteínas durante la biodegradación anaerobia. La toxicidad provocada por sulfuros también se presenta en residuos que contienen altas concentraciones de sulfatos, ya que al introducirse al proceso los sulfatos son usados como aceptores de electrones y finalmente se convierten en sulfuros.

Una vez dentro del digester podemos encontrar a los sulfuros en dos formas: formando un sulfuro insoluble con metales pesados, (ya sea con cobre, zinc o hierro) que se precipita y no representa ningún daño para el proceso, y como sulfuros solubles. Estos últimos representan los mayores riesgos cuando su concentración se eleva, en particular la forma ionizada del ácido sulfhídrico que se encuentra disuelta en el contenido del digester.



Ciertas cantidades de azufre son necesarias para el crecimiento bacteriano, de manera que las bacterias son capaces de tolerar entre 50-100 mg/l de sulfuros solubles presentando leves afectaciones, incluso pueden manejar concentraciones de 200 mg/l, pero una vez que se ha sobrepasado este límite, la presencia de H_2S provoca inhibiciones considerables (McCarty, 1964). Además de los efectos que produce en el metabolismo microbiano, el H_2S es un gas muy oloroso que afecta la salud de los trabajadores y las condiciones de seguridad dentro del sistema anaerobio, ya que también es corrosivo.

El impacto de los sulfuros dentro del digester no es del todo negativo, su presencia también es necesaria para minimizar los efectos en caso de que una alta concentración de



metales pesados sea introducida al proceso. Cuando se detectan efectos inhibitorios causados por los sulfuros se puede (1) diluir el contenido del reactor (2) identificar, separar y contener el flujo de tóxicos y (3) agregar alguna sal de hierro para precipitar los sulfuros.

5.4.7.4. Metales Pesados

Las sales de cobre, níquel, zinc y cadmio son solubles y también tóxicas a bajas concentraciones. El mercurio también es tóxico a concentraciones pequeñas. Sólo 1 mg/l de cualquiera de los metales arriba mencionados producen efectos inhibitorios considerables. Como se menciona en la sección previa la presencia de sulfuros ayuda a minimizar el impacto producido por los metales pesados ya que forma compuestos insolubles con ellos. Otro factor que ayuda a minimizar la toxicidad producida por metales pesados es que el hierro normalmente se encuentra en concentraciones altas, lo cual no presenta ningún efecto desfavorable en el metabolismo de la biomasa, y junto con los sulfuros forma complejos buffer ante la introducción de otro tipo de metal. El FeS se encuentra en solución y al estar en presencia de otro metal el Fe es desplazado, en ese momento se forma un precipitado insoluble lo que impide la permanencia de condiciones tóxicas. En algunas ocasiones se agrega ácido sulfúrico o sulfuros, sin embargo se debe ser muy cauteloso con el uso de estas sustancias ya que los sulfuros por sí mismos pueden inhibir el proceso si se excede la concentración límite, por otra parte, el ácido sulfúrico requiere de condiciones de transporte uso y almacenaje muy especiales, por lo que su uso debe hacerse bajo un estricto control.

5.4.7.5. Compuestos Orgánicos

Los compuestos orgánicos que resultan tóxicos para el proceso de anaerobiosis provienen de los residuos industriales en altas concentraciones. Sin embargo, a bajas concentraciones pueden convertirse en fuente de alimento para los microorganismos, con



un diseño adecuado la mayoría pueden ser tratados por vía anaerobia con buenos resultados. A continuación se presenta una tabla con diversos tipos de contaminantes y las concentraciones a las cuales producen efectos inhibitorios.

Tabla 4.4 Concentración de compuestos orgánicos que reducen la producción de gas en un 50%

Tóxico	Concentración mg/l	Tóxico	Concentración mg/l
Hidrocarburos		Alcanos Halogenados	
Alcanos		Clorometano	50
ciclohexano	150	Cloroformo	1
Octano	2	Tetracloruro de carbono	6
Decano	0.35	Pentacloroetano	11
Aromáticos		Hexacloroetano	22
Benceno	1200	Bromometano	4
Tolueno	580	Bromodiclorometano	2
Xileno	250	Alquenos Halogenados	
Fenoles		Tricloroetano	13
Fenol	2100	Tetracloroetano	22
o-Cresol	890	1,1-Dicloroetano	8
p-Cresol	91	Aromáticos Halogenados	
Alcoholes		Clorobenceno	270
Metanol	22000	1,2-Diclorobenceno	150
Etanol	43000	2-Clorotolueno	53
1-propanol	34000	2-cloro-p-xileno	89
1-butanol	11000	2-Clorofenol	160
Cetonas		Miscelaneos	
Acetona	50000	Hidroquinona	2800
2-Butanona	28000	Acetonitrilo	28000
2-Hexanona	6100	Acilonitrilo	90

Fuente: Adaptado de Perry L. McCarty, 2001