

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO**

**Diseño, Construcción y Puesta en Marcha de un Biodigestor a Escala Piloto  
para la Generación de Biogás y Fertilizante Orgánico**

**Jairo Andrés Salamanca Tamayo**

Tesis de grado presentada como requisito para la obtención del título de Ingeniero Químico

Quito

Noviembre 2009

© Derechos de autor (Copyright)

Jairo Andrés Salamanca Tamayo

2009

## **Agradecimientos**

El presente trabajo se ha realizado en el Laboratorio de Desarrollo de Energías Renovables (LADEA) del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad San Francisco de Quito, bajo la dirección de la Dr. – Ing. Daniela Almeida, a quien deseo manifestar mi más profundo y sincero agradecimiento por su continua y valiosa dirección, así como la constante ayuda prestada que ha hecho posible la finalización de este proyecto.

Asimismo quiero expresar mi reconocimiento al Dr. Carlos Fabara, al Ing. Marcelo Albúja y Ing. Cesar Octavio León, por sus valiosos conocimientos impartidos y el estímulo durante todo el transcurso de la carrera.

Agradezco a mi padre por darme la vida y por enseñarme que en la vida hay que luchar para vivirla y ser merecedor de ella. Gracias papá por todo.

A mi hermana por apoyarme y por creer sinceramente en lo que hago.

A amigos y compañeros por la desinteresada colaboración y amistad que me han brindado durante estos años, ante cualquier problema.

A Marco Paredes por ser el proveedor de materia orgánica animal para la realización de este proyecto.

## Resumen

En este trabajo se realizó el diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor a escala piloto para la generación de biogás y fertilizante orgánico por medio de la digestión anaeróbica de desechos orgánicos animales y vegetales. En la primera parte se diseñó y construyó el biodigestor con todos sus equipos y accesorios como son bombas, tanques de almacenamiento, contador de gas, etc., además del sistema de control. Una vez construido se prosiguió con la puesta en marcha en frío para la comprobación del sistema, y finalmente la puesta en marcha en caliente y la operación del proceso. Durante estos dos últimos pasos se investigó la biodigestión de los desechos orgánicos con una mezcla definida entre la materia orgánica animal y vegetal para maximizar la producción de biogás. Para esto se controló una serie de parámetros como pH, temperatura, agitación, reducción de DQO, TS, oTS, contenido de nitrógeno y fósforo, tiempo de residencia, producción de biogás, entre otros.

Por otro lado, como producto secundario de la digestión anaeróbica de los desechos orgánicos se produjo un fertilizante orgánico en fase líquida de alta calidad que sirve para reducir la cantidad de fertilizantes sintéticos que requieren los cultivos. Además se estudiaron tratamientos necesarios para la estabilización del fertilizante orgánico posterior a la salida del biodigestor.

Finalmente, en el biodigestor piloto se logró producir 400 litros de biogás por día con 400 litros de volumen de reactor y una carga orgánica de  $2,01 \text{ kg}_{\text{DQO Ali}} / \text{m}^3 \cdot \text{d}$ . Lo que equivale a una generación de  $1,012 \text{ kg biogás} / \text{m}^3_{\text{reactor}} \text{ día}$ . Para el fertilizante orgánico se logró producir 30 litros por día con un pH de 6,56 y un tiempo de residencia de 16 días. Para su estabilización se utilizó en tratamiento térmico con una exposición de 20 minutos.

## Abstract

This thesis project is the design, construction and start up of a pilot scale biodigester for the generation of biogas and organic fertilizer by anaerobic digestion of organic animal and vegetable waste. Initially the biodigester was designed and built including all equipment, accessories such as pumps, storage tanks, gas counter, etc. and control system. Once the reactor was built a cold start up followed, this was necessary to test the system. Finally the hot start up was completed along with the process operation. During these last two steps, the biodigestion of the organic waste was investigated, defining along the way the most efficient mixture of animal and vegetable organic material in the production of biogas. To accomplish this a series of parameters such as pH, temperature, agitation, DQO reduction, TS, oTS, nitrogen and phosphor content, residence time, biogas production along with other parameters were controlled.

The anaerobic biodigestion of organic waste produces, as a secondary product, a high quality organic fertilizer in liquid phase that can be used to reduce the amount of synthetic fertilizers need to stabilize organic fertilizers required in cultures. In addition various treatments used in the stabilization of this organic fertilizer were studied posterior to the biodigestion.

Finally, the pilot biodigester produces 400 liters of biogas per day with a reactor volume of 400 liters and an organic feed of  $2.01 \text{ kg}_{\text{DQO Ali}} / \text{m}^3 \cdot \text{d}$ . This is the equivalent to the generation of  $1.012 \text{ kg biogas}/\text{m}^3_{\text{reactor}} \cdot \text{d}$ . With respect to the organic fertilizer 30 liters were produced per day with a pH of 6.56 and a residence time of 16 days. In order to stabilize the fertilizer a thermal treatment with a 20 minute exposure period was used.

## Índice General

<b>Agradecimientos .....</b>	<b>iv</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>v</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>vi</b>
<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Justificación de proyecto .....	4
1.3. Objetivos .....	5
1.3.1. Objetivos principales .....	5
1.3.2. Objetivos específicos .....	5
<b>2. Fundamentos Teóricos .....</b>	<b>6</b>
2.1. Digestión anaerobia .....	6
2.1.1. Hidrólisis .....	9
2.1.2. Acidogénesis .....	9
2.1.3. Acetogénesis .....	10
2.1.4. Metanogénesis .....	10
2.2. Biodigestores .....	12
2.3. Clasificación de los biodigestores .....	13
2.3.1. Digestores de carga en batch .....	13
2.3.2. Digestor de mezcla completa .....	14
2.3.2.1. Digestores de régimen semi-continuo .....	15
2.3.2.2. Digestores de régimen continuo .....	17
2.3.3. Digestores con retención de biomasa sin recirculación .....	19
2.3.4. Digestores de dos etapas .....	23
2.4. Parámetros relacionados al proceso de digestión anaeróbica .....	24

2.4.1.	Sustratos .....	24
2.4.2.	Temperatura del proceso .....	25
2.4.3.	Tiempo de retención hidráulico (TRH) .....	28
2.4.4.	pH .....	29
2.4.5.	Degradación.....	30
2.4.6.	Nutrientes .....	30
2.4.7.	Agitación y mezcla .....	31
2.4.8.	Promotores e inhibidores de la fermentación .....	36
2.5.	Propiedades que definen a la biomasa .....	38
2.5.1.	Sólidos totales (TS) .....	38
2.5.2.	Sólidos volátiles (oTS). .....	39
2.5.3.	Carga orgánica volumétrica (COV).....	40
2.5.4.	Demanda química de oxígeno DQO.....	40
2.5.5.	Relación carbono – nitrógeno (C: N) .....	41
2.6.	Producción de biogás .....	42
2.7.	Producción de lodos.....	43
2.8.	Acondicionamiento y aprovechamiento de biogás .....	44
2.8.1.	Características del biogás .....	44
2.8.2.	Purificación de biogás .....	46
2.9.	Aprovechamiento del bioabono (BIOL) .....	50
2.9.1.	Característica del bioabono .....	51
2.9.2.	Usos del bioabono como fertilizante .....	52
2.9.3.	Efectos del bioabono como fertilizante .....	53
2.9.4.	Formas de aplicación del bioabono .....	53
<b>3.</b>	<b>Métodos Experimentales.....</b>	<b>55</b>

3.1.	Descripción del proceso de digestión anaerobia.....	55
3.1.1.	Preparación de la materia prima.....	55
3.1.2.	Operación de la planta piloto.....	56
3.1.3.	Tratamiento del biogás.....	58
3.1.4.	Tratamiento del fertilizante orgánico (biol).....	59
3.2.	Descripción de la planta piloto.....	61
3.2.1.	Diagrama de flujo.....	61
3.2.2.	Equipos utilizados.....	65
3.2.3.	Accesorios y sistemas de control.....	71
3.3.	Puesta en marcha.....	75
3.4.	Análisis realizados.....	78
3.4.1.	Medición del pH.....	78
3.4.2.	Contenido de sólidos totales.....	78
3.4.3.	Contenido de sólidos totales orgánicos.....	79
3.4.4.	Determinación de la demanda química de oxígeno.....	81
3.4.5.	Determinación de nitrógeno total.....	81
3.4.6.	Determinación del fósforo total.....	82
3.4.7.	Determinación de Coliformes totales y Echerichia coli (E. coli).....	82
<b>4.</b>	<b>Resultados y Discusión.....</b>	<b>84</b>
4.1.	Construcción y puesta en marcha.....	85
4.2.	Resultados de la operación de la planta piloto.....	85
4.3.	Análisis de la alimentación, la mezcla reactiva y el biol.....	96
4.4.	Interpretación y evaluación de la operación de la planta piloto.....	100
4.5.	Balance de masa de la planta piloto.....	103
4.6.	Caracterización y estabilización del biol.....	108



<b>5. Conclusiones y Recomendaciones .....</b>	<b>111</b>
<b>6. Bibliografía.....</b>	<b>115</b>
<b>7. Anexos.....</b>	<b>119</b>
<b>Anexo 1 .....</b>	<b>119</b>
<b>Anexo 2 .....</b>	<b>121</b>
<b>Anexo 3 .....</b>	<b>124</b>
<b>Anexo 4 .....</b>	<b>126</b>
<b>Anexo 5 .....</b>	<b>131</b>

## Índice de Figuras

<b>Fig. 2.1.</b> Etapas en la producción de metano a partir de residuos orgánicos.....	8
<b>Fig. 2.2.</b> Biodigestor modelo Batch.....	14
<b>Fig. 2.3.</b> Digestor de mezcla completa (CSTR) .....	15
<b>Fig. 2.4.</b> Digestor tipo Hindú.....	16
<b>Fig. 2.5.</b> Digestor tipo Chino.....	17
<b>Fig. 2.6.</b> Digestores de régimen continuo.....	18
<b>Fig. 2.7.</b> Digestores de filtro anaeróbico con relleno irregular.....	20
<b>Fig. 2.8.</b> Digestores de filtro anaeróbico con relleno regular o lecho fichto .....	20
<b>Fig. 2.9.</b> Lecho Fluidizado .....	21
<b>Fig. 2.10.</b> Digestor de lecho de lodo granular (UASB).....	22
<b>Fig. 2.11.</b> Digestor de dos etapas .....	23
<b>Fig. 2.12.</b> Diagrama del efecto de la temperatura y el tiempo de retención hidráulico con respecto a la producción de gas. ....	26
<b>Fig. 2.13.</b> Agitador vertical .....	32
<b>Fig. 2.14.</b> Agitador vertical con motor sumergible .....	33
<b>Fig. 2.15.</b> Agitador horizontal .....	34
<b>Fig. 2.16.</b> Agitador inclinado.....	35
<b>Fig. 3.1.</b> Diagrama de bloque del proceso de producción de biogás y fertilizante orgánico.....	57
<b>Fig. 3.2.</b> Diagrama de bloque del tratamiento de biogás .....	58
<b>Fig. 3.3.</b> Diagrama de bloque del tratamiento del fertilizante orgánico (biol) con aireación.....	59
<b>Fig. 3.4.</b> Diagrama de bloque del tratamiento del fertilizante orgánico (biol) con cal.....	60
<b>Fig. 3.5.</b> Diagrama de bloque del tratamiento térmico del fertilizante orgánico (biol).....	60
<b>Fig. 3.6.</b> Diagrama de flujo de la planta piloto.....	62
<b>Fig. 3.7.</b> Tanque de mezcla y alimentación .....	65
<b>Fig. 3.8.</b> Trituradora de martillos .....	66
<b>Fig. 3.9.</b> Bomba centrífuga.....	67
<b>Fig. 3.10.</b> Reactor semi- continuo para la digestión anaerobia. a) sin aislamiento térmico, b) con aislamiento. ....	68
<b>Fig. 3.11.</b> Disecador de gas .....	69

<b>Fig. 3.12.</b> Condensador o trampa de vapor .....	69
<b>Fig. 3.13.</b> Desulfurizador.....	70
<b>Fig. 3.14.</b> Contador de gas.....	70
<b>Fig. 3.15.</b> Tanques de Almacenamiento .....	71
<b>Fig. 3.16.</b> Medidor de caudal.....	72
<b>Fig. 3.17.</b> Sistema eléctrico de control automático .....	73
<b>Fig. 4.1.</b> Variación de la temperatura con respecto al tiempo de operación del biodigestor.....	86
<b>Fig. 4.2.</b> Variación del pH con respecto al tiempo de operación del biodigestor.....	88
<b>Fig. 4.3.</b> Variación de la recirculación con respecto al tiempo de operación del biodigestor ...	89
<b>Fig. 4.4.</b> Variación del volumen de alimentación con respecto al tiempo de operación del biodigestor .....	90
<b>Fig. 4.5.</b> Variación de la carga orgánica de alimentación con respecto al tiempo de operación del biodigestor .....	91
<b>Fig. 4.6.</b> Variación del tiempo de residencia hidráulico con respecto al tiempo de operación del biodigestor .....	92
<b>Fig. 4.7.</b> Variación del consumo de aditivos para elevar el pH diario con respecto al tiempo de operación del biodigestor.....	94
<b>Fig. 4.8.</b> Variación de la generación de gas por día con respecto al tiempo de operación del biodigestor .....	96
<b>Fig. 4.9</b> Sólidos totales del biol con respecto al tiempo de operación del biodigestor.....	97
<b>Fig. 4.10.</b> Sólidos orgánicos totales del biol con respecto al tiempo de operación del biodigestor .....	98
<b>Fig. 4.11.</b> Demanda química de oxígeno con respecto al tiempo de operación del biodigestor	99
<b>Fig. 4.12.</b> Relación del flujo másico de DQO en la alimentación y la descarga con respecto al tiempo de operación del biodigestor.....	101
<b>Fig. 4.13.</b> Comparación del factor de degradación y la producción de biogás con respecto al tiempo de operación del biodigestor.....	102
<b>Fig. 4.14.</b> Diagrama del espacio de control para el balance de masa .....	104

## Índice de Tablas

<b>Tabla 2-1.</b> Reacciones representativa de la digestión anaerobia .....	12
<b>Tabla 2-2.</b> Nomenclatura de procesos y equipos de la planta industrial de biogás .....	18
<b>Tabla 2-3.</b> Rendimiento de gas con materiales empleados comúnmente a diferente temperatura. ....	27
<b>Tabla 2-4.</b> Concentración inhibidora de inhibidores comunes. ....	38
<b>Tabla 2-5.</b> Contenido de sólidos totales aproximados de materiales de fermentación utilizados comúnmente en las zonas rurales. ....	39
<b>Tabla 2-6.</b> Relación carbono a nitrógeno de las materias primas empleadas .....	42
<b>Tabla 2-7.</b> Composición del biogás. ....	44
<b>Tabla 2-8.</b> Propiedades de los componentes del biogás. ....	45
<b>Tabla 2-9.</b> Equivalencias energéticas para 1 m <sup>3</sup> de biogás. ....	45
<b>Tabla 2-10.</b> Características del biogás en comparación con otros gases combustibles .....	46
<b>Tabla 3-1.</b> Nomenclatura de procesos y equipos .....	63
<b>Tabla 3-2.</b> Nomenclatura válvulas .....	63
<b>Tabla 3-3.</b> Nomenclatura del tipo control .....	63
<b>Tabla 3-4.</b> Descripción del flujo de la planta piloto .....	64
<b>Tabla 3-5.</b> Cantidad de accesorios .....	74
<b>Tabla 4-1.</b> Datos necesarios para los cálculos del balance de masa .....	104
<b>Tabla 4-2.</b> Pasos y fórmulas para el balance de masa .....	105
<b>Tabla 4-3.</b> Balance de masa .....	106
<b>Tabla 4-4.</b> Comparación de la producción real con la calculada .....	107
<b>Tabla 4-5.</b> Caracterización del biol según el tratamiento de estabilización .....	108

## Nomenclatura

COV	Carga orgánica volumétrica
$\dot{m}_{\text{biogás}}$	Cantidad de biogás producida
$\dot{V}$	Volumen de la carga diaria
AC	Acumulado
C	DQO consumido
CSTR	Continuos Stirred Tank Reactor
DQO	Demanda Química de Oxígeno
F	Alimentación
$m_1$	Masa de la muestra inicial
$m_2$	Masa de la muestra seca
$m_3$	Masa de la muestra calcinada
MO	Materia orgánica
Ots	Sólidos Totales Orgánicos
P	Producto
$P_{\text{biogás}}$	Producción específica de biogás
pH	Potencial de Hidrógeno
$R_{\text{biogás}}$	Velocidad de producción de biogás
$R_{\text{DQO}}$	Velocidad de degradación de DQO
RPM	Revoluciones por minuto
SDV	Sólidos disueltos volátiles
SST	Sólidos suspendidos totales
SSV	Sólidos suspendidos volátiles
TRH	Tiempo de residencia hidráulico
TS	Sólidos Totales
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
V	Volumen
$V_{\text{gas producido}}$	Volumen de biogás producido
$V_{\text{reactor}}$	Volumen del reactor
$\rho_{\text{biogás}}$	Densidad del biogás
$\rho_{\text{lodos}}$	Densidad de lodos
$\tau$	Tiempo de residencia hidráulico

## **1. Introducción**

### **1.1. Antecedentes**

En la actualidad el 90 % de las necesidades energéticas de nuestro planeta son satisfechas con la utilización de combustibles fósiles que se obtienen del petróleo, del gas natural y del carbón. Estos combustibles fósiles no renovables y sus derivados están experimentando crecientes costos debido a su agotamiento (1). A pesar de su alto uso como combustible, su combustión es altamente contaminante debido al aporte del CO<sub>2</sub> en la atmosfera. El carbón de los hidrocarburos se encontraba atrapado en los yacimientos durante millones de años. Durante la combustión de los combustibles fósiles se libera CO<sub>2</sub> en la atmosfera aumentando su concentración. Este gas aporta significativamente al cambio climático, ya que su estructura molecular posee un efecto invernadero al almacenar calor en la atmosfera.

Las energías alternativas a diferencia de las energías no renovables, son energías inagotables. Entre las energías renovables se encuentran el viento, el sol, el agua, la biomasa o los residuos orgánicos (2) por lo que se plantea la necesidad de encontrar una tecnología apropiada para que estos recursos puedan ser usados como medio para producir energía.

Entre las ventajas de los distintos tipos de energía renovable se encuentra la no emisión de gases contaminantes como resultado de la combustión, ya que el dióxido de carbono liberado en el proceso es igual al dióxido de carbono absorbido por el material durante su crecimiento, y la no generación de residuos peligrosos de difícil tratamiento. Además las distintas fuentes de energía son recursos naturales o domésticos, por lo que su disposición no está afectada por variaciones de precio a nivel mundial, no se encuentran distribuidas en un territorio específico y se pueden generar de cualquier actividad humana, principalmente en los procesos agrícolas, ganaderos y los del propio hombre, tal como, basuras y aguas residuales, por lo que al utilizar estos residuos como fuente de energía, a su vez se reduce significativamente el problema de la disposición de basura, mejora la vida de los campesinos, incrementa la producción agrícola y preserva el medio ambiente (3).

Dentro de las energías renovables encontramos varios tipos como la energía eólica, energía solar, energía hídrica, utilización energética de biomasa, etc. La energía eólica proviene de la

energía cinética contenida en el viento que debe tener una velocidad promedio de 5 a 12 metros por segundo para que puede convertirse en energía mecánica o eléctrica por medio de aeroturbinas, las cuales están integradas principalmente por un arreglo de aspas, un generador y una torre (2). La energía hídrica se obtiene del aprovechamiento de las energías cinética y potencial de la corriente de ríos, saltos de agua o mareas para ser transformada a energía eléctrica por medio de turbinas (2). La energía solar que recibe nuestro planeta es resultado de un proceso de fusión nuclear que tiene lugar en el interior del sol. Esa radiación solar se puede transformar directamente en electricidad por medio de paneles solares (2). Finalmente, la utilización energética de la biomasa, que se refiere a la madera, las cosechas, los residuos de la cosecha o la basura orgánica, se puede realizar mediante la combustión de la misma o a través de la digestión anaeróbica en la cual se produce biogás. Biogás se llama al metano que se puede extraer de estos residuos en un generador de gas o un digestor que también es usado para generar energía eléctrica o energía mecánica (3).

Este trabajo se va a enfocar en la energía con biomasa. La biomasa abarca todo un conjunto heterogéneo de materias orgánicas, tanto por su origen como por su naturaleza. Energéticamente el término biomasa se usa para denominar a una fuente de energía renovable basada en la utilización de la materia orgánica conformada por desechos y basura industrial y municipal; residuos de cultivos agropecuarios; y cultivos y plantaciones con propósitos energéticos (4). La biomasa tiene carácter de energía renovable debido a que su contenido energético proviene de la energía solar fijada por las plantas en forma de cadenas de carbono en un proceso que se lleva a cabo llamado fotosíntesis vegetal. Esta energía es liberada al romper los enlaces de los compuestos orgánicos a través de dos procesos tecnológicos, el primero es el proceso termoquímico del cual destaca la combustión directa de la biomasa; y, el segundo es el proceso bioquímico en el cual destaca la digestión anaerobia de los residuos vegetales y animales (5).

La digestión anaerobia es un proceso biológico en el cual la materia orgánica, en ausencia de oxígeno, y mediante la acción de un grupo de microorganismos específicos, se descompone en biogás y fertilizante orgánico. Para que el proceso de digestión anaeróbica se lleve a cabo se deben presentar tres etapas principales; la hidrólisis y acidogénesis, la acetogénesis, y la metanogénesis. En la primera etapa la materia orgánica compuesta por proteínas,

carbohidratos y lípidos es degradada a compuestos más simples como ácidos grasos y compuestos neutros. En la segunda etapa las bacterias acetogénicas convierten los ácidos grasos en ácido acético el cual sirve como alimento para las bacterias metanogénicas, las cuales producen el metano siendo esta la tercera y última etapa del proceso. Al finalizar estas etapas se obtiene el biogás y fertilizante orgánico líquido (6). El biogás por su origen biológico contiene entre 50 a 70 % de metano, 30 a 45 % de dióxido de carbono, 1 a 5 % de hidrógeno, 0,5 a 1 % de oxígeno y de 1 a 5 % de diversos gases. El fertilizante orgánico conocido como biol contiene aproximadamente 20 % de proteínas, un 14 % de nitrógeno y 20% de potasio a un pH de 7 (7). El proceso controlado de digestión anaeróbica es uno de los más idóneos para la reducción de emisiones de efecto invernadero de desechos, para el aprovechamiento energético de los residuos orgánicos, y el mantenimiento y mejora del valor fertilizante de los productos orgánicos tratados (6).

En vista a la alta generación de desechos orgánicos de las industrias alimenticias y agroindustrias, así como el alto consumo de pesticidas y fertilizantes químicos en la producción agrícola, se ha generado el interés por aprovechar la energía que puede aportar la biomasa y a la vez dar una solución alternativa a los problemas de contaminación ambiental y desgaste de la tierra ocasionado por los fertilizantes químicos (5). Esto se puede hacer con la implementación de digestores anaerobios en los cuales es posible generar biogás y fertilizante orgánico a partir de la biomasa proveniente de los desechos.

En este proyecto se plantea ocupar los desechos orgánicos vegetales y animales mediante la ubicación, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaeróbico a escala piloto, en el cual se depositan los desechos orgánicos mezclados con agua en un recipiente herméticamente cerrado con recirculación. En el biodigestor se controla parámetros de operación como temperatura, pH, agitación (recirculación), tiempo de residencia hidráulico, volumen de alimentación, carga orgánica, sólidos totales, sólidos orgánicos totales, producción de fertilizante orgánico y producción de biogás (8). El biodigestor es una alternativa importante y eficiente para la utilización de la biomasa, es muy fácil de realizarlo, ya que es un tanque cerrado que puede ser construido de diversos materiales como ladrillo, hormigón, acero o plástico. El biodigestor es por lo general de forma cilíndrica posee un conducto o tubería de entrada conocido como afluente, por donde ingresa la mezcla de materia orgánica, y otro de



salida conocido como efluente, por donde se descarga el fertilizante orgánico el cual fue digerido por la acción de las bacterias anaerobias y a la vez se genera biogás que es utilizado como fuente para la producción de energía (9).

Para poder llevar a cabo este proyecto es muy importante que se tome en cuenta qué desechos o material se va a ocupar para la biodigestión ya que deben ser asequibles. Como sustrato pueden aprovecharse diversos materiales orgánicos tales como residuos vegetales, estiércol, desechos agroindustriales, basura orgánica, algas, efluentes de las industrias de alimentos, bebidas, pulpas, desechos de mataderos y procesadores de carne, vinazas de producción de alcohol, entre otros. Estos son algunos de los desechos que podemos utilizar o adecuar de acuerdo a los desechos de la empresa a la que se quiera ayudar (10).

## **1.2. Justificación de proyecto**

Uno de los motivos por el cual se decidió realizar este proyecto es por el hecho que día a día se agotan las energías no renovables y se debe buscar una alternativa a este tipo de energías. Adicionalmente, el manejo de los desechos orgánicos genera grandes dificultades tanto a municipios que deben recolectarlos como a los productores agroindustriales que los generan. La construcción de los biodigestores presenta una solución a estos dos problemas ya que mediante biodigestores se puede dar un tratamiento a los desechos orgánicos estabilizándoles y otorgándoles un valor agregado sea como abono líquido o como biogás, un biocombustible que se puede utilizar para suplantar algunos combustibles y generar energía eléctrica o térmica.

La realización de biodigestores en el Ecuador es viable, debido a que es un país agrícola el cual posee varios recursos que facilitan la implementación de este tipo de tecnología. Los biodigestores pueden aplicarse a residuos ganaderos, agrícolas, así como desechos de industrias alimenticias. Entre los residuos se pueden tomar en cuenta estiércol, residuos agrícolas, excedentes de cosechas, etc. Estos residuos se pueden tratar de forma independiente o juntos, lo cual se denomina co-digestión (7).

La instalación de biodigestores tiene grandes beneficios económicos y ambientales, debido a que tiene varios usos. La producción de biogás se puede utilizar en motores para la generación eléctrica por medio de turbinas o aplicar directamente para la generación de energía térmica en

cocina a gas o en la generación de climas controlados con el fin de calentar criaderos de pollos o cerdos recién nacidos, también para huertos de plantas como en el caso de rosas, disminuyendo así el consumo de leña o gas natural. Esta es una forma de producir energía no contaminante ni en el proceso de producción ni en su combustión, ya que la energía proviene de desechos que de lo contrario tendrían que ser tratados de otra forma y el biogás contiene menores concentraciones de  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$  y  $\text{CO}$ . Además como subproducto de la producción de biogás se obtiene el fertilizante orgánico o biol de muy buena calidad y de inmediata disponibilidad para los cultivos, que se puede utilizar en haciendas y fincas de producción agrícola y reducir o eliminar a los fertilizantes sintéticos.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivos principales**

El objetivo principal de este trabajo es el diseño, la construcción y la puesta en marcha de un biodigestor a escala piloto para aumentar el rendimiento en la producción de biogás con respecto a biodigestores rurales y de fase sólida.

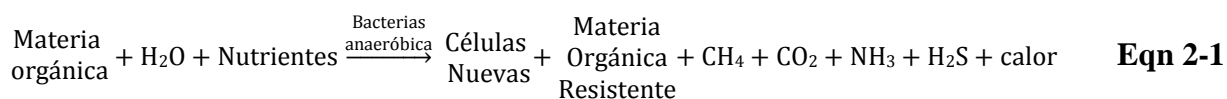
#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Realizar el montaje y puesta en marcha del sistema de digestión anaerobia a escala piloto.
- Realizar ensayos experimentales en el sistema de digestión anaerobia en un biodigestor continuo para obtener los parámetros operacionales del proceso que maximicen la eficiencia de degradación de la materia orgánica.
- La adquisición de conocimientos y el desarrollo de habilidades consecuentes con el fin de aplicar estos en el desarrollo tecnológico de biodigestores en el Ecuador.

## 2. Fundamentos Teóricos

### 2.1. Digestión anaerobia

La digestión anaeróbica es un proceso biológico que ocurre bajo condiciones estrictamente anaerobias en el cual microorganismos degradan la materia orgánica y la estabilizan, transformándola en biogás o gas biológico formado por metano (CH<sub>4</sub>) y otros productos inorgánicos incluyendo principalmente dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (11). La cantidad presente de metano en el biogás varía, según el tipo de materia orgánica digerida y de las condiciones del proceso, con porcentajes entre el 50% a un 70% aproximadamente. Para que el proceso se lleve a cabo es necesario que intervengan varios grupos de microorganismos que sean capaces de transformar la materia orgánica en compuestos intermedios, como en ácido acético, anhídrido carbónico e hidrógeno, los cuales son usados por los microorganismos metanogénicos los cuales concluyen el proceso con la producción de metano. Los microorganismos anaerobios presentan bajas velocidades de crecimiento y de reacción, por lo tanto, y en la medida de lo posible, es necesario mantener el entorno de la reacción en condiciones óptimas para su crecimiento (6).



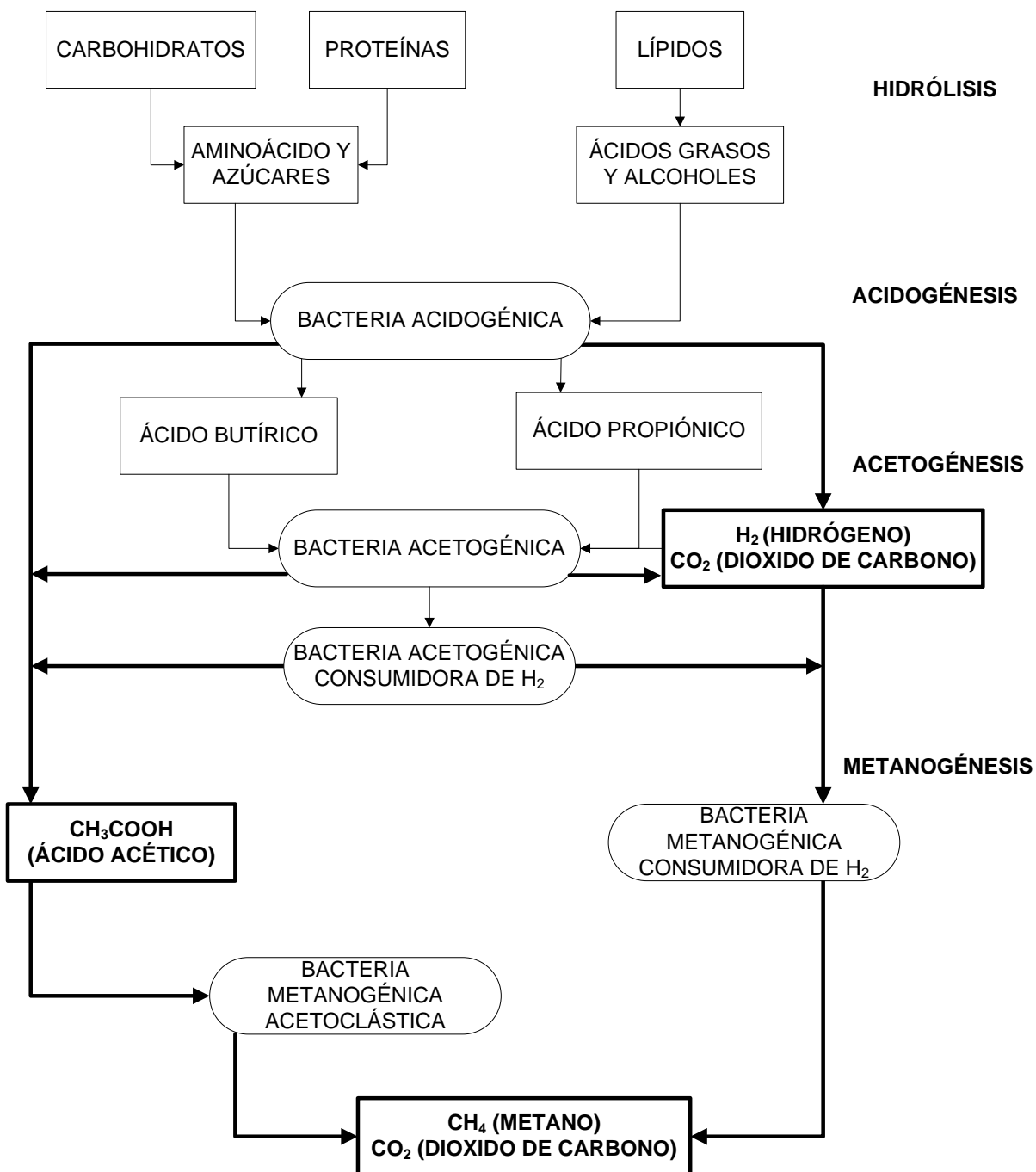
La ecuación 2.1 muestra que la materia orgánica junto con el agua en una reacción biológica bajo condiciones anaeróbicas produce metano y dióxido de carbono. Adicionalmente a esta reacción se forman otros gases en bajas concentraciones como amoníaco y ácido sulfhídrico, a la vez que células nuevas y materia orgánica resistente que no es degradada en su totalidad y calor (12).

El proceso biológico de degradación de la materia prima orgánica es el siguiente. Al acumular materia orgánica compuesta por polímeros, como carbohidratos, proteínas, celulosa, lípidos, etc. en un ambiente acuoso, los microorganismos aerobios actúan primero tratando de alimentarse de este sustrato, ya que puede consumir todo el oxígeno disuelto que existe. Posterior a esta etapa, cuando el oxígeno se termina, empiezan a aparecer las condiciones perfectas para la flora anaeróbica la cual puede consumir la materia orgánica disponible (13).

En la primera etapa la materia orgánica es atacada por grupos de bacterias fermentativas proteolíticas y celulolíticas, que la degradan hasta ácidos grasos y compuestos neutros. En la segunda fase los ácidos grasos orgánicos son atacados por bacterias consumidoras de hidrógeno, que llevan los ácidos a acetato, a  $H_2$  y  $CO_2$ . Simultáneamente un grupo de bacterias homoacetogénicas, degradan los ácidos de cadena larga a acetato,  $H_2$  y  $CO_2$  (14). Las tres etapas se presentan en la Fig. 2.1

Por consiguiente es posible considerar el tratamiento anaerobio de los diversos desechos orgánicos realizado en un digestor como un proceso de tres etapas, al final de las cuales se obtiene un gas rico en metano llamado “biogás” y residuo rico en nitrógeno el cual es el bioabono.

A continuación se explicará en detalle cada paso en el proceso de digestión anaerobia.



**Fig. 2.1.** Etapas en la producción de metano a partir de residuos orgánicos.

### **2.1.1. Hidrólisis**

En esta etapa es necesario que el material particulado, los biopolímeros y en general los compuestos orgánicos complejos, los cuales son componentes principales de los desechos orgánicos que se utilizan como materia prima, sufran una hidrólisis inicial generada por la adición de moléculas de agua, que los conviertan en sustratos orgánicos simples. Estos sustratos hidrolizados se fermentan produciendo ácidos orgánicos, principalmente ácidos acético, propiónico, butírico y láctico, y en menor proporción compuestos neutros como metanol, etanol,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2$  y  $\text{CO}_2$  (1).

Una vez realizado este proceso, las bacterias puedan asimilar la materia orgánica como fuente alimenticia para cumplir sus labores metabólicas. Este proceso es realizado por la acción de las exoenzimas de las bacterias conocidas genéricamente como acidogénicas o fermentativas y puede ser muy rápida o lenta dependiendo de las características del sustrato (15).

### **2.1.2. Acidogénesis**

Las bacterias que participan en este proceso dependen básicamente del sustrato y de las condiciones de temperatura. Cuando se tiene la materia orgánica en forma de compuestos simples como azúcares y ácidos grasos, las bacterias toman estos sustratos, incorporándolos en sus procesos metabólicos realizando la degradación y tomando los nutrientes que necesitan para su alimentación y reproducción (16).

Estas dos primeras fases son realizadas por un primer grupo de bacterias las cuales se denominan facultativas debido a que tienen la capacidad de consumir oxígeno molecular para su metabolismo y se adaptan a la presencia de oxígeno. Existe un segundo grupo de bacterias denominadas estrictas las cuales no crecen en presencia de oxígeno molecular, el oxígeno les resulta tóxico incluso en mínimas cantidades. El consumo del oxígeno molecular disponible en el aire por las bacterias facultativas, produce el ambiente anaeróbico ideal para el crecimiento de las bacterias estrictas (7).

En estas etapas no existe una reducción significativa de la Demanda Química de Oxígeno del sustrato, puesto que las cadenas orgánicas complejas se transforman en cadenas más cortas.

### **2.1.3. Acetogénesis**

En esta etapa del proceso se convierten los compuestos intermedios a ácido acético por medio de las bacterias acetogénicas, las cuales realizan la degradación de los ácidos orgánicos. Los alcoholes, ácidos grasos volátiles y compuestos aromáticos se degradan produciendo ácido acético,  $\text{CH}_3\text{-COOH}$ , y liberando como producto hidrógeno y dióxido de carbono (15).

El propionato es convertido en ácido acético por la acción de la bacteria *Syntrophobacter wolinii*. Los ácidos grasos volátiles que poseen cuatro o siete carbonos son convertidos por *syntrophomonas wolfei*. El hidrógeno es convertido a ácido acético por bacterias acetogénicas hidrogenoclasticas como la *Acetobacterium* (16).

#### **2.1.3.1 Acetogénesis Acidoclástica**

En base a la acidogénesis en la cual se producen ácidos grasos como ácido propiónico y ácido butírico, entre otros, y porque los ácidos grasos no son convertidos directamente a gas es necesario que estos sean transformados mediante la acetogénesis acidoclástica a ácido acético como un paso anterior a su transformación a metano, debido a que el ácido acético es la principal fuente de metano llegando a ser un 70% del total obtenido durante el proceso (16). Por otro lado existen compuestos que si pueden transformarse directamente a metano como el metanol y el ácido fórmico, pero no se encuentran en gran cantidad en la materia prima es por ello que es mínimo el aporte que pueden generar para la producción de biogás.

#### **2.1.3.2 Acetogénesis Hidrogenoclastica**

Durante el proceso de digestión anaerobia se realiza la conversión del hidrógeno producido en las etapas de acidogénesis y acetogénesis acidoclástica a ácido acético. Con esta reacción se logra que los niveles de hidrógeno presentes se mantengan dentro del intervalo apropiado para la producción de biogás, el cual es de 0,1 a 1%.

### **2.1.4. Metanogénesis**

En esta etapa un tercer grupo de bacterias convierte el ácido acético en metano y dióxido de carbono. Se trata de bacterias metanogénicas estrictamente anaeróbicas, es decir que la presencia de oxígeno molecular las elimina. Las más importantes son las que transforma los ácidos propiónico y acético, denominadas bacterias metanogénicas acetoclasticas. El otro

grupo de bacterias metanogénicas son las hidrogenoclasticas que consumen el hidrógeno generado y lo convierten con dióxido de carbono en biogás (7).

Entre las bacterias más comunes para la formación de metano en la fase metanogénica tenemos a la *Metanosarcina* la cual tiene un crecimiento rápido y tiene la capacidad de convertir hidrógeno, CO<sub>2</sub> y metanol en metano. Por otro lado tenemos a *Metanothix* que tiene un crecimiento lento y con la capacidad de convertir al ácido acético en metano, entre muchas más bacterias existente en el sustrato (16).

#### **2.1.4.1. Metanogénesis Acetoclástica**

Esta es la fase final de todo el proceso de digestión anaerobia debido a que se llega a la transformación de la materia orgánica a biogás, especialmente a metano. Por medio de la metanogénesis acetoclástica se convierte el ácido acético en metano, es por ello que es la vía principal de la producción de metano, ya que corresponde al 70% de la producción total (17).

#### **2.1.4.2. Metanogénesis Hidrogenoclastica**

Esta fase compite con la acetogénesis hidrogenoclastica debido a la capacidad que poseen las bacterias metanogénicas para transformar el hidrógeno con dióxido de carbono a metano. Estas bacterias realizan con la ayuda de la acetogénesis la labor de mantener el nivel del hidrógeno en el sistema.

A continuación en la tabla 2-1 se detalla las principales reacciones bioquímicas que se llevan a cabo en cada etapa del proceso de digestión anaerobia. Se observa secuencialmente la forma en que los azúcares de la materia orgánica se transforman en metano y dióxido de carbono en base a las etapas descritas anteriormente. En las etapas de acidogénesis y de acetogénesis se observa cómo se produce hidrógeno, dióxido de carbono y ácido acético, el cual es el compuesto que aporta con el 70% para producción total de metano. En la etapa de metanogénesis se consume el ácido acético para la formación de metano y dióxido de carbono lo cual constituye el biogás (17).



**Tabla 2-1.** Reacciones representativa de la digestión anaerobia

Tipo de reacción	Ecuación
<b>Conversión completa de glucosa a CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub></b>	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3CH_4 + 3CO_2$
<b>Acidogénesis de Carbohidratos a Ácido Acético</b>	$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 2CO_2 + 4H_2$
<b>Acetogénesis del Propionato</b>	$CH_3CH_2COO^- + 3H_2O \rightarrow CH_3COO^- + H^+ + HCO_3^- + 3H_2$
<b>Acetogénesis Hidrogenoclástica</b>	$4H_2 + 2CO_2 \rightarrow CH_3COOH + 2H_2O$
<b>Metanogénesis Acetoclástica</b>	$CH_3COOH + H_2O \rightarrow CH_4 + HCO_3^- + H^+$
<b>Metanogénesis Hidrogenoclástica</b>	$4H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$

## 2.2. Biodigestores

Un biodigestor es un tanque construido de diferentes formas geométricas, tamaños y materiales, donde se almacenan los residuos orgánicos como sobrantes de cocina, estiércol de animales y humanos, material vegetal, etc. Estos elementos diluidos en agua forman una mezcla que es descompuesta biológicamente por microorganismos. En el proceso de descomposición se forma el biogás, por lo que el tanque debe disponer de algún sistema que le permita capturar el biogás controlando su presión y evitando su mezcla con aire atmosférico. Como resultado de la descomposición biológica, los residuos almacenados se transforman en bioabono denominado biol, el cual es de fácil absorción para las plantas y tiene un alto contenido de nitrógeno, fósforo y potasio, y esta libre de microorganismos patógenos dañinos para las plantas (8).

Los biodigestores son recipientes o tanques cerrados herméticamente. Estos permiten la carga de sustratos de biomasa denominados afluente y la descarga de bioabono o biol denominado efluente y poseen un sistema de recolección y almacenamiento de biogás para su aprovechamiento energético (18).

El término biomasa o sustrato se refiere a toda la materia orgánica que proviene de desechos de animales (estiércol), árboles, plantas, todos los desechos orgánicos que pueden ser convertidos en energía; o los provenientes de la agricultura como residuos de maíz, café, arroz, papas, banano; de aserraderos como ramas, aserrín, cortezas; y de los residuos urbanos como aguas residuales, basura orgánica y otros (19).

El biogás se produce a través de la degradación anaeróbica de la biomasa. La digestión anaeróbica es un proceso natural microbiano que ocurre en forma espontánea en la biomasa en ausencia de oxígeno y como se detalló anteriormente genera una mezcla de gases, principalmente metano y dióxido de carbono conocida como biogás y una suspensión acuosa o biol que contiene los componentes no degradados o parcialmente degradados pero estabilizados y restos inorgánicos inicialmente presentes en la biomasa (7).

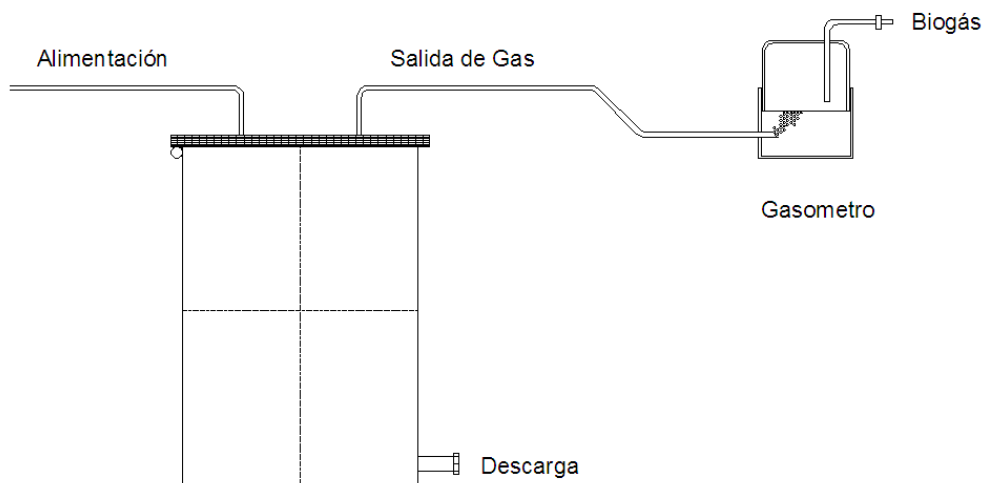
### **2.3. Clasificación de los biodigestores**

Los biodigestores se clasifican en base al proceso o modo de operación y a su capacidad de carga en el reactor. La clasificación general los define como digestores de régimen batch o por lotes, de régimen semi-continuo, horizontales de desplazamiento y de régimen continuo (17).

#### **2.3.1. Digestores de carga en batch**

El digestor tipo batch se carga una sola vez de forma total y la descarga se la hace una vez que haya dejado de producir biogás. Este tipo de biodigestores se aplica cuando existen problemas operativos (falta de personal) o cuando la materia orgánica a procesar está disponible en forma intermitente (7). Por lo general el sistema tipo batch consiste en tanques herméticos con una salida de gas la cual es conectada a un gasómetro flotante, donde se almacena el biogás como se muestra en la fig. 2.3. Este tipo de reactores pueden procesar una gran variedad de materiales orgánicos, los cuales pueden ser recopilados a campo abierto. Impurezas como tierra u otros inertes mezclados en el sustrato entorpecen la operación del biodigestor. Para obtener una producción de biogás constante se instalan varias unidades las cuales se cargan a distintos tiempos de tal forma que cuando disminuye o acaba la producción de gas de una unidad, la siguiente unidad este empezado la producción del mismo (17).

Este tipo de digestores es ideal a nivel de laboratorio si se desea evaluar parámetros del proceso, o el comportamiento de un residuo orgánico específico o de la mezcla de materiales orgánicos. Prácticamente no requiere ninguna atención diaria. La producción de biogás de este tipo de biodigestores es de 0,5 a 1 m<sup>3</sup> biogás / m<sup>3</sup> digestor (20).

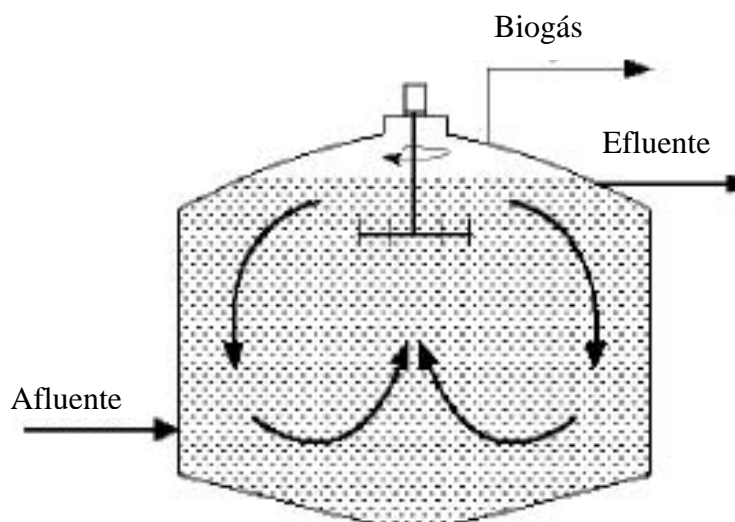


**Fig. 2.2.** Biodigestor modelo Batch

### 2.3.2. Digestor de mezcla completa

En el reactor de mezcla completa o CSTR (continuos stirred tank reactor) se mantiene una distribución uniforme de la concentración, tanto del sustrato como de los microorganismos. Esto se consigue por medio un sistema de agitación ya sea de manera mecánica o neumática, tratando en lo posible que no sea de una manera violenta ya que puede afectar a la población bacteriana (17). En la Fig. 2.4 se muestra un diagrama de un digestor de mezcla completa.

Este tipo de digestor puede funcionar en régimen continuo o semi-continuo (alimentación y descarga periódica) y es el más utilizado para el tratamiento de residuos. La concentración de la biomasa del efluente es la misma que a la salida del digestor. En comparación con otros digestores, el tiempo de permanencia de la biomasa en el interior de biodigestor para completar su degradación (tiempo retención hidráulico) es alto, debido a que la concentración de la biomasa en el interior del digestor es baja (17).

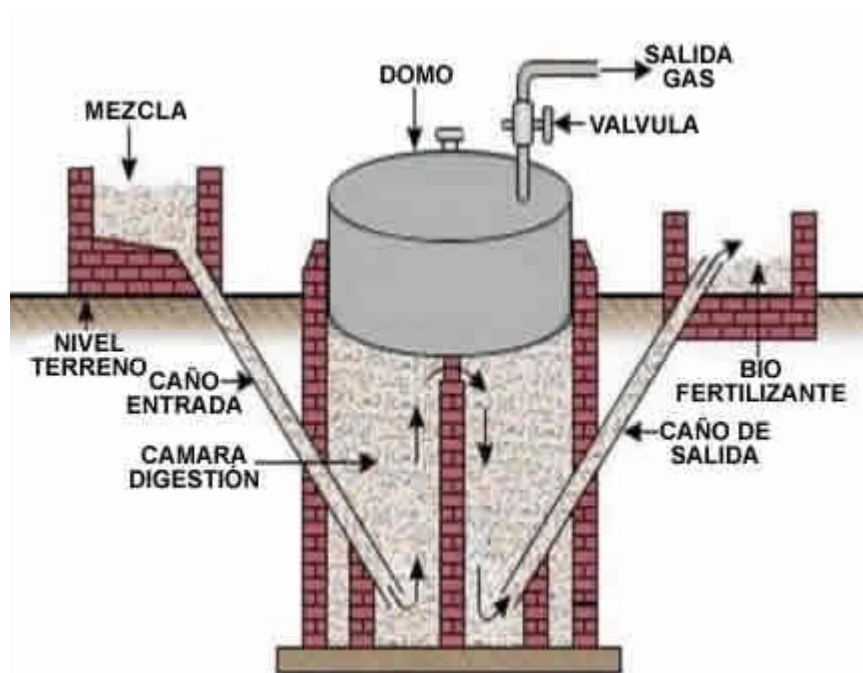


**Fig. 2.3.** Digestor de mezcla completa (CSTR)

### 2.3.2.1. Digestores de régimen semi-continuo

El digestor tipo semi-continuo es el más utilizado en áreas rurales o en pequeñas granjas agrícolas, cuando se trata de digestores pequeños para uso doméstico. Entre los diseños más comunes son los conocidos tipo hindú y el chino (7).

Entre los digestores tipo hindú existen muchos diseños, pero en general son verticales y se encuentran enterrados como se muestra en la Fig. 2.4. El digestor se carga por gravedad una vez al día con un volumen de mezcla, que depende del tiempo de retención de la materia orgánica, y producen cantidades constantes de biogás si se mantienen las condiciones de operación. El gasómetro está integrado en el digestor. En la parte superior del pozo se encuentra una campana flotante donde se almacena el gas, y de donde sale para su uso. El volumen del gasómetro es equivalente a  $1/3$  del gas generado por día. La eficiencia con respecto a la producción de biogás es buena en este tipo de biodigestores, ya que genera  $0,5$  a  $1 \text{ m}^3 \cdot \text{d}$  volumen de gas por volumen de digestor (21).



**Fig. 2.4.** Digestor tipo Hindú

En lo que se refiere al digestor de tipo chino, son tanques de cúpula fija en forma cilíndrica, este tipo de digestor se construye enterrado y no posee un gasómetro integrado, por lo que el gas producido se acumula en el interior del digestor (22) como se muestra en la fig. 2.5. Por lo tanto, a medida que aumenta la producción de gas, aumenta a la vez su presión en el interior, forzando al líquido de la entrada y salida a subir su nivel. La producción de biogás es de 0,1 a 0,4 m<sup>3</sup> de biogás por m<sup>3</sup> de digestor. La eficiencia es mala pero en tiempos de retención amplios produce un excelente bioabono (21).

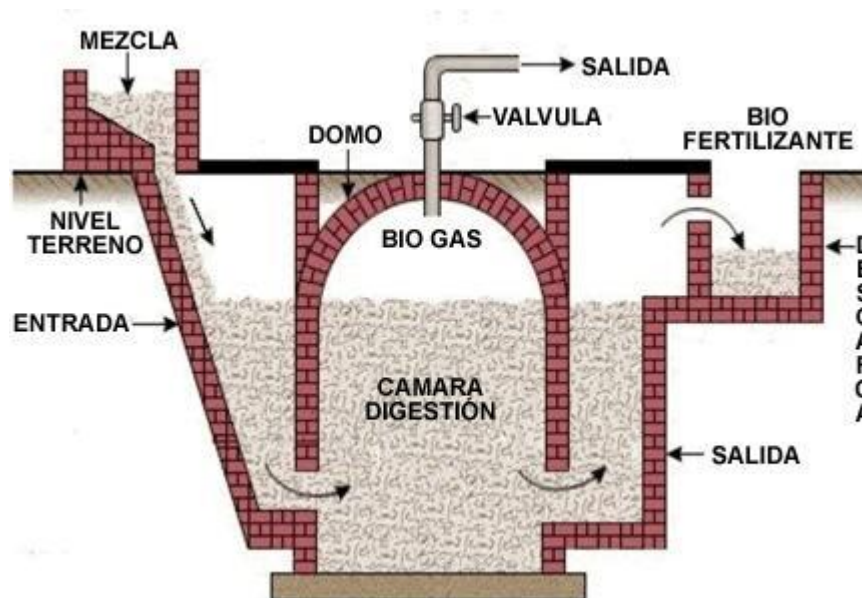


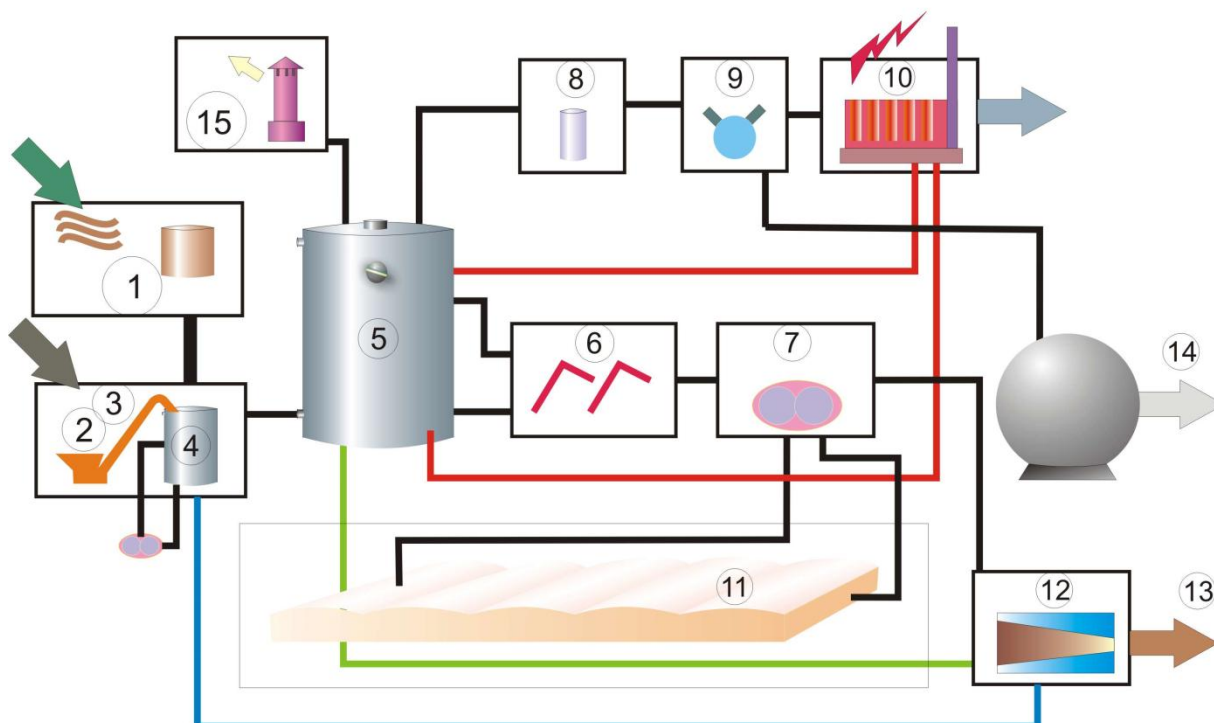
Fig. 2.5. Digestor tipo Chino

### 2.3.2.2. Digestores de régimen continuo

El digestor de régimen continuo se utiliza para plantas de producción de biogás con el objetivo de generar energía eléctrica. Estos digestores son de gran tamaño y con ello el nivel de tecnología, industrialización e instrumentación son altos. Se emplean equipos de control para la alimentación, para la agitación, para elevar o disminuir la temperatura, entre otros, como se muestra en la fig.2.6 (22).

Este tipo de biodigestores permiten controlar la digestión de una manera precisa. Es por ello que se puede corregir cualquier tipo de anomalías que se presente dentro del proceso. Con este reactor es posible manejar las variables relacionadas a carga específica, tiempo de retención y temperatura, a largos periodos. La puesta en marcha solo se repite cuando se vacía el digestor por razones de mantenimiento o fallas mecánicas. Las desventajas que presenta este tipo de digestores son la baja concentración de sólidos, no posee un diseño apropiado para materiales fibrosos, existen problemas de limpieza por sedimentos y se generan espumas e incrustaciones (7). Entre las ventajas que presenta este tipo de digestores tenemos la alta eficiencia, tiempos de residencia más cortos y mejor calidad de productos. En este sistema se puede alimentar el

biodigestor con sustratos de diferente calidad sin afectar la producción de biogás y obteniendo resultados bastante satisfactorios (22).



**Fig. 2.6.** Digestores de régimen continuo

**Tabla 2-2.** Nomenclatura de procesos y equipos de la planta industrial de biogás

Número	Equipos y Procesos
1	Ingreso de residuos líquidos y semilíquidos
2	Ingreso de residuos sólidos. Triturador y dosificador
3	Transportador de residuos sólidos
4	Tanque de mezcla e hidratador de biomasa
5	Biodigestor anaeróbico 1
6	Control y dosificación de efluentes
7	Cuarto de bombas
8	Filtro de biogás
9	Compresor de biogás
10	Generador eléctrico
11	Biodigestor anaeróbico 2
12	Tratamiento de estabilización de efluentes
13	Salida del fertilizante orgánico
14	Almacenamiento y salida de biogás
15	Antorcha

### **2.3.3. Digestores con retención de biomasa sin recirculación**

En este tipo de reactores se desea retener las bacterias en el interior del biodigestor. Existen varios métodos de retención de biomasa: la inmovilización sobre un soporte (filtros anaeróbicos y lechos fluidizado), la agregación de biomasa y su retención por gravedad (reactores de lecho de lodos) (17).

A continuación se va a detallar sobre los métodos de retención de biomasa:

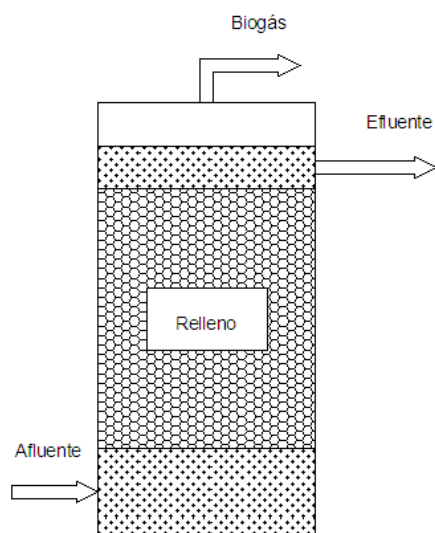
#### ***2.3.3.1. Inmovilización sobre un soporte***

##### **Filtros anaeróbicos**

En este método las bacterias anaeróbicas se encuentran fijadas a una superficie inerte, formando una biopelícula. La flora bacteriana es atrapada en las ranuras de la columna de relleno, con un flujo vertical. El soporte puede ser material plástico o cerámico (17).

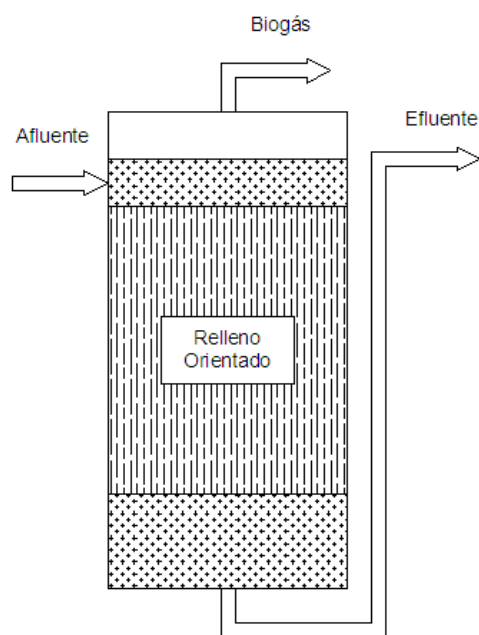
Como se muestra en las Figuras 2.7 y 2.8 existen dos tipos de filtros, los cuales se diferencian debido a la estructura de su distribución en el interior de la columna. Para el “filtro anaeróbico” propiamente denominado la distribución del relleno irregular y su flujo es ascendente. En este caso la mayoría de las bacterias son atrapadas en los intersticios del relleno (Fig. 2.7). Por otro lado, se encuentra el filtro anaeróbico denominado “lecho fijo”. En este caso la distribución del relleno es regular y orientada verticalmente y su flujo es descendente (17). En este caso las bacterias están fijadas en los soportes (Fig. 2.8). La eficiencia de las bacterias aumenta de tal manera que puedan aprovechar mucho mejor la biomasa. Este tipo de sistema disminuye el tiempo de retención y a la vez mejora la producción de biogás.





Filtro anaerobico

**Fig. 2.7.** Digestores de filtro anaeróbico con relleno irregular

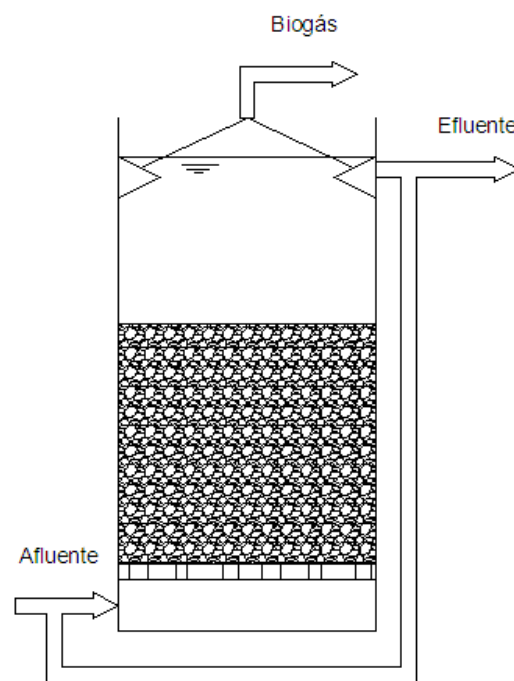


Lecho Fijo

**Fig. 2.8.** Digestores de filtro anaeróbico con relleno regular o lecho fijo

### Lecho fluidizado

Para este tipo de sistema los microorganismos se encuentran fijos formando una biopelícula sobre pequeñas partículas inertes que se encuentran fluidizadas dentro de un adecuado flujo ascendente del fluido en el digestor. Es por ello que para que exista un adecuado caudal y sea posible la fluidización del lecho se controla la recirculación del efluente, como se muestra en la Fig.2.9 (17).

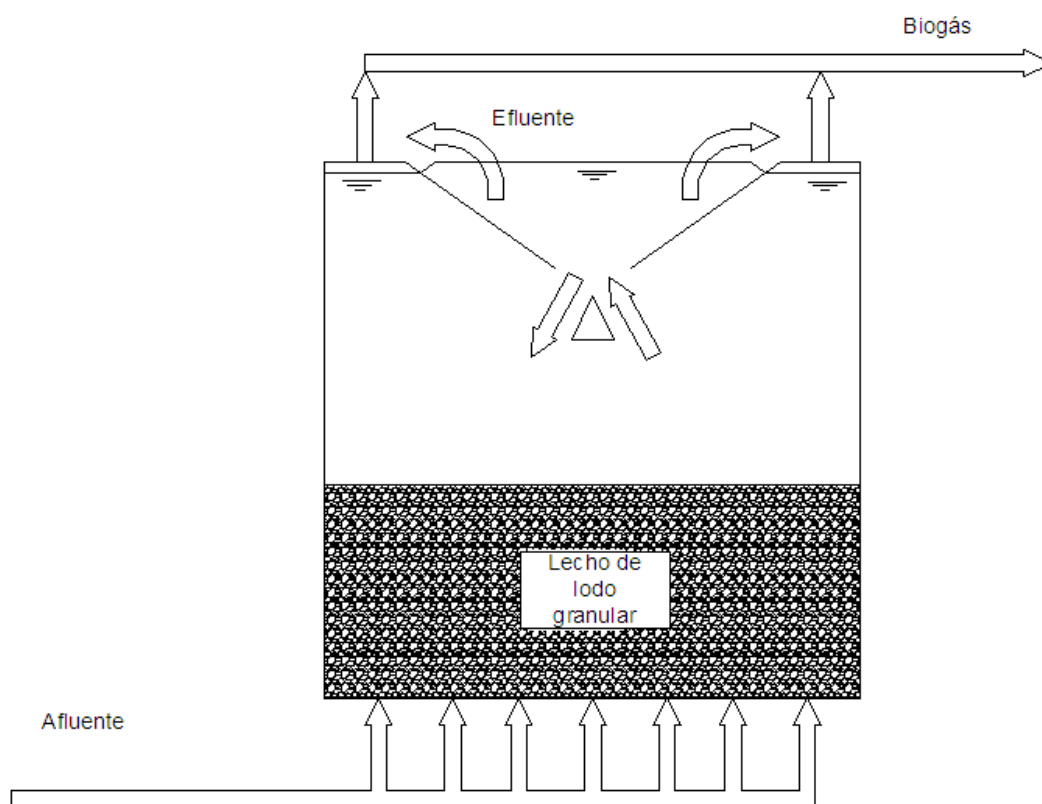


### Lecho Fluidizado

**Fig. 2.9.** Lecho Fluidizado

### 3.2.3.2. Agregación de biomasa y retención por gravedad

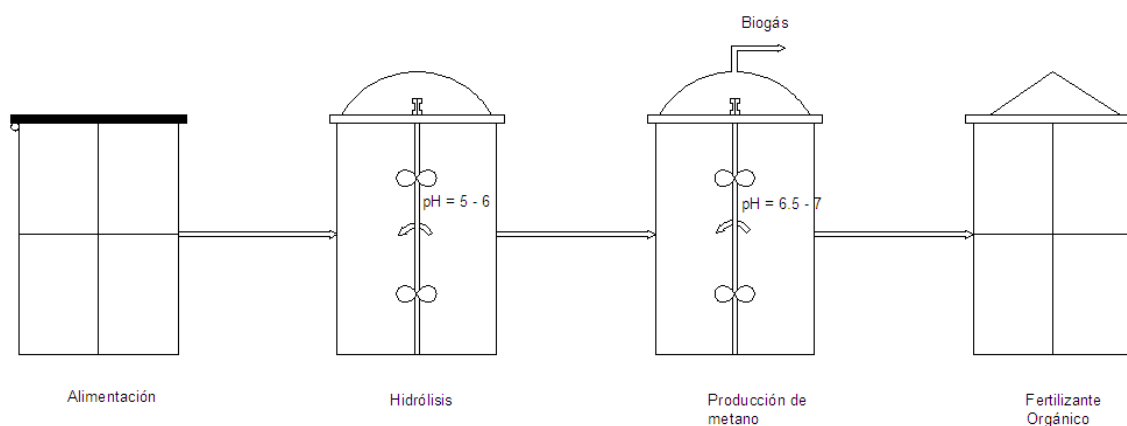
En el reactor de lecho de lodos se promueve la floculación o agregación de bacterias entre ellas, formando gránulos. De esta forma las bacterias se mantienen en el interior del digestor por sedimentación, con la velocidad ascendente adecuada del fluido, siempre y cuando que en la parte superior exista un buen separador sólido, líquido, gas. El diseño más utilizado es el *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB), como se muestra en la Fig. 2.10, el cual se ocupa en el tratamiento de aguas residuales de la industria agroalimentaria. Este es el diseño más simple entre los sistemas con retención de biomasa y el único limitante para su aplicación es que la biomasa activa granule, esto es que forma agregados de alta densidad. Para ello es determinante la composición del afluente a tratar y mantener una operación constante establecida la cual sea la más óptima (17).



**Fig. 2.10.** Digestor de lecho de lodo granular (UASB)

### 2.3.4. Digestores de dos etapas

El concepto de este sistema está basado en el hecho de que durante el proceso de digestión anaeróbica existen bacterias y etapas que requieren de pH y tiempos de retención diferentes para la degradación de la materia orgánica. Es por ello que el proceso de digestión se divide en dos etapas. En la primera etapa ocurre la hidrólisis de la materia orgánica compleja, mientras que en la segunda se lleva a cabo la acetogénesis y metanogénesis del material acidificado. como se muestra en la Fig. 2.11 (7). La ventaja de este sistema es que las condiciones de cada reactor pueden ser las óptimas para cada grupo de bacterias. La desventaja de este sistema es que presenta altos tiempos de residencia en la primera etapa (hidrolisis) y bajas eficiencias de conversión. Se diseñan dos digestores separados para la acidogénesis y otro para la metanogénesis. Para el caso de la primera etapa, la formación de ácido se tienen condiciones de pH bajo de 5 a 6 y tiempos de retención de sólidos bajos, para favorecer el crecimiento de bacterias acidogénicas y a la vez la producción de ácido en el interior del digestor. Como se muestra en la figura 2.11. Para la segunda etapa, la formación de metano, se tienen condiciones de pH de 6,5 a 7 con el fin de favorecer el crecimiento de bacterias metanogénicas las cuales convierten los ácidos a metano mejorando con una eficiencia alta la producción de biogás (6).



**Fig. 2.11.** Digestor de dos etapas

## **2.4. Parámetros relacionados al proceso de digestión anaeróbica**

A continuación se describen los parámetros que se deben tomar en cuenta durante el proceso de digestión anaeróbica para asegurar una buena y óptima producción de biogás y bioabono.

### **2.4.1. Sustratos**

El sustrato es la biomasa o material orgánico que se alimenta a un digestor para su descomposición anaeróbica, es por ello que existe una gran cantidad y variedad de sustratos animales y vegetales que son posibles emplear, pero para que esta tecnología sea realmente barata y una excelente fuente de energía, normalmente se ocupa los desechos orgánicos, es decir materiales que no tengan otra aplicación y que son contaminantes orgánicos y se les da valor agregado al convertirlos en materia prima (23).

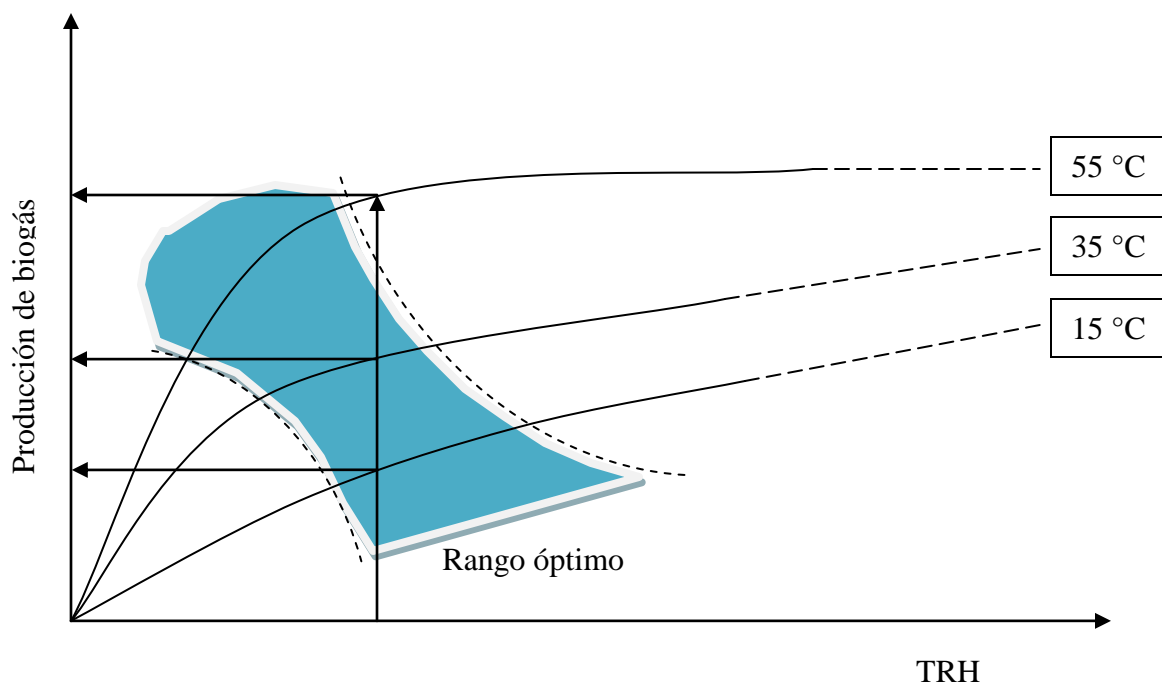
Entre los desechos orgánicos más comunes se encuentran los desechos animales (estiércol), de manera especial la de ganado porcino y bovino, debido a que se encuentran bacterias que ayudan y acelerar el proceso de fermentación anaeróbica. El desecho vegetal por otro lado tiene la desventaja de no poseer estas bacterias desde el inicio y su descomposición es mucho más lenta y difícil. Es por ello que por lo general se mezcla el desecho vegetal en un 25 % con el desecho animal (23).

La calidad del sustrato es un factor que tiene una importante influencia en la producción de biogás, ya que depende de la cantidad de grasas, proteínas, hidratos de carbono y nutrientes que tenga la biomasa. El material orgánico utilizado como carga se puede dividir en dos grupos, materias primas ricas en nitrógeno y materias primas ricas en carbono, el nitrógeno es utilizado como constituyente para la formación celular y el carbono es utilizado como fuente de energía (22). Es por esto que se debe tener una buena calidad de sustrato ya que en el interior del biodigestor se encuentran bacterias que requieren de todos los nutrientes y grasas que les puede proveer la biomasa para su crecimiento y desarrollo con el objetivo de degradar el sustrato para obtener una buena producción de biogás. Por otro lado, no es factible alimentar al biodigestor con sustrato podrido o fermentado, ya que este ingresa con pH inferior al pH de operación y como consecuencia puede inhibir el proceso anaeróbico o hasta llegar a colapsar la digestión (7). El tipo y la mezcla de sustrato alimentado no deben cambiarse de

forma brusca porque puede alterar la estabilidad del proceso anaeróbico y la inhibición de bacterias. Es por ello que en estos casos se recomienda que el cambio de sustrato se realice de forma paulatina y en un periodo de varios días para que las bacterias se adapten poco a poco al nuevo sustrato (1).

#### **2.4.2. Temperatura del proceso**

La temperatura mínima para que el proceso de inicio es de 4°C a 5°C y la temperatura máxima no debe sobrepasar los 70°C. El intervalo de temperatura para la digestión anaeróbica puede dividirse en tres rangos. El rango psicrófilico en el cual la temperatura se encuentra por debajo de 25°C, el rango mesofílico que se encuentra entre 25 y 45 °C y el rango termofílico donde la temperatura está entre 45-60°C (24). Por lo general en digestores que operan dentro de los límites de temperatura mesofílica, la digestión óptima se obtiene a 35 °C, ya que como se observa en la fig. 2.12 la temperatura está íntimamente relacionada con el tiempo de residencia de la biomasa en el interior del biodigestor para completar su degradación (tiempo de retención hidráulico, TRH). Los tiempos de residencia disminuyen a medida que la temperatura incrementa, y por lo tanto se requiere reactores de menor volumen que puedan digerir mayor cantidad de biomasa (24). La velocidad de degradación a temperaturas mayores de 45°C es mayor y mejor que a temperaturas bajas, pero trabajar a rangos de temperaturas termofílica implica un aumento de costos energéticos por el calentamiento que requiere lo cual no lo hacen un sistema económicamente viable. Por otro lado las bacterias son más susceptibles a cambios ambientales de temperatura en especial a la disminución repentina de unos cuantos grados (25).



**Fig. 2.12.** Diagrama del efecto de la temperatura y el tiempo de retención hidráulico con respecto a la producción de gas.

El incremento de la actividad biológica y la producción de gas con la temperatura, y el aumento de la degradación del material en el interior de digestor según la temperatura de trabajo se puede observar en la tabla 2-3. La misma biomasa aumenta la producción de biogás a mayor temperatura, generando una mejor eficiencia en el proceso anaeróbico.

**Tabla 2-3.** Rendimiento de gas con materiales empleados comúnmente a diferente temperatura.

Materiales	Mesofílico (35°C)	Ambiente (8 – 25°C)
	m <sup>3</sup> /día	m <sup>3</sup> /día
<b>Estiércol de cerdo</b>	0,42	0,25 – 0,3
<b>Estiércol de vaca</b>	0,3	0,2 – 0,25
<b>Estiércol de humano</b>	0,43	0,25 – 0,3
<b>Paja de arroz</b>	0,4	0,2 – 0,25
<b>Paja de trigo</b>	0,45	0,2 – 0,25
<b>Pasto verde</b>	0,44	0,2 – 0,25

La sensibilidad a cambios de temperatura en el proceso depende de diversos factores, principalmente del grado de adaptación de las bacterias, del modo de operación y del tipo de biodigestor. En el rango termofílico, un incremento de temperatura brusco por lo general provoca un importante descenso en la producción de biogás, mientras que una baja puede suponer un descenso completamente reversible en la producción de biogás, o puede no mostrar diferencias, debido a la disminución del efecto de inhibición por amoníaco. El efecto inhibitor de amonio es mayor en el rango termofílico que en el mesofílico por el aumento de la concentración de forma tóxica, NH<sub>3</sub>, al aumentar la temperatura, a pesar de la mayor sensibilidad de los microorganismos mesofílicos al amoníaco libre (19). Para pasar un digestor del rango mesofílico al termofílico sin que se afecte la producción de biogás, se debe realizar el proceso de cambio muy lentamente (7).

Las bacterias metanogénicas son más sensibles a los cambios de temperatura que otros organismos en el digestor. Esto se debe a que los demás grupos de bacterias crecen mucho más rápido, como las acetogénicas, las cuales pueden alcanzar un metabolismo sustancial, incluso a bajas temperaturas. Las velocidades de reacción química y biológica aumentan generalmente con un incremento de la temperatura hasta un rango de temperatura tolerable para diferentes microorganismos. Las altas temperaturas causan una declinación del metabolismo, debido a la degradación de las enzimas, lo que es crítico para la vida de las bacterias (7).



Todas estas condiciones deben ser evaluadas antes de escoger un determinado rango de temperaturas para el funcionamiento de un digestor ya que al operar a mayores temperaturas se aumenta la eficiencia y la producción de biogás, pero paralelamente aumentan los costos de instalación, de operación y de mantenimiento debido a la mayor complejidad del proceso. Los digestores que trabajan a temperatura mesofílico, y termofílico, poseen sistemas de calefacción, aislamiento y control, los cuales son obviados en digestores rurales económicos que trabajan a bajas temperaturas (22).

### 2.4.3. Tiempo de retención hidráulico (TRH)

El tiempo de retención hidráulico (TRH) es el tiempo de permanencia de la biomasa en el interior del digestor hasta su descarga. El TRH para digestores de carga continua coincide con el tiempo de permanencia de la biomasa en el interior del digestor. En sistemas de digestión continua y semi-continua el tiempo de retención (TRH) se define de la división entre el volumen del digestor y el volumen de la carga diaria.

$$\tau = \frac{V}{\dot{V}} \quad \text{Eqn 2-2}$$

donde,

$\tau$  = tiempo de retención hidráulico [d]

$V$  = Volumen del digestor [ $m^3$ ]

$\dot{V}$  = volumen de la carga diaria  $\left[ \frac{m^3}{d} \right]$

El TRH necesario para tratar cierta cantidad de sustrato depende de la carga orgánica y temperatura de operación, los cuales determinan el volumen del digestor. El TRH elegido para una biomasa específica depende de la degradabilidad de la materia orgánica, por lo que en caso de fácil degradación requiere menor TRH (26).

Existen dos factores que están muy relacionados con el tiempo de retención hidráulico: el tipo de sustrato y la temperatura de operación. Con respecto al tipo de sustrato, los sustratos que

poseen mayor cantidad de carbono retenido en moléculas resistentes a la degradación, como la celulosa, requieren mayores tiempos de retención para ser digeridos en su totalidad. Para la elección de la temperatura, a mayor temperatura menor tiempo de retención, consecuentemente serán menores los volúmenes del digestor necesarios para digerir un determinado volumen de biomasa (1).

Si el TRH se elige demasiado corto las bacterias no tienen tiempo de formarse y crecer. Las bacterias requieren por lo menos unos días para que puedan reproducirse, es por ello que se considera un TRH de 10 días como mínimo para la producción de bacterias. A TRH muy altos la producción de biogás es muy baja, es por ello que la rentabilidad no es buena (7).

#### **2.4.4. pH**

El pH es uno de los parámetros de control más importantes, ya que los microorganismos metanogénicos presentan una gran sensibilidad a las fluctuaciones del mismo. El pH ideal para la digestión metanogénica es de 6.5 a 7.5, es por ello que cuando disminuye a 5 o aumenta a 8 se inhibe el proceso de fermentación o incluso se suspende (22).

El pH del sustrato también afecta a la producción de biogás. Se debe considerar que durante el proceso anaeróbico hay variaciones del pH que pueden ser soportados y equilibrados por el digestor, siempre que el pH este dentro de rangos establecidos. Si se alimenta al digestor con sustrato de pH bajo es muy posible que ocurra una inhibición en el proceso a la vez que puede generar la formación de espumas en el interior del mismo (7).

Para controlar el pH se utilizan varios productos químicos como: cal ( $\text{CaO}$ ), cal hidratada ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), bicarbonato de sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ) y hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) (7).

La cal se usa para elevar el pH, debido a tener un costo bajo y de fácil acceso. Sin embargo por ser un producto muy insoluble puede ocasionar problemas muy serios en la operación al digestor, como la formación de precipitados e incrustaciones que generan problemas con las bombas y taponamientos de tuberías a la vez que degeneración en la operación del digestor.

Otra opción para controlar el pH es el bicarbonato de sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ) es de fácil manipulación y muy soluble en comparación con cal, pero su costo es elevado (7).

#### **2.4.5. Degradación**

El grado de degradación es el porcentaje de la masa orgánica que es degradado durante el tiempo de retención y es transformado en biogás. Para lograr la degradación total de la biomasa se requieren tiempos de retención demasiados grandes, pero debido a que la materia orgánica posee un polímero llamado lignina el cual afecta notablemente a la digestibilidad de la fibra, no es posible una degradación total de la biomasa hasta llegar a su mineralización. Es por eso que en un digestor la degradación no es constante, comienza de forma acelerada y a medida que avanza el tiempo se empieza a tornar más lenta (7), (24).

En un biodigestor el porcentaje de degradación que es posible alcanzar depende del tipo de biomasa, de su alimentación y del proceso en sí. Si se co-digestionan varios tipos de biomasa como estiércol con materia vegetal, la degradación depende de las características de los componentes de la mezcla en el digestor. En la práctica se logra un porcentaje de degradación de un 35 a 75%, en promedio es posible degradar aproximadamente un 65% (27), (21).

#### **2.4.6. Nutrientes**

Para que exista actividad y crecimiento bacteriano, se requiere el aporte de nutrientes a bacterias y células que se encuentran en el interior del reactor. Entre los nutrientes se encuentran carbono, nitrógeno, fósforo, azufre y algunas sales minerales, que deben estar presentes en cantidades suficientes en los desechos orgánicos utilizados como sustrato (28). La cantidad de nutrientes disponibles para los microorganismos presentes en el biodigestor debe ser superior a la concentración óptima, debido a la sensibilidad de las bacterias metanogénicas las cuales se inhiben severamente por la deficiencia de nutrientes (29).

### 2.4.7. Agitación y mezcla

En biodigestores anaeróbicos la agitación de la masa es muy beneficiosa para la operación del proceso, debido a que ayuda a la generación del gas (27). Los principales objetivos que tiene la agitación son:

- Poner en contacto el sustrato fresco de alimentación con la población microbiana y a la vez que exista una densidad uniforme de las mismas.
- Ayudar con la remoción de las burbujas de biogás producida por las bacterias metanogénicas.
- Evitar la formación de costras, espumas y la sedimentación en el interior del digestor.
- Disminución en la formación de espacios muertos que reducen el volumen efectivo del digestor.
- Mantener una temperatura uniforme en todo el digestor.

Cuando se diseña un sistema de agitación se debe tomar en cuenta los objetivos deseados y a la vez los perjuicios que puede causar, para poder realizar una buena elección, ya que existen varios mecanismos de agitación. Entre ellos tenemos, los más simples como el que es provocado por la entrada y la salida de los líquidos o la agitación manual hasta los que involucran agitadores de hélice o recirculadores de sustratos (7).

#### 3.2.3.1. Tipos de agitadores

Los tipos de agitación aplicada en los digestores pueden ser mecánicos o neumáticos por recirculación del gas o líquido. Los más importantes se describen a continuación.

##### 2.4.7.1.1. Agitadores mecánicos

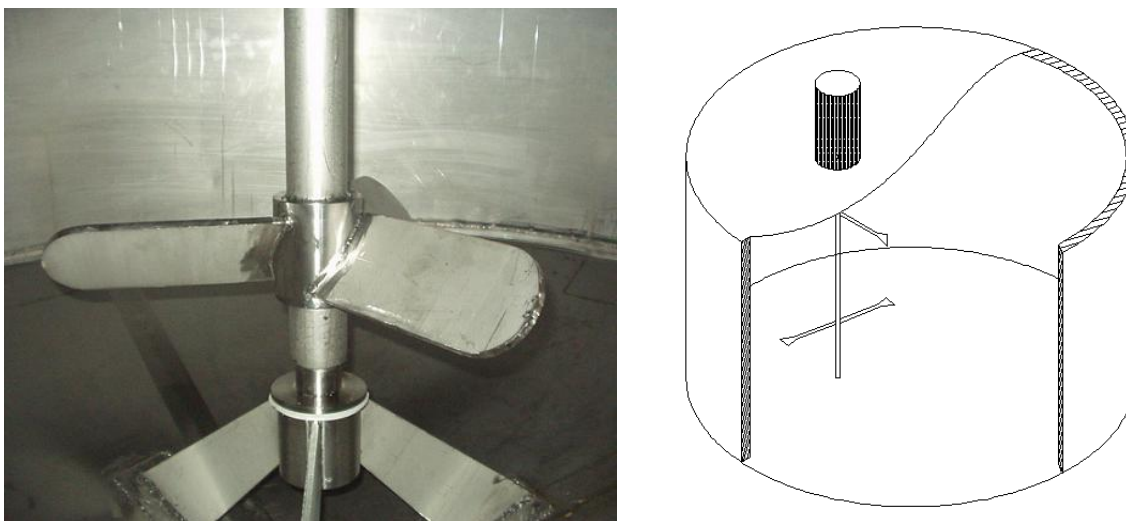
La agitación mecánica consiste en la aplicación de un dispositivo de paletas o hélice dentro del digestor

- Agitadores verticales

Existen dos tipos de agitadores verticales: agitadores verticales fijos y agitadores verticales con motor sumergible.

Los agitadores verticales fijos se los utiliza cuando se construye biodigestores con cubierta de hormigón o son de estructura de acero y alcanzan volúmenes de hasta  $1000 \text{ m}^3$ . El motor del agitador se encuentra en el exterior del digestor. El eje recorre verticalmente y se asienta sobre un soporte de giro que se encuentra en la base del digestor (8) como se muestra en la fig.2.13. La velocidad de giro de estos agitadores puede ser de 50 a 1500 revoluciones por minuto (RPM). La elección de la velocidad de giro y la duración de los periodos de agitación depende del tipo de biomasa y de las condiciones operativas a las que funciona el biodigestor. De manera general estos agitadores operan con velocidades de 300 RPM y por intervalos de tiempo de 1 hora continua con pausas de 30 minutos. Sin embargo, la operación siempre depende de las condiciones de temperatura y del tipo de biomasa (22).

La construcción de los agitadores es siempre de materiales resistentes y de excelente calidad. Es por ello que se recomienda que sea de acero inoxidable o galvanizado para evitar en lo posible la corrosión, las aspas deben tener un diseño aerodinámico y ser de alta dureza (7).



**Fig. 2.13.** Agitador vertical

Los agitadores verticales con motor sumergido se los utiliza cuando se construye biodigestores con cubierta de hormigón o son de estructura de acero y alcanzan volúmenes de hasta  $1000 \text{ m}^3$ . El motor del agitador se encuentra en el interior del biodigestor en contacto con la biomasa la cual sirve como refrigerante. Estos agitadores tienen un eje vertical que permite que el motor y las aspas recorran la biomasa de arriba abajo como se muestra en la fig. 2.14.

Esta característica es importante ya que evita formación de costras en la superficie del sustrato (8).

La velocidad de giro a la que trabajan estos agitadores es aproximadamente 1500 revoluciones por minuto (RPM) depende del tipo de biomasa y de las condiciones operativas a las que funciona el biodigestor. Según el volumen del biodigestor se instalan hasta 2 o 3 agitadores de esta característica. El tiempo de operación se ajusta según los parámetros de operación (22).



**Fig. 2.14.** Agitador vertical con motor sumergible

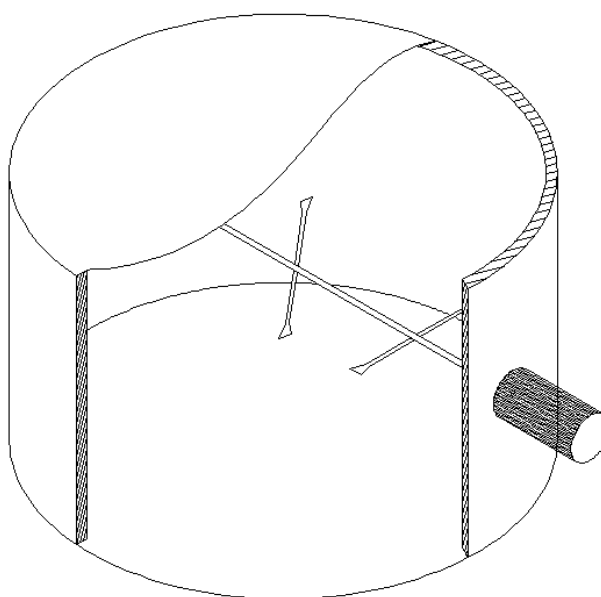
La construcción de los agitadores es así mismo de materiales resistentes y de excelente calidad como en los agitadores verticales fijos. Las aspas pueden llegar a tener 1m de diámetro y se construyen con acero al carbón recubierto con una lámina de 1mm de acero inoxidable y deben tener un diseño aerodinámico y alta dureza (7).

- **Agitadores horizontales**

Los agitadores horizontales se pueden instalar en digestores de acero, cubierta de hormigón o geomembrana. El motor del agitador se encuentra en el exterior del biodigestor. Estos agitadores se instalan transversalmente a la dirección del flujo en el digestor. El tamaño máximo del agitador es de 6 metros de ancho. En caso de que el tamaño del digestor sea superior se recomienda la instalación de dos agitadores que cubran el ancho del mismo. Las aspas tienen una forma de remos y se colocan asimétricamente encima y debajo del eje como se muestra en la fig.2.15 (8).

La velocidad de giro a la que trabajan estos agitadores es bastante baja llegando a un máximo de 60 RPM y opera un tiempo de 10 minutos dependiendo del tipo de biomasa y de las condiciones operativas a las que funcione el biodigestor, lo cual implica que se prende de 6 a 12 veces por día (22).

Este tipo de agitados al igual que los agitadores anteriores se construyen con materiales resistentes y de buena calidad, con estructuras de acero inoxidable o galvanizado para evitar la corrosión, las aspas son de acero inoxidable de alta dureza (7).



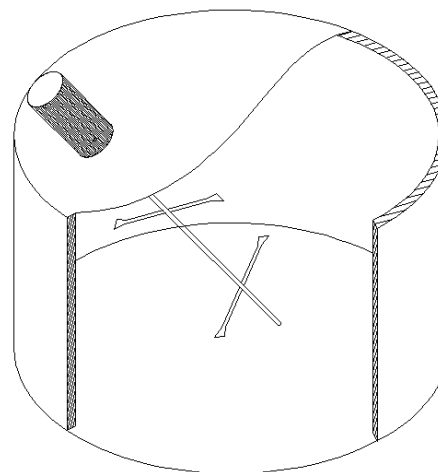
**Fig. 2.15.** Agitador horizontal

- **Agitadores inclinados**

Los agitadores inclinados se pueden instalar en digestores de acero, hormigón o geomembrana. El motor del agitador se encuentra en el exterior del biodigestor. Estos agitadores se instalan diagonalmente a lo largo del digestor al piso llegando hasta la pared del digestor. El tamaño máximo del agitador es de 8 metros de largo. Las aspas tienen una forma de hélice como se muestra en la fig.2.16 (8).

La velocidad de giro a la que trabajan estos agitadores es de 100 a 200 RPM y opera según los requerimientos de la operación del digestor dependiendo del tipo de biomasa y de las condiciones operativas a las que funciona el biodigestor (22).

La construcción de los agitadores requiere de materiales muy resistentes y de buena calidad y que eviten la corrosión, las aspas son de acero inoxidable (7).



**Fig. 2.16.** Agitador inclinado



#### 2.4.7.1.2. Agitadores Neumáticos

- Recirculación

Existen dos tipos de recirculación ya sea del biogás o de la mezcla líquida.

La agitación neumática por recirculación del gas consiste en inyectar el biogás producido del proceso de digestión anaeróbico por la parte inferior del digestor con lo que se consigue la creación de un flujo turbulento en el interior del reactor. Este método proporciona una mayor producción de gas y una rápida estabilización de la materia orgánica (15).

Con la agitación neumática por recirculación de parte de la mezcla líquida contenida en el digestor por medio de una bomba se logra de igual manera un flujo turbulento en el interior del reactor. A más de ayudar a generar mayor producción de biogás, se aprovecha para elevar la temperatura del digestor utilizando un intercambiador de calor externo (15).

#### **2.4.8. Promotores e inhibidores de la fermentación**

Los promotores son materiales que ayudan a la degradación de la materia orgánica y a la vez influyen positivamente en la producción del biogás. En cuanto a los efectos inhibidores se pueden dar por varias razones. Por un lado pueden ser razones operativas o de mantenimiento, mientras que por otro lado pueden ser ocasionados por elementos inhibidores que se encuentran en cantidades pequeñas en el sustrato, los cuales actúan negativamente en la producción de biogás o en la estabilidad del proceso anaeróbico (30).

En la alimentación de los biodigestores es necesario tomar en cuenta la concentración de biomasa, ya que un contenido de biomasa demasiado alto puede ocasionar inestabilidad en el proceso. Esto es debido a las altas concentraciones de elementos inhibidores presentes en la biomasa, como por ejemplo los antibióticos, desinfectantes y fungicidas o metales que pueden estar presentes en el sustrato (22).

Adicionalmente durante el proceso de producción de biogás se forman sustancias que pueden inhibir el proceso anaeróbico. Entre las sustancias producidas no deseables encontramos al amoníaco,  $\text{NH}_3$ , y al ácido sulfhídrico,  $\text{H}_2\text{S}$ .

Los desechos ganaderos contienen altas concentraciones de compuestos nitrogenados, en función del sistema de alimentación y del tipo de animales de los que procede. Durante la digestión anaeróbica el nitrógeno orgánico se hidrolisa, produciendo formas amoniacales. Debido a que el nitrógeno amoniacal es un importante nutriente para el crecimiento de la flora bacteriana, su deficiencia puede provocar fracaso en la producción de biogás y su exceso de concentración puede limitar el crecimiento bacteriano (19).

El amoníaco,  $\text{NH}_3$ , actúa como elemento inhibidor si existe en bajas concentraciones en el interior del biodigestor. El ion amonio,  $\text{NH}_4^+$ , reacciona con agua y se transforma en amoníaco,  $\text{NH}_3$ , de acuerdo al equilibrio termodinámico entre estas dos especies. Este equilibrio depende del pH de la mezcla haciendo que la concentración de amoníaco,  $\text{NH}_3$ , se incremente con el aumento en el valor del pH. Mientras que el amonio sirve a los microorganismos como una fuente de nitrógeno, el amoníaco en pequeñas concentraciones incluso mayores a 0,15 g/l, actúa como inhibidor.

Por otro lado el ácido sulfhídrico,  $\text{H}_2\text{S}$ , se forma durante el proceso anaeróbico. En presencia de sulfatos las bacterias metanogénicas compiten con las bacterias sulfato-reductoras por los sustratos útiles, teniendo estas últimas ventajas termodinámicas y cinéticas sobre las bacterias metanogénicas, las bacterias consumidoras de hidrógeno y sobre las bacterias acetogénicas. El resultado de esta competencia determinará la proporción de ácido sulfhídrico,  $\text{H}_2\text{S}$ , producido en el biogás. Este compuesto actúa como inhibidor en concentraciones mayores a 50 mg/l (7).

Las bacterias metanogénicas son generalmente las más sensibles a los inhibidores, aunque todos los grupos bacterianos pueden ser afectados por los compuestos tóxicos presentes en el biodigestor. Aparte de oxígeno, concentraciones elevadas de amoníaco, sales minerales, metales, etc. inhiben la digestión. En la tabla 2-4 se encuentran los compuestos que se pueden encontrar en el interior del digestor y las concentraciones que pueden provocar inhibición (31).

**Tabla 2-4.** Concentración inhibitoria de inhibidores comunes.

Inhibidores	Concentración inhibitoria
<b>Sulfatos (SO<sub>4</sub>)</b>	5000 ppm
<b>NaCl</b>	40000 ppm
<b>Nitrato</b>	0,05 mg/ml
<b>Carbono total</b>	0,2-50 g/l DQO
<b>Fosfatos (PO<sub>4</sub>)</b>	50 – 150 ppm
<b>Cobre (Cu)</b>	100 mg/l
<b>Cromo (Cr)</b>	200 mg/l
<b>Níquel (Ni)</b>	200-500 mg/l
<b>Calcio (Ca)</b>	2500-4500 mg/l
<b>Sodio (Na)</b>	3500-5500 mg/l
<b>Potasio (K)</b>	2500-4500 mg/l
<b>Magnesio(Mg)</b>	1000-1500 mg/l
<b>Oxigeno (O<sub>2</sub>)</b>	1ppm
<b>Hierro (Fe)</b>	10 – 200 ppm
<b>Cinc (Zn)</b>	0 - 3 ppm
<b>Cobalto (Co)</b>	0,5 – 20 ppm
<b>Molibdeno (M)</b>	0,1 – 0,35ppm
<b>Relación C:N:P:S</b>	2000:15:5:3
<b>Detergente Sintético</b>	20 – 40 mg/l

## 2.5. Propiedades que definen a la biomasa

Las propiedades que se deben tomar en cuenta para un mejor aprovechamiento de la biomasa en el biodigestor son las siguientes:

### 2.5.1. Sólidos totales (TS)

Los sólidos totales o TS por sus siglas en ingles representan la cantidad del material seco en porcentaje o mg/l. Se determina por el método estándar 2540B para el análisis de sólidos (32).

Este parámetro no representa un factor crítico en el funcionamiento, pero si es necesario tomar en cuenta para realizar la dilución correcta del sustrato que se va a utilizar (23). El porcentaje óptimo de sólidos en el sustrato que se va a digerir depende del diseño del digestor. Para el diseño utilizado en este estudio los sólidos totales deben ser menores al 5 %. Para llegar a estos porcentajes se tiene que diluir la biomasa con agua o recirculando el biol. En la tabla 2-5 se detallan los sólidos totales de materiales orgánicos utilizados en biodigestores. Porcentajes superiores a 15 % de la mezcla generan problemas de bombeo por las tuberías de alimentación a la vez que son difíciles de agitar dentro del digestor y pueden acumularse en el fondo ocasionando zonas muertas en el reactor (13).

**Tabla 2-5.** Contenido de sólidos totales aproximados de materiales de fermentación utilizados comúnmente en las zonas rurales.

Materiales	Contenido seco (%)	Contenido de humedad (%)
<b>Paja de arroz</b>	83	17
<b>Paja de trigo seca</b>	82	18
<b>Tallo de maíz</b>	80	20
<b>Pasto verde</b>	24	76
<b>Excretas humanas</b>	20	80
<b>Estiércol de cerdo</b>	18	82
<b>Estiércol de vaca</b>	17	83
<b>Orina humana</b>	0,4	99,6
<b>Orina de cerdo</b>	0,4	99,6
<b>Orina de vaca</b>	0,6	99,4

### 2.5.2. Sólidos volátiles (oTS).

Los sólidos volátiles o sólidos totales orgánicos se determinan por el método estándar 2540E de Italic Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (32) y son la parte orgánica de los sólidos totales. Esta es la materia que se degrada para producir biogás durante la digestión anaeróbica en el biodigestor. Este parámetro representa el contenido real de masa orgánica en la biomasa en porcentaje o en mg/l (23).

### 2.5.3. Carga orgánica volumétrica (COV)

Se entiende como COV a la cantidad de materia orgánica seca con la que se alimenta diariamente al biodigestor por cada  $\text{m}^3$  de volumen de digestor. Se define en kg de sólidos totales por  $\text{m}^3$  de volumen de digestor por día ( $\text{kg oTS} / \text{m}^3_{\text{reactor}} \cdot \text{d}$ ). El valor óptimo de la COV depende mayormente de la temperatura del proceso al interior del digestor y del tiempo de retención hidráulica (TRH). La COV es considerada como un parámetro para controlar la carga del digestor y es un factor determinante para el dimensionamiento del mismo. Si el sustrato es muy diluido, las bacterias no tienen suficiente alimento para vivir; mientras que un exceso de sólidos disminuye la movilidad de los microorganismos y por consiguiente la efectividad del proceso, ya que les impide acceder al alimento (7).

La velocidad con la que se alimenta la materia orgánica a los microorganismos que participan en la degradación de sustrato es fundamental para poder mantener unas condiciones estables en la digestión. Cuando la COV aportada es excesiva se crea una inestabilidad en el digestor por la acumulación de sólidos volátiles oTS. Generalmente la COV debe alcanzar valores entre 2-3  $\text{kg oTS} / \text{m}^3$  de digestor por día (15).

Si se mantiene constante el volumen del digestor ( $\text{m}^3$ ) y se aumenta la COV, disminuye el TRH. En este caso las bacterias tienen menor tiempo para degradar la materia orgánica y para producir biogás. Para cargas de COV mayores 3  $\text{kg} / \text{m}^3\text{d}$  se puede dar el caso de que la materia orgánica se descargue del digestor a través del efluente sin ser degradada completamente (7).

### 2.5.4. Demanda química de oxígeno DQO

La demanda química de oxígeno, DQO, es la cantidad total de oxígeno requerida para la oxidación de las sustancias orgánica en una muestra líquida bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo (15).

Por el principio de conservación de la materia, la cantidad eliminada de demanda química de oxígeno, DQO, es una medida indirecta de la concentración de materia orgánica en el residuo que es degradada y se convierte en biogás. Por este principio, la cantidad máxima de metano

producible es de  $0.35 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg}$ . DQO eliminada, en condiciones normales de presión y temperatura (7).

### 2.5.5. Relación carbono - nitrógeno (C: N)

Los biodigestores son considerados como un cultivo de flora microbiana, a los que se alimenta desechos orgánicos y la degradan. Los elementos como el carbono (en forma de carbohidratos) y el nitrógeno (como proteínas, amoníaco, etc.), son el principal alimento para las bacterias anaeróbicas (23).

La digestión anaeróbica se lleva a cabo cuando la materia orgánica contiene una mínima cantidad de nutrientes. El consumo de carbono (C) es superior al de nitrógeno (N). El carbono es utilizado para la obtención energía y el nitrógeno para construir estructuras celulares. Las bacterias presentes en el proceso, utilizan carbono 30 veces más rápido que el nitrógeno, dando una relación  $C/N = 30:1$  (33). Cuando la relación es muy baja (10:1) se presentan perdidas de nitrógeno asimilable. Por consecuencia los microorganismos suspenden su actividad y el digestor se detendrá. En el material digerido se reduce el poder fertilizante, además de producir amoníaco en grandes cantidades el cual es tóxico e inhibe el proceso. Por otro lado, si la relación es muy grande (40:1) se inhibe el crecimiento debido a falta de nitrógeno, por lo tanto, el digestor operará lentamente y tiende a acidificarse (23). En la tabla 2-4 se detallan algunas relaciones de carbono a nitrógeno de varia materias orgánicas (22).

Es necesario también conocer la concentración de fósforo, ya que es parte de los nutrientes necesarios para el crecimiento de microorganismos. Una relación de nitrógeno a fósforo  $N/P=5:1$  se considera óptimos.

La relación ideal de nutrientes se expresa en la siguiente ecuación:

$$C/N/P = 125:5:1$$

$$C/N = 20:1 \text{ hasta } 30:1$$

$$N/P = 5:1$$

Debido a estas características de la relación C/N, en varios casos es necesaria la cogeneración o mezclas de distintos tipos de biomasa con diferente relación C/N para aumentar o reducir esta relación hasta obtener un valor más cercano al óptimo. Es posible mezclar los materiales de baja relación C/N con materiales de alta relación de C/N para obtener el promedio de relación C/N deseada, la cual es de 20 a 30 partes de carbono por una de nitrógeno (7).

En la tabla 2-6 se muestra la relación entre el carbono y el nitrógeno de ciertas materias primas empleadas en los biodigestores anaeróbicos (22).

**Tabla 2-6.** Relación carbono a nitrógeno de las materias primas empleadas

Materias Primas	Contenido de carbono de las materias primas por peso (%)	Contenido de nitrógeno de las materias primas por peso (%)	Relación carbono a nitrógeno (C/N)
<b>Paja seca de trigo</b>	46	0.53	87:1
<b>Paja seca de arroz</b>	42	0.64	67:1
<b>Tallo de maíz</b>	40	0.75	53:1
<b>Hojas secas</b>	41	1.00	41:1
<b>Estiércol de aves</b>	41	1.30	32:1
<b>Pasto</b>	14	0.54	27:1
<b>Cacahuets tallos y hojas</b>	11	0.59	19:1
<b>Estiércol fresco de oveja</b>	16	0.55	29:1
<b>Estiércol fresco de vaca</b>	7.3	0.29	25:1
<b>Estiércol fresco de caballo</b>	10	0.42	24:1
<b>Estiércol fresco de cerdo</b>	7.8	0.60	13:1
<b>Excretas frescas humanas</b>	2.5	0.85	2.9:1

## 2.6. Producción de biogás

Los volúmenes de biogás generados por el digestor se expresan de manera general en  $\text{m}^3$  biogás /  $\text{m}^3$  reactor, l biogás / kg oTS, etc. Estos volúmenes difieren según el tipo de alimentación, concentración de sólidos volátiles (oTS), tiempo de retención hidráulica (TRH),

temperatura, cantidad de inhibidores y el diseño del biodigestor. De manera general la producción promedio oscila entre 1 y 2 m<sup>3</sup> biogás por cada m<sup>3</sup> digestor o 0,35 m<sup>3</sup> de gas metano por kg DQO degradado (7).

Todos los desechos orgánicos pueden producir biogás, así sea en mínimas proporciones. La producción de biogás de un determinado desecho orgánico depende de la composición físico - química y especialmente de la cantidad de carbono degradable que contenga. Otros factores que influyen en la producción son las propiedades que definen a la biomasa, con la que se alimenta el biodigestor (23).

En la realidad es imposible predecir con exactitud la producción de biogás de determinada biomasa o mezcla, debido a que se desconoce la cantidad exacta de nutrientes y componentes del sustrato. Para estimar la producción de biogás se realizan mediciones puntuales del contenido de nutrientes, pero estos no garantizan el pronóstico de la producción de biogás debido a que estos valores varían día a día (7).

La velocidad de degradación de la materia orgánica se consigue también elevando la temperatura del proceso dentro del biodigestor, pero solo se logra hasta un cierto límite, ya que no es posible aumentar demasiado la temperatura por que las bacterias se inhiben o mueren y la producción de biogás se detiene (7). Por consiguiente se favorece la producción de CO<sub>2</sub> y se reduce la cantidad de metano, ocasionando que el gas producido tenga bajo poder calorífico. La producción de biogás dependerá del grado de homogenización y mezcla de la biomasa, por lo cual a mayor agitación mayor será la producción de biogás. El pH es otro factor que influye en la producción de biogás, el cual se debe mantener en un rango de 6.5 a 7.5 para que las bacterias se encuentren en condiciones apropiadas para su crecimiento (16).

## **2.7. Producción de lodos**

Los lodos se producen debido a componentes orgánicos e inorgánicos que no pudieron ser degradados en el interior del biodigestor por medio de la digestión anaeróbica. La materia orgánica volátil contenida en la masa seca es el único componente de la biomasa que se puede degradar y de la cual se produce el biogás. El resto de biomasa corresponde a desechos



orgánicos no degradables, materiales inorgánicos, arenas, etc. Los cuales son retirados periódicamente (7).

En el proceso de digestión anaeróbica se remueven los gases generados ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ) y se conservan en el efluente todos los nutrientes originales (N, P, K) contenidos en la materia prima que son esenciales para el crecimiento de las plantas, por lo cual los lodos se convierten en un valioso fertilizante orgánico (24).

## 2.8. Acondicionamiento y aprovechamiento de biogás

El biogás es un combustible natural, de carácter no fósil, este gas posee un alto poder calorífico dependiendo del contenido de gas metano. El aprovechamiento del biogás está relacionado básicamente por el uso que se le puede dar como combustible para la generación de energía eléctrica o para la generación de energía térmica, como gas para uso doméstico o como combustible para vehículos, etc. (23). A continuación se presentan las características y los tipos de acondicionamiento necesarios del biogás.

### 2.8.1. Características del biogás

El biogás es el producto del proceso de digestión anaeróbica de material orgánico. Su composición específica depende de la biomasa digerida y del tipo de biodigestor utilizados, de manera general la composición del biogás esta detallada en la siguiente tabla 2-7.

**Tabla 2-7.** Composición del biogás.

Componentes	Contenido (%)
Metano ( $\text{CH}_4$ )	50 – 70
Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ )	30 – 40
Hidrogeno ( $\text{H}_2$ )	1– 5
Nitrógeno ( $\text{N}_2$ )	1 – 2
Oxigeno( $\text{O}_2$ )	0,5 – 1
Acido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ )	0 – 1
Saturación de vapor de agua	80 – 100

En tabla 2-8 se especifican las características de los componentes del biogás producido por el proceso de digestión anaerobia y de la mezcla resultante.

**Tabla 2-8.** Propiedades de los componentes del biogás.

Componentes	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Relación de densidad con el aire	Temperatura de encendido (°C)	Contenido de oxígeno para la explosión (% vol.)
<b>CH<sub>4</sub></b>	0,72	0,55	600	4,4 – 16,5
<b>CO<sub>2</sub></b>	1,85	1,53	-	-
<b>H<sub>2</sub>S</b>	1,44	1,19	270	4,3 – 45,5
<b>CO</b>	1,57	0,97	605	10,9 – 75,6
<b>H<sub>2</sub></b>	0,084	0,07	585	4 – 77
<b>Biogás</b>	1,2	0,9	700	6 – 12

Debido a su elevado contenido de metano el biogás, posee un poder calorífico de 4700 a 5500 kcal/m<sup>3</sup> (6,4 kWh/m<sup>3</sup>) dependiendo del contenido de gas metano. Por lo tanto, puede llegar a genera un calor equivalente a 22000 BTU/m<sup>3</sup> o 21,5 MJ/m<sup>3</sup> (17). Su temperatura de auto-ignición es similar a la del metano puro y oscila entre 650 – 750°C. En la tabla 2-9 se presentan algunas equivalencias energéticas del biogás.

**Tabla 2-9.** Equivalencias energéticas para 1 m<sup>3</sup> de biogás.

Tipo de biomasa o sustrato	Cantidad equivalente	Capacidad energética
<b>Diesel</b>	0,6 kg	12 kWh/kg
<b>Carbón</b>	0,7kg	8,5 kWh/kg
<b>Gas natural</b>	0,6 m <sup>3</sup>	5,3 kWh/m <sup>3</sup>
<b>Gas propano</b>	0,24 m <sup>3</sup>	25 kWh/m <sup>3</sup>
<b>Biogás para generar electricidad</b>	1 m <sup>3</sup>	2 kWh/ m <sup>3</sup>
<b>Biogás para generar 20 horas de luz equivalente a una bombilla</b>	1 m <sup>3</sup>	100W
<b>Madera</b>	1,43 kg	4,5 kWh/ kg

En la siguiente tabla se exponen las características relevantes del biogás y a la vez se compara con otros gases que se emplean como combustibles.

**Tabla 2-10.** Características del biogás en comparación con otros gases combustibles

Tipos de gas	Poder calorífico (kWh/m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Relación de densidad con el aire	Temperatura de ignición (°C)	Contenido de oxígeno para la explosión (% vol.)
<b>Biogás</b>	6	1,2	0,9	700	6 – 12
<b>Gas natural</b>	10	0,7	0,54	650	4,4 – 15
<b>Propano</b>	26	2,01	1,51	470	1,7 – 10,9
<b>Metano</b>	10	0,72	0,55	600	4,4 – 16,5
<b>Hidrógeno</b>	3	0,09	0,07	585	4 – 7

Como se observa en la tabla 2-10, el poder calorífico del biogás es inferior al de gas natural o al del propano, pero este valor puede fluctuar debido a que está íntimamente relacionado con el porcentaje de metano presente en el biogás. La densidad es de 1,2 kg/m<sup>3</sup> y la relación de densidad con el aire es menor a uno, lo que indica que es menos pesado que el aire, y a su vez lo hace un gas muy volátil que tiende a subir cuando existen fugas dentro del sistema. La temperatura de ignición es relativamente alta por lo cual no estalla con facilidad. Para que ocurra una explosión debe estar dentro del rango de ignición de oxígeno las cuales deben estar dentro del rango de 6 – 12% (17).

### 2.8.2. Purificación de biogás

El biogás está compuesto principalmente por metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Adicionalmente tiene pequeñas cantidades de otros gases, entre ellos tenemos la presencia de sulfuro de hidrogeno (H<sub>2</sub>S) y vapor de agua. Estos compuestos disminuyen la eficiencia energética y la calidad del biogás. Es por ello que el biogás requiere de un tratamiento adicional para disminuir las concentraciones de estos compuestos (1). A continuación se describen algunos métodos alternativos para la disminución de los compuestos indeseados en el biogás.

### **2.8.2.1. Reducción de humedad**

Cuando el biogás sale de los biodigestores está saturado al 100% con humedad. Este problema aumenta en épocas de verano donde las mayores temperaturas ambientales hacen que el biogás alcance la sobresaturación. Por otro lado, hay factores que influyen la cantidad de humedad en el biogás como son el porcentaje de dilución y tipo de biomasa (7). Junto con el vapor de agua se arrastran partículas sólidas las cuales resultan perjudiciales en el aprovechamiento del biogás. Por lo cual, es necesaria la reducción del contenido de humedad y de partículas sólidas hasta un valor adecuado para potencializar su uso como material energético (1).

Las características de la generación del biogás hacen que este sea un gas naturalmente húmedo y que en la tubería de conducción del gas se almacene un elevado porcentaje de humedad en forma de condensado. Esta humedad disminuye por un lado el potencial energético por m<sup>3</sup>. Por otro lado, produce oxidación de materiales y además obstruye tuberías, por lo que es conveniente su eliminación en especial si queremos comprimir el biogás. Entre los métodos más utilizados tenemos la implementación de filtros de silicato de silicio llamado comúnmente silicagel, o la instalación de condensadores, etc. (25), (34).

Para motores a biogás que usan el biogás para la generación eléctrica se encuentran parámetros establecidos con un límite máximo de contenido de humedad en un rango comprendido entre el 70 al 80 % y contenido de partículas muy bajo (7).

### **2.8.2.2. Reducción de H<sub>2</sub>S**

El ácido sulfhídrico es un gas altamente venenoso y es el principal causante de malos olores en los biodigestores. Tiene un efecto corrosivo en los generadores de energía eléctrica, motores, válvulas, tuberías y de manera general en cualquier equipo electromecánico que se encuentra en la planta de biogás debido a la facilidad que tiene para formación de ácido sulfúrico como se muestra en la ecuación 2.2 (35).



Los tratamientos de reducción o eliminación de H<sub>2</sub>S y en general para compuestos que emanan malos olores se clasifican en tratamientos físico-químicos y en tratamientos biológicos. Entre

los sistemas de tratamiento físico-químico para la reducción de H<sub>2</sub>S en el biogás tenemos la absorción (filtros de carbón activado), la adsorción (limaduras de hierro), la oxidación química, etc. Estos tipos de sistemas son mucho más costosos que los tratamientos biológicos. Además los procesos físico-químicos generan casi siempre compuestos que son mucho más contaminantes que los mismos compuestos que se requiere eliminar. En cuanto a eficiencia estos tratamientos son excelentes siempre y cuando se cumpla con las condiciones óptimas y con los requerimientos de productos químicos que automáticamente elevan los costos del tratamiento (7).

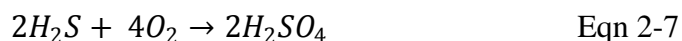
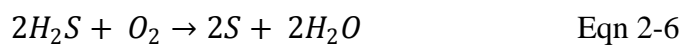
El sistema de tratamiento más importante y común es la adsorción, debido a su facilidad para la implementación y su bajo costo, el cual por lo general es utilizado para instalaciones pequeñas. Para la reducción de H<sub>2</sub>S, se utiliza de esponjillas o limaduras de hierro (óxido de hierro III) que son sometidas a un proceso de oxidación. La reacción química que ocurre durante el proceso de oxidación se expresa en las siguientes ecuaciones.



Estas reacciones ocurren a temperaturas menores de 48.8 °C y a un pH sobre 7. A temperaturas mayores a 50°C, se deshidrata el óxido de hierro de tal forma que reduce su capacidad de oxidación y se requiere una constante reposición del hierro. Lo cual lo hace un método poco amigable ambientalmente debido a que genera un desecho que debe ser reciclado o deber recibir un tratamiento previo antes de exponerlo al medio ambiente.

El carbón activado está asociado con la adsorción, es un proceso físico en el cual las moléculas de H<sub>2</sub>S disueltas se adhieren a la superficie del carbón. Cuando se usa solo, la filtración por carbón activado elimina cantidades muy pequeñas de ácido sulfhídrico, generalmente concentraciones bajo 0.3 mg/l. Sin embargo, el carbón activado tiene una capacidad limitada para absorber el H<sub>2</sub>S (19).

La purificación del biogás por medio del suministro de pequeñas cantidades oxígeno se realiza por medio de compresores o bombas de aire. Si la dosificación de oxígeno se realiza correctamente se pueden obtener reducciones de H<sub>2</sub>S de hasta el 95% (7).



La oxidación química de  $H_2S$  por medio del suministro de oxígeno al interior del digestor, presenta las dos reacciones químicas descritas en las ecuaciones 2-6 y 2-7. Se obtiene como productos un polvo amarillo de azufre que se deposita sobre la superficie de la biomasa, el cual puede ser utilizado como fertilizante y agua. Por otro lado se produce ácido sulfúrico que trae consigo problemas de corrosión en accesorios y parte metálicas de la planta de producción de biogás.

En cuanto al tratamiento biológico es amigable ambientalmente y requiere bajos costos de operación y mantenimiento. Solo requieren de un exacto control de la cantidad de oxígeno que se suministra en el interior del digestor de tal manera, que las bacterias oxidantes sulfobacter puedan transformar el  $H_2S$  en azufre ( $S_2$ ) y agua ( $H_2O$ ), pero no se logra reducir tanto la concentración de  $H_2S$ , con este método (7). Se llega mínimo a 500 ppm, mientras que con métodos físico- químicos se puede bajar más su concentración, y se recircula el azufre que vuelve a formar  $H_2S$ . Puede haber acumulación de azufre lo cual puede generar inhibición en el funcionamiento del reactor.

### **2.8.2.3. Reducción de $CO_2$**

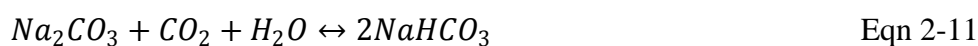
La reducción del contenido de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) se la realiza cuando se desea añadir el biogás a una red de gas natural, ya que en este caso requiere un gas de mayor calidad y poder calorífico. Para el caso donde el gas es utilizado directamente para la generación de energía eléctrica o térmica no se requiere una alta pureza del biogás. En este caso se considera innecesario realizar algún tipo de tratamiento para la reducción del  $CO_2$  ya que aumenta los costos innecesariamente. Por otro lado en plantas industriales de producción de biogás este tratamiento debe estar justificado económicamente para su realización (7).

El método más sencillo y eficiente es la remoción del dióxido de carbono ( $CO_2$ ) por absorción en una solución de cal ( $CaO$ ). Este método requiere mucha atención debido a que la solución de cal se agota y necesita cambiarse periódicamente, como se muestra en la ecuación 2-8.



Pero otra alternativa de bajo costo es la adsorción en agua, ya que el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es muy soluble bajo presión atmosférica y temperatura de 20 °C mientras que el metano CH<sub>4</sub> no lo es. Además es un método muy sencillo para la eliminación de impurezas. Se debe tomar en cuenta que a alta presión, la solubilidad del CO<sub>2</sub> aumenta proporcionalmente permitiendo que la concentración de CH<sub>4</sub> se incremente (19).

Existen métodos alternativos para la reducción el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) presente en el biogás por ejemplo por medio de hidróxido de sodio (NaOH) o por medio del bicarbonato de sodio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), pero son métodos de altos costos y de complicada adquisición es por ello que no se realiza de forma común. En las siguientes ecuaciones se muestran las reacciones químicas que se dan para atrapar el CO<sub>2</sub>.



## 2.9. Aprovechamiento del bioabono (BIOL)

Como resultado de la digestión anaeróbica se obtienen dos productos que son perfectamente aprovechables, uno el biogás que es usado en la área energética y el otro el bioabono conocido como biol que es muy valioso en el área agrícola. El bioabono sale del residuo orgánico que se descarga del biodigestor después del proceso de digestión anaeróbica, este es un fluido con características físicas de lodo – líquido, el cual posee unas excelentes propiedades fertilizantes debido a que está constituido por una fracción orgánica que no se degrada anaeróbicamente y por el material inorgánico el cual aporta con nutrientes y micro elementos (4).

En el proceso de digestión anaeróbica se remueve solo la masa volátil que puede generar el biogás (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S) que representa entre 5 al 10% del volumen total de la carga. Es por ello que en el efluente del biodigestor se conservan nutrientes originales (N, P, K) contenidos en su materia prima (biomasa o sustrato), que son esenciales para los cultivos. Esto lo hace un valioso fertilizante orgánico, estabilizado químicamente y prácticamente libre de

microorganismos patógenos y de sencilla utilización. El contenido de nitrógeno (N), carbono (C), fósforo (P), potasio (K) y otros nutrientes, depende del origen de la biomasa que se alimenta al digestor, del tiempo de residencia (TRH), de la carga orgánica volumétrica (COV) y la temperatura del proceso. Por medio de la digestión se degrada de 25 a 80 % de materia orgánica en masa volátil en su mayoría en metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (36).

El grado de degradación depende esencialmente del tipo de biomasa que se utilice. Por ejemplo en el caso de desechos animales, específicamente el estiércol de ganado vacuno, el porcentaje de degradación es de 30 a 40%, para el estiércol de cerdo es de 40 a 50%, para la gallinaza es de 45 a 65% (37).

La composición del bioabono es en promedio la siguiente: contiene 8,5% de materia orgánica, 2,6% de nitrógeno, 1,5% de fósforo, 1% de potasio con un pH de 7,5 (38). Este biol ya sea sólido o líquido no tiene mal olor ni bacterias patógenas a diferencia del estiércol fresco, y puede ser aplicado directamente en el campo en forma líquida. El fertilizante orgánico sólido se deshidrata y almacena para su posterior utilización. El problema que genera la deshidratación es que puede haber pérdidas de nitrógeno y eso no es el alto costo y conveniente para el bioabono (39).

### **2.9.1. Característica del bioabono**

El bioabono se caracteriza en base a sus propiedades y al sustrato del cual proviene, de tal manera que las principales características son las siguientes: (7)

- Menor tamaño de partículas y homogenización.
- Reducción de malos olores.
- Reducción de microorganismos patógenos, larvas.
- Se mantiene la concentración de los nutrientes (NPK) del sustrato.
- Menor viscosidad.
- Mayor mineralización y disponibilidad para el cultivo.



### **2.9.2. Usos del bioabono como fertilizante**

El bioabono se utiliza como fertilizante orgánico para cualquier tipo de cultivos. Mediante diferentes pruebas a cultivos, se ha determinado que existen aumentos en el rendimiento de las cosechas y mejoramientos en las propiedades del suelo en comparación con los fertilizantes químicos que a largo plazo disminuyen la productividad del suelo (29).

A continuación se describen algunas razones por las cuales se prefiere el uso del fertilizante orgánico o biol al uso de fertilizantes sintéticos o químicos.

Debido a las condiciones anaeróbicas de proceso y operación los microorganismos patógenos sufren una reducción significativa en el interior del biodigestor. Estudios realizados experimentalmente demuestran que se alcanza un 85% de reducción de patógenos, debido a factores como temperatura y tiempo de retención del digestor. A temperatura de 35 °C los coliformes fecales fueron destruidos en un 50 a 70 % (19).

El bioabono tiene un gran poder de fijación en el suelo, lo que evita la solubilidad excesiva de las sales, mejora la estructura del suelo para que sea más trabajable y con facilidad para que las raíces penetren más fácilmente. El biol además contiene nutrientes no disponibles con facilidad para las plantas, por lo que necesitan de complejos procesos de descomposición para la liberación de los nutrientes. De esta forma la nutrición es a largo plazo y continúa (7).

Se incrementa la cantidad de humus en la tierra, lo cual mejora la estructura y textura del suelo, facilita la aireación, mejora la capacidad de retención e infiltración del agua.

Permite el ahorro en la cantidad de fertilizantes químicos utilizados sin la disminución de la producción. Presenta incrementos en la producción.

Favorece el desarrollo de la flora bacteriana en el suelo, ayudando a que las bacterias se multipliquen, dando vida y salud a la tierra, la alta actividad bacteriana fija el nitrógeno atmosférico, transformándolo en sales aprovechables por los cultivos. Por su pH neutro (7,5) funciona como corrector de acidez.

### **2.9.3. Efectos del bioabono como fertilizante**

Se ha determinado que los efectos generados por el fertilizante orgánico líquido son promover el equilibrio nutricional del suelo, aumentar su fertilidad, estimular a los microorganismos beneficiosos del suelo, a la vez de ser rico en minerales, aminoácidos y hormonas. Aumenta el crecimiento de las plantas. Un gran efecto que se ha encontrado es el balance nutricional que le da a la planta debido a su origen orgánico, haciendo que sea mucho más resistente al ataque de plagas y enfermedades originadas por el desequilibrio ambiental (7).

Un metro cúbico de bioabono producido y aplicado diariamente, puede llegar a fertilizar dos hectáreas de tierra por año y proporcionar hasta 200 kg de nitrógeno por hectárea de los cuales estarán disponibles en el primer año de 60 a 70 kg. El bioabono no deja residuos perjudiciales a la tierra gracias a su origen orgánico, por lo contrario aumenta la calidad de los cultivos y puede considerarse como un buen fertilizante que puede competir o complementarse con fertilizante químicos (7).

### **2.9.4. Formas de aplicación del bioabono**

El bioabono se puede aplicar en los suelos de tres maneras: de forma líquida, sólida o como compostaje. A continuación se detalla cada una.

#### ***3.1.4.1. Efluente líquido***

La aplicación en forma líquida presenta ventajas como la alta disponibilidad de nutrientes y una buena absorción en los cultivos. Se puede aplicar directamente después de la salida del biodigestor o almacenarse en tanques muy bien cerrados durante un periodo no mayor a 4 semanas, para evitar grandes pérdidas de nitrógeno ( $N_2$ ) por volatilización (8).

#### ***3.1.4.2. Efluente compostado***

Otra alternativa de aplicación del bioabono es agregándole material verde al efluente del biodigestor, por ejemplo, desechos de forraje de establo, y someterlo a un proceso de compostaje. Con este método se pierde aproximadamente de 30 a 50 % de nitrógeno disponible, pero tiene la ventaja de que el producto final es compacto, en forma de tierra negra, lo que facilita el transporte, comercialización y aplicación (7).

### **3.1.4.3. Efluente seco**

La deshidratación del efluente del digestor da como resultado la pérdida de por lo menos el 90% de nitrógeno orgánico, lo que significa aproximadamente el 5% de nitrógeno total. Al utilizar el efluente seco se tiene el mismo resultado que al usar el estiércol seco por consiguiente no genera ningún beneficio extra que este bioabono pase por el proceso de digestión anaeróbica, es por eso que se recomienda utilizar este método solo cuando se va a fertilizar extensas áreas.

### **3. Métodos Experimentales**

En esta investigación se utilizó un biodigestor a escala piloto para dar un tratamiento anaeróbico a desechos orgánicos vegetales y animales con el fin de generar biogás y fertilizante orgánico. Es por ello que para dar funcionamiento a la planta piloto se tomó en cuenta tres fases; la construcción, la puesta en marcha y la operación del biodigestor. Para controlar los parámetros se usó un sistema de control automático para la temperatura y nivel. Los análisis realizados tanto en la materia prima como en la mezcla reactiva y el producto fueron pH, sólidos totales, sólidos totales orgánicos, demanda química de oxígeno (DQO), y contenido de nitrógeno y fósforo.

El tratamiento que se le da al biogás producido, es el de pasar por una trampa de vapor para la eliminación de humedad, luego por un filtro de limaduras de hierro para la eliminación de  $H_2S$  y por último un filtro de carbón activado para la eliminación de olores y humedad, para su posterior almacenamiento. Los tratamientos que se realizaron al fertilizante orgánico producido para la eliminación de los microorganismos patógenos fueron adición de cal ( $CaO$ ) y estabilización a elevadas temperatura y aeración del líquido, para su posterior almacenamiento.

A continuación se presenta el proceso, los equipos de la planta piloto y el procedimiento utilizado para la digestión anaeróbica.

#### **3.1. Descripción del proceso de digestión anaerobia**

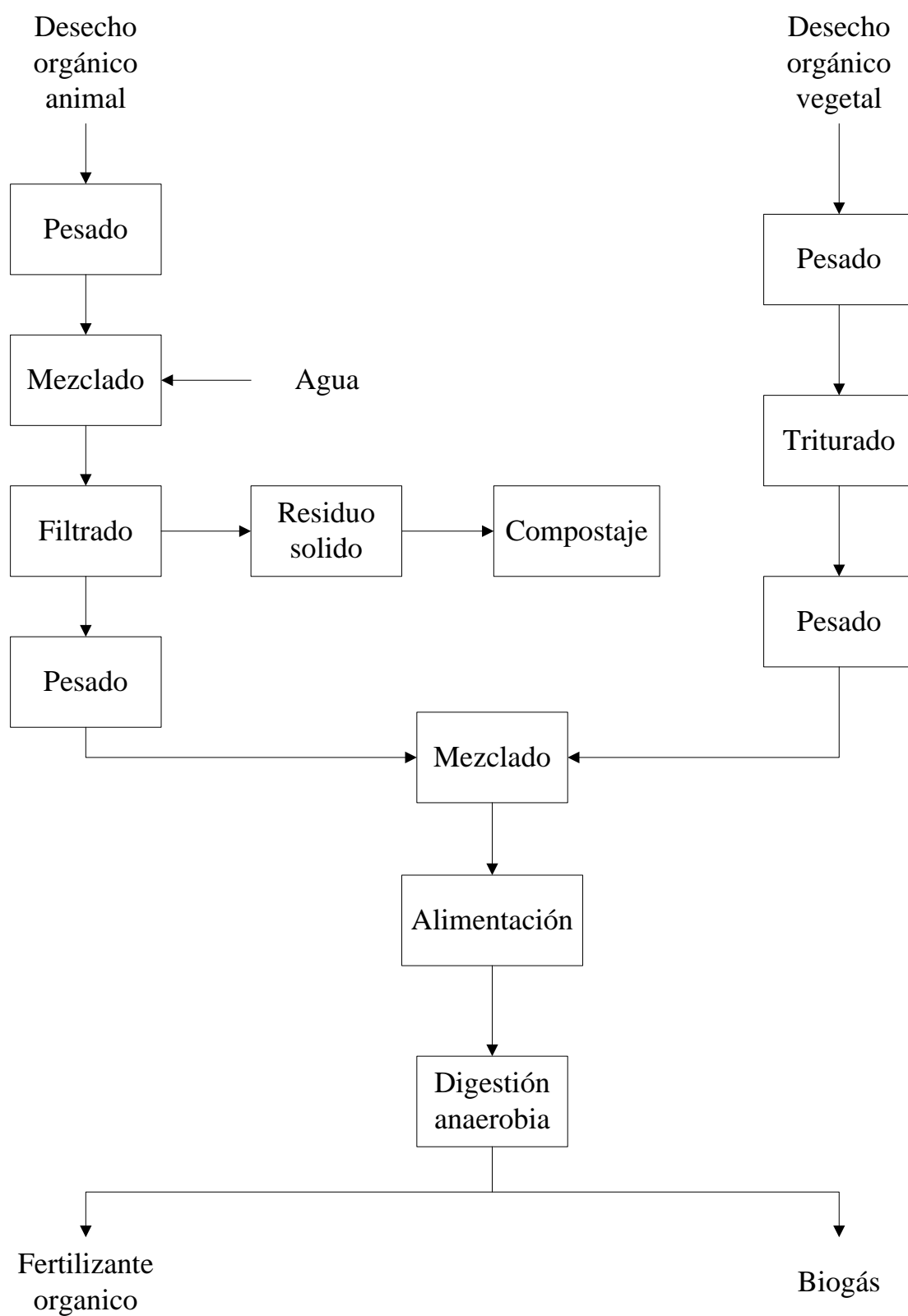
##### **3.1.1. Preparación de la materia prima**

El tratamiento de la materia prima que ingresa al biodigestor inicia con la recepción y pesado de la materia orgánica vegetal y animal. La materia orgánica vegetal se tritura por medio de una trituradora de martillos de uso agrícola hasta que alcance un tamaño de partícula aproximado de 0.5 a 1 mm. Por otro lado se realiza la mezcla de materia orgánica animal con agua, y la separación de los sólidos grandes al hacer pasar la mezcla por un tamiz de malla 4mm. En la etapa de puesta en marcha se usó una dilución en relación de 1 a 5 de materia

orgánica animal y agua respectivamente. Mientras que en la etapa de operación la mezcla debe ser mucho más concentrada y por ello se usó una dilución 1 a 3, lo que significa que por cada kg de materia orgánica animal se añade 3 litros de agua. Una vez realizada la dilución se procedió a filtrar la mezcla con una malla que permitía el paso de partículas menores o iguales al diámetro de partícula de 4mm, donde se separa el residuo sólido del estiércol diluido el cual se va a compostaje. Posterior a esto se agrega al tanque de alimentación la materia orgánica vegetal triturada y la materia orgánica animal filtrada, en un porcentaje de 50% del volumen total para cada una de las materias orgánicas y se agita la mezcla.

### **3.1.2. Operación de la planta piloto**

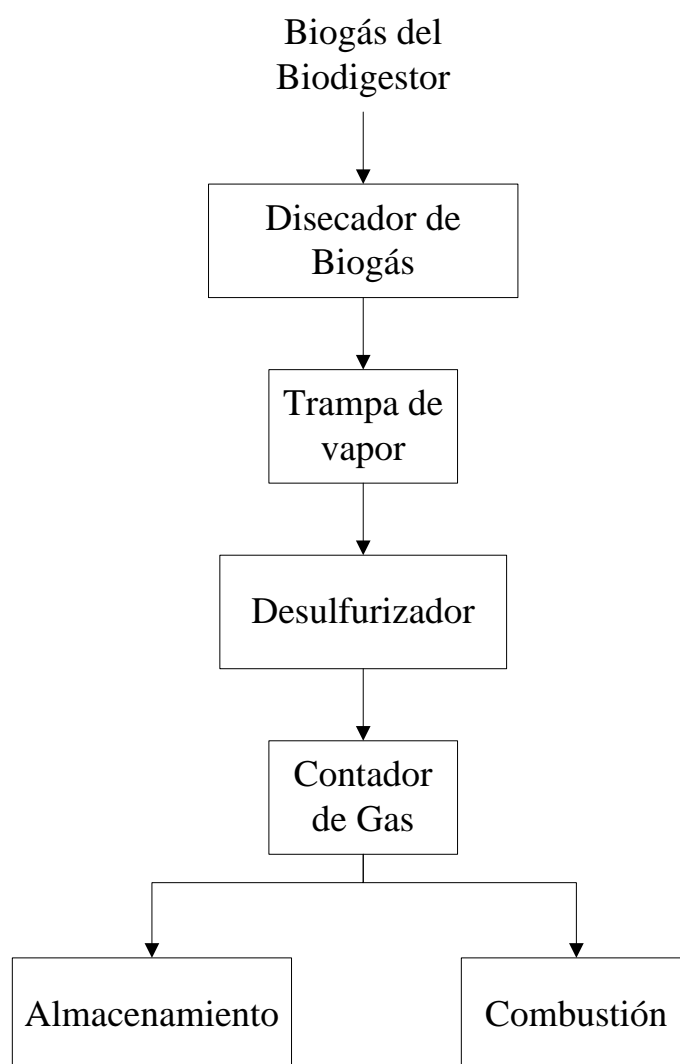
La operación de la planta piloto inicia, como se muestra en la Fig.3.1, con el pre tratamiento de la biomasa como se detalló en el apartado anterior. La mezcla de las materias primas se realiza en el tanque de alimentación donde además se controla los parámetros de pH y homogeneidad. La alimentación ingresa al interior del biodigestor por medio de una bomba centrífuga donde se controla parámetros de presión, temperatura y nivel. Durante el tiempo de residencia de la mezcla reactiva determinado por el proceso, se produce biogás y fertilizante orgánico. El biogás pasa por un tratamiento con el objetivo de purificarlo, y el fertilizante orgánico o biol requiere de un tratamiento después de salir del biodigestor para su estabilización.



**Fig. 3.1.** Diagrama de bloque del proceso de producción de biogás y fertilizante orgánico

### 3.1.3. Tratamiento del biogás

El tratamiento que se da al biogás producido en la digestión anaeróbica de desechos orgánicos animales y vegetales, es con el fin de purificarlo y elevar su capacidad de combustión. Es por ello que se adoptó en primer lugar un filtro del carbón activado para la reducción de la humedad y del ácido sulfhídrico, luego pasa por una trampa de vapor para seguir reduciendo la humedad. Posteriormente el gas fluye por un filtro de limallas de hierro con el objetivo de atrapar de manera considerable trazas de ácido sulfhídrico,  $H_2S$ , de tal manera que sea posible su almacenamiento o quema. En la Fig. 3.2 se muestra un diagrama con el tratamiento completo.



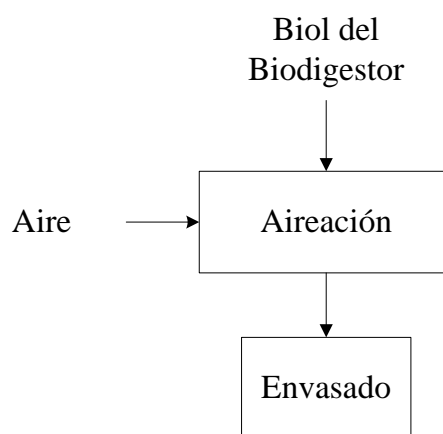
**Fig. 3.2.** Diagrama de bloque del tratamiento de biogás

### 3.1.4. Tratamiento del fertilizante orgánico (biol)

El tratamiento que se le da al biol posterior a la salida del biodigestor es con el objetivo de estabilizarlo y reducir los microorganismos patógenos para su posterior almacenamiento y uso en cultivos. Es por ello que se investigaron tres rutas las cuales son descritas a continuación.

#### 3.1.4.1. *Tratamiento con aireación*

Este tratamiento consiste en hacer burbujear aire al interior del tanque de almacenamiento que contiene el biol por un periodo aproximado de 8 horas por día durante 5 días, con el fin de estabilizar y eliminar las bacterias anaeróbicas presentes en el bioabono.

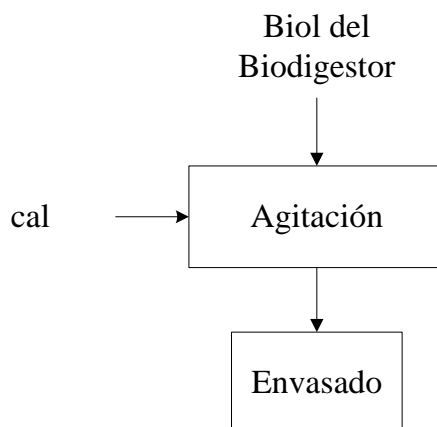


**Fig. 3.3.** Diagrama de bloque del tratamiento del fertilizante orgánico (biol) con aireación

#### 3.1.4.2. *Tratamiento con cal*

Este tratamiento consiste en la adición de cal (CaO) en una concentración del 0.05% al tanque de almacenamiento en un periodo de 6 días con agitación intermitente. El fin es eliminar en lo posible las bacterias patógenas variando el pH drásticamente a 8,5 – 9.

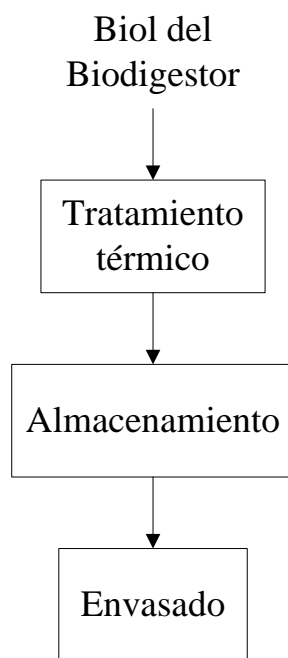




**Fig. 3.4.** Diagrama de bloque del tratamiento del fertilizante orgánico (biol) con cal

#### **3.1.4.3. Tratamiento térmico o higienización**

Este tratamiento consiste en subir la temperatura del biol a 70 °C durante un periodo de 20 minutos con el fin de reducir la población bacteriana patógena, ya que estas bacterias son muy sensibles frente a cambios de temperatura.



**Fig. 3.5.** Diagrama de bloque del tratamiento térmico del fertilizante orgánico (biol)

## **3.2. Descripción de la planta piloto**

### **3.2.1. Diagrama de flujo**

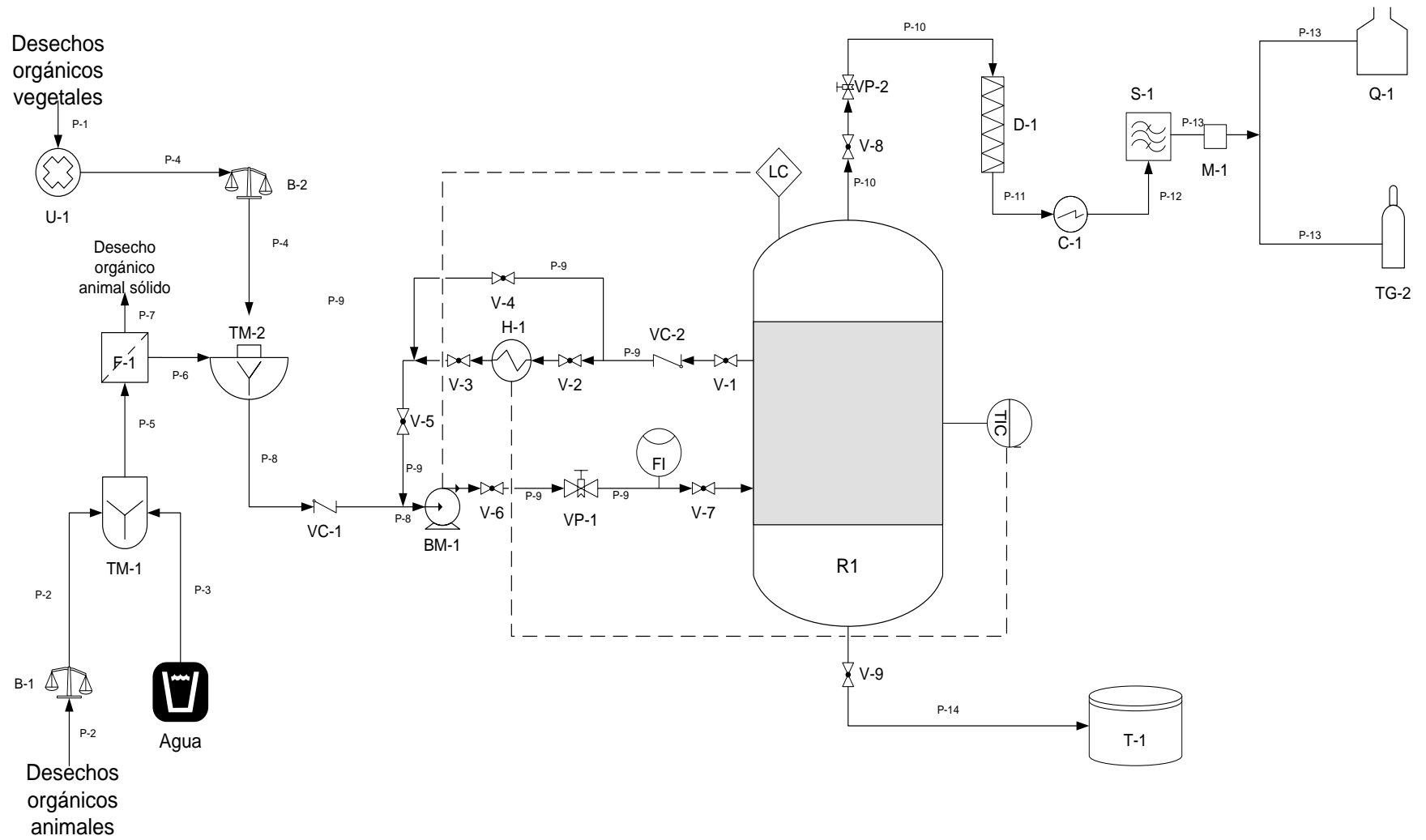
El proceso tecnológico de la planta piloto inicia con la recepción de los desechos orgánicos vegetales y desechos orgánicos animales. Se recibe semanalmente la materia prima necesaria para una semana de producción.

La materia orgánica vegetal que se va utilizar en el proceso debe pasar por una trituradora de martillos marca Yard machines, en donde se reduce el tamaño de partícula.

En un proceso paralelo se realiza la mezcla del desecho orgánico animal con el agua. Luego se procede a filtrar y homogenizar la mezcla, donde se separa el residuo sólido de la mezcla diluida.

Posteriormente se realiza la mezcla del desecho orgánico vegetal y el desecho orgánico animal diluido en las proporciones requeridas del material, en el tanque de alimentación donde son mezclados manualmente. A la salida del tanque de alimentación el sustrato se encuentra a temperatura ambiente.

Por medio de una bomba centrífuga marca WEG, modelo Caracol Super 1 ½”NPT, se ingresa la mezcla al biodigestor, donde se produce el contacto del sustrato fresco con la mezcla reactiva y los microorganismos anaeróbicos, los cuales van a dar comienzo a todas las fases para la digestión anaeróbica. Esto se realiza a una temperatura de 35°C y a constante agitación por recirculación. Después de un tiempo de residencia calculado se ha producido la cantidad de biogás y fertilizante orgánico deseado, los cuales son sometidos a los tratamientos de purificación y estabilización respectivos. El diagrama de flujo del proceso se muestra en la fig.3.6. En el anexo 5 se muestran la isometría y las vistas del biodigestor a escala piloto.



**Fig. 3.6.** Diagrama de flujo de la planta piloto

**Tabla 3-1.** Nomenclatura de procesos y equipos

Nomenclatura	Equipo
<b>B</b>	Balanza
<b>TM</b>	Tanque de mezcla y almacenamiento
<b>F</b>	Filtro tipo tamiz
<b>U</b>	Trituradora de martillos
<b>BM</b>	Bomba centrifuga
<b>R</b>	Reactor o biodigestor
<b>H</b>	Intercambiador de calor
<b>D</b>	Disecador de biogás
<b>C</b>	Condensador o trampa de vapor
<b>S</b>	Desulfurizador
<b>Q</b>	Quemador
<b>TG</b>	Tanque de almacenamiento de gas
<b>T</b>	Tanque de almacenamiento de biol
<b>M</b>	Contador de gas

**Tabla 3-2.** Nomenclatura válvulas

Nomenclatura	Tipo de válvula
<b>V</b>	Válvula de bola
<b>VC</b>	Válvula check
<b>VP</b>	Válvula de compuerta

**Tabla 3-3.** Nomenclatura del tipo control

Nomenclatura	Tipo de control
<b>LC</b>	Control de nivel automático
<b>FI</b>	Indicador de flujo
<b>TIC</b>	Control e indicador de temperatura automático

**Tabla 3-4.** Descripción del flujo de la planta piloto

Nomenclatura	Flujo
<b>P-1</b>	Desechos orgánicos vegetales
<b>P-2</b>	Desechos orgánicos animales
<b>P-3</b>	Agua
<b>P-4</b>	Desecho orgánico vegetal triturado
<b>P-5</b>	Dilución de los desechos orgánicos animales en agua
<b>P-6</b>	Mezcla de desechos orgánicos animales filtrado
<b>P-7</b>	Desecho orgánico animal sólido
<b>P-8</b>	Mezcla de desechos orgánicos animales y vegetales
<b>P-9</b>	Mezcla reactiva
<b>P-10</b>	Biogás crudo
<b>P-11</b>	Biogás con reducción de humedad y olores
<b>P-12</b>	Biogás con reducción de humedad
<b>P-13</b>	Biogás con reducción de H <sub>2</sub> S
<b>P-14</b>	Fertilizante orgánico

### **3.2.2. Equipos utilizados**

Para la construcción y el ensamblado de la planta piloto se ocuparon los siguientes equipos con su respectiva función.

#### **3.2.2.1. *Tanque de mezcla y alimentación***

Es un tanque de plástico de polipropileno, de 130 litros de volumen. La función que cumple es de contener la materia orgánica a alimentar y a la vez se mezcla manualmente.



**Fig. 3.7.** Tanque de mezcla y alimentación

#### **3.2.2.2. *Filtrado***

Se realiza manualmente con una malla de tamiz de 4mm. La función que cumple es de separar los sólidos de la dilución de la materia orgánica animal.

### **3.2.2.3. Trituradora**

Es una trituradora de martillos de marca Yard Machine con una potencia de 5,5 HP. La función que cumple es la de disminuir el diámetro de partícula del desecho orgánico vegetal hasta aproximadamente 0,5 – 1 mm.



**Fig. 3.8.** Trituradora de martillos

#### **3.2.2.4. Bomba centrífuga**

Es una bomba centrífuga de marca WEG y con una potencia de  $\frac{3}{4}$  HP con un rendimiento del 65.10%. Las conexiones de entrada y de salida son de  $1\frac{1}{2}$ " y  $\frac{3}{4}$ ", respectivamente. La función que cumple la bomba es la de recirculación (agitación) del contenido interno del reactor y sirve para alimentación del sustrato al reactor.



**Fig. 3.9.** Bomba centrífuga

#### **3.2.2.5. Reactor**

El reactor semi-continuo está construido de acero con un volumen de  $0,6\text{ m}^3$ . El reactor está aislado con fibra de vidrio, posee conexiones para el afluente y efluente de la mezcla reactiva, salida de gas, salida de lodos y espacios para los sensores de nivel y temperatura. La función que cumple es de proporcionar las condiciones necesarias para la digestión anaerobia con el objetivo de producir biogás y fertilizante orgánico.





**Fig. 3.10.** Reactor semi-continuo para la digestión anaerobia. a) sin aislamiento térmico, b) con aislamiento.

### **3.2.2.6. Disecador de biogás**

Está construido por un cilindro de PVC, de 25 cm de longitud y 11 cm de diámetro, en su interior contiene carbón activado granular (CAG). Su función es la de reducir la humedad y eliminar olores.



**Fig. 3.11.** Disecador de gas

### **3.2.2.7. Condensador**

Está conformado por una T y una botella. Su función es la de condensar el agua presente en el gas generado de la digestión anaeróbica y almacenar el agua proveniente de disecador de gas.



**Fig. 3.12.** Condensador o trampa de vapor

### 3.2.2.8. *Desulfurizador*

Está construido por un cilindro de PVC, de 25 cm de longitud y 11 cm de diámetro, en su interior contiene limaduras o esponjas de hierro. Su función es la de reducir el H<sub>2</sub>S.



**Fig. 3.13.** Desulfurizador

### 3.2.2.9. *Contador de gas*

Es un medidor de gas marca KEUK DONG, modelo G1.6 de tipo Diafragma. El cual registra la producción diaria en litros de biogás.



**Fig. 3.14.** Contador de gas

### **3.2.2.10. Tanques almacenamiento**

Son tanques de plástico de polipropileno, de 55 galones y 35 galones de volumen. La función que cumplen es almacenar el fertilizante orgánico.



**Fig. 3.15.** Tanques de Almacenamiento

### **3.2.3. Accesorios y sistemas de control**

#### **3.2.3.1. Medidor de caudal**

Es un medidor de caudal marca Blue – White de  $\frac{3}{4}$ " de modelo F45750LHN-12, con la capacidad de medir el caudal entre 1-10 GPM (galones por minuto) o 0,4-40 LPM (litros por minuto). El cuerpo está construido en poly-sulfone. Este equipo tiene como función indicar el flujo del líquido en las tuberías, de tal manera que permite regular el flujo por medio de una válvula de compuerta.



**Fig. 3.16.** Medidor de caudal

### **3.2.3.2. Control de temperatura**

El sistema de control automático de temperatura instalado es de marca Full Gauge, modelo MT-543Ri. Este puede operar a voltaje de 115 o 230 V, temperatura de -99 a 300 °C y posee una alarma para alertar cualquier error en el sistema. El controlador es del tipo PID y su interface es del tipo PLC. Por otro lado tiene un sensor de temperatura tipo RTP (Resistive temperature device) de modelo PT100, 6" de largo y ¼" de diámetro, el cual está construido en acero inoxidable. La función que cumple este sistema es control y registro de la temperatura en el interior del biodigestor. El control hace que la temperatura del reactor se mantenga a una temperatura establecida. De tal manera que cuando la temperatura baja el control automático le ordena al intercambiador de calor que se encienda hasta alcanzar la temperatura deseada. El sensor está ubicado en la parte media del reactor.

### **3.2.3.3. Control de nivel**

Es un sistema de marca Warrick, serie 16M, el cual funciona con una conductividad de 10 Kilo-Ohms, V120 AVC. Junto con electrodos de marca Warrick, cuerpo en SS316, toma roscada de 3/8" NPT y presión 400 psi. Estos electrodos esta conectados al biodigestor y marcan el nivel mínimo y máximo contenido en interior del reactor por medio de

conductividad. El sistema está programado para que en caso de que el nivel del fluido sobrepase el nivel máximo o en su defecto no alcance el nivel mínimo, el sistema automáticamente apague o desconecte la bomba para evitar que la bomba sufra daños por la succión de aire.



**Fig. 3.17.** Sistema eléctrico de control automático

#### **3.2.3.4. Válvula de bola**

Son válvulas con una medida para tubería de  $\frac{3}{4}$ ”, y están ubicadas antes y después de cada equipo. La función es bloquear o habilitar el paso del flujo por las tuberías. A la vez que permite retirar o reparar equipos para mantenimiento.

#### **3.2.3.5. Válvula de compuerta**

Es una válvula con una medida para tubería de  $\frac{3}{4}$ ” y está ubicada antes del medidor de caudal. La función es regular el caudal de alimentación y de recirculación.

#### **3.2.3.6. Válvula check**

Son válvulas con una medida para tubería de  $\frac{3}{4}$ ” y están ubicadas a la salida de la alimentación y en el ciclo de recirculación. La función es de no permitir el retorno del flujo por la tubería ya que esta válvula se bloquea.

### 3.2.3.7. *Válvula de seguridad*

Es una válvula que se encuentra ubicada en la parte superior del reactor. Se activa cuando el reactor supera una presión de 2.4 bar dejando escapar el gas con el fin de evitar una explosión.

### 3.2.3.8. *T's*

La T es un accesorio con una medida de ¾" se encuentra ubicada a lo largo de la tubería en lugares donde se requiere. La función que cumple es la unión de 2 flujos o separación en 2 flujos.

### 3.2.3.9. *Codos*

Los codos son accesorios con una medida de ¾" se encuentran ubicados en la tubería con el fin de un cambio de dirección a 90°.

### 3.2.3.10. *Conexiones universales*

Son conexiones de una medida de ¾" que se ubican antes y después de cada equipo. La función es permitir retirar los equipos con facilidad para mantenimiento o reparación.

La cantidad de accesorios está detallada en la tabla 3-5

**Tabla 3-5.** Cantidad de accesorios

Cantidad	Accesorios
9	Válvula de bola (líquido)
1	Válvula de bola (gas)
1	Válvula de compuerta
2	Válvula tipo Check
14	Codos
2	T's
7	Unión Universales
11	Pitones de ½"
1	Válvula de seguridad

### **3.3. Puesta en marcha**

#### ***3.3.1. Puesta en marcha en frío***

Antes de iniciar la puesta en marcha del biodigestor se verificó el funcionamiento y operación de cada uno de los componentes que forman parte de la planta piloto de digestión anaerobia. Este proceso se conoce como la puesta en marcha en frío. Se verificaron los siguientes componentes.

- Hermeticidad del tanque de reacción o reactor
- Sellado de tuberías para fluidos
- Funcionamiento de bomba
- Hermeticidad de filtros de remoción de H<sub>2</sub>S y humedad
- Funcionamiento del contador de gas

A continuación se detalla las pruebas realizadas en la puesta en marcha en frío de cada componente.

##### ***3.3.1.1. Hermeticidad del tanque de reacción o reactor (biodigestor)***

La prueba de hermeticidad se realizó, llenando el tanque con agua con las válvulas cerradas, generando una presión interna, de tal manera que sea fácil detectar las fugas en los puntos de soldadura y en las conexiones con las válvulas.

La siguiente prueba fue ingresar aire por medio de un compresor, generando un sobre presión de aproximadamente 15 psi y observar si se mantiene la sobrepresión en el sistema, para poder detectar zonas de fuga en los puntos señalados anteriormente.

##### ***3.3.1.2. Sellado de tuberías para fluidos***

La conexión de las tuberías se realizó por acople de rosca y se añadió sellador de caucho sintético de marca polimex silicona sintética de color rojo en cada conexión para evitar las fugas. La prueba se realizó haciendo fluir agua por el interior de la tubería y tratando de detectar las fugas en las uniones de tubería.



### **3.3.1.3. Funcionamiento de la bomba**

Para el funcionamiento de la bomba centrífuga se verifica que las conexiones eléctricas estén correctamente instaladas, comprobando el giro de la bomba para un excelente succión. La prueba se realiza con agua.

### **3.3.1.4. Filtros de remoción de H<sub>2</sub>S y humedad**

Los filtros fueron construidos con tubos PVC de 11 cm de diámetro y 25 cm de largo, se sellaron con cemento solvente para tuberías y accesorios de PVC de marca Kalipega de tal manera que no se encuentren fugas o grietas. Para el caso del filtro de remoción de H<sub>2</sub>S el filtro contiene 200gr de limallas de hierro y para el de humedad contiene 1200 gr de carbón activado. No se hizo ninguna prueba en especial de hermeticidad solo se aseguró que el interior y el contenido se encuentre seco. La función de los filtros es de remover en lo posible la humedad y el contenido de H<sub>2</sub>S presente en el biogás.

### **3.3.1.5. Contador de gas**

El contador de gas es de marca Keuk Donkg, sirve para medir el volumen de gas generado por el biodigestor. La lectura que da es en litro (l) y metros cúbicos (m<sup>3</sup>). La prueba que se realizó para verificar su funcionamiento fue hacer pasar aire por el interior de contador por medio de una bomba y verificar el avance del contador.

Finalmente se llenó el biodigestor primero con agua para probar el funcionamiento del sistema en frío y verificando de que todos los componentes se encuentre en óptimo funcionamiento.

## **3.3.2. Puesta en marcha en caliente**

A continuación se describen los pasos que se dieron para cumplir con el proceso de puesta en marcha en caliente.

Para el llenado del biodigestor se empezó a añadir el sustrato con una dilución de (5:1) para el desecho orgánico animal y la mezcla con el desecho orgánico vegetal en las proporciones deseadas. La etapa de llenado se la realizó gradualmente, de tal manera que todos los días se ingresaba aproximadamente 15 litros de mezcla hasta llegar a los  $\frac{3}{4}$  del volumen total (441 litros) del biodigestor. Durante el llenado, la válvula de salida del biogás se dejó abierta para

que escape todo el aire contenido en el biodigestor. Una vez alcanzado el volumen se dejó un periodo de reposo de 20 días con todo cerrado herméticamente para empezar a generar el medio anaeróbico necesario para que las bacterias empiecen a reproducirse.

Posterior al periodo de reposo se procedió a dar inicio a la recirculación (agitación) para que exista un mejor contacto entre el sustrato y los microorganismos, este consistía en un tiempo de 8 horas de agitación durante 10 días. A partir del decimo día se inicio la alimentación periódica la cual, consistía en añadir un volumen específico de mezcla orgánica cada 2 o 3 días. Esta etapa se mantuvo durante 20 días y la recirculación seguía operando de la misma manera por 8 horas diarios de agitación. La temperatura se mantenía en 19°C ya que hasta ese momento no se encontraba instalado el intercambiador de calor y el reactor no tenía alistamiento. Por otro lado toda la producción de biogás se dejaba escapar por que era de mala calidad y no se combustionaba.

A partir del día cincuenta de operación se empezó a alimentar por periodos de 5 días seguidos y no se alimentaba por dos días de esta manera se mantuvo por 25 días. A partir del día setenta y cinco se alimentó diariamente y se aumentó de manera gradual el volumen de alimentación al biodigestor según aumentaba la producción de biogás.

Otros parámetros que se tomaron en cuenta durante la puesta en marcha fueron el pH y la dilución de los desechos orgánicos animales, es por ello que para el día ciento diez de operación se redujo la dilución del material orgánico animalde 5:1 a 3:1y se empezó la adición de cal (CaO) a la alimentación para elevar el pH de tal manera que se mantenga el pH en los rangos establecidos de operación.

Las características de la puesta en marcha son:

- Una calidad baja del biogás, con un contenido alto de CO<sub>2</sub> alrededor del 60%
- Un biogás de olor muy fuerte
- Un bajo pH
- Producción fluctuante de biogás

Desde el día ciento cincuenta de operación hasta el final de la operación se mantuvo constante la producción de biogás y con un pH óptimo, por lo tanto fue posible determinar que se llegó a la estabilización de la planta piloto. Estos resultados se muestran en el capítulo 4.

### **3.4. Análisis realizados**

#### **3.4.1. Medición del pH**

El pH se determinó por medio de un medidor de pH marca OAKTON modelo 100 series. Para esta medida las muestras se tomaron de la alimentación al biodigestor y del biol saliente del biodigestor.

El pH se mide como parámetro de control de la acidez de la alimentación para que ésta no ingrese con valores muy ácidos ya que es posible que altere la estabilidad de digestor. Además se mide el pH del biol para conocer el estado en el que se encuentra el medio en que habitan los microorganismos.

#### **3.4.2. Contenido de sólidos totales**

Se conoce como masa seca al contenido de material sólido del sustrato, la cual es la parte seca y sin humedad de un residuo. El valor de masa seca se requiere para el cálculo de las mezclas apropiadas en la alimentación y dentro del biodigestor.

Se determina por un proceso de secado a 105 °C durante 24 horas o el tiempo en el cual se observe que no existe pérdida de peso. Con el método 2540B del Standard Methods.

Para determinar el porcentaje de humedad se realiza el siguiente cálculo.

$$\text{Humedad}(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1} * 100 \quad \text{Eqn 3-1}$$

Donde:

$m_1$  = masa de la muestra inicial [gr]

$m_2$  = masa de la muestra seca [gr]

Masa Seca (%) = 100% - Humedad (%)

Para determinar los mg/l de sólidos totales se realiza el siguiente cálculo:

$$TS = \frac{m_2}{m_1/\rho} \quad \text{Eqn 3-2}$$

Donde:

TS = sólidos totales en mg/l

$m_1$  = masa de muestra inicial [mg]

$m_2$  = masa de la muestra seca [mg]

$\rho$  = densidad de la muestra [ $\frac{mg}{l}$ ]

### 3.4.3. Contenido de sólidos totales orgánicos

Se conoce como sólidos totales orgánicos (oTS) al contenido de cenizas que se obtiene de la calcinación de los sólidos totales (TS). Para determinar el contenido de oTS, se toma la muestra seca y se pesa, y posteriormente se incinera a 550°C en un horno durante 6 horas. Para luego de enfriada volver a pesar la muestra aplicando el método 2540E de Standard Methods (32).

Para determinar el porcentaje de masa volátil se realiza el siguiente cálculo.

$$oTS(\%) = \frac{m_2 - m_3}{m_2} * 100 \quad \text{Eqn 3-3}$$

Donde:

$m_2$  = masa seca [mg]

$m_3$  = masa de la muestra calcinada [mg]

La masa volátil u oTS es el porcentaje de contenido real de masa orgánica de la biomasa. Este valor es requerido para el cálculo de la carga orgánica volumétrica COV con la que se alimenta el biodigestor.

Para determinar los mg/l de sólidos totales orgánicos se realiza el siguiente cálculo:

$$oTS = \frac{m_2 - m_3}{V} \quad \text{Eqn 3-4}$$

Donde:

$oTS$  = sólidos totales orgánicos en mg/l

$m_2$  = masa seca [mg]

$m_3$  = masa de la muestra calcinada [mg]

$V$  = Volumen de muestra [ml]

#### **3.4.4. Determinación de la demanda química de oxígeno**

La demanda química de oxígeno, DQO, se determinó por el método de prueba de tubo con el colorímetro marca Hach modelo DR/890. El método utilizado es el método Oxygen Demand Chemical, method 8000, del manual de Hach. Para realizar este análisis las muestras se tomaron de la alimentación al biodigestor, del biol saliente del biodigestor y de los bioles tratados. Se realizaron diluciones de las muestras en un factor de (1:5). El método se encuentra detallado en el Anexo 1.

La DQO se mide como método de control de la alimentación al biodigestor, ya que por medio de este valor es posible relacionar la cantidad de carbono total presente en la alimentación, de tal manera que es posible determinar el volumen de alimentación que se debe dar al biodigestor. La medición de la DQO de la mezcla reactiva da información del estado del biodigestor sobre todo si la materia orgánica está siendo degradada durante el proceso. Por otro lado, sabiendo la cantidad de DQO a la entrada y a la salida del biodigestor es posible realizar un balance de materia alrededor del biodigestor que nos permite conocer cuanta cantidad de materia orgánica se transformo en biogás.

#### **3.4.5. Determinación de nitrógeno total**

El contenido del nitrógeno total se determinó por el método de la prueba de tubo con el colorímetro marca Hach modelo DR/890, el método utilizado el método Nitrogen Total (10 to 150 mg/l N), method 10072 del manual Hach. Para este método las muestras se tomaron de biol saliente del biodigestor. Se realizaron diluciones de las muestras en un factor de 1:200. El método se encuentra detallado en el Anexo 2.

El  $N_{total}$  se mide con el propósito de saber la cantidad de N que se encuentra disponible para que aporte como un buen fertilizante orgánico. A la vez que se puede conocer la relación entre carbono total y nitrógeno total (C/N) la cual nos indica el estado del biodigestor en ese momento, y que el carbono y el nitrógeno aportan los nutrientes y las proteínas a las bacterias metanogénicas. Según datos bibliográficos la relación C/N se debe encontrar de 30:1 respectivamente (23).

### 3.4.6. Determinación del fósforo total

El contenido de fósforo total se determinó por el método de la prueba de tubo con el colorímetro marca Hach modelo DR/890, el método utilizado es el método Phosphorus Total (0 to 3,50 mg/l  $\text{PO}_4^{3-}$ ), method 8190 de manual Hach. Para este método las muestras se tomaron del biol saliente del biodigestor. Se realizaron diluciones de las muestras en un factor de 1:200. El método se encuentra detallado en el Anexo 3.

El  $P_{\text{total}}$  se mide con el objetivo de saber las propiedades fertilizantes del biol. Así podemos determinar el aporte a la tierra para que sea más productiva de manera natural y orgánica.

### 3.4.7. Determinación de Coliformes totales y *Echerichia coli* (E. coli)

Para la determinación de las bacterias *coliformes* y *Echerichia coli* se utilizó el medio de cultivo Agar Chromocult de marca Merck. La preparación del medio consiste en agregar 26,5 gr en un litro de agua previamente ingresada por una autoclave. Se calienta a baño maría hasta llegar al punto de ebullición de la mezcla y se revuelve continuamente para ayudar a la disolución aproximadamente durante 35 minutos o hasta que se vuelva una solución cristalina amarillenta. Posteriormente, se coloca en placas Petri y se deja enfriar durante 5 horas para luego almacenar en refrigeración. Para realizar este análisis las muestras se tomaron del biol saliente del biodigestor y de los bioles tratados. Se realizaron diluciones de las muestras en agua peptonada, en un factor de ( $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$ ,  $10^{-3}$ ).

La composición de Agar Chromcult Merck es: Peptona 3 g/l; Cloruro sódico 5 g/l; Dihidrógenofosfato potásico 1,7 g/l; Hidrógenofosfato dipotásico 3 g/l; Piruvato sódico 1 g/l; Triptófano 1 g/l; Laurilsulfato sódico 0,1 g/l; Agar-agar 12 g/l; Mezcla de cromógenos 0,2 g/l. para mayor información del método se detalla en el anexo 4.

El método se describe a continuación:

1. Inocular por duplicado 0,1 mL de muestra en placas de Petri preparadas con Agar Chromocult. Rastrillar el inóculo con espátula de Drigalsky.

2. Incubar a 35 - 37°C durante 24 hs.
3. Observar y contar las colonias obtenidas. El Agar Chromocult identifica coliformes totales (enterobacterias fermentadoras de lactosa) y *Escherichia coli* a través de dos sustancias cromógenas: Salmon-gal que pone en evidencia la b-D-galactosidasa dando colonias de color rojo y X-glucurónido que determina la presencia de la b-D glucuronidasa dando colonias azules. *Escherichia coli* encide ambos compuestos dando coloración violeta. Las colonias rojas y violetas son características de bacterias coliformes. Las rojas pertenecen al grupo de las no fecales, mientras que las violetas a las fecales. Las especies que no poseen ninguna de las enzimas se evidencian a través de colonias transparentes. El medio tiene también laurilsulfato de sodio para inhibir el desarrollo de Gram positivas y triptófano para realizar la prueba de indol.
4. Calcular el número promedio de unidades formadoras de colonias por mL (UFC/mL) de bacterias coliformes totales, fecales y no fecales presentes en la muestra, según la expresión:

$$\frac{\text{UFC}}{\text{ml}} = \frac{\text{Número de colonias promedio de ambas placas}}{\text{Dilución por volumen del inoculo}}$$

Eqn 3-5



## 4. Resultados y Discusión

A continuación se presentarán los resultados durante la puesta en marcha y operación del biodigestor durante 230 días.

Una vez llenado el biodigestor con la mezcla de desecho orgánico vegetal y animal inicia el proceso de puesta en marcha en el cual se deja herméticamente cerrado por un periodo de tiempo determinado con el fin de que se establezca la biomasa e inicie el crecimiento del primer grupo de bacterias que consumen el oxígeno generando así el medio anaeróbico requerido para el crecimiento de las bacterias productoras de biogás. Posteriormente inicia la recirculación y la alimentación gradual controlada al digestor con el fin de que exista el contacto entre los nutrientes del sustrato con los microorganismos permitiendo su crecimiento y reproducción. A la vez se incrementa la temperatura debido al aporte de la bomba de recirculación llegando al rango mesofílico que comprende temperaturas entre 25 a 40°C, con el tiempo el digestor llega a un periodo de estabilización donde la producción de gas es constante y de buena calidad. A partir de este instante es posible incrementar la alimentación con el objetivo de incrementar la producción de biogás hasta llegar a la carga permitida por el diseño.

Durante la operación se controlaron diariamente los siguientes parámetros: temperatura, pH recirculación, alimentación volumétrica, carga orgánica de alimentación, tiempo de residencia, aditivos para controlar el pH y la producción de biogás.

Algunos de estos parámetros como temperatura, pH y producción de biogás no pueden ser controlados directamente y dependen de las condiciones de operación y de la salud de biodigestor. Por otro lado, la alimentación volumétrica y la carga orgánica, así como el tiempo de residencia, la recirculación y la adición de aditivos son parámetros que se determinan con anterioridad y se varían dependiendo del estado de biodigestor.

El objetivo principal durante la operación del biodigestor es alcanzar una operación de alto rendimiento al maximizar la producción de biogás. Para alcanzar este objetivo se aumenta gradualmente la carga orgánica de alimentación y se reduce el tiempo de residencia en el

interior del biodigestor. Adicionalmente se desea producir un biol de alto valor nutricional para plantas y cultivos y libres de microorganismos patógenos.

Con estos dos objetivos en mente se prosiguió con la operación del biodigestor durante 230 días. A continuación se presentan los resultados del monitoreo diario para continuar con la evaluación de los mismos.

#### **4.1. Construcción y puesta en marcha**

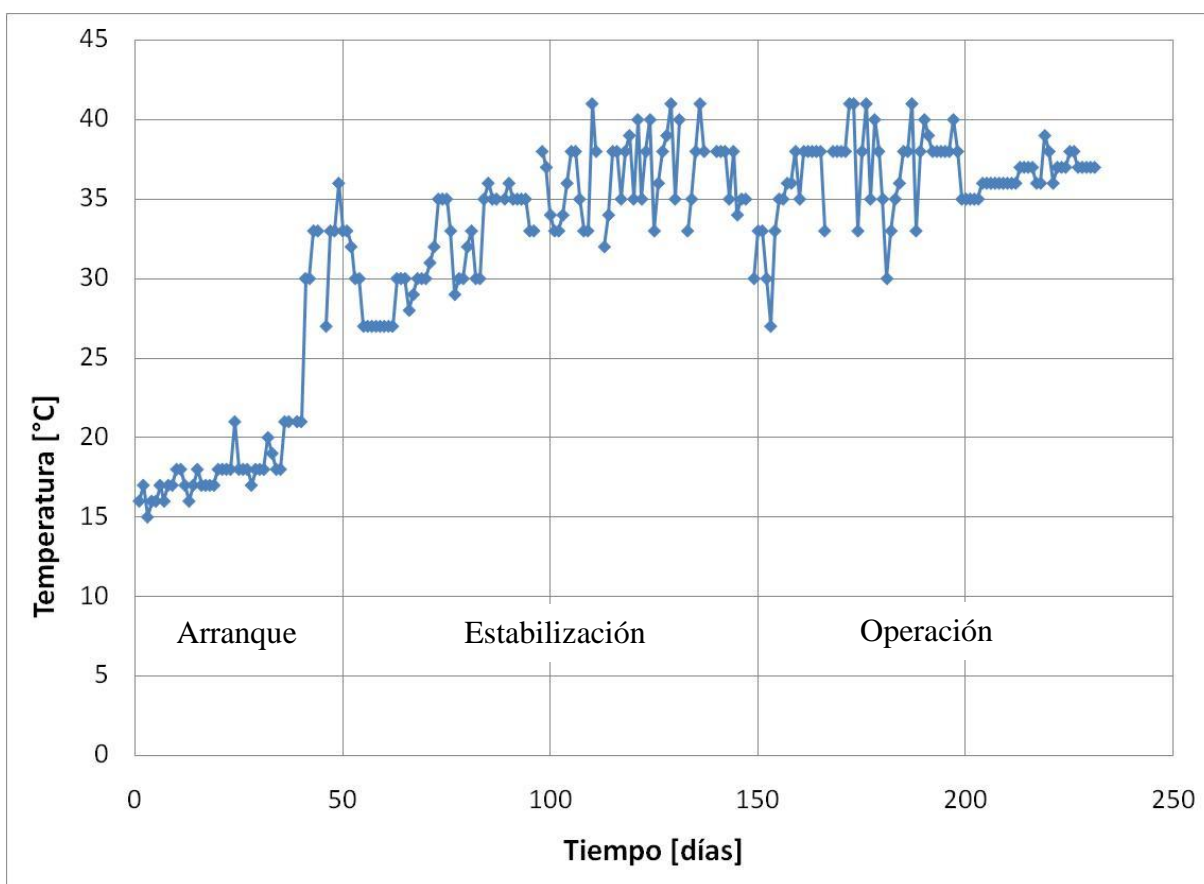
Se construyó el biodigestor con un reactor semi-continuo. La construcción del biodigestor se realizó de un tanque de acero con un volumen de 600 litros. En el interior se soldaron 2 mallas, la primera separada del piso del reactor a una distancia de 40 cm y la distancia de malla a malla es de 50 cm. La descripción del proceso, así como el diagrama de flujo de la planta se puede encontrar en el capítulo 3.2.

La puesta en marcha inicia con la operación en frío de la planta piloto en la cual se llenó con agua y se hizo fluir agua para comprobar los componentes. Posteriormente, se llenó poco a poco el biodigestor con la materia orgánica animal diluida y materia orgánica vegetal hasta  $\frac{2}{3}$  del volumen total y se subió la temperatura poco a poco hasta llegar a los 36°C de operación. En el capítulo 3.3 se detalla el procedimiento de la puesta en marcha en frío y en caliente.

#### **4.2. Resultados de la operación de la planta piloto**

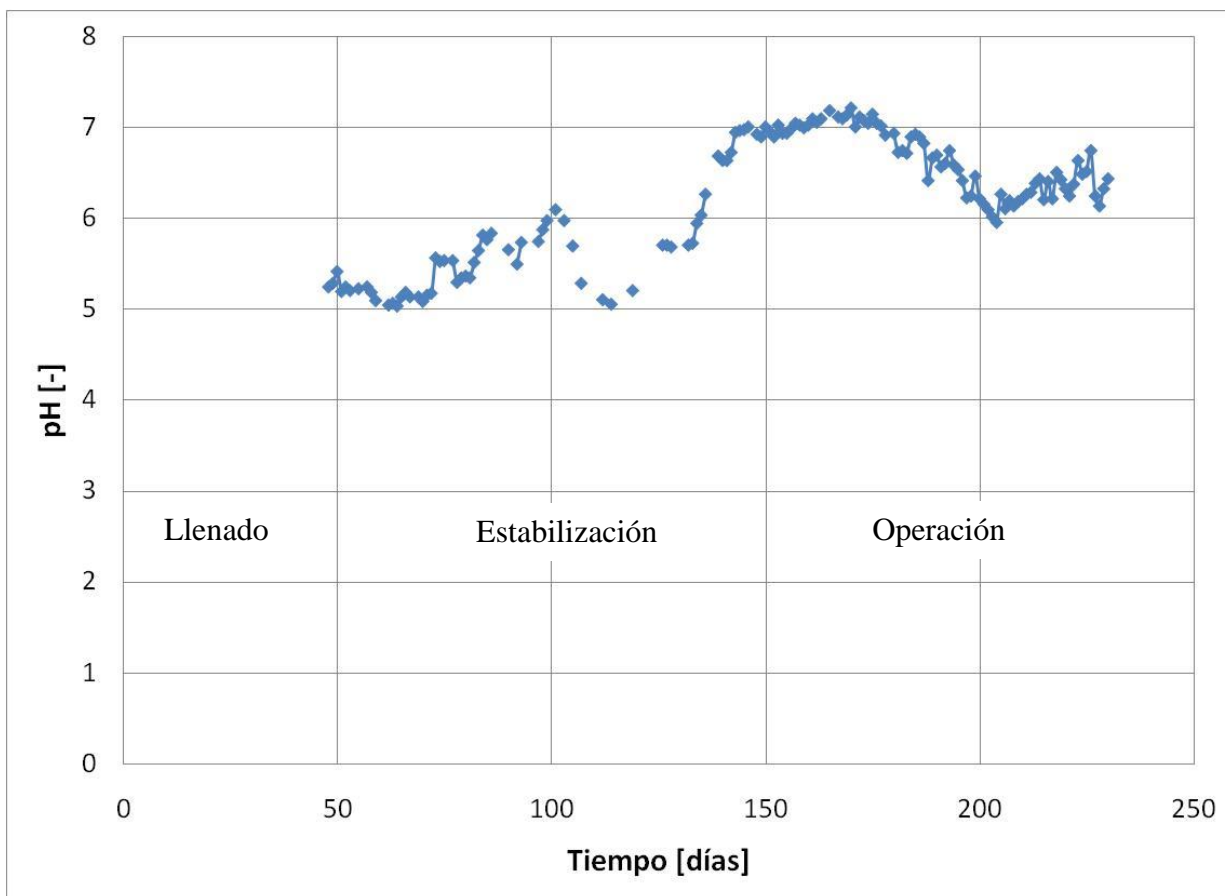
La temperatura a la que operó el biodigestor fue, durante gran parte de la operación, a un valor promedio de a 35°C. Los primeros 40 días de operación, al cual los vamos a denominar periodo de arranque, corresponden a una operación a temperatura ambiente o en frío. Durante este periodo el biodigestor se encontraba sin aislamiento e intercambiador de calor. El calor producido por la reacción de degradación de la materia orgánica y por la bomba de recirculación se perdía por las paredes del reactor, registrando una temperatura promedio de 28°C. A partir de los 41 días hasta los 140 días es un periodo de estabilización, el considerable aumento en la temperatura se debe al aislamiento del reactor por lo que el calor generado por

la reacción y proporcionado por la bomba logra aumentar la temperatura en el reactor. Sin embargo, no se encuentra instalado el intercambiador de calor por lo que no era posible controlar la temperatura de forma automática. El valor máximo registrado en este periodo de corresponde a 41 °C y el mínimo registrado corresponde a 27 °C. Desde el día 190 hasta el fin de la operación que es a los 230 días de operación, se instaló un intercambiador de calor en forma de serpentín, de tal manera que se logró mantener la temperatura promedio a 36 °C, por lo que se observa una mayor estabilidad en la temperatura del proceso. Como se puede apreciar en la figura 4.1 la temperatura no es estable lo cual nos genera un perjuicio para las bacterias metanogénicas presentes en el interior del biodigestor ya que son bacterias muy sensibles a cambios de temperatura y es posible determinar que puede ser un limitante para la generación de biogás.



**Fig. 4.1.** Variación de la temperatura con respecto al tiempo de operación del biodigestor

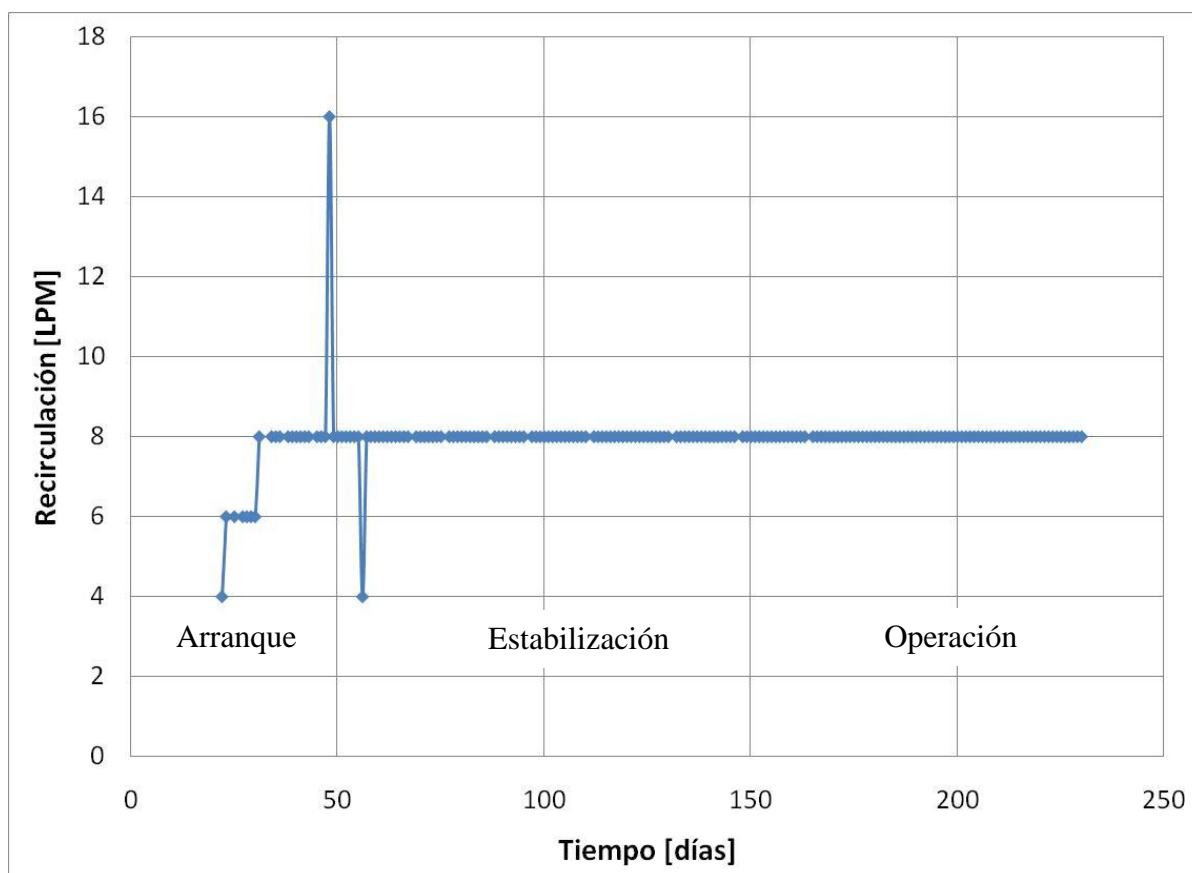
El pH al que operó el biodigestor se divide así mismo en 3 periodos como se puede observar en la figura 4.2. En el primer periodo el cual consta desde el día 0 hasta el día 50 no se registraron datos de pH porque el digestor se encontraba en proceso de llenado y estabilización de la biomasa en el cual no se extraía muestras de biol. Esto corresponde al periodo de arranque. El segundo periodo de puesta en marcha el cual corresponde a los días del 50 al 150, se divide en tres secciones. Entre los días 50 al 80 se observa un pH muy bajo, pero se mantiene en un rango entre 5,0 a 5,6. Para la siguiente sección del día 80 al día 115 el pH baja drásticamente debido a la alimentación que ingresó a un pH muy bajo, alterando al proceso de digestión anaerobia. En la tercera sección que comprende del día 116 al 150 se observa la elevación del pH y su recuperación, llegando a un máximo de 7,0 debido a la adición de carbonato de calcio en la alimentación. En el periodo de operación de los días de 151 al 230 se puede observar una disminución paulatina del pH de 7,0 a 6,5. Más adelante se hace referencia a este comportamiento.



**Fig. 4.2.** Variación del pH con respecto al tiempo de operación del biodigestor

La agitación es un parámetro muy importante en el proceso de digestión anaeróbica porque permite que la materia orgánica del sustrato llegue con facilidad al lecho donde se encuentran distribuidos los microorganismos y sean aprovechados de la mejor manera. La agitación se dio por un sistema de recirculación ascendente, la cual se mantuvo en 8 litros por minuto con una velocidad de 1m/h en el reactor durante la mayor parte de la operación. Como se explicó anteriormente en la etapa de arranque no hubo recirculación los primeros 20 días. Durante los 10 días posteriores la recirculación se mantuvo entre de 4 a 6 l/min con una velocidad en el interior del reactor de 0,5 a 0,7m/h, hasta que desde el día 30 hasta el final de la operación se mantuvo constante en 8 l/min como se muestra en la Fig 4.3. Los picos son errores en la operación ya que 2 días no se dejó en la medida establecida de recirculación. Se comenzó con

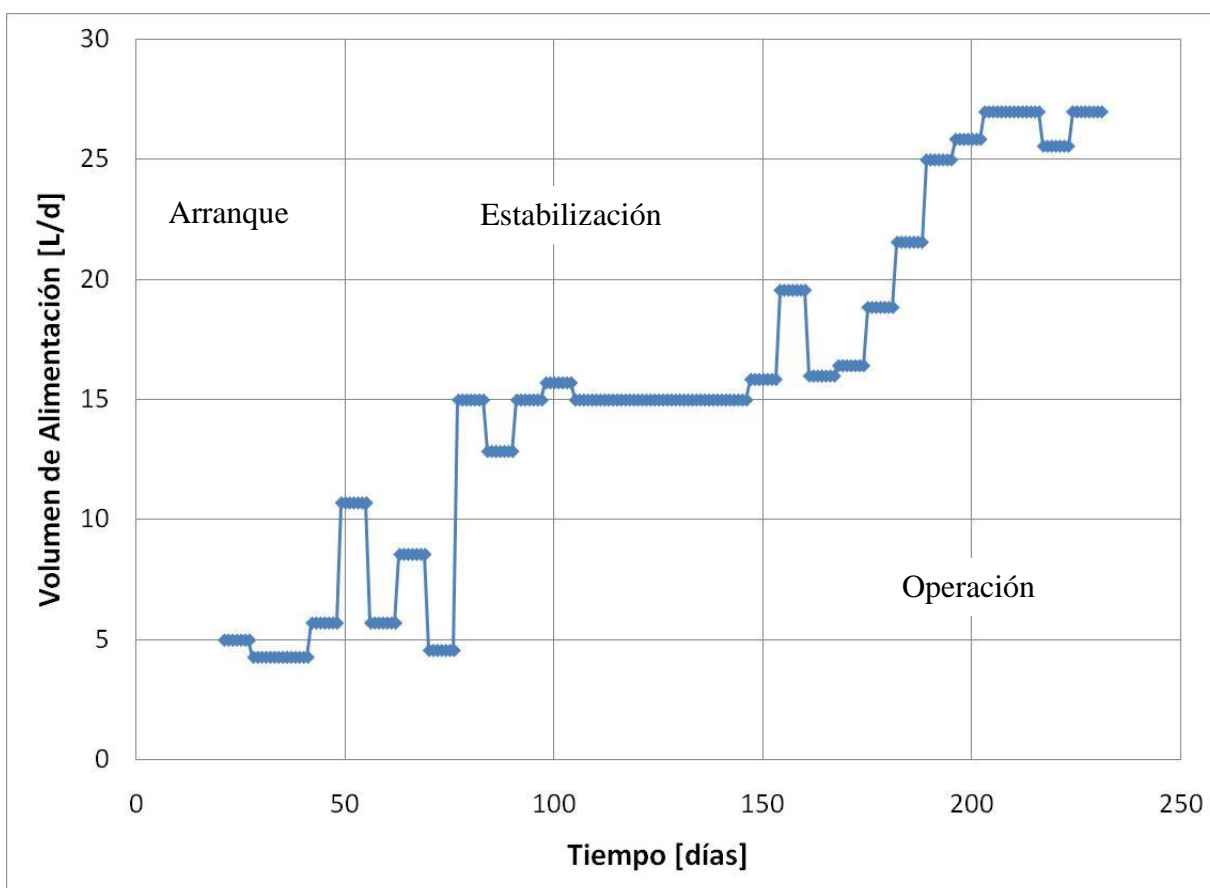
una recirculación baja con el objetivo de darle un pequeño tiempo de adaptación a los microorganismos y a la vez facilitar las condiciones de la puesta en marcha y operación.



**Fig. 4.3.** Variación de la recirculación con respecto al tiempo de operación del biodigestor

Como se observa en la Fig. 4.4, en el periodo de arranque que comprende los días del 0 al 50, el biodigestor no fue alimentado en los primeros 20 días debido a que se estaban estableciendo las condiciones anaerobias. Durante los días posteriores del 20 al 80, se alimentó intermitentemente con un volumen promedio diario de 5 a 10 litros, lo que significa que se alimentaba cada 2 o 3 días un volumen de 10 a 15 litros. Se realizó esta alimentación intermitentemente para iniciar lentamente la alimentación y propagación de las bacterias anaerobias y dado el equipo existente resulta muy difícil alimentar cantidades menores. A partir del día 51 inicia la etapa de estabilización donde se alimentó hasta el día 80, 5 días seguidos un volumen de 10 a 15 litros y se dejaba descansar 2 o 3 días. Del día 80 al 150 se

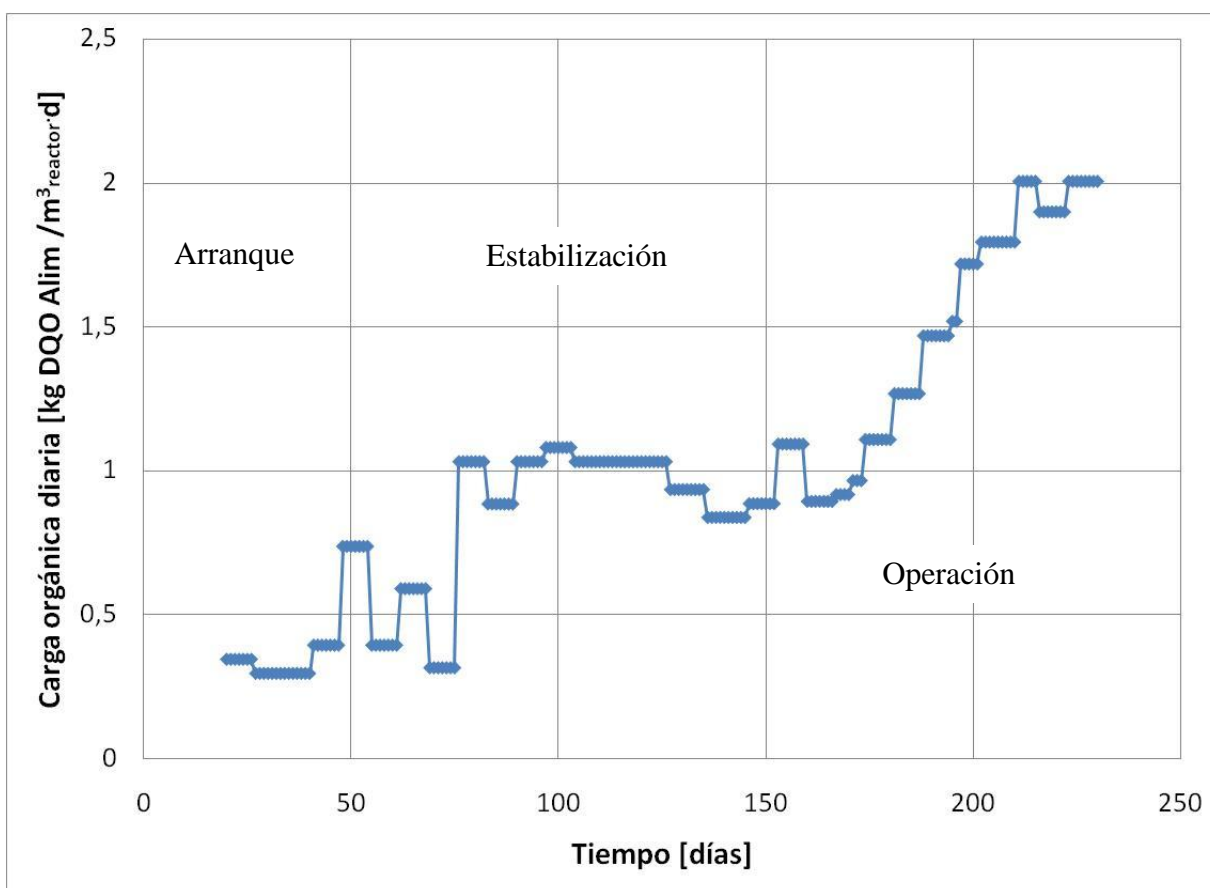
llevó a cabo una alimentación mas continúa. Se alimentó de forma continua 15 litros diarios sin descanso. Las pequeñas oscilaciones que se observa es debido a la falta de alimento, ya que no se tenía abastecimiento por parte del proveedor de la materia prima. Para el periodo de operación se prosiguió a incrementar periódicamente el volumen de alimentación en 2,5 litros, de acuerdo a la estabilidad del biodigestor y a la producción de biogás diaria hasta llegar a un volumen de 27 litros diarios hasta el final de la operación que fue a los 230 días.



**Fig. 4.4.** Variación del volumen de alimentación con respecto al tiempo de operación del biodigestor

La carga orgánica diaria tiene la misma tendencia que el volumen de alimentación lo cual indica que están estrechamente ligadas. Pero la diferencia está en que la carga orgánica nos indica la disponibilidad de alimento en forma de DQO presente en el sustrato. Para determinar la carga orgánica diaria se divide la cantidad de DQO alimentado diariamente (kg DQO/d)

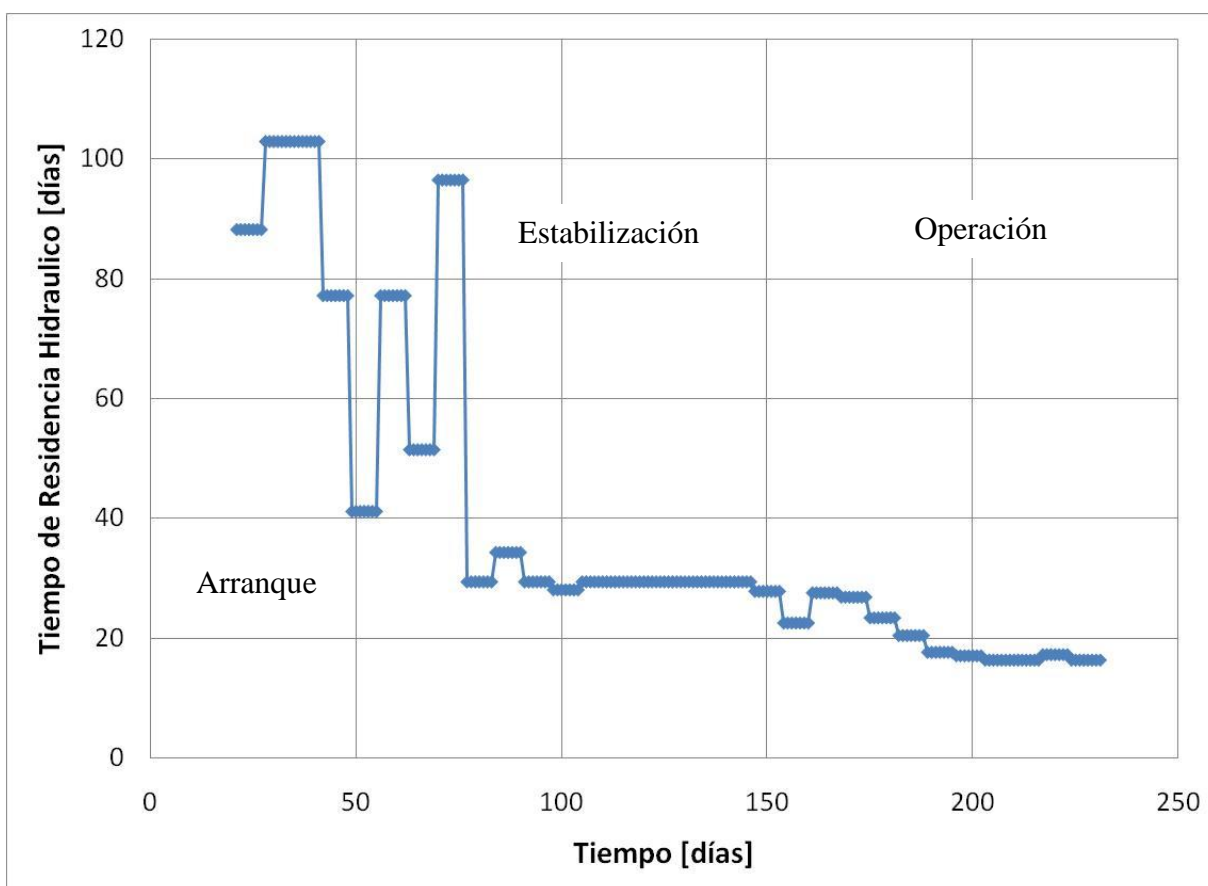
para el volumen del reactor en metros cúbicos ( $m^3$ ). En la Fig. 4.5 se muestra la carga orgánica alimentada en kg de DQO por volumen de reactor y día, y se puede notar que cumple con las mismas etapas que la alimentación volumétrica. En el periodo de arranque que va desde el día 0 hasta el día 50, la carga orgánica promedio es de  $0,37 \text{ kg}_{\text{DQO Alim}} / m^3 \cdot d$ . Es debido a que el biodigestor los primeros 20 días no recibió ninguna carga orgánica. Para los días del 20 al 50, la carga orgánica promedio es de  $0,37 \text{ kg}_{\text{DQO Alim}} / m^3 \cdot d$ . Entre los días del 51 al 80 la carga orgánica promedio es de  $0,57 \text{ kg}_{\text{DQO Alim}} / m^3 \cdot d$ . En el día 81 hasta 150 el cual pertenece al periodo de estabilización la carga orgánica promedio es de  $0,97 \text{ kg}_{\text{DQO Alim}} / m^3 \cdot d$ . y finalmente durante el periodo de operación del día 151 al día 230 se logró incrementar la carga orgánica alimentada desde  $0,88$  a  $2,01 \text{ kg}_{\text{DQO Alim}} / m^3 \cdot d$ .



**Fig. 4.5.** Variación de la carga orgánica de alimentación con respecto al tiempo de operación del biodigestor

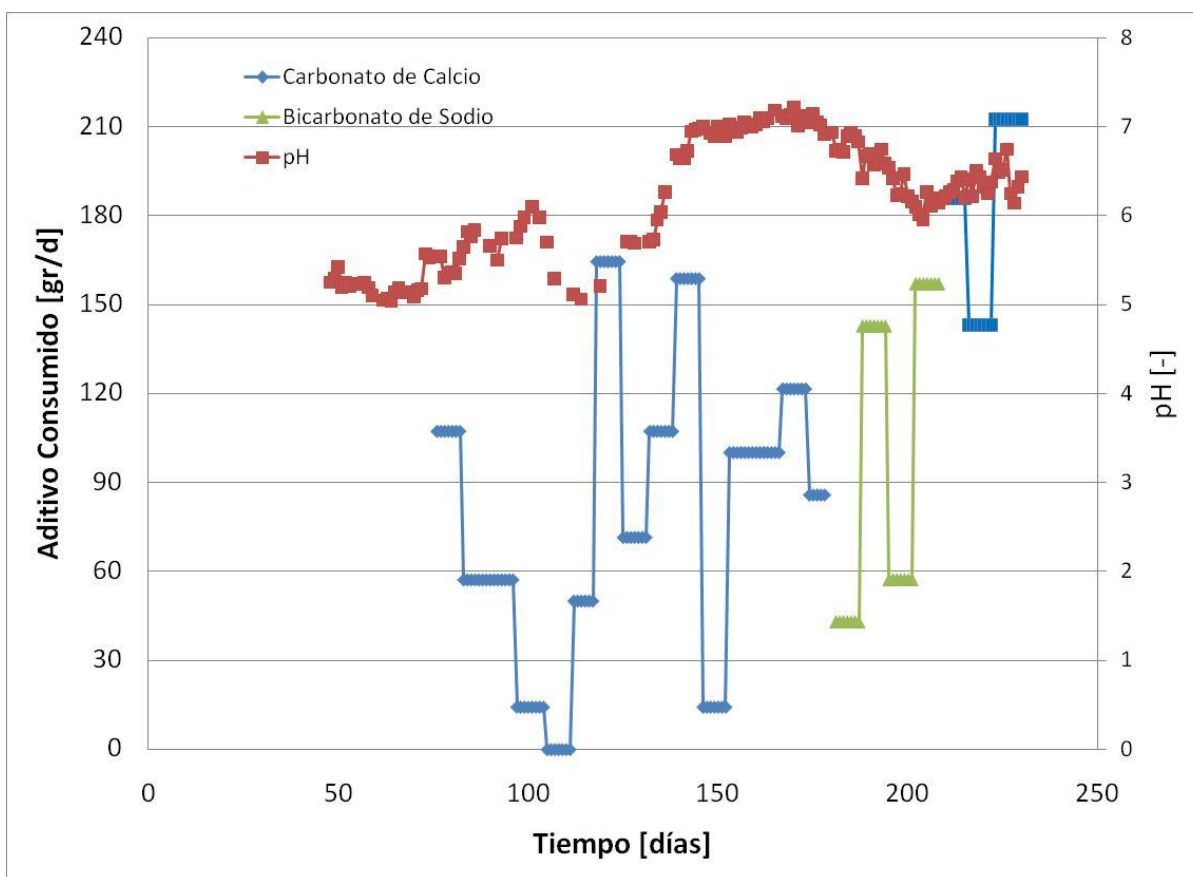


Como se muestra en la Fig. 4.6, en el tiempo de residencia hidráulico (TRH) es posible determinar los 3 periodos muy bien definidos. En el primer periodo el cual consta de los 50 primeros días se observa que hay un descenso en el tiempo de residencia iniciando desde los 102 días aproximadamente hasta llegar a 30.8 días. Las oscilaciones son producidas por la poca y pausada alimentación. En el periodo de estabilización que comprende los días del 80 a 150 se presenta un tiempo de residencia hidráulico aproximado de 30 días. Posteriormente se llega al tercer periodo que consta desde los 150 días hasta los 230 días que es el final de la operación, donde se observa que inicia con un tiempo de residencia hidráulico de 27,8 y decrece hasta los 16.3 días, esto se debe al aumento de la carga orgánica y al incremento de la degradación. Un tiempo de residencia menor a 20 días ya representa un proceso de digestión eficiente.



**Fig. 4.6.** Variación del tiempo de residencia hidráulico con respecto al tiempo de operación del biodigestor

El consumo de cal (CaO) está directamente relacionado con el pH del biodigestor y la cantidad necesaria depende del pH de la alimentación. Como se puede observar en la Fig. 4.7, en los primeros 80 días que corresponden a los periodos de arranque y puesta en marcha no se adicionó CaO. Desde el día 50 hasta el día 75, como se observa en la figura el pH inicia con 5,50 aproximadamente y empieza a bajar hasta llegar a un pH de 5,04. Este pH es muy bajo para las bacterias metanogénicas y por ende para la producción de biogás lo cual significa condiciones de operación indeseadas. Adicionalmente, debido a la alimentación ácida. La tendencia del pH es a seguir bajando, pero con la adición de 100 gr por día en promedio de aditivo, en 5 días se logra recuperar el pH obteniendo un valor de 5,53 aproximadamente. Para el periodo que comprende los días 81 al 150 se decidió reducir la cantidad de cal (CaO) para evitar inhibición por exceso de calcio. Es por eso que en los 30 días siguientes se disminuyó paulatinamente la carga del aditivo a la alimentación hasta no colocar nada, pero como consecuencia de esa acción el pH bajo drásticamente debido a que la alimentación que ingresó al biodigestor estaba fermentada, por lo tanto con un grado de acidez muy alto haciendo que el pH baje de 6,1 a 5,06. Es por ello que se tomó la acción de agregar cal según la acidez en la que se encuentre el sustrato de alimentación. Es así como se logró alcanzar un pH de 7,0 para el periodo de operación del biodigestor que va desde el día 151 hasta el día 230 en la que termina la operación. Por esta razón la curva del aditivo es oscilatoria, ya que depende de la acidez de la alimentación al biodigestor. A partir del día 190 se cambia el CaO por bicarbonato de sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ) y se nota un descenso gradual de pH hasta llegar a un mínimo de 6.03 a pesar de la adición de bicarbonato. Al observar que el  $\text{NaHCO}_3$  no lograba aumentar ni mantener el pH en el nivel deseado se decidió volver a aplicar el CaO para recuperar el pH de operación entre 6,7 a 7,0. Además de no cumplir con el objetivo de elevar el pH, el bicarbonato de sodio generó problemas de espumas e inhibición en la producción de biogás y en la degradación en el biodigestor.

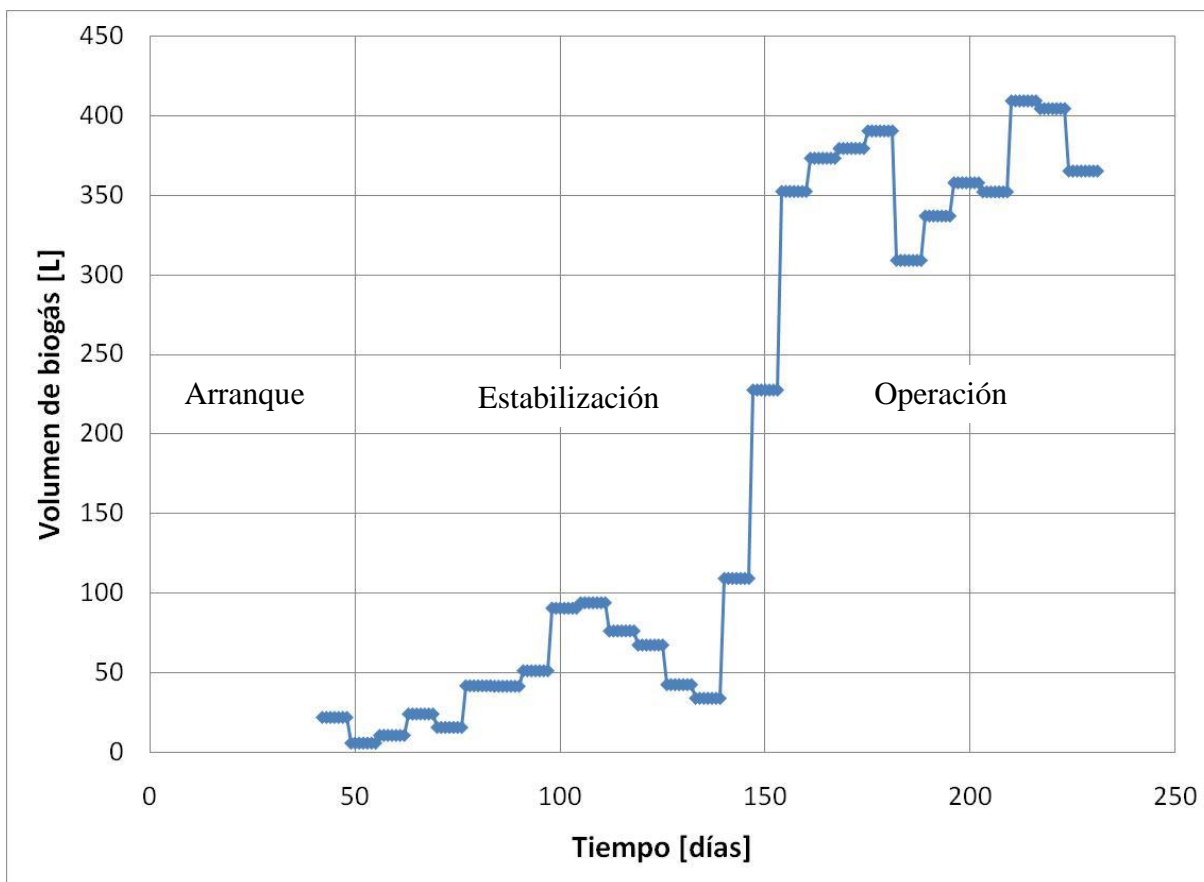


**Fig. 4.7.** Variación del consumo de aditivos para elevar el pH diario con respecto al tiempo de operación del biodigestor

Todos los parámetros presentados hasta ahora se controlaron y regularon con el objetivo de obtener un biodigestor que opere bajo las condiciones óptimas para producir la máxima cantidad de biogás. Y recién cuando los parámetros previamente presentados se encuentran en el rango de operación adecuado, se puede esperar una producción de biogás considerable.

La generación de biogás se dio, como se muestra en la Fig.4.8, mostrando tres etapas muy bien marcadas. La primera etapa está de acuerdo con el periodo de arranque del biodigestor, en la cual no se produjo nada de biogás en los primeros 40 días. En los 10 días siguientes hay una ligera producción de biogás, pero sin importancia ya que se considera que esta constituido en su mayoría por  $\text{CO}_2$  hasta que se instale las condiciones adecuadas para la digestión anaerobia.

A partir del día 50 inicia un ascenso considerable de la producción de biogás llegando a los 42 litros diarios para el día 80, el fin del periodo. En la segunda etapa que corresponde a los días del 81 al 150 se presenta incremento de la producción de biogás, hasta llegar a 94 l/d en el día 105. Pero en el día 106 es donde aparecen problemas e inconvenientes de operación y la producción de biogás, se reduce considerablemente produciendo 34 litros diarios en el día 135. Con la adición de aditivos para elevar el pH, con temperatura estable a un promedio de 38°C y la alimentación de la materia prima fresca se recuperó la producción de biogás para el día 150 produciendo 110 litros diarios terminando la etapa de estabilización. Para la tercera etapa que corresponde al periodo de operación se observa que la producción de gas se recupera y tiene una producción estable de 390 litros por día en los lapsos de tiempo del día 151 al 180. En el intervalo de tiempo del día 181 al 205 se nota un descenso de la producción de biogás. Esto se debe al cambio de aditivo de CaO por bicarbonato de sodio bajando así la producción de biogás a 300 litros por día. Es por eso que para los días del 206 al 230 se vuelve a aplicar el aditivo de CaCO<sub>3</sub> para mejorar el pH y se nota que la producción de biogás vuelve a subir inmediatamente y a mantenerse con un volumen de 410 litros por día.



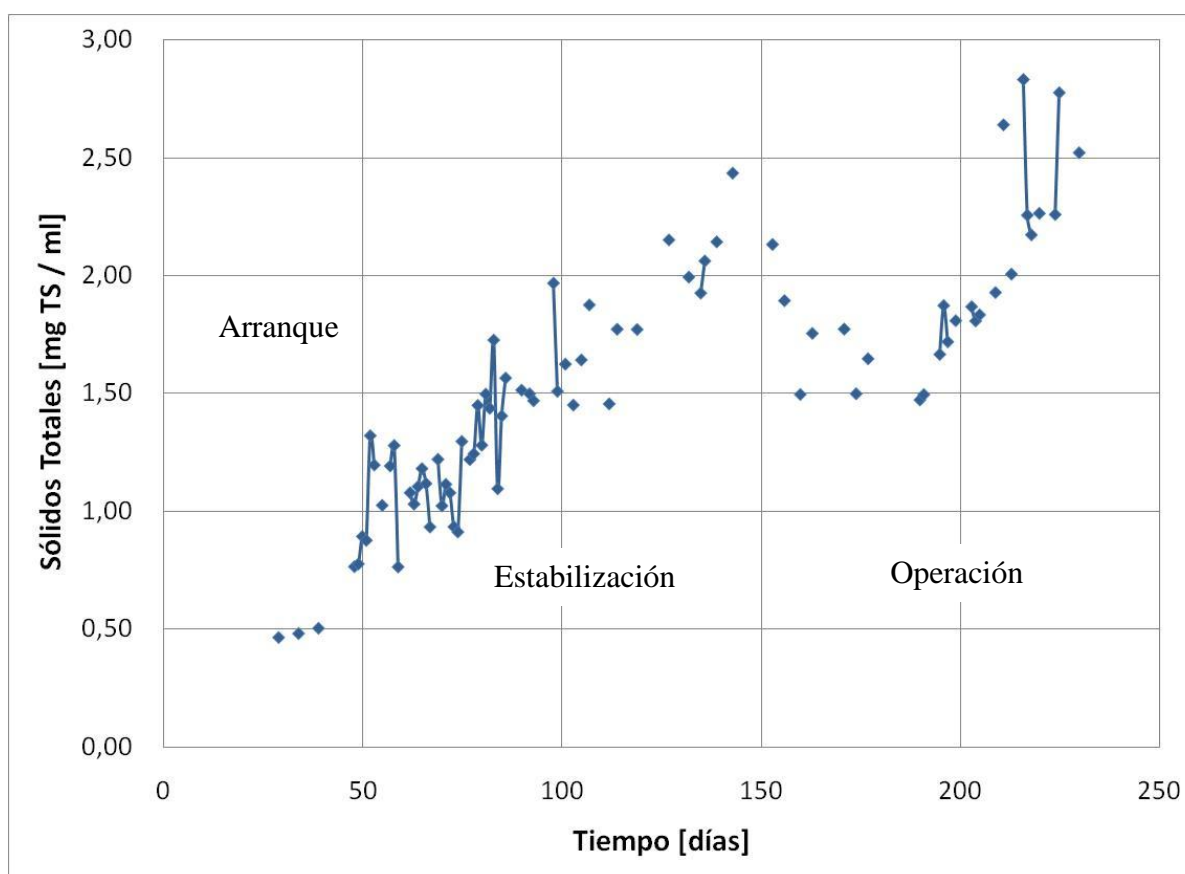
**Fig. 4.8.** Variación de la generación de gas por día con respecto al tiempo de operación del biodigestor

### 4.3. Análisis de la alimentación, la mezcla reactiva y el biol

A continuación se presentan los análisis realizados a la alimentación, la mezcla reactiva y el biol con el objetivo de conocer el estado del biodigestor en su interior, ya que estos análisis proporcionan información sobre la salud y la degradación en el interior del digestor.

El análisis de sólidos se lo realizó al fertilizante orgánico producido por el biodigestor piloto. Para esto se analizaron sólidos totales y sólidos orgánicos totales. El contenido de sólidos totales (TS) del biol se muestra en la Fig. 4.9. Se nota que la cantidad de sólidos totales aumenta progresivamente desde el día 30 con 0.46 mg/ml al día 135 con un máximo de 1.92 mg/ml estos valores representan. En el siguiente tramo que consta de los días del 136 al 200 se

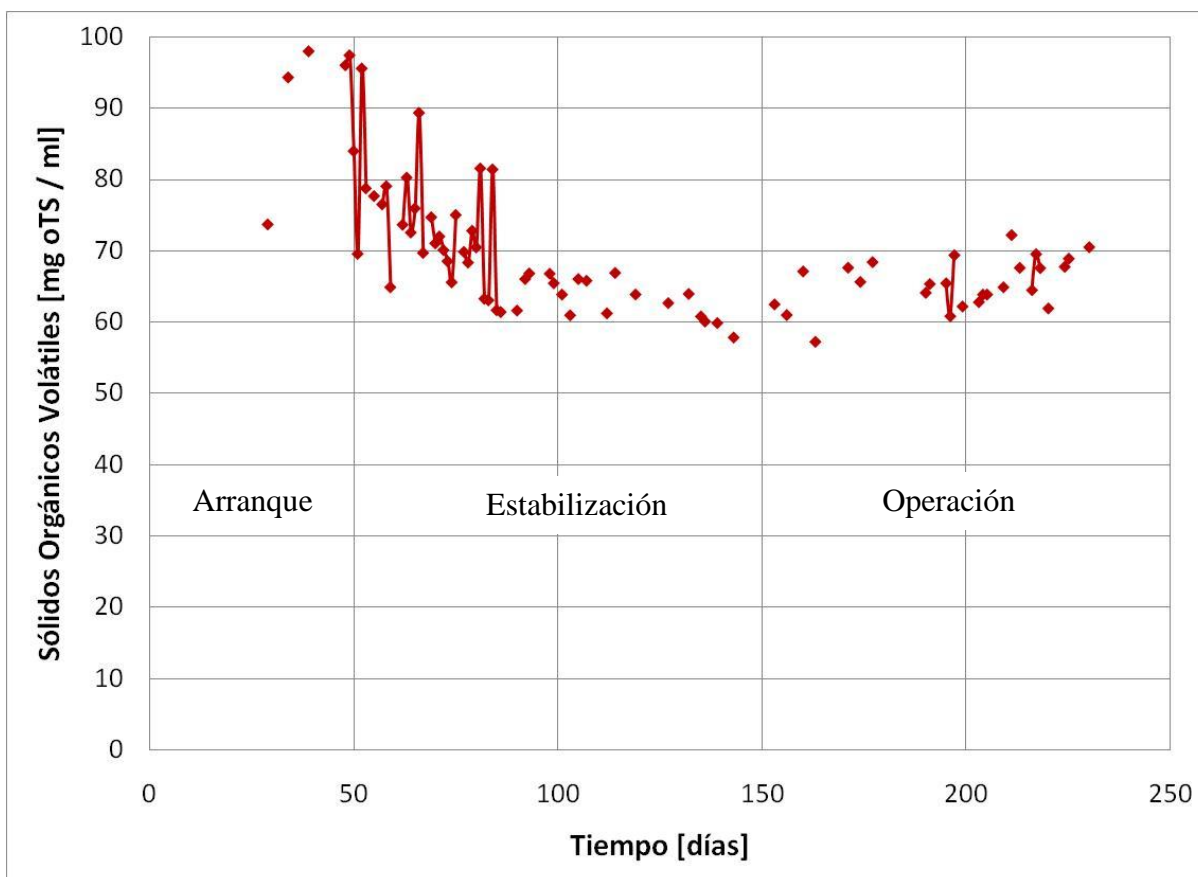
observa una oscilación en los datos. Esto se debe a la adición de carbonato y bicarbonato para controlar el pH y el volumen de alimentación irregular. A partir del día 201 a 230 de operación se recupera el porcentaje de sólidos totales y vuelve ascender hasta llegar a 2.77mg/ml o debido al aumento a la carga de alimentación. Sin embargo estos valores se encuentran dentro del rango óptimo de operación que no debe superar un 5% de TS en el reactor para evitar complicaciones con los parámetros en la tubería de recirculación o de sólido de lodos o acumulación de sólidos en el fondo del reactor.



**Fig. 4.9** Sólidos totales del biol con respecto al tiempo de operación del biodigestor

El contenido de sólidos totales orgánicos del biol como se muestra en la Fig. 4.10. Disminuye progresivamente desde el día 30 con un 97.98 mg/ml a con un mínimo de 60.15mg/ml al día 135 esto se debe a la degradación de la materia orgánica neutra, se instalan y estabilizan las condiciones anaerobias en el reactor. En el siguiente tramo que se considero consta de los días

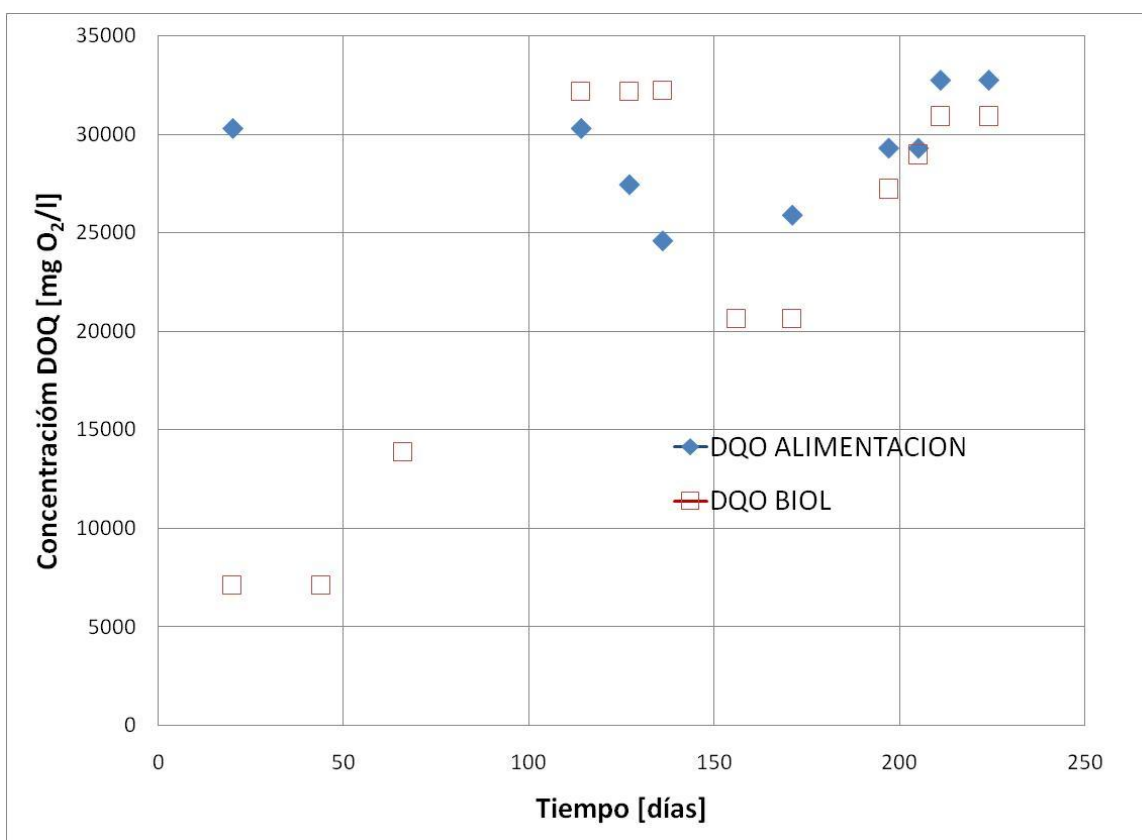
del 136 al 210 se observa una ligera oscilación tendiendo a subir el porcentaje a un máximo de 67.67mg/ml. A partir del día 211 a 230 de operación se nota que hay una tendencia seguir bajando el porcentaje de sólidos orgánicos totales y se registra un valor promedio de 66.30 mg/ml.



**Fig. 4.10.** Sólidos orgánicos totales del biol con respecto al tiempo de operación del biodigestor

La DQO fue analizada tanto de la alimentación como de la mezcla reactiva. Como se aprecia en la Fig. 4.11, la DQO alimentada (rombos) muestra valores que se mantienen en un intervalo de 25000 a 33000 mg O<sub>2</sub>/l. Este valor depende de la materia prima, tanto de desecho orgánico vegetal como el desecho orgánico animal. Mientras que la interpretación de la DQO dentro del reactor es más complicada. Durante la etapa de puesta en marcha la DQO es muy baja con

7000 mg/l. Sin embargo, cuando se empieza a aumentar la carga orgánica diaria a partir del día 50, la DQO en el reactor aumenta linealmente hasta un máximo de 33000 mg/l en los días 100 a 150. Este aumento también coincide con los valores bajos de pH por debajo de 6,0, lo cual confirma que a estas condiciones las bacterias anaeróbicas se encuentran inhibidas y no logran degradar la materia orgánica, acumulándose en el biodigestor. A partir del día 151 empieza un periodo de estabilización y mejora de degradación. Con el aumento en el pH inicia también un aumento en la actividad microbológica y, por lo tanto, una reducción es la DQO, llegando a un valor estable alrededor de 22000 mg/l. Sin embargo, con el aumento en la carga orgánica diaria y la simultánea disminución del pH en la etapa de operación se vuelve a observar un incremento en la DQO.



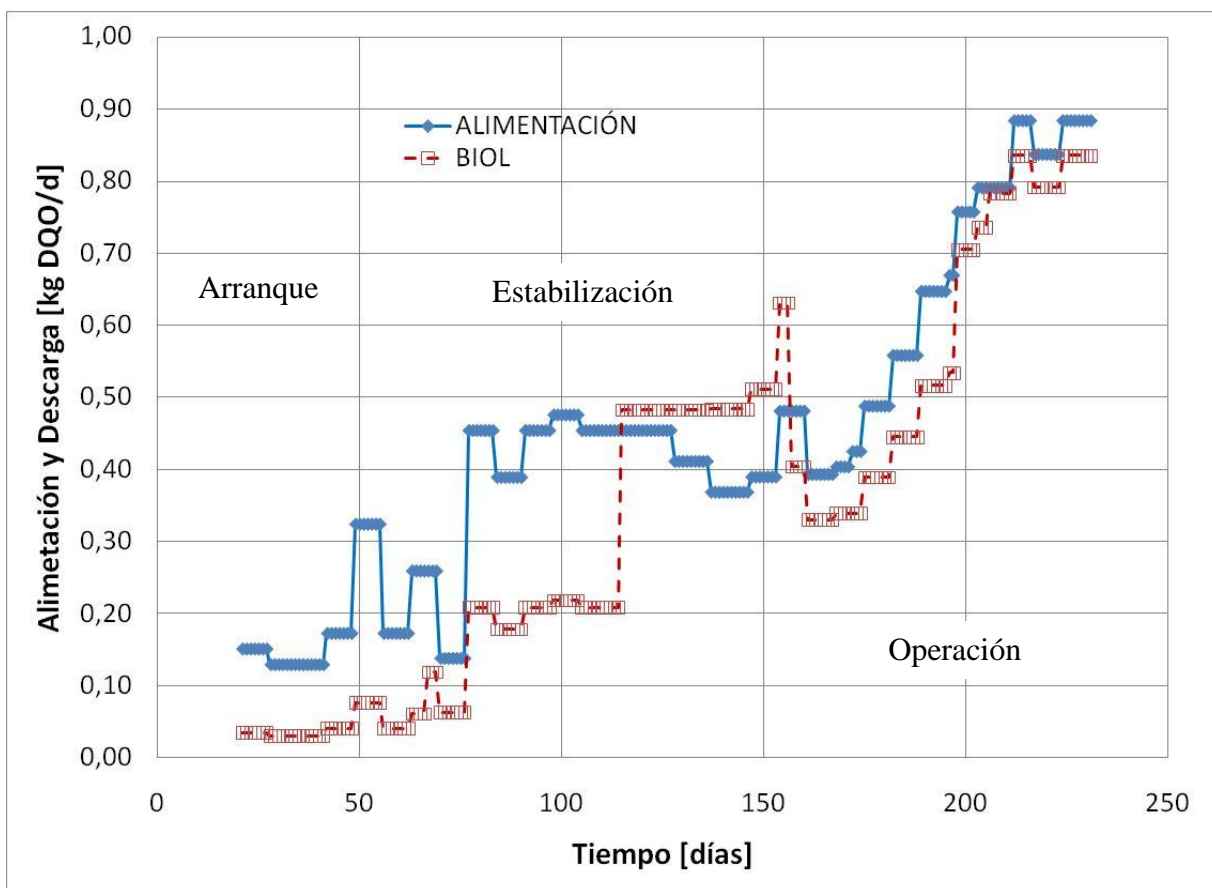
**Fig. 4.11.** Demanda química de oxígeno con respecto al tiempo de operación del biodigestor



#### 4.4. Interpretación y evaluación de la operación de la planta piloto

Es posible relacionar la alimentación y la descarga volumétrica con la DQO al graficar la alimentación y la descarga en términos de kg DQO/d. Para esto se utilizó los valores de DQO obtenidos con los análisis y los caudales volumétricos. La fig. 4.12 muestra los flujos de entrada y salida de la DQO diarios. Esta información es fundamental para poder realizar posteriormente el balance de la materia orgánica en el biodigestor.

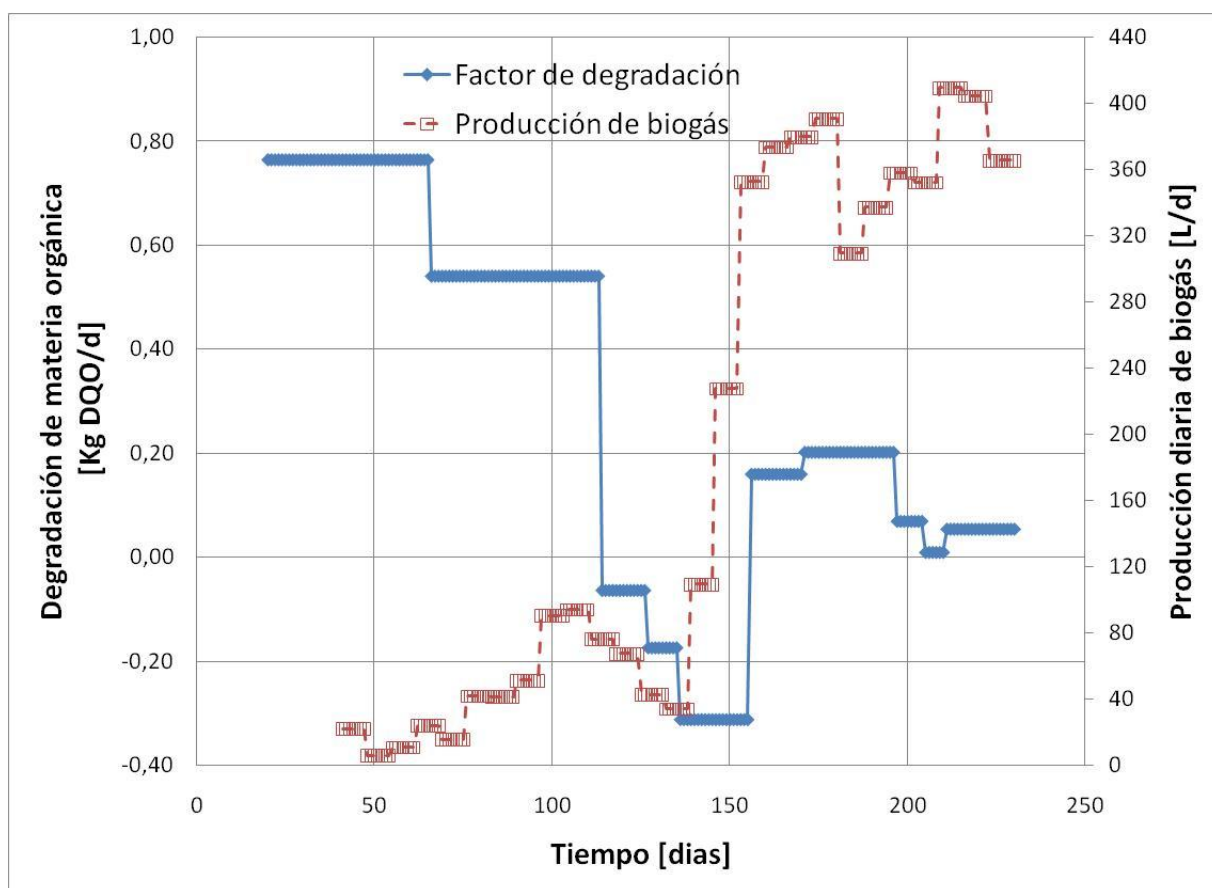
En los primeros 50 días, los cuales corresponden al periodo de arranque del biodigestor, se nota una reducción considerable de la DQO entre la alimentación con el producto (Biol). La reducción promedio es de un valor inicial de 0,21 kg DQO<sub>alim</sub>/día a 0,06 kg DQO<sub>biol</sub>/día lo cual representa una reducción del 48%. Para la segunda etapa que consta desde del día 81 al 160 se observa dos secciones, la primera sección de los días 81 al 115 se observa una buena degradación y significativa con un valor de reducción promedio 0,23 kg DQO/día que corresponde a un 51%. Pero los días posteriores, del 115 al 160, se observa un incremento considerable en la DQO del biol hasta llegar a un valor máximo de 0,63 kg DQO<sub>biol</sub>/día y un valor promedio de 0,49 kg DQO<sub>biol</sub>/día teniendo en la alimentación un valor promedio de 0,42 kg DQO<sub>alim</sub>/día. Esto nos indica que existieron problemas de operación en el biodigestor por los parámetros nombrados anteriormente, y prácticamente no hubo degradación de DQO lo cual coincide con los problemas en la generación de biogás durante este periodo. A partir del día 161 hasta el final de la operación en el día 230 se observa que en el periodo de operación se recuperó la degradación y la reducción de DQO, obteniendo una reducción promedio desde un valor inicial 0,76 kg DQO/día a 0,69 kg DQO /día dando un 10% de reducción.



**Fig. 4.12.** Relación del flujo másico de DQO en la alimentación y la descarga con respecto al tiempo de operación del biodigestor

En la Fig. 4.13 se muestra la comparación entre el factor de degradación y la producción de biogás con respecto al tiempo de operación del biodigestor. El factor de degradación se calculó con la diferencia entre la DQO de la alimentación y la DQO del biol dividida para la DQO de alimentación. En esta figura se aprecia que los primeros 110 días existe una buena degradación de la materia orgánica de 0,8 a 0,5 kg DQO/ día. Esto favorece a la vez la producción de biogás con un factor de degradación promedio 0,54 kg DQO/ día y una producción de biogás hasta llegar a 104 litros/ día. Para los días del 111 al 150 de observa que el factor de degradación cae a valores negativos y a su vez la generación de gas disminuye notablemente siendo estos valores mínimos en ambos casos. Esto se puede explicar por

problemas de operación por pH bajo. El factor de degradación negativo indica una acumulación de materia orgánica expresada como DQO en el biodigestor a partir del día 155 hasta el fin de la operación del biodigestor se observa una estabilización en la producción de biogás, y un factor de degradación estable llegando a volúmenes de 400 a 410 litros diarios promedio de 0,05 kg DQO por día.



**Fig. 4.13.** Comparación del factor de degradación y la producción de biogás con respecto al tiempo de operación del biodigestor

#### 4.5. Balance de masa de la planta piloto

Para el balance de masa de la planta piloto se tomó tres intervalos de días para controlar el desarrollo y la eficiencia de cada uno de los periodos de operación de la planta piloto. Los intervalos para el balance de masa se tomaron en base a su estabilidad y valorando el tipo de periodo al que pertenecen. Los intervalos tomados en cuenta son: el primer intervalo que corresponde al periodo de puesta en marcha que van desde el día 70 al 80, el segundo intervalo corresponde a periodo de estabilización que va desde el día 115 al 125, y finalmente el tercer intervalo corresponde al periodo de operación que va desde el día 220 al 230.

La ecuación del balance de masa se puede expresar de la siguiente forma:

$$F - P - C = AC \quad \text{Eqn 4-1}$$

donde

$$F = \text{Alimentación} \left( \frac{\text{kgDQO}}{\text{día}} \right)$$

$$P = \text{Producto} \left( \frac{\text{kgDQO}}{\text{día}} \right)$$

$$C = \text{DQO Consumido o Producción de Biogás} \left( \frac{\text{kgDQO}}{\text{día}} \right)$$

$$AC = \text{Acumulado} \left( \frac{\text{kgDQO}}{\text{día}} \right)$$

El balance de masa se realizó en el espacio de control alrededor del reactor como se muestra en la fig. 4.14.

De la evaluación de los datos de operación del biodigestor se pueden obtener los valores de alimentación de DQO, de salida de DQO por el producto y del consumo de DQO por la producción de biogás. Estos valores se encuentran para los balances en los tres puntos de operación en la tabla 4-1.

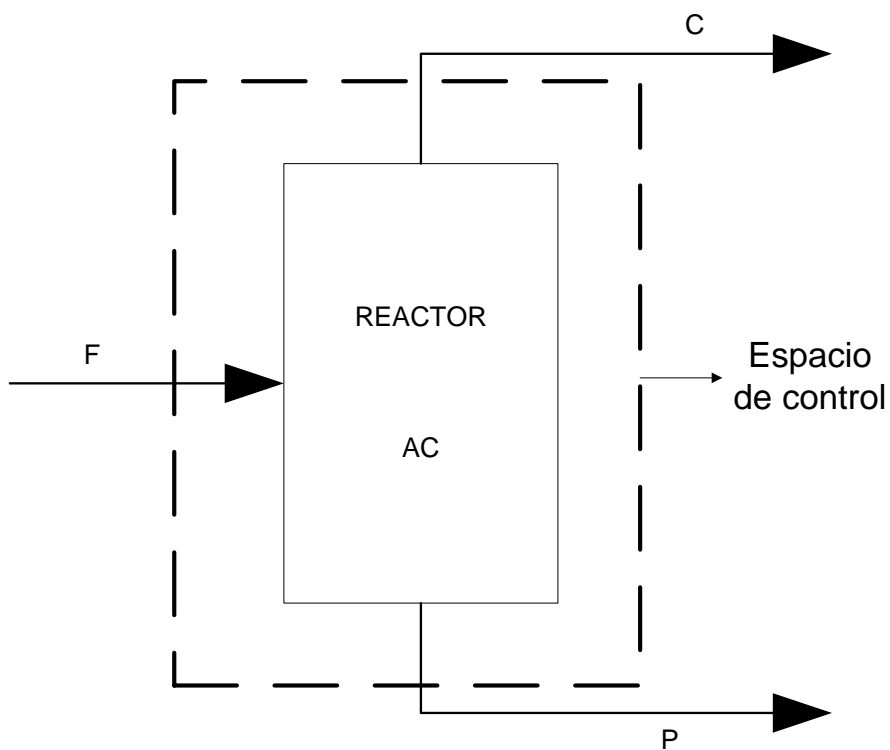


Fig. 4.14. Diagrama del espacio de control para el balance de masa

Tabla 4-1. Datos necesarios para los cálculos del balance de masa

Datos	Nomenclatura	Unidades	Balance 1	Balance 2	Balance 3
<b>Días promediados</b>		Días	70 – 80	115 – 125	220 – 230
<b>Entrada</b>	F	$\frac{kgDQO}{día}$	0,28	0,45	0,87
<b>Salida</b>	P	$\frac{kgDQO}{día}$	0,13	0,48	0,82
<b>Volumen de Biogás producido</b>	$V_{Gas\ Producido}$	$\frac{m^3}{día}$	0,028	0,068	0,376
<b>Densidad del Biogás</b>	$\rho_{biogás}$	$\frac{kg}{m^3}$	1,2	1,2	1,2
<b>Volumen de reactor</b>	$V_{Reactor}$	$m^3$	0,441	0,441	0,441

Suponiendo que en los intervalos observados no hay acumulación de DQO en el reactor se puede calcular la producción específica de biogás. Esto es la cantidad de biogás que se espera producir por cada kg de DQO degradado. Las ecuaciones necesarias para estos cálculos se presentan en la tabla 4-2.

**Tabla 4-2.** Pasos y fórmulas para el balance de masa

Calculo	Nomenclatura	Formula	Unidades
<b>Balance de masa</b>		$F - P - C = 0$	
<b>Consumo de DQO</b>	$C$	$C = F - P$	$\frac{kgDQO}{día}$
<b>Velocidad de degradación de DQO</b>	$R_{DQO}$	$R_{DQO} = \frac{C}{V_{Reactor}}$	$\frac{kg DQO}{m^3_{reactor} \cdot día}$
<b>Cantidad de biogás producida</b>	$\dot{m}_{biogás}$	$\dot{m}_{biogás} = \rho_{biogás} \times V_{Gas\ Producido}$	$\frac{kg\ biogas}{día}$
<b>Velocidad de producción de biogás</b>	$R_{biogás}$	$R_{biogás} = \frac{\dot{m}_{biogás}}{V_{Reactor}}$	$\frac{kg\ biogas}{m^3_{reactor} \cdot día}$
<b>Producción específica de biogás</b>	$P_{biogás}$	$P_{biogás} = \frac{R_{biogás}}{R_{DQO}}$	$\frac{kg\ biogás}{kg\ DQO}$

La tabla 4-3 muestra los valores numéricos para el cálculo de la producción específica de biogás.

**Tabla 4-3.** Balance de masa

Calculo	Unidades	Balance 1	Balance 2	Balance 3
<b>Consumo de DQO</b>	$\frac{kgDQO}{día}$	0,15	-0,03	0,05
<b>Velocidad de degradación de DQO</b>	$\frac{kg DQO}{m^3 \cdot día}$	0,340	-0,068	0,113
<b>Cantidad de biogás producido</b>	$\frac{kg biogás}{día}$	0,034	0,082	0,451
<b>Velocidad de producción de biogás</b>	$\frac{kg biogás}{m^3_{reactor} \cdot día}$	0,076	0,185	1,023
<b>Producción específica de biogás</b>	$\frac{kg biogás}{kg DQO}$	0,224	-2,720	9,024

Como se observa en el balance de masa de la tabla 4-3 el consumo de la biomasa para el primer periodo es 0,15 kg DQO/d lo cual indica que hubo una degradación de la materia orgánica y una transformación a gases, con una velocidad de degradación de DQO de 0,340 kg DQO/m<sup>3</sup>·d. Este valor indica es una alta degradación y eso se debe a la baja concentración de material orgánico disponible en la alimentación. Para las bacterias en crecimiento contenidas en el interior del biodigestor ese sustrato es disponible y de fácil consumo. La cantidad de biogás producida por estas bacterias es de 0,034 kg biogás /d, pero este gas es de mala calidad para la combustión debido a que predomina dentro de sus componentes el CO<sub>2</sub> y la cantidad de CH<sub>4</sub> no es la suficiente para lograr quemarse.

Para el segundo periodo aparece un valor de -0,03 kg DQO/d en el balance de masa lo cual indica que no existe consumo de biomasa. Por lo contrario aparece una acumulación de DQO en el interior del biodigestor como ya se había observado anteriormente. Por lo tanto, no hay degradación de la materia orgánica y esto se refleja en la velocidad de degradación negativa de -0,068 kg DQO / m<sup>3</sup>·d. Esto es consecuencia de problemas en la operación y alteración del parámetro pH. La cantidad de biogás producida durante este periodo no aumenta de manera importante ya que en comparación con el periodo anterior se genera un valor de 0,082 kg biogás /d que es un indicador de que el proceso está fallando por la baja producción de biogás.

Finalmente, para el tercer periodo de operación del biodigestor se observa un consumo de biomasa relativamente bajo de 0,05 kg DQO/d. Esta cantidad no es alta, pero a diferencia de los periodos anteriores en este periodo el consumo se mantiene estable y la velocidad de degradación de DQO es aceptable con un valor de 0,113 kg DQO / m<sup>3</sup>·d. La cantidad de biogás de 0,451 kg biogás/d es mucho más alta que la cantidad producida por los anteriores balances con una buena calidad del biogás apta para combustión y generación de energía. La producción del biogás es constante dando señales de que la digestión anaeróbica es buena con una producción específica de 9,024 kg biogás / kg DQO degradada.

**Tabla 4-4.** Comparación de la producción real con la calculada

Comparación	Unidades	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3
<b>Producción de biogás Real</b>	$\frac{kg\ biogas}{m^3_{reactor}\ día}$	0,054	0,201	1,012
<b>Producción de biogás Calculada</b>	$\frac{kg\ biogas}{m^3_{reactor}\ día}$	0,076	0,185	1,023

La producción de biogás real es el valor diario tomado del biodigestor directamente, mientras que la producción de biogás calculada es la cantidad de biogás en base al DQO consumido dividido para el volumen del reactor.

La comparación entre la producción de biogás real con la producción de biogás calculada son relativamente similares. Para el primer periodo la producción real de biogás es de 0,054 kg biogás/ m<sup>3</sup><sub>reactor</sub> día y la producción calculada de biogás es de 0,076 kg biogás/ m<sup>3</sup><sub>reactor</sub> día lo que indica un variación de 0,022 kg biogás/ m<sup>3</sup><sub>reactor</sub> día esto se debe probablemente a la inestabilidad en temperatura y pH que se tenía lo cual no permitió que las bacterias se desarrollen y produzcan biogás adecuadamente. En el segundo periodo se observa que la producción real de biogás es mayor que la producción de biogás calculada pese a los inconvenientes de acumulación y pH bajo, lo cual nos indica que produjo más gas que lo esperado. En cuanto al tercer periodo de operación del biodigestor la diferencia entre la producción de biogás real con la calculada es mínima ya que la diferencia es solo de 0,011 kg



biogás/  $m^3_{reactor}$  día por lo tanto indica que a medida que avanzaba la operación la cantidad real se acercaba a la cantidad esperada probando el buen funcionamiento del sistema.

#### 4.6. Caracterización y estabilización del biol

La mezcla reactiva saliente del biodigestor requiere de un tratamiento posterior para su estabilización y reducción de microorganismos patógenos. Por lo tanto, este biol fue sometido a tres pruebas durante los diferentes periodos de la operación del biodigestor. La primera prueba a la que se sometió el biol fue un tratamiento con aeración. La muestra se tomó durante el periodo de puesta en marcha. La segunda prueba a la que se sometió el biol fue un tratamiento con cal y se tomó la muestra durante el periodo de estabilización y principio del periodo de operación. Finalmente, la tercera prueba del biol fue dándole un tratamiento térmico y se tomó la muestra durante el periodo de operación del biodigestor. En la tabla 4-5 se detallan las características del biol después de ser sometido a los respectivos tratamientos.

**Tabla 4-5.** Caracterización del biol según el tratamiento de estabilización

Análisis	Unidades	Mezcla Reactiva	Tratamiento con aireación	Tratamiento con cal	Tratamiento térmico o higienización
<b>pH</b>		6,65	5.50	8,72	6,56
<b>Sólidos totales (TS)</b>	mg/ml	1,98	1,05	1,84	1,47
<b>Sólidos volátiles(oTS)</b>	mg/ml	65,55	76,71	61,96	67,29
<b>DQO</b>	mg/l	18815	10917	18063	18943
<b>Nitrógeno total</b>	mg/l	5470	3740	5217	4145
<b>Fósforo total</b>	mg/l	468	454	454	505
<b>Microbiología Patógenos</b>					
<b>Coliformes totales</b>	UFC/ml	62	800	8	----
<b>E. coli</b>	UFC/ml	----	18	----	----

Los datos obtenidos en la tabla 4-5 son promedios de cada periodo para poder realizar una comparación y poder determinar el mejor método de estabilización y las características presentes en el biol.

Los datos de la mezcla reactiva fueron tomados del periodo de operación el cual consta desde el día 150 hasta el día 230, final de la operación. Para esta mezcla reactiva se observa característica de pH, TS, oTS, DQO, N, P, y microorganismos patógenos, los cuales serán comparados y se muestra como van variando sus características según su tratamiento.

Durante el tratamiento de aireación que se le da al biol se observa variaciones en las características, estas variaciones son evidentes para el caso del pH, TS, oTS y la DQO. Todos estos parámetros bajan debido a que con la aireación del biol se da inicio a la degradación aeróbica la cual afecta directamente al TS, oTS y DQO. Por otro lado, el pH tiene un descenso debido a que el proceso de fermentación continúa. Otro factor por el cual el TS, oTS y DQO son bajos es porque la dilución en este periodo es alta con una relación (5:1) entre el agua y la materia orgánica animal, respectivamente. En comparación con los periodos de estabilización y operación que la dilución fue en una relación (3:1). Este tratamiento afectó directamente al contenido de nitrógeno (N) debido a que permite la volatilización considerable de nitrógeno molecular, bajando su concentración de más de 5000 mg/l a 3740 mg/l de biol. Se observa también que la cantidad de microorganismos patógenos sube considerablemente con este tratamiento a niveles de 800 UFC/ml para *Coliformes totales* y a 18 UFC/ml para *E. coli*, en comparación con los valores iniciales a los que sale la mezcla reactiva del biodigestor que son de 62 UFC/ml de *Coliformes totales* y sin presencia de *E. coli*. Según las normas de la Environmental Protection Agency, EPA, señalan que el limite permisible de patógenos en fertilizantes orgánicos es de valores menores a 2 millones UFC/ml para *Coliformes totales* y de valores menores a 1000 UFC/ml para *E. Coli* (40). Por lo tanto, el fertilizante cumple con normas internacionales. En cuanto a la cantidad de fósforo se observa una pérdida relativamente pequeña que indica que este tratamiento no afecta la disponibilidad de este elemento en el biol.

En el biol tratado con cal, CaO, las muestras fueron tomadas en el periodo de estabilización y presentan variaciones en sus características de la siguiente manera: el pH es afectado debido a

que el CaO es un aditivo utilizado para elevar el pH. Es por eso que tenemos un pH promedio en el biol de 8,72. Los TS, oTS, DQO y fósforo total prácticamente no varían lo que indica que el tratamiento no cambia las características. El nitrógeno total dentro del rango de variación disminuye ligeramente de 5470 mg/l de biol a 5217 mg/l lo que indica que este tratamiento conserva en lo posible la cantidad de nitrógeno presente en el biol. En cuanto a los microorganismo patógenos sí se ven afectados con la elevación drástica del pH, bajando la cantidad de *Coliformes totales* de 62 UFC/ml en el biol a 8 UFC/ml y sin presencia de *E. coli*.

La última prueba que se realizó fue el tratamiento térmico o higienización, las muestras fueron tomadas en el periodo de operación y el biol presenta las siguientes características: este tratamiento altera las características del biol mínimamente, es por esto que el pH, TS, oTS y DQO se mantienen prácticamente constantes. La cantidad de nitrógeno total es afectada reduciéndose de más de 5000 mg/l a 4145 mg/l debido a que se volatiliza el nitrógeno molecular. Por otro lado, en este tratamiento la disposición de fósforo en el biol esta dentro de un rango de variación aceptable ya que no difiere su concentración siendo de 505 mg/l en comparación con los 468 mg/l de la mezcla reactiva. En cuanto a la cantidad de microorganismos patógenos es un tratamiento efectivo ya que puede reducir la cantidad de *Coliformes totales* y *E. coli* a 0 UFC/ml, lo cual indica que no hay presencia de bacterias en el biol.

## 5. Conclusiones y Recomendaciones

En este estudio se construyó, se puso en marcha y se operó la planta piloto de digestión anaeróbica del laboratorio de desarrollo de energías alternativas de la USFQ con el fin de aumentar el rendimiento en la producción de biogás con respecto a biodigestores rurales y de fase sólida. Para esto se utilizó un biodigestor piloto durante 230 días de operación. El biodigestor fue alimentado con una mezcla de desecho orgánico vegetal triturado y desecho orgánico animal diluido. Durante el funcionamiento del biodigestor se midieron y controlaron parámetros en cada uno de los periodos de puesta en marcha, de estabilización y de operación. Entre los parámetros controlados encontramos: pH, temperatura, recirculación, tiempo de residencia, DQO de alimentación, DQO de la mezcla reactiva, aditivos, carga orgánica, sólidos totales, sólidos totales orgánicos y biogás generado. Todos estos datos fueron analizados buscando un método de operación óptima y detallada para el sistema de digestión anaeróbica a escala piloto. A la vez que se obtiene información sobre cómo afecta cada parámetro al funcionamiento y a la eficiencia de la degradación de la materia orgánica en el biodigestor.

La temperatura, el pH y la recirculación son parámetros muy importantes para el óptimo funcionamiento del biodigestor, ya que estos están relacionados directamente con la producción de biogás. En el caso de que alguno falle, el descenso en producción de biogás es inmediata. Es por ello que durante la operación se procede a mantener estos parámetros constantes dentro de rangos establecidos en la operación del biodigestor, de tal manera que se pudo tener un control dentro del sistema. Durante el proceso de puesta en marcha se regularizaron estos parámetros gradualmente hasta llegar a valores óptimos de operación. Esto implica que se debe subir estos valores poco a poco siempre con un tiempo de adaptación para que el sistema no colapse. De tal manera que el pH es un buen indicador de que el sistema funcione adecuadamente.

Los aditivos se añadieron debido a la necesidad de incrementar el pH. Es por eso que se probó con 2 tipos de aditivos, el primero fue el cal (CaO) y el segundo bicarbonato de sodio. Los resultados con el cal (CaO) fueron satisfactorios ya que se llegó al pH de operación deseado el cual era de 6,5 a 6,9, manteniendo una solución amortiguadora y por otro lado era bueno ya

que la producción de gas se mantenía o se incrementaba con el tiempo. Dando como resultado un buen aditivo de fácil aplicación y económica adquisición. Mientras que la prueba con el bicarbonato de sodio no fue una buena opción debido a que generó los siguientes inconvenientes: no llegar al pH deseado en el biodigestor, generación de demasiada espuma en el tanque de alimentación y exceder los niveles permitidos de sodio en el digestor lo que probablemente inhibió a los microorganismos dando como resultado una reducción en la producción diaria del biogás. Por lo cual el bicarbonato de sodio resultó ser un aditivo malo para el proceso y de alto costo para la operación. Durante la puesta en marcha casi no se utilizó aditivos, los aditivos fueron requeridos durante los periodos de estabilización y operación del biodigestor.

En cuanto al tiempo de residencia hidráulico se reconoce tres periodos. El primero es la puesta en marcha del biodigestor, en el cual los tiempos de residencia son altos llegando a registrar 102,9 días de residencia. El segundo periodo es de estabilización donde el tiempo de residencia se mantiene en 29,4 días. Para el tercer periodo de operación se empezó a aumentar el volumen de alimentación haciendo que el tiempo de residencia hidráulico disminuya hasta llegar al fin de la operación a 16,3 días. El volumen de alimentación se aumentaba según la producción del biogás, cuando la producción de biogás se mantenía en un valor alto se incrementaba paulatinamente el volumen de alimentación. Por lo tanto, a medida que el tiempo de residencia hidráulico disminuía la degradabilidad de la materia orgánica aumentaba lo que nos indica que el estado del biodigestor es bueno.

Los resultados de la operación de la planta piloto muestran que la carga orgánica alimentada al biodigestor se aumenta gradualmente ya que inició con una carga de  $0,37 \text{ kg}_{\text{DQO Ali}}/\text{m}^3\cdot\text{d}$  hasta llegar a  $2,01 \text{ kg}_{\text{DQO Ali}}/\text{m}^3\cdot\text{d}$ . Esto se debe principalmente a dos factores: el primero a que se fue subiendo gradualmente el volumen de alimentación, y el segundo factor es que se aumentó la concentración del desecho orgánico animal, generando mayor disponibilidad de alimento para los microorganismos presentes en el interior del biodigestor. En el proceso de puesta en marcha la carga orgánica alimentada al biodigestor fue limitada y controlada para beneficiar la reproducción y el crecimiento de la población bacteriana.

La cantidad de gas producida durante la operación de la planta piloto de digestión anaeróbica es aceptable ya que se logró una aceptable degradabilidad y una producción de biogás equivalente al volumen del biodigestor, esto es 400 litros de biogás por día con 400 litros de volumen del reactor. Por lo tanto, se logró un buen rendimiento en la producción de biogás y la producción de un fertilizante orgánico de muy buena calidad con un biodigestor en fase líquida.

De acuerdo con la caracterización y estabilización del biol se puede apreciar que los tres tratamientos realizados al fertilizante orgánico fueron de gran ayuda para determinar la mejor opción y obtener un producto con un valor agregado. Por lo tanto, el primer tratamiento, la aireación del biol, no fue el más efectivo debido a que el biol se contaminaba rápidamente con bacterias *E. coli* y *coliformes totales* transmitidas por el ambiente llegando a niveles permitidos, pero no óptimos. En el segundo tratamiento, con la adición de cal (CaO) al 1% en masa al biol, la cantidad de bacterias era mucho menor, pero con presencia de *coliformes totales* y sin presencia de *E. coli*. En el tercer tratamiento se realizó un calentamiento del biol a 70°C durante 25 minutos. Para este tratamiento no se registró presencia de bacterias *E. coli* y *coliformes totales*. Este tratamiento fue el más adecuado ya que deja al biol libre de bacterias cumpliendo con exigencias vigentes y sus características iniciales no varían considerablemente.

Este tipo de digestores permite controlar la digestión anaeróbica con el grado de precisión que se desee y permite corregir cualquier anomalía que se presente en el proceso tan pronto es localizada. Además permite manejar las variables relacionadas con carga orgánica, pH, temperatura, agitación y tiempo de retención a largos periodos. La puesta en marcha de este tipo de digestores sólo se realiza cuando hay que hacer mantenimiento al digestor. Para esto se requiere vaciar el contenido. Por otro lado, la alimentación y la descarga se la realiza diariamente lo cual implica que todos los días hay producción de fertilizante orgánico y biogás. La desventaja de este tipo de biodigestor es que no admite concentraciones altas de sólidos. En el digestor de escala piloto el diámetro de partícula debe ser máximo de 6 mm ya que el diseño no nos permite tratar materiales fibrosos debido a problemas con los equipos específicamente con la bomba y el medidor de flujo, y con conexiones, válvulas y tuberías.

En base a la experiencia adquirida durante este proyecto es posible realizar las siguientes recomendaciones para el diseño, construcción y operación del biodigestor a escala piloto. El control de temperatura es indispensable y su precisión debe ser rigurosa con el fin de evitar cambios indeseados de temperatura debido a que los microorganismos presentes en el biodigestor son muy susceptibles a variaciones.

Los biodigestores deberían ser construidos en materiales como PVC, plástico o acero inoxidable con el objetivo de que no se produzcan problemas de corrosión en su interior castigando la efectividad del proceso.

La utilización de válvulas de bola en las tuberías y mangueras, en toda la instalación, es muy positiva, debido a que con ellas se pueden controlar los flujos, tanto líquidos como gaseosos, y hacer cambios y reparaciones de algunos equipos de la planta piloto como la bomba, el medidor de flujo, etc. sin necesidad de interferir en el proceso.

Se recomienda un estricto control en las posibles pérdidas de biomasa como en el instante de la mezcla de los desechos orgánicos animales, como en la carga del sustrato a la alimentación, debido a que grandes pérdidas de ésta pueden llegar a modificar la concentración de carga orgánica que requiere el biodigestor.

Las cargas de trabajo en la experimentación deben ser progresivas a fin de buscar el punto óptimo de funcionamiento, ya que introducir altas cargas orgánicas de golpe puede repercutir en la acidificación del biodigestor ocasionando problemas de bajas significativas de pH provocando la inhibición de la metanogénesis y baja producción de biogás.

Con respecto al biol con tratamiento térmico, la temperatura no debe superar los 70 °C y con un tiempo de exposición de 20 minutos ya que el nitrógeno se puede volatilizar reduciendo su cantidad y castigando su poder fertilizante.

No se debe abusar del aditivo que ayuda a elevar el pH ya que puede causar inhibición al proceso por exceso de calcio.

## 6. Bibliografía

1. **Carrillo, Leonor.** *Energía de Bomasa*. 1º ed. Jujuy : Leonor Carrillo, 2004.
2. **Fundación Natura y Ministerio de Energía y Minas.** *Energías Renovables : conceptos y aplicaciones*. Segunda edición. Quito : Fundación Natura, 2004.
3. **Camps, Manuel y Marcos, Francisco.** *Los Biocombustibles* . Madrid : Mundi - Prensa, 2002.
4. **Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE.** *Especies para leña: Arbustos y Arboles para la producción de energía*. Turrialba : s.n., 1984. pág. 344.
5. **Fernández, Jesús.** *Energías renovables para todos - Biomasa*. Madrid : Iberdrola, 2007.
6. **Guenneron, Charles.** *Anaerobic digestion : principals and practices for biogas systems*. Washington : The World Bank, 1986.
7. **Moncayo, Gabriel.** *Dimensionamiento, Diseño y contrucción de biodigestores y plantas de biogas*. s.l. : Aqualimpia Beratende Ingenieure, 2008.
8. **Duque, Carlos y Bravo, Juan.** *Manual técnico para la contrucción y operación de Biodigestores*. Ibarra : PROCANOR, 2007.
9. **Yank, L y Corace, J.** *Construcción de un biodigestor pequeño para uso en investigación y docencia*. Termodinamica, Universidad Nacional del Nordeste. Chaco : s.n., 2005.
10. **Mansur, Miguel.** *Tratamiento de desagües domésticos en reactores anaerobicos de flujo ascendete, en manto de lodos*. Lima : Organizacion Panamericana de la Salud, 1985.
11. **Kiely, Gerard.** *Ingeniería Ambiental*. Madrid : McGRAW - HILL, 1999. VOL 2.
12. **Tchobanoglous, G, Theisen, H y Vigil, S.** *Orígenes, Composición y Propiedades de los Residuos Sólidos*. s.l. : Gestión Integral de Residuos Sólidos, 1998. págs. 109-110. Vol. I.
13. **Taylhardat, L.** *Biodigestores. Su utilización como estructuras alternativas y como fuente alterna de energía*. s.l. : Porciven, 1985. Vol. 2.



14. **McInerney, M, Bryant, M y Stafford, D.** Metabolic stages and energetic of microbial. London : s.n., 1980, págs. 91-98.
15. **López, Jose Maria.** *Digestión Anaeróbica de Lodos de Depuradora.* Departamento de Química Inorgánica e Ingeniería Química, Universidad de Alicante. Alicante : s.n., 1989. Tesis doctoral.
16. **Expósito Vélez, Germán Antonio.** *Modelización de procesos biológicos para la eliminación de residuos ganaderos, teniendo en cuenta sus condicionantes especiales.* Departamento de Ordenación del Territorio, Urbanismo y Medio Ambiente. Madrid : s.n., 2004. pág. 352, Tesis doctoral.
17. **Intituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.** *Biomasa: Digestores anaerobicos.* Madrid : IDAE, 2007.
18. **Martí Herrero, Jaime.** *Biodigestores Familiares.* La Paz : GTZ, 2008.
19. **Moncayo Romero, Gabriel y Arrue, Ramón.** Colegio de ingenieros agrónomos de Chile. [En línea] Aqualimipia. [Citado el: 20 de Abril de 2009.] <http://www.agronomos.cl/2007/feb/htm/construccion.htm>.
20. **Solari, Giannina.** *Ficha Técnica Biodigestores.* Universidad Alas Peruanas. Lima : s.n., 2004.
21. **Escuela técnica.** Biomasa. *Plantas de biogás.* [En línea] [Citado el: 12 de Marzo de 2009.] [http://www.oni.escuelas.edu.ar/2004/GCBA/444/BIO/bio\\_015.htm](http://www.oni.escuelas.edu.ar/2004/GCBA/444/BIO/bio_015.htm).
22. **Guevara, Antonio.** *Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores.* Lima : CEPIS, 1996.
23. **Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial, ICAITI.** *Primer seminario de Biogás.* San Salvador : ROCAP, 1983. Memoria.
24. **Hilbert, Jorge A.** *Manual para la producción de biogás.* Castelar : INTA, 1985.

25. **Alianza en Energía y Ambiente.** *Manual de uso y mantenimiento de unidad biodigestora.* Universidad Earth. Panama : s.n., 2006.
26. **Caldera, Yaxcelys, Madueño, Pedro y et.al.** *Efecto del tiempo de retención hidráulica en el funcionamiento de un reactor UASB.* Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Univesidad de Zulia. Maracibo : s.n., 2006.
27. **Decara, Lorena, Sandoval, Gabriela y Funes, Claudio.** *El uso de biodigestores en sistemas caprinos de la provincia de Córdoba.* Córdoba : Universidad Nacional Rio Cuarto, 2004.
28. **Fragela, Marisol, Hernández, Rolando y et.al.** *Los biodigestores como aportador de energía y mejoradores de suelos.* Universidad de Matanzas. Varadero : s.n., 2007.
29. **Dominguez, Pedro Luis y Ly, Julio.** *Biodigestores como componentes de sistemas agropecuarios integrados.* Instituto de investigaciones porcinas. La habana : s.n., 2001.
30. **Fernández, Georgina, Vázquez, Elizabeth y Martínez, Pedro.** *Inhibidores del proceso anaerobio: compuestos utilizados en porcicultura.* Mérida : Universidad Autónoma de Yucatán, 2002. págs. 67-71. Vol. 6.
31. **FAO.** *Reciclaje de materias orgánicas y Biogas.* Santiago : Chengdu, 1986.
32. **Clesceri, Lenore, Greenberg, Arnold y Eaton, Andrew, [ed.].** *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.* Vigésima edición. Washington DC : American Public Health Association, 1992.
33. **Soria, Manuel y Ferrera, Ronald.** *Producción de biofertilizantes mediante biodigestión de la excreta líquida de cerdo.* Montecillo : Terra, 2001.
34. **FAO.** *Estudio Potencial bioenergético de los desechos agroindustriales y agrícolas.* Cali : s.n., 1986.
35. **Taylhardat, L.** *El biogas. Fundamentos e infraestructura rural.* Maracay : Facultad de agronomía. U.V.C., 1986.

36. **Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.** Oficina de IICA en Nicaragua. *ESTUDIOS AGRÍCOLAS, GANADEROS, FORESTALES, COMERCIALES.* [En línea] [Citado el: 12 de Marzo de 2009.] [www.iica.int.ni/Library/Free\\_Download.htm](http://www.iica.int.ni/Library/Free_Download.htm).
37. **Botero, Raúl y Preston, Thomas R.** *Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas.* San José : s.n., 1987.
38. **Instituto de Investigación de Energías Eléctricas.** *Digestores de desechos orgánicos.* Cuernavaca : Organización Latinoamericana de Energía, 1980.
39. **Werner, Uli, Stöhr, Ulrich y Hees, Nicolai.** *Biogas Plants in Animal Husbandry.* Alemania : Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien, 1989. A Practical Guide.
40. **U.S. Environmental Protection Agency, EPA.** Límites Permisibles de Patógenos en Biosólidos. *Norma 40 CFR Parte 503.* Washington DC : U.S. Environmental Protection Agency, 2000. EPA 832-B-93-005.

## **7. Anexos**

### **Anexo 1**

Determinación de la demanda química de oxígeno

## Procedimiento para la determinación de demanda química de oxígeno (200-15000) mg/L DQO

Método de digestión de reactor

**Parte I:** Usando el reactor DRB 200

1. Se enciende el reactor DRB 200. Se calienta a 150 °C.
2. **Se prepara el blanco.** Se coloca 0,2 ml de agua destilada en un vial de HR+ (high range plus).
3. Se mezcla con cuidado el contenido del vial y se coloca en el reactor precalentado. Se deja digerir durante dos horas.
4. Una vez digerido, se deja enfriar durante veinte minutos y se agita. Una vez agitado, se deja enfriar a temperatura ambiente.
5. Si se desea reutilizar el blanco, este debe almacenarse en un lugar frío y oscuro pues es sensible a la luz. Sirve como blanco hasta que su absorbancia cambie en un 0.01.
6. **Se prepara la muestra** homogeneizándola en una licuadora para que la fase líquida y la fase sólida se junten formando una sola película homogénea. Si se considera necesario, homogeneizar durante 10 minutos más con el agitador magnético.
7. Se colocan 0,2 ml de la muestra homogenizada en un vial HR+ y se digiere en el reactor durante dos horas.
8. Una vez terminada la digestión, se mezcla la muestra y se deja enfriar a temperatura ambiente. Se remueven los tubos del reactor, usando guantes, para que se enfríen a temperatura ambiente.

**Parte II:** Usando el colorímetro

9. Para ingresar el programa "COD HR (High Range/High Range Plus)". Se aplasta la tecla 

PRGM
7

 .
10. Se presiona 435 COD HR "enter".
11. Se coloca el blanco en el contenedor de celdas y se aplasta "zero". Aparecerá 0 mg/L COD en la pantalla.
12. Luego coloque las muestras y aplaste "read". Luego de un instante aparecerá el valor de la lectura junto con las unidades mg/L COD.

**Anexo 2**  
**Determinación de nitrógeno total**

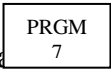

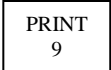
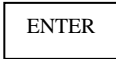
## Procedimiento para la determinación de nitrógeno total (10-150) mg/L N

Método TNT de digestión con persulfato

### Parte I: Usando el reactor DRB 200

1. Se enciende el reactor DRB 200. Se calienta de 103-106 °C.
2. **Se prepara el blanco.** Utilizando una pipeta se añade 5.0 ml de la muestra a “Acid Hydrolyzable test vial”.
3. Usando un embudo se añade el contenido de un sobre de “Postassium Persulfate Powder” al vial, se tapa herméticamente hasta que se disuelva.
4. Se coloca el blanco y la muestra en el reactor DRB200 durante 30 minutos.
- 5.
6. Se ta y se agita hasta que se disuelva. Se añaden 0.5 mL de agua destilada al tubo que contiene el hidróxido y el persulfato. Se sella el tubo y se agita durante 30 segundos.
7. Se prepara la muestra. Usando un embudo, se añade el contenido de un “total nitrogen persulfate reagent poder pillow” a un “HR total nitrogen hydroxide digestion vial”.
8. Se añaden 0.5 mL de la muestra al tubo que contiene el hidróxido y el persulfato. Se sella el tubo y se agita durante 30 segundos.
9. Se introducen el blanco y la muestra en el reactor DRB 200 durante 30 minutos. (exactamente 30 minutos)
10. Se remueven los tubos del reactor, usando guantes, para que se enfríen a temperatura ambiente.

### Parte II: Usando el colorímetro

11. Para ingresar el programa “Test ‘N tube HR total nitrogen”. Se aplasta la  PRGM 7
12. Se presiona 69 enter  CONC 6  PRINT 9 se observará en la pantalla: mg/L, N y el ícono de zero.  ENTER
13. Se añade el contenido de un “total nitrogen reagent A poder pillow” al tubo del blanco digerido o de la muestra digerida durante y se los agita durante 15 segundos. Se presiona TIMER ENTER después de agitar. Se dará una reacción de 3 minutos.

14. Después de que el timer suene, se debe añadir un “total nitrogen reagent B powder pillow” al tubo de la muestra o el blanco. Se sella el tubo y se lo agita durante 15 segundos. La pantalla mostrará 02:00 Timer 2. Se presiona Enter después de mezclar. Empezará un periodo de reacción de 2 minutos.
15. Después de que el timer suene, se quita la tapa de un “total nitrogen reagent C vial”. Se añaden 2 mL de muestra digerida o blanco al tubo que contiene el reactivo C. El tubo va a estar tibio.
16. Se sella al nuevo tubo y se lo invierte 10 veces para mezclarlo, se lo debe hacer despacio.
17. La pantalla va a mostrar: 05:00 Timer 3. Se presiona Enter. Un periodo de reacción de 5 minutos va a empezar.
18. Se inserta el adaptador de COD/TNT en la celda, rotando el adaptador hasta que calce, después se lo presiona hasta que quede sujeto.
19. Cuando el timer suene, se debe secar con un trapo húmedo el tubo nuevo (con el reactivo C) que contiene el blanco. Se coloca el tubo en el adaptador con el logo de Hach dando la cara a la parte frontal del instrumento. Se presiona recto hacia abajo, en la parte superior del tubo, hasta que quede ajustado en el adaptador. Cuidadosamente se coloca la tapa del instrumento.
20. Se presiona ZERO. El cursor se moverá a la derecha, entonces la pantalla mostrará: 0 mg/L.
21. Limpiar con una toalla húmeda el tubo que contiene la muestra.
22. Colocar el tubo en el adaptador como se explica en el punto 16
23. Presionar la tecla READ y tomar el dato.



### **Anexo 3**

#### Determinación de Fósforo total



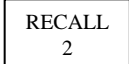

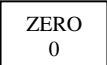
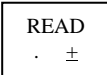
## Procedimiento para la determinación de Fósforo total (0-3,50) mg/L $\text{PO}_4^{3-}$

Método PhosVer 3 with Acid Persulfate Digestion TNT.

### Parte I: Usando el reactor DRB 200

1. Se enciende el reactor DRB 200. Se calienta de 150 °C.
2. **Se prepara el blanco.** Utilizando una pipeta se añade 5.0 ml de la muestra a “Acid Hydrolyzable test vial”.
3. Usando un embudo se añade el contenido de un sobre de “Postassium Persulfate Powder” al vial, se tapa herméticamente y se agita hasta que se disuelva.
4. Se coloca el blanco y la muestra en el reactor DRB200 durante 30 minutos.
5. Se retira del reactor la muestra y se deja enfriar en un porta tubos de ensayo hasta temperatura ambiente.
6. Usando una pipeta se añade 2 ml de “1.54 N sodium hydroxide” en el vial. Se tapa y se agita.

### Parte II: Usando el colorímetro

7. Para ingresar el programa para el fosforo reactivo “Test ‘N tube ”. Se presiona la tecla .
8. Se presiona 82 ENTER    se observará en la pantalla: mg/L,  $\text{PO}_4$  y el ícono de zero.
9. Inserte el adaptador COD/TNT en la celda rotándolo hasta que ingrese correctamente.
10. Limpie con un pañito o una toalla la parte exterior de tubo que contiene la muestra.
11. Coloque el blanco en el colorímetro, empujando el tubo hasta que la punta se asiente en el adaptador. Tape la muestra y presione ZERO. .
12. Para la muestra, remueva la tapa del vial y Usando un embudo se añade el contenido de un sobre de “Phos Vre3 Phosphate Reagent Powder” al vial, se tapa herméticamente y se agita durante 10 – 15 segundos.
13. Se presiona TIMER ENTER después de agitar. Se dará una reacción de 2 minutos.
14. Limpie con un pañito o una toalla la parte exterior de tubo que contiene la muestra.
15. Coloque la muestra en el colorímetro, empujando el tubo hasta que la punta se asiente en el adaptador. Tape la muestra y presione.  Y se toma el dato.

**Anexo 4**  
**Determinación de Bacterias**  
**Coliformes totales y Echerichia coli**

## **Anexo 5**

### **Planos: Isometría y vistas del biodigestor a escala piloto**

**Autor:** Jairo Andrés Salamanca