

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA



**ESTUDIO DEL PROCESO BIOQUIMICO DE FERMENTACION  
EN DIGESTORES PARA LA PRODUCCION DE BIOGAS Y  
BIOFERTILIZANTE A PARTIR DE RESIDUOS ORGANICOS  
PROVENIENTES DEL CAMPUS DE LA UNIVERSIDAD DE EL  
SALVADOR**

PRESENTADO POR:

**MARISA CELESTE CANALES GARCÍA**

**LUIS ALFREDO RIVAS OLIVA**

**ROBERTO JOSE SORTO CRUZ**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO QUÍMICO**

CIUDAD UNIVERSITARIA, AGOSTO DE 2010.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO QUÍMICO**

Título :

**ESTUDIO DEL PROCESO BIOQUIMICO DE FERMENTACION  
EN DIGESTORES PARA LA PRODUCCION DE BIOGAS Y  
BIOFERTILIZANTE A PARTIR DE RESIDUOS ORGANICOS  
PROVENIENTES DEL CAMPUS DE LA UNIVERSIDAD DE EL  
SALVADOR**

Presentado por :

**MARISA CELESTE CANALES GARCIA**

**LUIS ALFREDO RIVAS OLIVA**

**ROBERTO JOSE SORTO CRUZ**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores :

**LIC. JOSÉ ALONSO MARTÍNEZ MALTEZ**

**INGRA. TANIA TORRES RIVERA**

San Salvador, Agosto de 2010.

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR :

**MSc. RUFINO ANTONIO QUEZADA SÁNCHEZ**

SECRETARIO GENERAL :

**LIC. DOUGLAS VLADIMIR ALFARO CHÁVEZ**

**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**

DECANO :

**ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO**

SECRETARIO :

**ING. OSCAR EDUARDO MARROQUÍN HERNÁNDEZ**

**ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA**

DIRECTOR :

**ING. FERNÁNDO TEODORO RAMÍREZ ZELAYA**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores :

**LIC. JOSÉ ALONSO MARTÍNEZ MALTEZ**

**INGRA. TANIA TORRES RIVERA**

## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo no se habría podido realizar sin la colaboración de muchas personas e instituciones que nos han brindado su ayuda, sus conocimientos y su apoyo.

Por ello es para nosotros un verdadero placer utilizar este espacio para expresarles nuestros más sinceros agradecimientos.

Primero y antes que nada, dar gracias a Dios, por estar con nosotros en cada paso que damos, por fortalecer nuestro corazón e iluminar nuestra mente y por haber puesto en nuestro camino a aquellas personas que han sido nuestro soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

Quedamos especialmente agradecidos con nuestros dos directores de tesis. La Ingra. Tania Torres Rivera y el Lic. José Martínez Maltez quienes nos han ayudado y apoyado en todo momento. Han corregido minuciosamente este trabajo y nos han dado la posibilidad de mejorarlo.

Les agradecemos sinceramente a nuestras familias por su confianza y todo el apoyo, consejos y ayuda, sin ellos no habríamos podido llegar a este punto pues hemos necesitado su cariño, comprensión y su apoyo incondicional.

Así mismo agradecemos las valiosas contribuciones por miembros de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de El Salvador, del Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal "CENTA", así como profesionales conocedores de la materia como Ingra. Eugenia de Gamero, Ing. Luis Rivas Cortez y muchos otros profesionales que de forma desinteresada han aportado de su tiempo y conocimientos para la realización de esta investigación.

Desde luego agradecemos a todos nuestros amigos y compañeros que han hecho las largas jornadas de estudio que acompañan esta carrera mucho más amenas y fáciles de llevar.

# Dedicatorias

**Por Marisa Celeste Canales García**

Cuando termina la Universidad nos encontramos con un sinfín de sentimientos: algunos se podrían decir contradictorios, como la alegría de saber que se cierra una etapa de la vida para empezar otra, la cual traerá nuevos retos, pero a la vez se encuentra tristeza por dejar un lugar en donde se pasó tanto tiempo (en algunos casos mucho tiempo y en otros casos el tiempo requerido) compartiendo momentos alegres y angustiosos con tus amigos.

Le dedico este, mi último trabajo en mi querida UES a una persona que me apoyo en todo durante toda mi vida y que tristemente no está conmigo hace más de un año: Mi querida Abuelita Juanita. Espero que hoy que se encuentra en el Cielo se sienta orgullosa de mí. Tal vez mis logros no hayan sido muchos, pero lo que he realizado ha sido de corazón y tratando de aplicar los valores que pacientemente me enseñó.

Gracias por los ánimos que me diste cada día; pero más importante aún, gracias por creer de todo corazón en mí.

Recuerdo tus enseñanzas todos los días, pero la que más tengo presente es la enseñanza de tu vida: la de siempre dar lo mejor de uno mismo para los demás. Me sentiré orgullosa si diera por los demás tan sólo la mitad de lo que tú nos diste.

Tu nieta Celestita

## Por Luis Alfredo Rivas Oliva

Es un gusto agradecer a todos los que han hecho posible que llegue a completar mis estudios universitarios y este trabajo de graduación.

El salmista se preguntaba: “¿Qué pagaré a Jehová por todos sus beneficios para conmigo?” (Sal. 116:12), jamás podré pagarle a Dios por todas las cosas que ha hecho por mí, por lo tanto mis primeros agradecimientos y dedicatorias van al creador, gracias por darme más de lo necesario.

Dedico mi carrera como ingeniero químico y el presente trabajo a mi amada familia, mi inspiración:

A mi padre, quien demostró gran entusiasmo por el tema y me impulso a seguir adelante, un hombre apasionado con la investigación, si me interesó la química ha sido gracias a él, esta carrera es tuya papá, te recuerdo en cada paso como un modelo de padre, siempre cuenta conmigo para sentarnos a arreglar los problemas del mundo.

A mi madre, quien me prestaba la calculadora de mi papá cuando era pequeño y me daba un bote con dulces para hacer cálculos, ¡mira adonde llego la semilla!, este trabajo de investigación es tuyo.

A mi hermano, crecer junto a ti ha sido lo mejor, nunca me han faltado los amigos sabiendo que tengo un hermano como tú, contigo ya somos tres ingenieros en la familia Rivas Oliva, este trabajo te lo dedico.

A mi amada esposa, contigo somos la mejor reacción química, tú has resultado ser mi fuente de energía limpia, mi socia en este proyecto de vida, te dedico esta investigación y las demás alegrías que nos faltan vivir.

Luis

## **Por Roberto José Sorto Cruz**

Definitivamente debo este logro a Dios pues siempre ha sido la base de todo, y no solo en mi carrera.

Todas las demás personas a quienes agradezco y dedico este éxito han sido por supuesto añadiduras de él.

### **AÑADIDURAS**

Mis padres.

Nunca podré conocer amor más cercano al amor de Dios que el que ellos tienen por mí y mis hermanos, por supuesto nadie es perfecto pero me han heredado lo mejor de cada uno y eso es invaluable.

Dicen que los mejores padres no son los que están ahí cuando su hijo necesita un soporte, son los que hacen que su hijo no lo necesite, gracias papas.

Mis hermanos.

Los tres hemos buscado rumbos diferentes en la vida, pero la sangre siempre será la misma; siempre supe que he contado con ellos y ellos conmigo.

Mis maestros.

Todos los que he tenido en mi vida, no solo en la universidad, me han enseñado de buenas y malas maneras a ser mejor cada día. Y espero seguir teniendo muchos más.

Gente que quiero, me quiere y me apoya.

Necesitaría un número de páginas similar al de este documento para mencionarlos, por ello, no escribí el de ninguno!

Dios no quita la montaña, la cruza con vos

Roberto Sorto



## Tabla de contenido

RESUMEN.....	I
CAPÍTULO I: .....	1
PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO .....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO II: .....	4
INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	4
<b>1. LA TECNOLOGÍA DE BIODIGESTORES EN EL SALVADOR.....</b>	<b>4</b>
<b>2. EL PROBLEMA DE LA BASURA EN EL SALVADOR.....</b>	<b>7</b>
2.1. CLASIFICACIÓN DE LA BASURA .....	9
2.2. CANTIDAD DE MATERIA ORGÁNICA .....	11
2.3. ALTERNATIVAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA MATERIA ORGÁNICA.....	11
2.3.1. <i>Compostaje</i> .....	11
2.3.2. <i>Biomasa convertida en Energía</i> .....	12
2.4. MANEJO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS EN LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR .....	14
2.4.1. <i>Generación y recolección de residuos sólidos en la Universidad de El Salvador</i> .....	14
2.4.2. <i>Observaciones sobre la generación de residuos sólidos en la Universidad de El Salvador</i> .....	17
2.4.3. <i>Producción per cápita de residuos sólidos en la Universidad de El Salvador</i> .....	17
<b>3. GENERALIDADES SOBRE EL PROCESO DE FERMENTACIÓN METANOGÉNICA .....</b>	<b>19</b>
3.1. MICROORGANISMOS EN EL PROCESO DE DIGESTIÓN .....	19
3.1.1. <i>Microorganismos metanogénicos y su acción</i> .....	20
3.1.2. <i>Microorganismos no metanogénicos y su acción</i> .....	22
3.2. PROCESO DE FERMENTACIÓN METANOGÉNICA.....	22
3.2.1. <i>Hidrólisis</i> .....	23
3.2.2. <i>Acidificación</i> .....	24
3.2.3. <i>Fase Acetogénica</i> .....	27
3.2.4. <i>Fase Metanogénica</i> .....	29
3.3. FACTORES A CONSIDERAR EN EL PROCESO METANOGÉNICO.....	30
3.3.1. <i>Material de carga para la fermentación metanogénica</i> .....	31
3.3.2. <i>Relación Carbono-Nitrógeno (C/N)</i> .....	31
3.3.3. <i>Concentración de la carga</i> .....	32
3.3.4. <i>Temperatura</i> .....	32

3.3.5.	<i>Valor de pH</i> .....	34
3.3.6.	<i>Promotores e inhibidores de la fermentación</i> .....	35
<b>4.</b>	<b>SUSTRATOS PARA EL PROCESO DE DIGESTIÓN</b> .....	<b>37</b>
4.1.	TIPOS DE SUSTRATOS Y SU APORTE AL PROCESO DE DIGESTIÓN .....	37
4.1.1.	<i>Estimación del volumen de basura generado y aprovechable para el proceso de digestión</i> .....	42
<b>5.</b>	<b>PRODUCTOS DEL PROCESO DE DIGESTIÓN</b> .....	<b>43</b>
5.1.	EL BIOGÁS COMPARADO CON OTROS GASES QUE CONTIENEN METANO .....	43
5.2.	COMPONENTES PRINCIPALES DEL BIOGÁS .....	46
5.2.1.	<i>El metano y el dióxido de carbono</i> .....	47
5.2.2.	<i>Nitrógeno y Oxígeno</i> .....	48
5.2.3.	<i>Sulfuro de Hidrógeno</i> .....	49
5.2.4.	<i>Otros compuestos del Biogás</i> .....	50
5.3.	BIOFERTILIZANTE .....	51
5.3.1.	<i>Biol (Fertilizante Foliar Líquido)</i> .....	51
5.3.2.	<i>Ventajas del uso del Biol como fertilizante</i> .....	53
5.3.3.	<i>Biosol (fertilizante sólido similar al compost)</i> .....	54
5.3.4.	<i>Ventajas en el uso del Biosol (fertilizante sólido)</i> .....	56
<b>6.</b>	<b>PROPIEDADES DE FLUJO Y TERMODINAMICAS DE LOS GASES NATURALES</b> .....	<b>58</b>
6.1.	GRAVEDAD ESPECÍFICA.....	58
6.2.	PROPIEDADES PSEUDOCRÍTICAS.....	60
6.3.	VISCOSIDAD .....	62
6.4.	FACTOR DE COMPRESIBILIDAD .....	65
6.5.	COMPRESIBILIDAD DEL GAS NATURAL .....	68
<b>7.</b>	<b>CINETICA DE LA GENERACIÓN DEL BIOGAS</b> .....	<b>71</b>
<b>8.</b>	<b>ESTUDIO DEL PROCESO DE FERMENTACION: REACCIÓN BIOQUÍMICA</b> .....	<b>77</b>
<b>9.</b>	<b>DISEÑO DE DIGESTORES</b> .....	<b>80</b>
9.1.	TIPO DE DIGESTORES .....	80
9.2.	MODELOS DE BIODIGESTORES .....	82
9.2.1.	<i>Modelo Chino</i> .....	82
9.2.2.	<i>Modelo Hindú</i> .....	83
9.2.3.	<i>Modelos Horizontales</i> .....	85
9.2.4.	<i>Modelos Batch por lotes</i> .....	87
9.3.	DISEÑO DE BIODIGESTORES .....	88
9.4.	CONSIDERACIONES DEL DISEÑO DE BIODIGESTOR .....	88

9.4.1.	<i>Formas de alimentación</i> .....	88
9.4.2.	<i>Número de etapas de la reacción</i> .....	90
9.4.3.	<i>Componentes de un biodigestor</i> .....	90
9.4.4.	<i>Métodos de recolección del gas</i> .....	92
9.4.5.	<i>Gasómetros</i> .....	92
9.4.6.	<i>Distribución del gas</i> .....	94
9.4.7.	<i>Producción de biofertilizantes</i> .....	94
9.5.	SECUENCIA DE ACTIVIDADES PARA OPERAR DIGESTORES.....	95
9.5.1.	<i>Prueba de los nuevos digestores y mantenimiento de antiguos</i> .....	95
9.5.2.	<i>Preparación de carga</i> .....	95
9.5.3.	<i>Llenado del digestor</i> .....	96
9.5.4.	<i>Producción del gas</i> .....	98
9.5.5.	<i>Descarga</i> .....	98
9.5.6.	<i>Actividades cotidianas</i> .....	98
<b>CAPÍTULO III:</b> .....		<b>99</b>
<b>DISEÑO EXPERIMENTAL</b> .....		<b>99</b>
<b>10. METODOLOGÍA PARA EL PROCESO EXPERIMENTAL</b> .....		<b>99</b>
10.1.	SELECCIÓN DEL SUSTRATO .....	99
10.2.	OBTENCIÓN DE LAS MATERIAS PARA EL SUSTRATO Y PREPARACIÓN .....	103
10.3.	OTRAS CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DEL EXPERIMENTO.....	105
10.3.1.	<i>Concentración de Sólidos</i> .....	105
10.3.2.	<i>Efecto de la Luz</i> .....	106
10.3.3.	<i>Efecto de la Temperatura</i> .....	106
10.3.4.	<i>Efecto del pH</i> .....	106
10.4.	NIVELES DE TRATAMIENTO.....	106
10.5.	VARIABLE INDEPENDIENTE .....	107
10.6.	VARIABLES DEPENDIENTES .....	107
10.6.1.	<i>Volumen de Biogás</i> .....	108
10.6.2.	<i>Composición del Biogás</i> .....	108
10.6.3.	<i>Características del biofertilizante</i> .....	108
<b>11. CARACTERIZACIÓN DEL SUSTRATO</b> .....		<b>109</b>
11.1.	PREPARACIÓN DEL SUSTRATO PARA EL ANÁLISIS EN LABORATORIO .....	109
11.2.	DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD .....	110
11.3.	DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE CENIZAS .....	110
11.4.	DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE NITRÓGENO .....	111

11.5.	RELACIÓN CARBONO/NITRÓGENO DEL SUSTRATO .....	111
<b>12.</b>	<b>CÁLCULO DE CANTIDAD DE SUSTRATOS PARA LA CARGA DE DIGESTORES .....</b>	<b>113</b>
<b>13.</b>	<b>PREPARACIÓN DEL SUSTRATO Y PUESTA EN MARCHA DEL EXPERIMENTO .....</b>	<b>117</b>
13.1.	MARCHA DEL DIGESTOR.....	120
13.2.	MUESTREO DEL GAS CONTENIDO EN LOS BIODIGESTORES .....	120
<b>CAPÍTULO IV: .....</b>		<b>123</b>
<b>RESULTADOS DE LA ETAPA EXPERIMENTAL .....</b>		<b>123</b>
<b>14.</b>	<b>RESULTADOS OBTENIDOS DEL EXPERIMENTO.....</b>	<b>123</b>
14.1.	VOLUMEN GENERADO DE BIOGÁS .....	123
14.2.	RESULTADOS DE LAS DENSIDADES OBTENIDAS DEL MUESTREO DEL BIOGÁS .....	126
14.3.	RESULTADOS DE LAS COMPOSICIONES OBTENIDAS DEL MUESTREO DEL BIOGÁS .....	128
14.3.1.	<i>Determinación de las fracciones del gas metano .....</i>	<i>129</i>
14.4.	ANÁLISIS DEL BIOFERTILIZANTE.....	132
14.4.1.	<i>Determinación de Humedad en los biofertilizantes .....</i>	<i>132</i>
14.4.2.	<i>Determinación de Cenizas en los biofertilizantes .....</i>	<i>133</i>
14.4.3.	<i>Determinación de Nitrógeno Total en los biofertilizantes .....</i>	<i>133</i>
14.4.4.	<i>Determinación de Fósforo Insoluble en Citrato .....</i>	<i>134</i>
14.4.5.	<i>Determinación de Macro y Microelementos en los biofertilizantes.....</i>	<i>134</i>
<b>CAPÍTULO V:.....</b>		<b>136</b>
<b>DISEÑO PRELIMINAR DE UN BIODIGESTOR PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS .....</b>		<b>136</b>
<b>15.</b>	<b>DISEÑO DE BIODIGESTOR .....</b>	<b>136</b>
15.1.1.	<i>Datos de la zona de estudio .....</i>	<i>136</i>
15.1.2.	<i>Selección del modelo de biodigestor más factible .....</i>	<i>137</i>
15.1.3.	<i>Especificaciones para el diseño de biodigestores.....</i>	<i>137</i>
15.1.1.	<i>Forma geométrica.....</i>	<i>141</i>
15.1.2.	<i>Volumen de la cámara de carga y descarga.....</i>	<i>141</i>
15.1.3.	<i>Variables a considerar en el requerimiento de materiales y cálculos estructurales. ....</i>	<i>142</i>
15.1.4.	<i>Esquemas del biodigestor propuesto. ....</i>	<i>143</i>
<b>16.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>146</b>
<b>17.</b>	<b>RECOMENDACIONES PARA PROYECTOS FUTUROS.....</b>	<b>148</b>
<b>18.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>150</b>
<b>19.</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>153</b>

## Índice de Figuras

<i>Figura 2.1. Composición de los Desechos Sólidos.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 3.1. Formación de monómeros en la fase de Hidrólisis.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 3.2. Degradación del Piruvato.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 3.3. Degradación del Ácido Acético a Ácido Butírico.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 3.4. Influencia de la Temperatura sobre el tiempo de fermentación.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 5.1. Relación de contenido de Metano respecto al contenido de átomos de Carbono en el sustrato alimentado.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 5.2. Contenido de H<sub>2</sub>S en el biogás dependiendo de los días.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 7.1. Variación del sustrato y la biomasa con el tiempo en un cultivo por lotes.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 9.1. Esquemas del biodigestor chino.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 9.2. Esquemas de un biodigestor Hindú.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 9.3. Esquemas de un Modelo de Biodigestor Horizontal.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 10.1. Esquema de los niveles de tratamiento y sus ensayos definidos en el experimento.....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 11.1. Grama Paspalum Notatum y Residuos de Cafetería Universitaria secados y homogenizados en molino de laboratorio para análisis.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 13.1. Biodigestores para la producción de biogás y biofertilizante, contruidos a partir de materiales reciclados.....</i>	<i>119</i>
<i>Figura 13.2. Muestreo de biodigestores.....</i>	<i>122</i>
<i>Figura 13.3. Niveles de agua de medidor de nivel y gasómetro al momento de muestreo.....</i>	<i>122</i>
<i>Figura 14.1. Gráfico que muestra la producción de Biogás para 3 reactores con relación C/N de 25 124</i>	
<i>Figura 14.2. Gráfico que muestra la producción de Biogás para 3 reactores con relación C/N de 30 124</i>	
<i>Figura 14.3. Gráfico que muestra la comparación de la producción de biogás para los digestores de C/N 30 y C/N 25.....</i>	<i>125</i>
<i>Figura 15.1. Vista superior del biodigestor semicontinuo propuesto.....</i>	<i>144</i>
<i>Figura 15.2. Vista frontal del biodigestor semicontinuo propuesto.....</i>	<i>145</i>

## Índice de Tablas

<i>Tabla 1.1. Experiencias documentadas relacionadas con la obtención de biogás en El Salvador.....</i>	<i>5</i>
<i>Tabla 2.1. Toneladas de basura generada diariamente en el AMSS .....</i>	<i>8</i>
<i>Tabla 2.2. Cantidad de Materia Orgánica en los Desechos Sólidos Comunes en el año 2005 .....</i>	<i>11</i>
<i>Tabla 2.3. Promedios diarios de residuos sólidos que son generados por los diferentes contenedores en el Campus Central UES .....</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 2.4. Promedios diarios de residuos sólidos que son generados por las diferentes cafeterías del Campus Central UES, año 2000 .....</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 2.5. Clasificación de todos los contenedores de la UES exceptuando Cafeterías .....</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 2.6. Clasificación de los residuos sólidos totales por Cafeterías .....</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 3.1. Clasificación de los microorganismos productores de metano.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 3.2. Degradación Acetogénica .....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 3.3. Degradación Metanogénica .....</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 3.4. Concentración de algunos inhibidores comunes de las bacterias que intervienen en el proceso de fermentación anaeróbica .....</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 4.1. Sustratos para la producción de biogás con sus respectivos valores de materia seca y rendimientos .....</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 4.2. Análisis fisicoquímicos de los residuos de la Universidad de El Salvador .....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 5.1. Características del biogás .....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 5.2. Comparación del Biogás obtenido de diversas fuentes.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 5.3. Componentes comunes e impurezas presentes en el biogás .....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 5.4. Algunos componentes del Biogás que se encuentran a bajas concentraciones.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 5.5. Composición Química del Biol .....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 5.6. Características Generales del Biosol Fresco (Fertilizante Sólido) después de la Fermentación del Estiércol Vacuno .....</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 5.7. Comparación de la composición de Nutrientes del Estiércol Vacuno y Mezclas de Biol + Biosol (% en peso de materia seca) .....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 6.1. Resumen de propiedades de flujo y termodinámicas de los gases naturales.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 7.1. Constantes cinéticas y estequiométricas de la digestión anaerobia a 35°C .....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 10.1. Residuos en una muestra de basura proveniente de la Cafetería del Campus Central de la UES .....</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 11.1. Peso de muestra de residuos de la Cafetería Universitaria (residuos más representativos) y porcentaje en la mezcla total.....</i>	<i>109</i>
<i>Tabla 11.2. Cálculo del % de Humedad en grama y residuos.....</i>	<i>110</i>
<i>Tabla 11.3. Cálculo del porcentaje de cenizas base seca en grama y residuos .....</i>	<i>111</i>

<i>Tabla 11.4. Cálculo del porcentaje de Nitrógeno en grama y residuos .....</i>	<i>111</i>
<i>Tabla 11.5. Cálculo del porcentaje de Carbono y relación C/N en grama y residuos .....</i>	<i>112</i>
<i>Tabla 12.1. Masa de los residuos en el sustrato para cada reactor de C/N 25.....</i>	<i>114</i>
<i>Tabla 12.2. Masa de los residuos en el sustrato para cada reactor de C/N 30.....</i>	<i>115</i>
<i>Tabla 12.3. Total de residuos pesados para llenar tres digestores de C/N 25.....</i>	<i>115</i>
<i>Tabla 12.4. Total de residuos pesados para llenar tres digestores de C/N 30.....</i>	<i>116</i>
<i>Tabla 14.1. Producción de gas en ml para los 6 digestores anaeróbicos de relación C/N 25 y C/N 30 para diferentes tiempos, en días .....</i>	<i>123</i>
<i>Tabla 14.2. Resultados de densidades del muestreo del biogás para los digestores anaeróbicos de relación C/N 25 y C/N 30.....</i>	<i>126</i>
<i>Tabla 14.3. Densidades del biogás calculadas para los digestores anaeróbicos de relación C/N 25 y C/N 30 .....</i>	<i>126</i>
<i>Tabla 14.4. Promedio de densidad y desviación estándar del biogás muestreado.....</i>	<i>127</i>
<i>Tabla 14.5. Propiedades del biogás a condiciones estándar. Biogás seco (CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>) a 32°F y 1 atm .....</i>	<i>127</i>
<i>Tabla 14.6. Composiciones aproximadas de las muestras obtenidas en base a la comparación con la Tabla 14.5.....</i>	<i>128</i>
<i>Tabla 14.7. Resultados de fracciones volumetricas del muestreo del biogás para los digestores anaeróbicos de relación C/N 25 y C/N 30.....</i>	<i>129</i>
<i>Tabla 14.8. Comparación de resultados experimentales con datos teóricos para la fracción de metano .....</i>	<i>130</i>
<i>Tabla 14.9. Comparación de resultados experimentales con datos teóricos para la fracción de Dióxido de Carbono.....</i>	<i>131</i>
<i>Tabla 14.10. Composición experimental del biogás producido para relación C/N 25 y C/N 30 .....</i>	<i>131</i>
<i>Tabla 14.11. Rendimientos de gas producido por materia prima .....</i>	<i>132</i>
<i>Tabla 14.12. Contenido de Humedad en biofertilizante .....</i>	<i>133</i>
<i>Tabla 14.13. Contenido de Cenizas en biofertilizantes en base húmeda.....</i>	<i>133</i>
<i>Tabla 14.14. Contenido de Nitrógeno Total en biofertilizantes .....</i>	<i>133</i>
<i>Tabla 14.15. Contenido de Fósforo en biofertilizantes.....</i>	<i>134</i>
<i>Tabla 14.16. Contenido de Potasio Total en biofertilizantes.....</i>	<i>135</i>
<i>Tabla 14.17. Contenido de Microelementos .....</i>	<i>135</i>
<i>Tabla 15.1. Cálculos de la producción de residuos orgánicos diarios en la Universidad de El Salvador .....</i>	<i>138</i>
<i>Tabla 15.2. Resumen de parámetros de diseño obtenidos .....</i>	<i>141</i>

## Índice de Anexos

<i>Anexo 19.1. Características generales del biogás.....</i>	<i>153</i>
<i>Anexo 19.2. Características del metano .....</i>	<i>153</i>
<i>Anexo 19.3. Correlación entre contenido de metano en el biogás y largo de la cadena hidrocarbonada de los sustratos de los que parte .....</i>	<i>154</i>
<i>Anexo 19.4. Sustratos y sus características en la producción de biogás .....</i>	<i>155</i>
<i>Anexo 19.5. Liberación de Energía por la degradación de biomasa .....</i>	<i>160</i>
<i>Anexo 19.6. Concentraciones de metales inhibidores y sustancias inhibidoras .....</i>	<i>161</i>
<i>Anexo 19.7. Viabilidad de materiales para la construcción de las diversas partes de un biodigestor</i>	<i>162</i>
<i>Anexo 19.8. Prueba de biodegradabilidad .....</i>	<i>163</i>



## Resumen

En la presente investigación, se lleva a cabo un estudio de la reacción anaeróbica de biodigestión a partir de desechos orgánicos cuyo origen ha sido el campus central de La Universidad de El Salvador, para producir biogás y biofertilizante cuyas composiciones son determinadas experimentalmente, para evaluar si estos productos reúnen las características para ser aprovechables.

Para ello, se realizaron pruebas de laboratorio a los residuos orgánicos provenientes de las cafeterías y a la grama disponible como residuo de jardinería, con esto se buscó determinar las composiciones en cada tipo de residuo de los elementos más importantes en la metanogénesis, los cuales son carbono y nitrógeno, el resultado fue que los residuos de cafetería contienen la mayor composición de carbono y el mayor contenido de nitrógeno está en la grama, esta información fue importante para calcular las cantidades de cada residuo a mezclar para lograr los dos niveles de tratamiento en el presente estudio, es decir mezclas cuyas relaciones C:N sean de 30:1 y 25:1, las cuales serán las variables independientes del experimento.

Se construyeron biodigestores de vidrio ámbar para realizar las pruebas y se les adaptaron gasómetros para medir el desplazamiento de volumen, y mediante ellos se realizó por triplicado el estudio de la reacción anaeróbica para las relaciones de carbono nitrógeno de 25:1 y 30:1, es decir seis biodigestores en total, manteniendo variables constantes como el pH y la concentración de sólidos.

Después de diez días de digestión, tiempo que duro la producción significativa de biogás, se realizaron las mediciones experimentales de las variables dependientes como los son: volumen de biogás generado, densidad del biogás, composición y rendimiento, además se evaluaron las características del bioabono producido como resultado de la biodigestión.

Los resultados demuestran que la mezcla cuya relación carbono:nitrógeno es de 30:1, es la más propicia para ser aprovechada para la producción de biogás, pues presenta un rendimiento de  $0.0117 \pm 0.0008$  litros de gas por gramo de mezcla seca, además es la mezcla que produjo el biogás con mayor contenido de metano, pues contiene una fracción volumétrica de gas metano de  $0,639 \pm 0.1120$ , suficiente como para ser aprovechado energéticamente.

En base a estos resultados se calcularon las dimensiones de un biodigestor para ser utilizado en la planta piloto de la escuela de Ingeniería Química y Alimentos, con el objetivo de utilizar los residuos provenientes de la Universidad de El Salvador para la generación principalmente de biogás, el cual podrá ser aprovechado en los laboratorios para disminuir el consumo de gas propano. Los cálculos obtenidos apuntaron a un biodigestor semicontinuo con una cámara de fermentación de  $0.866 \text{ m}^3$  que podrá aliviar la demanda de gas propano de la planta piloto en aproximadamente un 30% del consumo anual

En lo referente al biofertilizante obtenido, se observó que la relación C:N de 25:1 produjo el biofertilizante más completo en nitrógeno y fósforo, así como en la mayoría de micronutrientes y en el caso se la relación C:N de 30:1 se obtiene un fertilizante más rico en potasio, cobre y hierro.

# Capítulo I:

## Planteamiento del estudio

### Introducción

El biogás como una fuente renovable de energía puede ser un medio para aliviar problemas tan actuales como la crisis energética, tratamiento / administración de los residuos y propiciar el desarrollo sostenible.

Generalmente, la producción de este gas envuelve reacciones bioquímicas complejas que tienen lugar bajo condiciones anaeróbicas en presencia de catalizadores microbiológicos altamente sensibles al pH, los cuales en su mayoría son bacterias.

Los principales productos de esta reacción son: metano ( $\text{CH}_4$ ) y bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), sin embargo se encuentran en forma de trazas otros gases, tales como:  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$ , y vapor de agua.

Los niveles de estos otros gases dependen de la naturaleza de los residuos.

El efluente de este proceso es un residuo rico en elementos inorgánicos necesarios para el crecimiento de las plantas, llamado biofertilizante, el cual al ser aplicado en suelos puede enriquecerlos sin detrimento del medio ambiente.

La tecnología del Biogás está siendo vista en tiempos actuales como una muy buena opción de tratamiento sostenible de los desechos, a medida que la forma de disposición de los mismos se ha vuelto un problema cada vez mayor cuyo efecto es más perceptible en países en vías de desarrollo.

En vista de lo anterior, la presente investigación se ha llevado a cabo para estudiar la reacción de biodigestión a condiciones locales para la producción de biogás y

biofertilizante utilizando residuos abundantes en la Universidad de El Salvador, más específicamente residuos de cafeterías y residuos de jardinería, dichos residuos por ser igualmente abundantes en la realidad salvadoreña hacen de este estudio una base teórica y práctica para justificar el uso de esta tecnología al tratamiento de residuos en nuestro país a la vez que se produce energía renovable.

El texto se divide en V capítulos, el capítulo I presenta los objetivos de esta investigación.

En el capítulo II, se explica teóricamente la factibilidad de transformar los residuos orgánicos en biogás y bioabono mediante el proceso de fermentación metanogénica, se explican los fundamentos del proceso químico de fermentación y los factores a controlar para que se lleve a cabo dicha reacción, además se describen cuales son los productos aprovechables y no aprovechables de la biodigestión y se describen algunos de los biodigestores más comúnmente utilizados.

En el capítulo III, se explica la metodología experimental a seguir y las justificaciones de las variables dependientes e independientes, se presentan los resultados de la caracterización del sustrato para avalar los cálculos a seguir en el diseño experimental, dichos cálculos son también presentados en esta sección y finalmente se resume la puesta en marcha del experimento.

En el capítulo IV, se presentan los resultados experimentales: la velocidad de generación de biogás, el procedimiento de muestreo, la densidad del biogás, las composiciones del biogás, el rendimiento y el análisis del biofertilizante.

El capítulo V, plantea una metodología general a seguir en el diseño de biodigestores y se enfoca a aplicar los resultados de la investigación al cálculo de las dimensiones de un biodigestora ser utilizado en la planta piloto de la Escuela de Ingeniería Química de La Universidad de El Salvador.

### ***Objetivo General***

- Estudiar el proceso químico de fermentación en biodigestores para la producción de biogás y biofertilizante a partir de residuos orgánicos provenientes del Campus de la Universidad de El Salvador.

### ***Objetivos Específicos***

- Construir un biodigestor para tratar residuos orgánicos domésticos.
- Cuantificar la cantidad de biogás y la cantidad de biofertilizante que se obtendrá en el proceso.
- Determinar la calidad del biogás y el biofertilizante obtenido en la reacción.
- Proponer un diseño preliminar para el escalamiento de biodigestores y su posible aplicación en la Universidad de El Salvador, para aprovechar los residuos orgánicos generados en el campus al transformarlos en biogás y biofertilizante.

### ***Alcances***

- Se construirán biodigestores a nivel de laboratorio con materiales económicos utilizando como sustrato residuos orgánicos producidos en la Universidad de El Salvador.
- Se medirá la cantidad de biogás que se producirá con un gasómetro y la cantidad de biofertilizante con métodos gravimétricos.
- Se determinará la composición del biogás y el biofertilizante obtenido con análisis en laboratorios especializados.
- Se estudiará la viabilidad del uso del biodigestor en los recintos de la Universidad de El Salvador para aprovechar residuos orgánicos específicos generados dentro del campus.

## **Capítulo II:**

### **Investigación Bibliográfica**

#### **1. LA TECNOLOGÍA DE BIODIGESTORES EN EL SALVADOR**

El país donde se desarrolló por primera vez la tecnología de los biodigestores fue la India, donde se construyó la primera instalación para producir biogás, en fecha cercana al año 1900; a partir de ese momento se ha incrementado el número de biodigestores en ese país, y actualmente funcionan alrededor de 200,000 unidades. Sin embargo, China es hoy la región que tiene un mayor número de este tipo de instalaciones, aproximadamente 6.7 millones (*Ardón, 1992*)

Las primeras experiencias relacionadas con la obtención de biogás en El Salvador, se remontan a principios de la década de 1970, y fueron estudios esporádicos dirigidos a producir biogás a partir de la pulpa de café y las aguas residuales resultantes del beneficiado húmedo del café (*Barrera et Al, 2005*)

En la tabla 1.1 se presentan algunos de los primeros esfuerzos documentados en El Salvador relacionados con la producción de biogás (*Vásquez y Rodríguez, 2001*)

En la Universidad de El Salvador se han llevado a cabo trabajos de investigación encaminados al aprovechamiento de residuos orgánicos mediante su fermentación anaeróbica.

En 1992 *Carranza y Elías* propusieron el tema “Incorporación al ciclo ecológico de una mezcla de heces y orina humana y desechos vegetales para la obtención de biogás y abono orgánico a nivel de laboratorio”, en este trabajo se dispuso de una caracterización de algunos sustratos y productos así como la eficiencia de conversión que permitió evaluar la factibilidad del proceso anaeróbico, este proporcionó las bases para futuros trabajos de investigación que desearan ahondar o ampliar el tema.

**Tabla 1.1. Experiencias documentadas relacionadas con la obtención de biogás en El Salvador**

Año	Descripción
1960	Black reportó un estudio realizado por el Dr. Víctor H. Ortiz con digestores metálicos utilizando como materia prima aguas negras no tratadas y pulpa de café.
1965	A. García Prieto realizó experimentos durante dos cosechas de café sin tener éxito pero se redujo los sólidos volátiles
1978	Hay un despertar del tema de producción de biogás por la crisis energética de 1973
1981	Lardé realizó un estudio de biogás tomando como materia prima pulpa de café y estiércol bovino
1982	El instituto salvadoreño de investigación de café (ISCI) experimento con aguas residuales de pulpa, ya que representa un potencial de biogás equivalente a 9274 m <sup>3</sup> en condiciones estándar
1983	La Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (CEL) y la Dirección de Desarrollo Comunal (DIDECO) realizan investigaciones preliminares relacionadas con sistemas de biodigestión y este mismo año se realiza el primer seminario Nacional de Biogás

*Ardónet Al* en el año de 1992 propusieron “Diseño y construcción de un sistema para la obtención y utilización de biogás, a través de desechos orgánicos diversos, para uso del campo experimental de la facultad de ciencias agronómicas de la UES” En este trabajo se tomó como base el digestor modelo ICAITI, y se centra en la implementación de dicho biodigestor al campo experimental de Comalapa, y resulta una buena fuente de información técnica, aunque carece del enfoque de la Ingeniería Química.

*Doñoet et Al* en el año 2000 presentaron el tema “Diagnóstico, perspectivas y alternativas de reactivación de la tecnología del Biogás en El Salvador”, el objetivo era determinar las causas económicas, políticas, socio-culturales, tecnológicas y ecológicas que limitaban el desarrollo de la tecnología del biogás en las familias rurales de El Salvador, las variables de mayor relevancia fueron para los biodigestores domésticos rurales en desuso: falta de apoyo institucional, falta de financiamiento, escaso nivel económico de las familias, escaso nivel de organización entre las familias, falta de conocimientos adecuados sobre el manejo higiénico de los biodigestores, escasa capacitación técnica.

Una de las conclusiones de esa investigación era que para que la tecnología del biogás satisfaga las necesidades energéticas de la población rural, es necesario que los sectores que apoyan esta tecnología continúen sus esfuerzos.

*Mejía et Al* investigaron en el 2005 el tema “Estudio de factibilidad técnico económica para la implantación de una planta productora de biogás a partir de desechos orgánicos”, dicha tesis es orientada a los aspectos técnicos y económicos teóricos que deberían ser tomados en cuenta para la instalación de una planta, sin embargo dejan fuera el aspecto del proceso químico, que como se sabe es la base para el diseño eficiente de un reactor químico.

Entre las experiencias recientes sobre la producción de biogás se tiene el caso de Industrias La Constancia. Esta empresa cuenta con dos plantas de tratamiento de aguas residuales, una esta situada dentro de la Planta de producción de Sodas y la otra en la Planta de producción de Cerveza. Sin embargo, sólo esta última esta diseñada para generar biogás, con el cual se quiere sustituir aproximadamente el 8% de la energía térmica utilizada en la planta. Esto contribuye a la reducción de los gases del efecto invernadero, al captar metano y desplazar el uso de los combustibles fósiles.



## 2. EL PROBLEMA DE LA BASURA EN EL SALVADOR

Muchas son las investigaciones que se han realizado sobre la tecnología de producción de biogás a partir de residuos orgánicos con fermentación metanogénica. Sin embargo todas han estado enfocadas en la utilización de residuos de origen agropecuario para la obtención de dicho producto. Ahora se ha visualizado que con el aumento de la población el problema de la basura ira en aumento y se necesitará de nuevas tecnologías (o en otro sentido adaptar las tecnologías anteriores a los nuevos sustratos) para tratar el volumen de todos los desperdicios orgánicos que se generan.

El problema que se necesita solucionar con el desarrollo de este trabajo de investigación es, en efecto, la disminución del volumen de residuos de naturaleza orgánica para convertirlos en biogás y biofertilizantes, ambos productos útiles tanto para la industria como para usos particulares.

La basura es considerada como un problema de salud y contaminación ya que en ella crecen una gran cantidad de microorganismos que pueden causar enfermedades. Por otro lado, al descomponerse la materia orgánica se generan olores desagradables y los lixiviados producidos pueden contaminar las aguas subterráneas.

Para el 2007 se generaron en el área urbana de El Salvador 3,186.97 ton diarias de desechos sólidos, de las cuales San Salvador produce 1,768.83 ton diarias (*MARN, 2007*). La mayor parte de esta basura es de origen doméstico y casi un 80% es de naturaleza orgánica. (*Merlos, 1998*)

En la Tabla 2.1 se detalla la cantidad de basura que se genera diariamente en varios municipios del Área Metropolitana de San Salvador.

**Tabla 2.1. Toneladas de basura generada diariamente en el AMSS**

<b>Basura (Toneladas)</b>				
<b>Municipio</b>	<b>Producida Diariamente</b>		<b>Recolectada Diariamente</b>	
	<b>Toneladas</b>	<b>% del total</b>	<b>Toneladas</b>	<b>% del total</b>
San Salvador	530.26	41	165.963	31.3
Soyapango	183.5	14	90.347	49.23
Mejicanos	101.79	8	50.118	49.23
Nueva San Salvador	79.9	6	39.342	49.23
Ciudad Delgado	77.20	6	38.013	38.87
Apopa	79.72	6	36.646	47.762
Ilopango	63.69	5	32.30	50.71
Cuscatancingo	40.40	3	19.889	49.23
San Marcos	42.10	3	20.728	49.23
San Martín	39.73	3	19.560	49.23
Antiguo Cuscatlán	19.81	2	9.657	48.74
Nejapa	16.79	1	8.183	48.73
Ayutuxtepeque	16.73	1	8.324	49.75
<b>Total</b>	<b>1,288.61</b>	<b>100.0</b>	<b>539.070</b>	<b>100.0</b>

*Nota: Según estudios de la Alcaldía de San Salvador, en este municipio se recoge en 75 % de la basura producida diariamente, según estudios de Prisma sólo se alcanza a recoger el 50 %.*

*Fuente: Elaboración de "La basura problema de todas y todos..." Serie Alternativas para el Desarrollo, Enrique Merlos, 1998 con base a La Prensa (30/abril/97) y El Diario de Hoy (19/febrero/97)*

Los sectores que más basura producen son en orden descendente: el domiciliario, seguido de los botaderos oficiales, comunidades y mercados. El crecimiento poblacional como se dijo al principio, y el desarrollo industrial son los factores que inciden en el aumento de la emisión de basura.

En la Cumbre de la Tierra (ECO,1992), que se realizó en Brasil para el año 1992, se subrayó la importancia de la conservación del medio ambiente y la necesidad de regular su contaminación. Para ello, se creó el documento llamado Agenda 21, que fue firmado por alrededor de 170 países, entre ellos El Salvador.

En el Capítulo 21 de este documento se establecen cuatro principios con respecto al problema de la basura, que dicen:

- I. Se debe minimizar la generación de desechos.
- II. Se deben emplear los mecanismos de reutilización y reciclaje de los desechos, como una manera de disminuir la contaminación del medio ambiente.
- III. Se debe promocionar y concientizar a las personas en el adecuado tratamiento de los desechos.
- IV. Se deben aumentar los servicios de saneamiento ambiental (sobre todo en las grandes ciudades).

La producción de biogás a partir de la fermentación metanogénica de residuos orgánicos obedece al principio de reciclaje de los desechos. Sin embargo siempre sería necesario un relleno sanitario para la basura que no pueda reciclarse. Una combinación adecuada de tecnologías puede dar como resultado una disminución sustancial de contaminación y de gastos para los gobiernos.

### **2.1. Clasificación de la basura**

Para poder reciclar la basura es necesario clasificarla por su origen en orgánica e inorgánica.

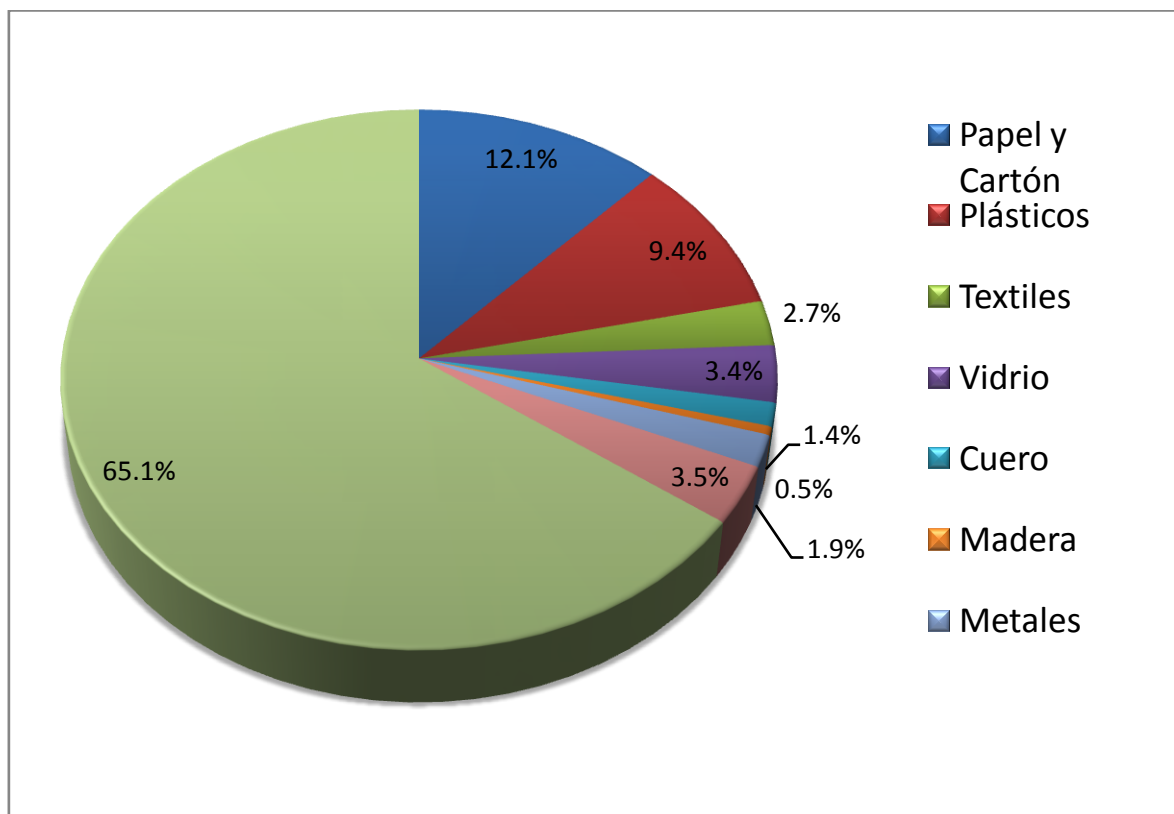
La basura orgánica es aquella que puede ser degradada por acción biológica, y está formada por todos aquellos residuos que se descomponen con el tiempo para integrarse al suelo, como los de tipo animal, vegetal y todos aquellos materiales que contengan carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno.

La basura inorgánica está formada por todos aquellos desechos no biodegradables, es decir, aquellos que no se pueden descomponer; éstos pueden ser plástico, vidrio,

lata, hierro, cerámica, materiales sintéticos, etc. La mejor manera en que se puede tratar este tipo de basura, es reciclándola.

En la Figura 2.1 se muestra la composición de los desechos municipales de San Salvador:

**Figura 2.1. Composición de los Desechos Sólidos**



*Fuente: Adaptado de "Medio Ambiente en Cifras/ El Salvador 2003", MARN*

El 65.1% de la basura producida diariamente es de origen orgánico, lo cual es una enorme ventaja, ya que puede ser aprovechada para la generación de energía y de biofertilizantes; los metales, el papel y el vidrio conforman el 1.9%, 12.1% y el 3.4% respectivamente de los desechos; éstos pueden ser reutilizados nuevamente.

Las ventajas del abono orgánico creado a partir de una mezcla de desechos vegetales y excrementos animales son que se obtiene un abono relativamente barato

que suministra nitrógeno, potasio y fósforo a las plantas, y se aporta; oligoelementos como hierro, manganeso, zinc, boro y cobre, indispensables en el desarrollo de las plantas; adicionalmente, la actividad biológica del suelo se ve favorecida por el aporte de bacterias.

## 2.2. Cantidad de Materia Orgánica

En un estudio sobre el mercado de reciclaje (*Meléndez, 2006*) se realizaron estimaciones de la cantidad de materia orgánica contenida en los desechos sólidos comunes, y se calcula en 500,702 toneladas anuales (Tabla 2.2).

**Tabla 2.2. Cantidad de Materia Orgánica en los Desechos Sólidos Comunes en el año 2005**

Región	Desechos Sólidos	Orgánicos	
	Ton/año	%	Ton/año
Central	443,537	51.85	229,974
Occidental	186,073	37.78	70,299
Oriental	165,944	75.47	125,238
Para Central	98,922	76.01	75,191
Total General	894,476	55.98	500,702

Fuente: "Estudio sobre el Mercado Potencial de Reciclaje en El Salvador (Informe Final)"

## 2.3. Alternativas para el Aprovechamiento de la Materia Orgánica

En el caso de la materia orgánica se pueden tener varias alternativas para tratarla y sacarle algún valor agregado. Algunas de estas alternativas son:

### 2.3.1. Compostaje

El compostaje es un proceso biológico controlado de descomposición aeróbica acelerada de los materiales orgánicos. Se puede hacer una comparación entre la

combustión (oxidación química) y el compostaje (oxidación biológica). En ambos procesos el carbón presente se oxida (química o biológicamente respectivamente) y si la combustión es completa se tienen como productos dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), agua (H<sub>2</sub>O) y energía en forma de calor. Sin embargo, en el compostaje usualmente la descomposición no es completa y se tiene como otro producto materia orgánica en forma de humus. Este producto de la descomposición aeróbica, que se caracteriza por ser biológicamente estable (relativamente hablando), es a lo que se llama compost. Es decir compostaje es el proceso y compost es uno de los productos de dicho proceso. Esta combustión biológica se da por la intercesión de una serie de microorganismos, principalmente bacterias, actinomicetos y hongos.

El compost, como producto, tiene valor desde tres puntos de vista diferentes:

1. Como fertilizante, es decir por su contenido de macro (NPK) y micronutrientes
2. Como acondicionador de suelos, por su contenido de materia orgánica (en forma de humus)
3. Como supresor de fitoenfermedades, por su contenido y variedad de microorganismos.

Además el compostaje por ser un proceso exotérmico tiene la capacidad de pasteurizar la materia orgánica, es decir, en un proceso de compostaje adecuadamente controlado se puede reducir la cantidad de microorganismos patógenos a un mínimo, lo cual es una condición necesaria en caso de utilizarse el compost para la producción de alimentos para el consumo humano (*Lemus, 1997*).

### **2.3.2. Biomasa convertida en Energía**

Biomasa, es la materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía. Las plantas transforman la energía radiante del sol en energía química a través de la fotosíntesis, y parte de esa energía química queda almacenada en forma de materia orgánica; la energía química de la

biomasa puede recuperarse quemándola directamente o transformándola en combustible.

Según el proceso de producción, los combustibles que pueden obtenerse a partir de la biomasa se pueden clasificar de la siguiente manera:

- ⊕ **Uso directo.** La biomasa empleada sufre sólo transformaciones físicas antes de su combustión, caso de la madera o la paja.
  
- ⊕ **Fermentación alcohólica.** Se trata del mismo proceso utilizado para producir bebidas alcohólicas. Consta de una fermentación anaeróbica liderada por levaduras en las que una mezcla de azúcares y agua se transforma en una mezcla de alcohol y agua con emisión de dióxido de carbono. Para obtener finalmente etanol es necesario un proceso de destilación en el que se elimine el agua de la mezcla.
  
- ⊕ **Transformación de ácidos grasos.** Aceites vegetales y grasas animales pueden transformarse en una mezcla de hidrocarburos similar al diesel a través de un complejo proceso.
  
- ⊕ **Descomposición anaeróbica.** Se trata de nuevo de un proceso liderado por bacterias específicas que permite obtener metano en forma de biogás.

La combustión de la biomasa o de biogás puede utilizarse para generar calor y vapor. El calor puede ser el producto principal, en usos tales como calefacción de hogares y cocción de alimentos, o puede ser un subproducto de la producción eléctrica en centrales combinadas de calor y energía.

El vapor generado por la biomasa puede utilizarse para accionar turbinas de vapor para la producción eléctrica, utilizarse como calor de proceso en una fábrica o planta de procesamiento, o utilizarse para mantener un flujo de agua caliente.

En El Salvador hay algunos proyectos de producción de energía a través del procesamiento de biomasa, la mayoría están orientados a la generación de electricidad a través del procesamiento de material vegetal o animal o de gas producto de la descomposición; entre ellos destacan el desarrollado por la empresa Manejo Integral de los Desechos Sólidos -MIDES- en el relleno sanitario de Nejapa que utiliza el metano producto la descomposición de los desechos para la generación de electricidad(*Fonaes, 2008*).

#### **2.4. Manejo de los Residuos Sólidos en la Universidad de El Salvador**

La Universidad de El Salvador, como institución de educación superior, debe aportar soluciones factibles a las problemáticas que enfrenta el país en base a conocimiento científico y tecnológico, en vista de la explosión demográfica que afecta al mundo entero, es preciso no solo aportar conocimiento técnico sino ser parte de la solución a los nuevos desafíos medioambientales, para lograrlo se debe comenzar con el establecimiento de metodologías para el manejo de residuos sólidos dentro del recinto universitario.

*Núñez et.Al., (2000)*, realizaron un valioso aporte investigando la situación actual del manejo de los residuos sólidos dentro del Campus de la Universidad de El Salvador, con el cual se estimó la cantidad generada de residuos sólidos y la composición de estos, los resultados obtenidos presentan un panorama específico muy importante para proponer soluciones a este problema.

##### **2.4.1. Generación y recolección de residuos sólidos en la Universidad de El Salvador**

Se han identificado en la Universidad de El Salvador, los siguientes puntos de generación de residuos sólidos:



- Cafeterías
- Oficinas
- Aulas, talleres y laboratorios
- Fotocopiadoras
- Clínicas Odontológicas
- Aéreas Verdes
- Otros

En la tabla 2.3 se presentan los promedios diarios de residuos sólidos generados y que se encuentran en los diferentes contenedores del Campus Central de la Universidad de El Salvador.

**Tabla 2.3. Promedios diarios de residuos sólidos que son generados por los diferentes contenedores en el Campus Central UES**

Contenedor	Promedio diarios (kg)
Oficina Central	292.66738
Jurisprudencia	288.52689
Ingeniería y Arquitectura	221.50370
Deportes	188.55041
Placita	71.29558
Odontología	50.43948
Promedio global	185.49724

*Fuente: Núñez, Ramírez y Yanes "Propuesta para la gestión de residuos sólidos en La Universidad de El Salvador", tesis para optar al título de Ingeniero Químico, 2000*

La distribución de cafeterías dentro de la universidad ha cambiado desde el 2000 hasta la fecha, sin embargo la población universitaria ha crecido por lo que en las Tablas 2.4, 2.5 y 2.6 se presentan datos del 2000 que pueden ser de utilidad para determinar cuantos desechos se generan como mínimo en la Cafetería Universitaria.

**Tabla 2.4. Promedios diarios de residuos sólidos que son generados por las diferentes cafeterías del Campus Central UES, año 2000**

<b>Cafetería</b>	<b>Promedio diario (Kg)</b>
ACOPUS	134.02288
Manguito	39.72760
Química y Farmacia	32.11434
Central	18.23448
<b>Promedio global</b>	<b>56.02483</b>

*Fuente: Núñez, Ramírez y Yanes "Propuesta para la gestión de residuos sólidos en La Universidad de El Salvador", tesis para optar al título de Ingeniero Químico, 2000*

**Tabla 2.5. Clasificación de todos los contenedores de la UES exceptuando Cafeterías**

<b>Categoría</b>	<b>Promedio de proporciones</b>
Papel y Cartón	0.1929
Plástico	0.0852
Vidrio	0.0107
Metales (Aluminio)	0.0113
Madera	0.0037
Residuos de jardín	0.6250
Residuos de comida	0.0319
Poliestireno Expandido	0.0317
Otros	0.0076
<b>Total</b>	<b>1.0000</b>

*Fuente: Núñez, Ramírez y Yanes "Propuesta para la gestión de residuos sólidos en La Universidad de El Salvador", tesis para optar al título de Ingeniero Químico, 2000*

**Tabla 2.6. Clasificación de los residuos sólidos totales por Cafeterías**

<b>Categoría</b>	<b>Promedio de proporciones</b>
Papel y Cartón	0.1791
Plástico	0.2026
Metales (Aluminio)	0.0141
Residuos de comida	0.4611
Residuos de jardín	0.1187
Poliestireno Expandido	0.0244
<b>Total</b>	<b>1.0000</b>

*Fuente: Núñez, Ramírez y Yanes "Propuesta para la gestión de residuos sólidos en La Universidad de El Salvador", tesis para optar al título de Ingeniero Químico, 2000*

#### **2.4.2. Observaciones sobre la generación de residuos sólidos en la Universidad de El Salvador**

De los datos presentados por (Núñez et Al,2000), se puede observar como la mayor cantidad de residuos sólidos generados son los residuos de jardín representando el 62.5% seguidos por 19.3% de residuos de papel.

En el caso de los residuos sólidos generados por los cafetines se hace notar que el 46.1% son residuos de comida, lo demás está representado por un 20.02% de plásticos y 11.9% es Poliestireno Expandido.

#### **2.4.3. Producción per cápita de residuos sólidos en la Universidad de El Salvador**

La producción per cápita de residuos sólidos es llamada también tasa de generación de residuos sólidos; y expresa la proporción entre la cantidad total de residuos sólidos que se recogen y la población atendida y se expresa de acuerdo a la ecuación 2.1:

$$PPC = \frac{\text{Cantidad total de residuos sólidos que se recolectan } \left( \text{Kg/día} \right)}{\text{Población atendida } \left( \text{habitantes/día} \right)} \quad 2.1$$

Tomando los datos de *Núñez et Al, 2000* de la cantidad de residuos generados en la Universidad de El Salvador el cual oscila dentro del intervalo: 145.7540 – 225.2398 kg/día, y el dato de la población atendida que fue para el año 2000 de 23,338 (Estudiantes, personal docente y administrativo) se puede calcular la PPC:

$$PPC = 0.006245 - 0.009651 \text{ Kg/hab día}$$

Este dato reporta la cantidad de residuos sólidos generados por los habitantes universitarios, durante un día de labores en la Universidad de El Salvador, haciendo hincapié que no se tomaron en cuenta los residuos generados por los cafetines ya que estos son transportados diariamente por el camión recolector municipal o transporte privado (*Núñez et Al, 2000*)

### **3. GENERALIDADES SOBRE EL PROCESO DE FERMENTACIÓN METANOGÉNICA**

La fermentación metanogénica o biometanogénesis es un medio antiguo de transformación energética de la biomasa descubierto en 1776 por Volta, que encontró metano en el gas de los pantanos. Es un proceso de degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno el cual genera metano, dióxido de carbono y otros compuestos e implica la realización de una serie de reacciones bioquímicas, en las cuales participa una gran variedad de microorganismos (*Guevara Vera, 1996*).

Casi todas las materias orgánicas pueden emplearse para la fermentación. Entre los sustratos más usados están las aguas residenciales, aguas residuales de la industria alimenticia, los desechos municipales, subproductos agrícolas (excrementos animales) y desechos humanos. La composición química de estos sustratos son polisacáridos, proteínas, grasas y pequeñas cantidades de metabolitos insolubles en agua (*Guevara Vera, 1996*).

#### **3.1. Microorganismos en el proceso de digestión**

Para que el proceso de fermentación sea normal se necesita la acción conjunta de bacterias que producen metano y de aquellas que no lo producen. El exceso o falta de una de las dos tienden a destruir el equilibrio cinético, lo que lleva a la anomalía o incluso al fracaso del proceso de fermentación (*Guevara Vera, 1996*).

Se han encontrado en aislamiento cuatro grupos de bacterias que poseen diferentes funciones catabólicas sobre el carbono, en el proceso de degradación de la materia orgánica hasta el metano:

- 🌐 Grupo I: Bacterias hidrolíticas, las cuales catabolizan sacáridos, proteínas, lípidos y otros constituyentes menores de la biomasa.

- Grupo II: Bacterias acetogénicas, productoras de hidrógeno, catabolizan ciertos ácidos grasos y productos finales neutros.
- Grupo III: Bacterias homoacetogénicas, catabolizan compuestos monocarbonados, y/o hidrolizan compuestos multicarbonados hacia la producción de ácido acético.
- Grupo IV: Bacterias metanogénicas, catabolizan acetato, compuestos monocarbonados para producir metano; contemplándose solo cuatro géneros: *Metanobacterium*, *Methanococcus*, *Methanospirillum* y *Methanosarcina*, basado en la clasificación taxonómica propuesta por Balch.

### 3.1.1. Microorganismos metanogénicos y su acción

Algunas de las características de los organismos metanogénicos que son sensibles al oxígeno y a los óxidos. Además, sólo pueden usarse como sustrato los compuestos orgánicos e inorgánicos más sencillos en condiciones de cultivo puro y por tal razón el crecimiento y reproducción de este tipo de microorganismos es muy lento. Su estudio ha avanzado lentamente por la dificultad de aislarlos, incubarlos y almacenarlos (*Guevara Vera, 1996*).

En la Tabla 3.1 se muestra una clasificación de los microorganismos productores de metano.

**Tabla 3.1. Clasificación de los microorganismos productores de metano**

<b>Orden</b>	<b>Familia</b>	<b>Género</b>	
<b><i>Methanobacteriales</i></b>	<i>Methanobacteriaceae</i>	<i>Methanobacterium</i> <i>Methanobrevibacter</i> <i>Methanosphaer</i>	
	<i>Methanothermaceae</i>	<i>Methanothermus</i>	
<b><i>Methanococcales</i></b>	<i>Methanococcaceae</i>	<i>Methanothermus</i>	
<b><i>Methanomicrobiales</i></b>	<i>Methanomicrobiaceae</i>	<i>Methanomicrobium</i> <i>Methanogenium</i> <i>Methanoculleus</i> <i>Methanospirillum</i>	
		<i>Methanocorpusculaceae</i>	<i>Methanocorpusculum</i>
		<i>Methanosarcinaceae</i>	<i>Methanoplanus</i>
		<i>Methanoplanaceae</i>	<i>Methanosarcina</i> <i>Methanococcoides</i> <i>Methanolobus</i> <i>Methanohalophilus</i> <i>Methanosaeta</i>

Fuente: *Enhancing Anaerobic Degradation of Lipids in Wastewater by Addition of Substrate*, Y. Kuang, 2002

Como características comunes a todas las metanobacterias pueden mencionarse la propiedad de proliferar en presencia de hidrógeno y dióxido de carbono, su enorme sensibilidad al oxígeno y a los inhibidores de la producción de metano. En condiciones naturales, las metanobacterias se encuentran estrechamente unidas a las bacterias productoras de hidrógeno; se trata de una asociación trófica de beneficio mutuo. Las primeras, al utilizar el hidrógeno gaseoso producido por las segundas, impiden que este alcance concentraciones tóxicas para estas últimas.

### 3.1.2. Microorganismos no metanogénicos y su acción

Los organismos no metanogénicos convierten complejos productos orgánicos en compuestos de moléculas más sencillas y más pequeñas. Participan numerosos y variados microbios anaeróbicos y facultativos, dependiendo su número y la variedad de los materiales de fermentación. En este grupo existen bacterias, mohos y protozoos (Guevara Vera, 1996).

- a) Bacterias: Las bacterias no metanogénicas se clasifican en siete grupos: las que descomponen la celulosa, la hemicelulosa, las proteínas, las grasas, las que producen hidrógeno, otros microbios específicos como *Thiovibros* y las que emplean el ácido láctico.
- b) Mohos: Mediante el cultivo artificial se han aislado numerosos mohos y levaduras en la digestión anaeróbica, llegándose a la conclusión que estos organismos podrían participar en el proceso de la digestión, del cual obtendrían los nutrientes para reproducirse.
- c) Protozoos: Algunos investigadores han señalado que los protozoos también intervienen en este proceso, principalmente *plasmodium*, *flagelados* y *amebas*, aunque consideran que podrían desempeñar un papel de menor importancia en el proceso.

### 3.2. Proceso de fermentación metanogénica

Desde el punto de vista bioquímico, la fermentación metanogénica es, de hecho, un tipo de respiración anaerobia, en el que los electrones procedentes de sustratos orgánicos terminan produciendo dióxido de carbono, que se reduce a continuación a metano. Además de los diversos sustratos orgánicos (como el acetato), el hidrógeno que es producido por diversos tipos de bacterias anaerobias, actúa como donador de electrones para las metanobacterias.



El metano puede obtenerse de compuestos aromáticos, en condiciones de anaerobiosis estricta. Probablemente, este proceso es muy frecuente en la naturaleza, sobre todo en el tratamiento de las aguas servidas y de los efluentes, así como en la transformación de algunos biocidas. Existen varias especies de bacterias que intervienen en las distintas etapas de la degradación de los ciclos aromáticos hasta llegar al acetato, que es uno de los sustratos de las metanobacterias, su deshidrogenación libera los electrones necesarios para la reducción del dióxido de carbono en metano.

En el proceso de producción de gas metano por fermentación anaeróbica existen cuatro fases:

- 1) Fase de hidrólisis, se rompen los enlaces para dar lugar a la formación de compuestos más sencillos.
- 2) Fase de acidificación, se forman ácidos orgánicos de cadena corta.
- 3) Fase acetogénica, se da la formación de acetato a partir de los ácidos orgánicos.
- 4) Fase metanogénica, se da la formación de metano por bacterias metanogénicas a partir de acetato, hidrógeno y dióxido de carbono.

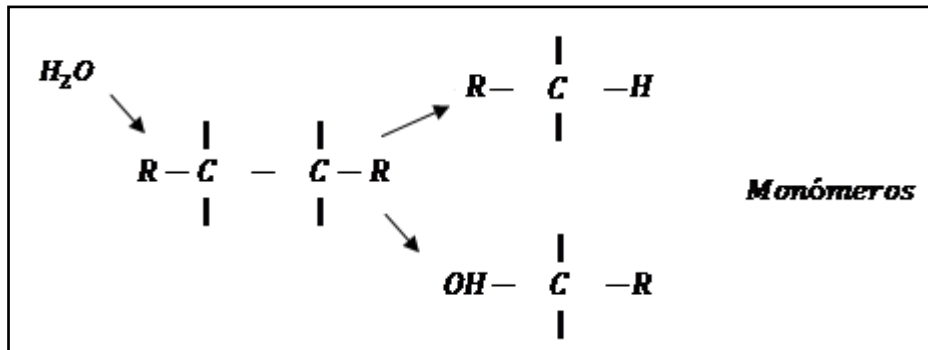
En los apartados del 3.2.1 al 3.2.4 se describen cada una de estas fases.

### **3.2.1. Hidrólisis**

En esta fase los compuestos insolubles como celulosa, proteínas y lípidos son convertidos en monómeros por exoenzimas (hidrolasa) producidas por los microorganismos anaeróbicos estrictos y facultativos. Los enlaces covalentes son rotos por las reacciones químicas en fase acuosa. La hidrólisis de los carbohidratos toma lugar en unas cuantas horas, la hidrólisis de proteínas y lípidos en días. En cambio la lignocelulosa y lignina son degradadas lentamente y muchas veces esta transformación es incompleta. Véase Figura 3.1.

Los microorganismos anaeróbicos facultativos toman el oxígeno disuelto en el agua produciendo las condiciones de bajo potencial redox necesario para los microorganismos anaeróbicos estrictos (Deublein&Steinhauser, 2008)

**Figura 3.1. Formación de monómeros en la fase de Hidrólisis**



Fuente: Dieter Deublein, Angelika Steinhauser. "Biogas from Waste and Renewable Resources". WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Alemania, 2008.

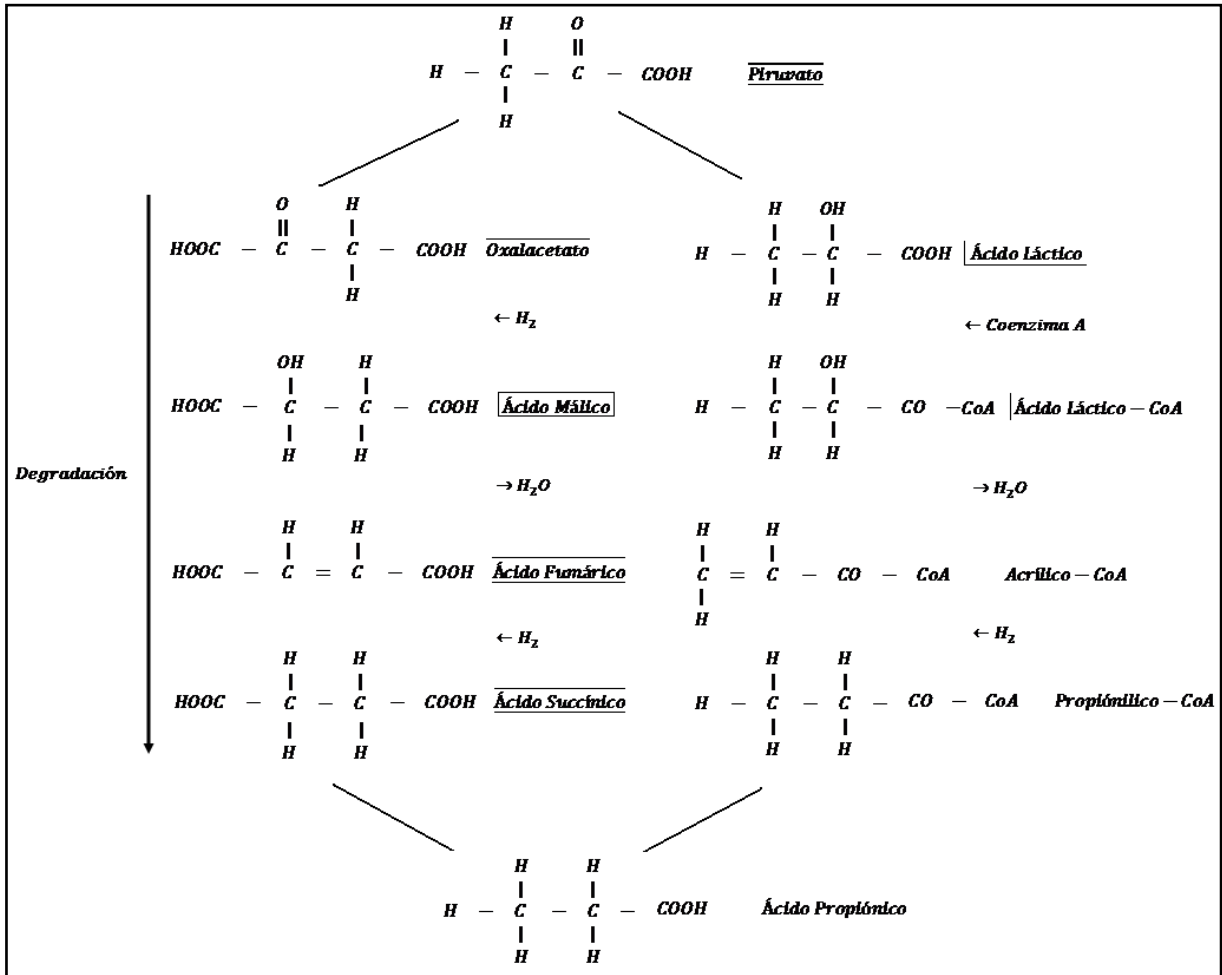
### 3.2.2. Acidificación

Los monómeros formados en la fase de hidrólisis son tomados por las diferentes bacterias anaeróbicas facultativas y estrictas y son degradados en esta fase a ácidos orgánicos de cadena corta (C1-C5) por ejemplo ácido butírico, ácido propiónico, acetato, ácido acético, alcoholes, hidrógeno y dióxido de carbono. La concentración de estos compuestos afecta en el tipo de productos de la fermentación. Por ejemplo si la presión parcial del hidrógeno aumenta, se ven reducidos otros componentes como acetato (Deublein&Steinhauser, 2008).

Las vías de degradación son las siguientes:

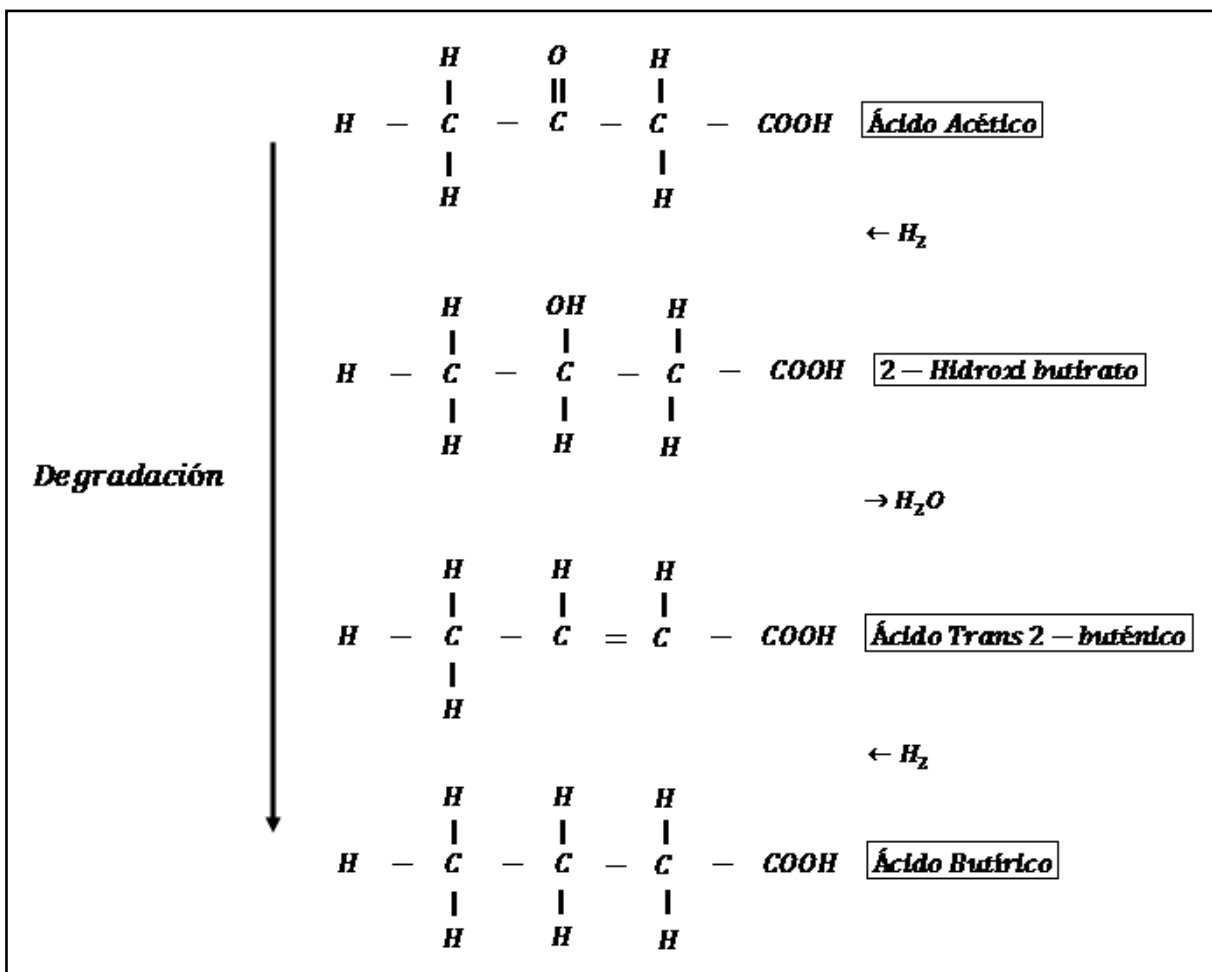
- Carbohidratos: Se forma ácido propiónico por bacterias vía succinato y acrilato. También existe formación de ácido butírico por los microorganismos del género *Clostridium* a partir de ácido acético. Figura 3.2 y Figura 3.3.

**Figura 3.2. Degradación del Piruvato**



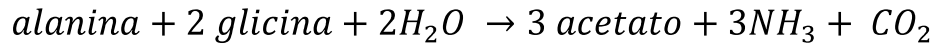
Fuente: Dieter Deublein, Angelika Steinhauser. "Biogas from Waste and Renewable Resources". WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Alemania, 2008.

**Figura 3.3. Degradación del Ácido Acético a Ácido Butírico**

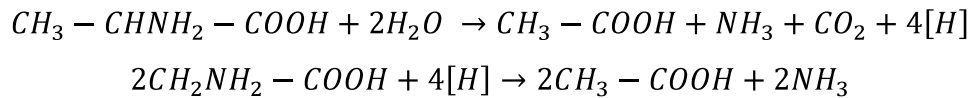


Fuente: Dieter Deublein, Angelika Steinhauser. "Biogas from Waste and Renewable Resources". WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Alemania, 2008.

- Ácidos grasos: Son degradados por bacterias como acetobacter por oxidación  $\beta$ . Se unen a coenzima A y luego son oxidados en etapas. En cada una de estas etapas son liberados 2 átomos de Carbono, en forma de acetato.
- Aminoácidos: Los clostridiospeptolíticos hidrolizan proteínas y fermentan aminoácidos. Muchos aminoácidos no son transformados en forma aislada. Tal como descubrió *Stickland (1934)* una mezcla de alanina y glicina es fermentada rápidamente por *Clostridiumsporogenes*, aunque los aminoácidos aislados no sean transformados. En base a la ecuación de equilibrio:



La alanina actúa como dador de hidrógeno y la glicina como aceptor de hidrógeno.



Aparentemente la energía se obtiene por una reacción acoplada de oxidación-reducción. Como dadores de hidrógeno actúan, por ejemplo, alanina, leucina, isoleucina, valina, serina, metionina, entre otros. Como aceptores de hidrógeno pueden actuar glicina, prolina, arginina y triptofano, entre otros. El aminoácido dador se desamina a un oxácido, que posteriormente mediante una descarboxilación oxidativa se transforma en el ácido graso. Este paso va unido a una fosforilación y representa por tanto la reacción productora de energía. El hidrógeno transferido a la ferredoxina vuelve a ser captado por el aminoácido aceptor durante la desaminación reductiva. No todos los aminoácidos pueden ser utilizados por todos los clostridiospeptolíticos (Schlegel, 1997).

### 3.2.3. Fase Acetogénica

Los productos de la fase acidogénica sirven como sustrato para otras bacterias en la fase acetogénica. Las reacciones acetogénicas son endergónicas<sup>1</sup>, algunas se muestran en el Tabla 3.2. Para la degradación del ácido propiónico es necesaria una energía de  $\Delta G_f' = +76.11 \text{ KJmol}^{-1}$  y para la degradación del etanol  $\Delta G_f' = +9.6 \text{ KJmol}^{-1}$ . En la fase acetogénica, microorganismos homoacéticos realizan constantemente una reducción exergónica de  $\text{H}_2$  y  $\text{CO}_2$  a ácido acético.

---

<sup>1</sup>Reacciones Endergónicas son aquellas que requieren un aporte neto de energía para tener lugar: los productos resultantes tienen más energía que los reactivos de partida. En cambio, las Reacciones Exergónicas son, aquellas que tienen lugar con un desprendimiento neto de energía: los productos tienen menos energía que los reactivos de partida.

**Tabla 3.2. Degradación Acetogénica**

Sustrato	Reacción
Ácido Propiónico	$CH_3(CH_2)COOH + 2H_2O \rightarrow CH_3COOH + CO_2 + 3H_2$
Ácido Butírico	$CH_3(CH_2)_2COO^- + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COO^- + H^+ + 2H_2$
Ácido Valérico	$CH_3(CH_2)_3COOH + 2H_2O \rightarrow CH_3COO^- + CH_3CH_2COOH + H^+ + 2H_2$
Ácido Isovalérico	$(CH_3)_2CHCH_2COO^- + HCO_3^- + H_2O \rightarrow 3CH_2COO^- + H_2 + H^+$
Ácido Capríónico	$CH_3(CH_2)_4COOH + 4H_2O \rightarrow 3CH_3COO^- + H^+ + 5H_2$
CO <sub>2</sub> /Hidrógeno	$2CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_3COO^- + H^+ + 2H_2O$
Glicerina	$C_3H_8O_3 + H_2O \rightarrow CH_3COOH + 3H_2 + CO_2$
Ácido Láctico	$CH_3CHOHCOO^- + 2H_2O \rightarrow CH_3COO^- + HCO_3^- + H^+ + 2H_2$
Etanol	$CH_3(CH_2)OH + H_2O \rightarrow CH_3COOH + 2H_2$

Fuente: Dieter Deublein, Angelika Steinhauser. "Biogas from Waste and Renewable Resources". WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Alemania, 2008.

Las bacterias acetogénicas producen H<sub>2</sub>. La formación de acetato por oxidación de los ácidos grasos de cadena larga, se da espontáneamente y es termodinámicamente posible a una baja presión del hidrógeno. Estas bacterias pueden tomar la energía necesaria para su supervivencia y crecimiento, solamente a una baja concentración de hidrógeno. (Deublein&Steinhauser, 2008).

Cuando la presión parcial del hidrógeno es baja, las bacterias acetogénicas forman predominantemente CO<sub>2</sub> y acetato. Cuando la presión del hidrógeno aumenta, predominan el ácido butírico, capríónico, propiónico, y valérico y también el etanol. A partir de estos productos, los microorganismos metanogénicos solamente pueden procesar acetato, H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>.

Aproximadamente el 30% de toda la producción de CH<sub>4</sub> a partir de lodos puede ser atribuida a la reducción del CO<sub>2</sub> por H<sub>2</sub>. Pero solamente el 5-6% de toda la producción de metano puede ser atribuido al hidrógeno disuelto. Esto se explica por que el hidrógeno se mueve directamente desde los microorganismos acetogénicos a los metanogénicos sin ser disuelto en el sustrato.

La conversión anaeróbica de ácidos grasos y alcoholes se da en la metanogénesis cuando existe el sustrato necesario ( $H_2$ ,  $CO_2$  y ácido acético) para el crecimiento de las bacterias acetogénicas. La fase acetogénica limita la velocidad de degradación en la fase final. La cantidad y la composición del biogás, dependen en gran medida de la actividad de las bacterias acetogénicas.

Al mismo tiempo, el nitrógeno orgánico y algunos compuestos de azufre pueden ser mineralizados a sulfuro de hidrógeno por la producción de amoníaco (*Deublein&Steinhauser, 2008*).

#### **3.2.4. Fase Metanogénica**

En la cuarta fase, la formación del metano toma lugar bajo estrictas condiciones anaeróbicas. Este tipo de reacciones se catalogan como exergónicas y se muestran en el Tabla 3.3. No todas las especies metanogénicas degradan todos los sustratos. Los sustratos que los microorganismos pueden degradar se dividen en tres grupos:

Los que degradan:

$CO_2$	$CO_2, HCOO^-, CO$
Grupo metilo	$CH_3OH, CH_3NH_3, (CH_3)_2NH_2^+, (CH_3)_3NH^+, CH_3SH, (CH_3)_2S$
Grupo acetato	$CH_3COO^-$

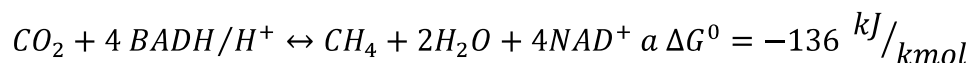
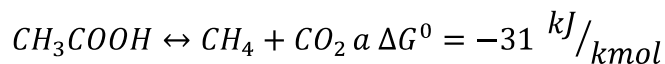
Cuando existe una perturbación en la formación de metano, ocurre una sobre acidificación. Estos problemas se pueden dar cuando las bacterias acetogénicas viven en simbiosis con otros microorganismos que no son metanogénicos, que usan  $H_2$ . En aguas residuales, la simbiosis entre microorganismos puede ocurrir trayendo consigo una reducción del sulfato a sulfuro de hidrógeno. Por tanto estas bacterias necesitan hidrógeno y compiten con las bacterias metanogénicas. La metanogénesis disminuye y hay una menor producción de metano. Además el sulfuro de hidrógeno es tóxico para las bacterias metanogénicas.

**Tabla 3.3. Degradación Metanogénica**

Tipo de Sustrato	Reacciones Químicas	$\Delta G(kJ mol^{-1})$	Especies metanogénicas
Tipo $CO_2$ -	$4H_2 + HCO_3^- + H^+ \rightarrow CH_4 + 3H_2O$	-135.4	Todas las especies
	$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$	-131.0	
Tipo $CO_2$ -	$4HCOO^- + H_2O + H^+ \rightarrow CH_4 + 3HCO_3^-$	-130.4	Muchas especies
Acetato	$CH_3COO^- + H_2O \rightarrow CH_4 + HCO_3^-$	-30.9	Algunas especies
Tipo Metilo	$4CH_3OH \rightarrow 3CH_4 + HCO_3^- + H^+ + H_2O$	-314.3	Una especie
Tipo Metilo	$CH_3OH + H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$	-113.0	
Tipo Metilo:			
Etanol	$2CH_3CH_2OH + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2CH_3COOH$	-116.3	

Fuente: Dieter Deublein, Angelika Steinhauser. "Biogas from Waste and Renewable Resources". WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Alemania, 2008.

Todas las reacciones de formación de metano tienen diferentes rendimientos energéticos. La oxidación de ácido acético es en comparación con la reducción del  $CO_2 + H_2$ , menos exergónica.



Sin embargo, sólo el 27-30% del metano proviene de la reducción, mientras que el 70% surge de acetato durante la metanación. (Deublein&Steinhauser, 2008).

### 3.3. Factores a considerar en el proceso metanogénico

Existen muchos factores que influyen directamente en la fermentación metanogénica y son capaces de modificar la rapidez de la descomposición. Entre ellos están:

- Material de carga para la fermentación metanogénica
- Relación Carbono – Nitrógeno.



- Concentración de la carga
- Temperatura
- Valor de pH
- Promotores e inhibidores de la fermentación

A continuación se describen estos factores.

### **3.3.1. Material de carga para la fermentación metanogénica**

Se llama así a todos los desechos orgánicos que se introducen dentro de un biodigestor para su degradación. En el proceso de fermentación los microorganismos metanogénicos necesitan nutrientes para producir biogás, por ello es necesario contar con suficiente material de carga para que el proceso de digestión no se interrumpa. La materia orgánica que se utiliza como material de carga (residuos de los cultivos, excretas de humanos y de animales) puede dividirse en dos grupos, las materias primas ricas en nitrógeno y las materias primas ricas en carbono. El nitrógeno se utiliza como constituyente para la formación de la estructura celular, y el carbono se utiliza como fuente de energía (*Guevara Vera, 1996*).

### **3.3.2. Relación Carbono-Nitrógeno (C/N)**

Los microbios siempre consumen estos elementos en determinada proporción, medidos por la relación carbono-nitrógeno (C/N) que contiene la materia orgánica. Existen muchos criterios en lo referente a esta relación, pero se reconoce en general como aceptable una relación C/N de 20-30:1.

Las excretas de humanos y de animales son ricos en nitrógeno, con una relación C/N inferior a 25:1, durante la fermentación tienen una mejor velocidad de biodegradación y de generación de gas; en cambio los residuos agrícolas son ricos en carbono, con

una relación C/N superior a 30:1, pero con una generación más lenta de gas en el proceso de digestión (*Guevara Vera, 1996*).

En general las materias primas ricas en carbono producen más gas que las ricas en nitrógeno, así mismo es más rápida la producción de gas a partir de materias primas nitrogenadas (excretas), que las ricas en carbono (paja y tallos). Mientras en los primeros 10 días de fermentación las materias primas nitrogenadas generan de 34.4%-46% del total de gas producido, las ricas en carbono solo aportan el 8.8% (*FAO, 1996*).

Por ello para conseguir un buen rendimiento de gas en forma constante durante la fermentación, es conveniente combinar proporciones adecuadas de materiales con bajo y alto rendimiento y de distintas velocidades de generación; también es conveniente agregar las materias primas ricas en nitrógeno a las materias primas de alta relación C/N, a fin de bajar esta relación. Por ejemplo, residuos de animales y humanos se aplica a la paja y a los tallos.

### **3.3.3. Concentración de la carga**

Para la producción de gas, tratamiento de los efluentes y operación del reactor no es conveniente que la carga a degradar este muy concentrada ni muy diluida, se recomienda una concentración de 5-10%. Sobre la base de los sólidos totales de la carga pueden calcularse la concentración de los lodos, la cantidad de agua que habrá que agregar y las proporciones de los componentes.

### **3.3.4. Temperatura**

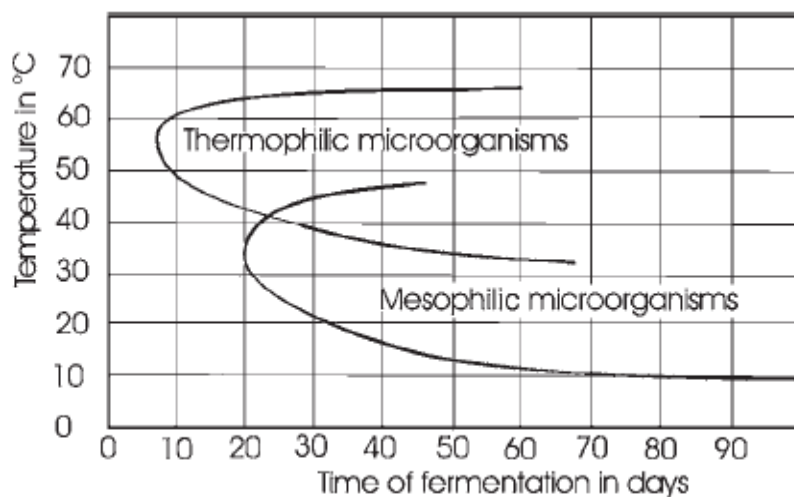
Es uno de los factores que tiene mayor relevancia en el proceso anaeróbico, ya que define las zonas en donde el proceso puede llevarse a cabo ya sea por la latitud y/o la altura. También es vista como el factor en potencia para aumentar la eficiencia de los sistemas, principalmente cuando de saneamiento se trata. La temperatura afecta

el tiempo de retención para la digestión y degradación del material dentro del digestor, la degradación se incrementa en forma geométrica con los aumentos de la temperatura de trabajo, además se incrementa la producción de gas.

Una forma de aumentar la eficiencia del sistema es calentando el efluente, para ello se hace circular agua caliente por un serpentín colocado dentro de la cámara de fermentación, también se utiliza bujías de calentamiento, pero tienen el inconveniente que el calor no se distribuye uniformemente en el efluente. Finalmente el ciclo digestivo al ser más rápido a altas temperaturas, determina que la capacidad del digestor debe ser mayor a menores temperaturas que a altas temperaturas.

La siguiente gráfica de temperatura (Figura 3.4) muestra 2 puntos óptimos para las bacterias acidificantes. El primer punto entre 32 – 42°C para los microorganismos mesófilos y una temperatura más alta a 48 -55°C para los microorganismos termofílicos. La mayoría de los microorganismos metanogénicos pertenecen al grupo mesofílicos, sólo unos pocos son termófilos. Existen otros que son capaces de producir metano a bajas temperaturas (0.6-1.2°C), como en los suelos con permafrost (Deublein&Steinhauser, 2008).

**Figura 3.4. Influencia de la Temperatura sobre el tiempo de fermentación**



Fuente: Dieter Deublein, Angelika Steinhauser. "Biogas from Waste and Renewable Resources". WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Alemania, 2008.

La temperatura más baja a la que los microorganismos pueden crecer es a  $-11^{\circ}\text{C}$ , y los más sensibles a las variaciones de temperatura son los microorganismos metanogénicos termófilos, incluso a pequeñas variaciones en la temperatura pueden generar un cambio sustancial en su actividad. Por eso la temperatura se debe de mantener en un rango de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ . Para los microorganismos mesofílicos las temperaturas entre  $40-45^{\circ}\text{C}$  son críticas porque pierden irreversiblemente su actividad.

La temperatura también afecta en la solubilidad del oxígeno. Para la fase anaerobia de formación de metano son recomendables las altas temperaturas ya que el oxígeno es menos soluble. En cambio para la fase de hidrólisis se recomienda temperaturas menores ya que los microorganismos que actúan en esta fase requieren oxígeno para poder degradar a los compuestos complejos. La mayor parte de estos microorganismos son mesofílicos.

### **3.3.5. Valor de pH**

El valor óptimo para la digestión metanogénica es de 6.5-7.5 (aunque normalmente el rango es de 6.7 a 7.5 ya que sólo la *Methanosarcina* puede mantenerse debajo del pH de 6.7), cuando baja de 5 o sube de 8 puede inhibir el proceso de fermentación o incluso detenerlo. Normalmente cuando se trabaja con residuos domésticos y agrícolas, la dinámica del mismo proceso ajusta el pH.

Un descenso en el valor del pH acompañado de un incremento en las emisiones de  $\text{CO}_2$  indica que hay una perturbación en el proceso de fermentación. El primer signo de acidificación es el aumento en la concentración del ácido propiónico. Las medidas que se pueden tomar para solventar este problema son:

- Detener el suministro del sustrato para que las bacterias metanogénicas puedan degradar el ácido.
- Aumento del tiempo de residencia.

- Remoción continua de los ácidos.
- Adición de sustancias neutralizantes como lechada de cal ( $\text{CaO}$ ,  $\text{Ca(OH)}_2$ ), carbonato de sodio y solución de soda caustica.
- Adición de agua.
- Vaciar y cargar de nuevo el reactor.

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

Los promotores son materiales que pueden fomentar la degradación de la materia orgánica y aumentar la producción de gas; entre ellos tenemos enzimas, sales inorgánicas, se pueden emplear urea, carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Los inhibidores, son aquellos factores, que inhiben la actividad vital de los microbios.

Cuando se carga el digestor, es útil agregar celulosa para promover el proceso y la producción de gas.

La urea y el carbonato de calcio han dado buenos resultados. El primero acelera la producción de metano y la degradación del material, el segundo es útil para la generación de gas y para aumentar el contenido de metano en el gas.

En relación a los inhibidores, por la naturaleza biológica del proceso son muchos los factores que afectan la actividad de los microorganismos. La alta concentración de ácidos volátiles (más de 2000 ppm en la fermentación mesofílica y de 3600 ppm para la termofílica). La excesiva concentración de amoníaco y nitrógeno, destruyen las bacterias, todo tipo de productos químicos agrícolas, en especial los tóxicos fuertes aún en ínfimas proporciones podrían destruir totalmente la digestión normal. Muchas sales como los iones metálicos son fuertes inhibidores.

En la tabla 3.4 se muestran algunos valores correspondientes a las concentraciones de ciertas sustancias que pueden ser inhibidores comunes. Sin embargo estos valores deben tomarse como orientativos puesto que las bacterias intervinientes

pueden con el tiempo adaptarse a condiciones que en un principio las afectaba marcadamente.

**Tabla 3.4. Concentración de algunos inhibidores comunes de las bacterias que intervienen en el proceso de fermentación anaeróbica**

Inhibidores	Concentración Inhibidora
Sulfatos (SO <sub>4</sub> )	5000 ppm
Cloruro de Sodio (NaCl)	40000 ppm
Nitrato (según contenido de Nitrógeno)	0.05 mg/ml
Cobre (Cu)	100 mg/L
Cromo (Cr)	200 mg/L
Níquel (Ni)	200-500 mg/L
CN (Después que se han domesticado las bacterias metanogénicas a 2-10 mg/ml)	25 mg/L
ABS (Detergente sintético)	20-40 mg/L
Sodio (Na)	3500-5500 mg/L
Potasio (K)	2500-4500 mg/L
Calcio (Ca)	2500-4500 mg/L
Magnesio (Mg)	1000-1500 mg/L

Fuente: <http://www.textoscientificos.com/energia/biogas/factores>

## **4. SUSTRATOS PARA EL PROCESO DE DIGESTIÓN**

Existen muchos tipos de sustratos que presentan buenas características para que el proceso de fermentación se lleve a cabo con éxito, desde estiércol animal y casi cualquier desecho orgánico. Como se sabe el análisis y utilización de biodigestores utilizando como sustrato estiércol animal ha sido muy amplio, pero, como se ha definido con anterioridad, los sustratos que se pretenden usar son los residuos orgánicos provenientes de la cafetería de la Universidad de El Salvador, considerando que gran parte de estos (alrededor del 60%) son del tipo orgánico (Núñez *et Al*, 2000), además, dentro de la Universidad de El Salvador se produce gran cantidad de residuos de la poda del césped que pueden utilizarse también para este fin.

### **4.1. Tipos de sustratos y su aporte al proceso de digestión**

En general, todos los tipos de biomasa pueden ser usados como sustratos mientras su contenido de carbohidratos, proteínas, grasas, celulosa y hemicelulosa sea más alto.

Es importante tomar en cuenta los siguientes aspectos al momento de seleccionar la biomasa:

- El contenido de materia orgánica debe ser apropiado para la selección del proceso de fermentación.
- El valor nutricional de la sustancia orgánica, de ahí el potencial para la formación de gas, debe ser lo más elevada posible.
- El sustrato debe estar libre de agentes patógenos y otros organismos, de ser posible debe ser inocuo antes de la fermentación.
- El contenido de sustancias nocivas en la basura debe ser baja para permitir que el proceso de fermentación tenga lugar sin problemas.
- La composición del biogás deben ser adecuada para una mayor aplicación.

- La composición de la fermentación de residuos debe ser tal que pueda ser utilizado, por ejemplo, como fertilizante.

La formación de metano es un proceso biológico natural que se produce cuando la materia orgánica (biomasa) se descompone en una atmósfera húmeda en ausencia de aire, pero en presencia de un grupo de microorganismos naturales que son metabólicamente activos, es decir, las bacterias metanogénicas.

Existen muchos sustratos orgánicos que favorecen este proceso de fermentación. A continuación se presenta una clasificación de acuerdo a su origen:

#### **a) Residuos forestales**

Los residuos de procesos forestales son una importante fuente de biomasa que actualmente es poco explotada. Se considera que de cada árbol extraído para la producción maderera, sólo se aprovecha comercialmente un porcentaje cercano al 20%. Se estima que un 40% es dejado en él, en las ramas y raíces, a pesar de que el potencial energético es mucho y otro 40% en el proceso de aserrío, en forma de astillas, corteza y aserrín (*Deublein&Steinhauser, 2008*).

La mayoría de los desechos de aserrín son aprovechados para generación de calor, en sistemas de combustión directa, en algunas industrias se utilizan para la generación de vapor, no así el 40% constituido por ramas y raíces.

#### **b) Residuos agrícolas**

La agricultura genera cantidades considerables de desechos: se estima que, en cuanto a desechos de campo, el porcentaje es más del 60%, y en desechos de proceso, entre 20% y 40% (*Deublein&Steinhauser, 2008*).



Al igual que en la industria forestal, muchos residuos de la agroindustria son dejados en el campo. Aunque es necesario reciclar un porcentaje de la biomasa para proteger el suelo de la erosión y mantener el nivel de nutrientes orgánicos, una cantidad importante puede ser recolectada para la producción de energía. Ejemplos comunes de este tipo de residuos son el arroz, el café y la caña de azúcar.

Por otro lado, las granjas producen un elevado volumen de residuos húmedos en forma de estiércol de animales. La forma común de tratar estos residuos es esparciéndolos en los campos de cultivo, con el doble interés de disponer de ellos y obtener beneficio de su valor nutritivo. Sin embargo, cuando existen cantidades elevadas de estiércol esta práctica puede provocar una sobre fertilización de los suelos y la contaminación de las cuencas hidrográficas.

### **c) Residuos industriales**

La industria alimenticia genera una gran cantidad de residuos y subproductos, que pueden ser usados como fuentes de energía, los provenientes de todo tipo de carnes (avícola, vacuna, porcina) y vegetales (cáscaras, pulpa) cuyo tratamiento como desechos representan un costo considerable para la industria. Otras industrias también generan grandes cantidades de residuos que pueden ser convertidos para su aprovechamiento energético, entre estas tenemos a la industria del papel, del plástico, las destilerías, etc.

### **d) Residuos domésticos**

Los centros urbanos generan una gran cantidad de residuos en muchas formas, por ejemplo: residuos alimenticios, papel, cartón, madera y aguas negras. La carencia de sistemas adecuados para el procesamiento de estos residuos genera grandes problemas de contaminación de suelos y cuencas, sobre todo por la inadecuada disposición de la basura y por sistemas de recolección y tratamiento con costos elevados de operación.

Por otro lado, la basura orgánica en descomposición produce compuestos volátiles (metano, dióxido de carbono, entre otros) que contribuyen a aumentar el efecto invernadero. Estos compuestos tienen considerable valor energético que puede ser utilizado para la generación de energía limpia.

En la tabla 4.1 se presenta un listado de algunas materias orgánicas o residuos de procesos con sus respectivos porcentajes de materia seca y rendimientos posibles de obtener, todo en función de los tipos de residuos.

**Tabla 4.1. Sustratos para la producción de biogás con sus respectivos valores de materia seca y rendimientos**

<b>Residuos</b>	<b>Materia Seca (%)</b>	<b>Rendimiento [m<sup>3</sup>/kg ] Tiempo de retención [d]</b>	<b>Comentario</b>
Residuos de manzana	2-3	0.5 3-10	No dañino Sin complejidad
Contenido estomacal de cerdos	12-15	0.3-0.4 62	Sin complejidad
Papa haulm	25	0.8-1.0 -	Inofensivo Baja complejidad
Residuos vegetales	5-20	0.4 8-20	No dañino Baja complejidad
Pan seco	65-90	0.8-1.2 -	Inofensivo Sin complejidad
Césped	21-40	0.6-0.7 -	Inofensivo Baja complejidad
Excretas de ganado (frescas)	25-30	0.6-0.8 -	Inofensivo Sin complejidad
Excretas de pollo	10-29	0.3-0.8 -	Inofensivo Sin complejidad
Excretas de cerdo	20-25	0.27-0.45 -	Inofensivo Sin complejidad
Residuos de cereales	86	0.2-0.5 -	Inofensivo Baja complejidad
Residuos de maíz	86	0.4 – 1.0 -	Inofensivo Baja complejidad
Plasma sanguíneo	30-40	0.66 – 1.36 43 – 63	Proceso previo Sin complejidad

Fuente: Dieter Deublein, Angelika Steinhauser. "Biogas from Waste and Renewable Resources". WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Alemania, 2008.

#### 4.1.1. Estimación del volumen de basura generado y aprovechable para el proceso de digestión

Según los datos reportados por Núñez et Al, 2000 la producción de residuos para los contenedores de basura es de 185.50 Kg/día (véase la Tabla 2.3) y de 56.02 Kg/día de residuos para las cafeterías (véase la tabla 2.4), de manera que al calcular en base a las composiciones de estos residuos dadas en las tablas 2.5 y 2.6 se obtiene que se cuenta con un aproximado de 122.58 Kg de residuos de jardín y 31.75 Kg de residuos de comida al día, es evidente por lo tanto que la cantidad es suficiente como para que estos residuos producidos en la Universidad puedan ser utilizados en un proceso de digestión.

Además, Nuñez et Al 2000 determinaron el porcentaje de carbono, hidrogeno y el nitrógeno total a través del método de Micro Kjeldahl. Los resultados de estos análisis realizados en la Facultad de Agronomía y en la Planta Piloto de la Escuela de Ingeniería Química se presentan en la Tabla 4.2, los cuales nos muestran que los residuos provenientes de la Universidad de El Salvador pueden ser utilizados en la digestión metanogénica, por su alto contenido de carbono.

**Tabla 4.2. Análisis fisicoquímicos de los residuos de la Universidad de El Salvador**

ANALISIS FISICOQUIMICOS	VALORES
Nitrógeno Total	0.617%
Carbono Total	26.84%
Materia Orgánica	46.17%
Azufre	Negativo
Fósforo	0.59% (%P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )
Hidrógeno	3.08%
PH	6.49

Fuente: Núñez Rivas, Ramírez Menjívar, Yáñez Gutiérrez. "Propuesta de Residuos Sólidos en la Universidad de El Salvador". Universidad de El Salvador, Ciudad Universitaria, Marzo de 2000.

## 5. PRODUCTOS DEL PROCESO DE DIGESTIÓN

Como se ha mencionado los productos principales del proceso de la fermentación metanogénica son: Biogás y Biofertilizante.

En los apartados del 5.1 al 5.2 se describen las características de los dos productos de importancia de la fermentación metanogénica.

### 5.1. El biogás comparado con otros gases que contienen metano

El biogás consiste principalmente de metano y dióxido de carbono, pero también contiene muchas otras impurezas. El biogás con un contenido de metano superior al 45% es inflamable. En general el metano tiene las siguientes características (Tabla 5.1):

**Tabla 5.1. Características del biogás**

<b>Composición</b>	55-70% de metano ( $CH_4$ ) 30- 45% dióxido de carbono ( $CO_2$ ) Trazas de otros gases
<b>Contenido energético</b>	6.0 – 6.5 kWh $m^{-3}$
<b>Equivalente de gasolina</b>	0.6- 0.65 l gasolina/ $m^3$ biogás
<b>Limites de explosión</b>	6- 12% de biogás en el aire
<b>Temperatura de ignición</b>	650- 750 $^{\circ}C$ (con el contenido de metano de >45 %)
<b>Presión crítica</b>	75- 89 bar
<b>Temperatura crítica</b>	-82.5 $^{\circ}C$
<b>Densidad normal</b>	1.2 Kg $m^{-3}$
<b>Olor</b>	Huevos en descomposición (si el gas se desulfuriza es difícilmente perceptible)
<b>Masa molar</b>	16.043 Kg $Kmol^{-1}$

Fuente: Dieter Deublein and Angelika Steinhäuser "Biogas from waste and renewable resources"

Wiley – VCH, 2008

El gas con contenido de metano más conocido es el gas natural. Existen muchas variantes del gas natural con muchos orígenes. Difieren en su composición química, sus fracciones de otros elementos químicos y la línea de presión del combustible.

El Tabla 5.2 muestra las comparaciones de las especificaciones de los gases naturales (biogás de la agricultura, biogás de plantas de alcantarillados, biogás de rellenos sanitarios). Debido a estas composiciones variables, no se permite que el gas de rellenos sanitarios sea mezclado con gas natural. Por ello la tabla incluye una composición típica del gas de rellenos sanitarios.

**Tabla 5.2. Comparación del Biogás obtenido de diversas fuentes**

Compuestos del gas	Unidades	Biogás de aguas negras	Biogás de la agricultura	Biogás de rellenos sanitarios
Metano	% en volumen	65 – 75	45 – 75	45 – 55
Etano	% en volumen	< 300 mg/m <sup>3</sup> (estos parámetros son mandatorios en países como Alemania)		
Propano	% en volumen			
Butano	% en volumen			
Pentano	% en volumen			
Hexano	% en volumen			
Heptanos	% en volumen			
Octano	% en volumen			
Benceno	% en volumen			
Dióxido de carbono	% en volumen			
Monóxido de carbono	% en volumen	< 0.2	< 0.2	< 0.2
Nitrógeno	% en volumen	3.4	0.01 – 5.00	10 – 25
Oxígeno	% en volumen	0.5	0.01 – 2.00	1 – 5
Hidrógeno	mg/m <sup>3</sup>	Trazas	0.5	0.00
Sulfuro de Hidrógeno	mg/m <sup>3</sup>	< 8000	10 – 30,000	< 8000
Sulfuro de Mercaptano	mg/m <sup>3</sup>	0	<0.1 – 30	N. A.
Sulfuro total	mg/m <sup>3</sup>	N. A.	N. A.	N. A.
Amonio	mg/m <sup>3</sup>	Trazas	0.01 – 2.50	Trazas
Siloxanos	mg/m <sup>3</sup>	< 0.1 – 5.0	Trazas	< 0.1 – 5.0
Benceno, Tolueno, Xileno	mg/m <sup>3</sup>	< 0.1 – 5.0	0.00	< 0.1 – 5.0
CFC	mg/m <sup>3</sup>	0	20 – 1000	N. A.
Aceites	mg/m <sup>3</sup>	Trazas	Trazas	Trazas
Valor calorífico neto	KWh/m <sup>3</sup>	6.0 – 7.5	5.0 – 7.5	4.5 – 5.5
Densidad normal	Kg/m <sup>3</sup>	1.16	1.16	1.27
Densidad relativa al aire	-	0.9	0.9	1.1
Punto de rocío	°C	35	35	0-25
Humedad relativa	%	100	100	<100

Fuente: Adaptado de Dieter Deublein and Angelika Steinhäuser "Biogas from waste and renewable resources" Wiley –VCH, 2008

## 5.2. Componentes principales del biogás

La Tabla 5.3 ofrece una lista de los componentes típicos del biogás y sus impactos en la calidad del biogás.

**Tabla 5.3. Componentes comunes e impurezas presentes en el biogás**

Componente	Contenido	Efecto
CO <sub>2</sub>	25 -50 % en volumen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disminuye el poder calorífico</li> <li>• Causa corrosión si el gas se humedece (ácido carbónico en baja concentración)</li> <li>• Daña celdas de combustible alcalinas</li> </ul>
H <sub>2</sub> S	0 – 0.5 % en volumen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efecto corrosivo en equipos y sistemas de tuberías (fatiga por corrosión): muchos establecen un límite de 0.05 en volumen.</li> <li>• Emisiones de SO<sub>2</sub> después de los quemadores o emisiones de H<sub>2</sub>S cuando la combustión es incompleta – el límite máximo es 0.1 % en volumen</li> </ul>
NH <sub>3</sub>	0 – 0.05% en volumen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emisiones de NO<sub>x</sub> dañan las células de combustibles</li> <li>• Incrementa las propiedades antidetonantes de los motores.</li> </ul>
Vapor de agua	1 – 5% volumen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Causa corrosión en sistemas de tuberías y equipos.</li> <li>• La condensación daña instrumentos</li> <li>• Riesgo de congelamiento en tuberías y boquillas en países fríos</li> </ul>
Polvo	> 5 μm	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bloquea boquillas y celdas de combustible</li> </ul>
N <sub>2</sub>	0 – 5 % en volumen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disminuye el poder calorífico</li> <li>• Incrementa las propiedades antidetonantes de los motores</li> </ul>
Siloxanos	0 – 50 mg/m <sup>3</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Actúa como abrasivo y daña motores</li> </ul>

*Fuente: Adaptado de Dieter Deublein and Angelika Steinhäuser "Biogas from waste and renewable resources" Wiley – VCH, 2008*

Los componentes del biogás son específicos del sustrato y deberían ser revisados regularmente a intervalos largos de tiempo.



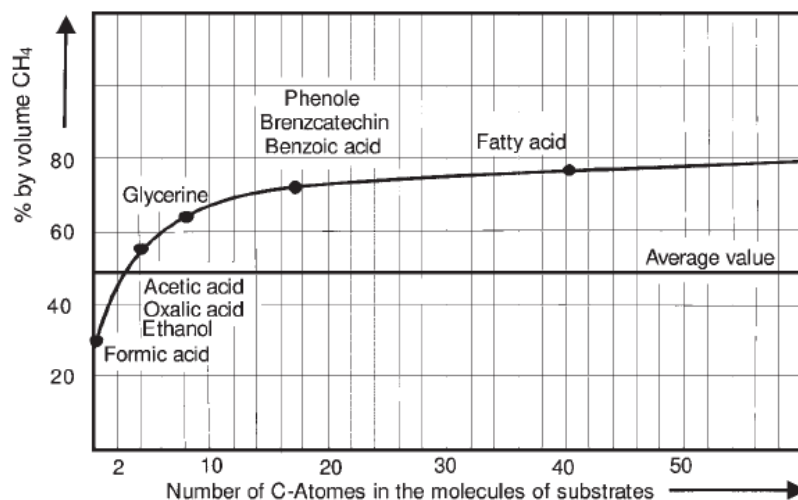
De acuerdo a la experiencia de algunas plantas de biogás con diversos sustratos se ha notado que la combinación de biomasa y co-sustratos ayuda a disminuir el contenido de CO<sub>2</sub> producido durante el proceso de fermentación. Con grasa como co-fermento, el contenido de CO<sub>2</sub> es cerca del 35% menor que el obtenido con solo fermentar el estiércol (cerca del 40%) (Deublein&Steinhauser, 2008).

### 5.2.1. El metano y el dióxido de carbono

La composición del gas (referente más precisamente a la razón de dióxido de carbono a metano) puede ser controlada solo parcialmente. Depende de los factores siguientes:

- a) Adición de cadenas hidrocarbonadas largas, ejemplo: materiales ricos en grasas, pueden ayudar a mejorar la calidad del gas, sin embargo agregados en cantidades razonables y no tanto como para evitar la acidez. Como se logra apreciar en la Figura 5.1, el contenido de metano crece de acuerdo al número de átomos de carbonos del sustrato.

**Figura 5.1. Relación de contenido de Metano respecto al contenido de átomos de Carbono en el sustrato alimentado**



Fuente: Dieter Deublein and Angelika Steinhauser "Biogas from waste and renewable resources"

Wiley-VCH, 2008

- b) Generalmente, la descomposición anaeróbica de biomasa mejora con mayores tiempos de retención. Al final de este tiempo el contenido de metano se incrementa desproporcionalmente, en especial tan pronto como el proceso de hidrólisis, que libera CO<sub>2</sub>, empieza a terminarse.
- c) El proceso de fermentación toma lugar mucho más rápido y más uniformemente si el material del bioreactor está homogéneamente activado. El tiempo de reacción será más corto.
- d) Si el sustrato tiene alto contenido de estructuras de lignina, el tipo de desintegración del sustrato se vuelve importante. La estructura deberá ser rota o desfibrada en vez de cortada.
- e) Un contenido alto de líquido en el bioreactor resulta en un contenido alto de CO<sub>2</sub> disuelto en el agua, reduciendo los niveles de CO<sub>2</sub> en la fase gaseosa.
- f) Entre mayor sea la temperatura durante el proceso de fermentación, más bajo el contenido de CO<sub>2</sub> en el agua.
- g) Una alta presión conlleva a una alta concentración de CO<sub>2</sub> en el agua. Esto podría afectar la calidad del gas en forma positiva cuando el material del fondo del reactor es removido, ya que el CO<sub>2</sub> se descarga al mismo tiempo.
- h) El sustrato tiene que haber reaccionado completamente antes de sacarlo para obtener mayor descomposición.

### **5.2.2. Nitrógeno y Oxígeno**

En general el biogás contiene nitrógeno y oxígeno en una razón de 4:1. Ambos componentes del aire son introducidos cuando la ventilación se abre para remover el sulfuro.

Pequeñas cantidades de aire pueden infiltrarse en las tuberías cuando no están lo suficiente ajustadas.

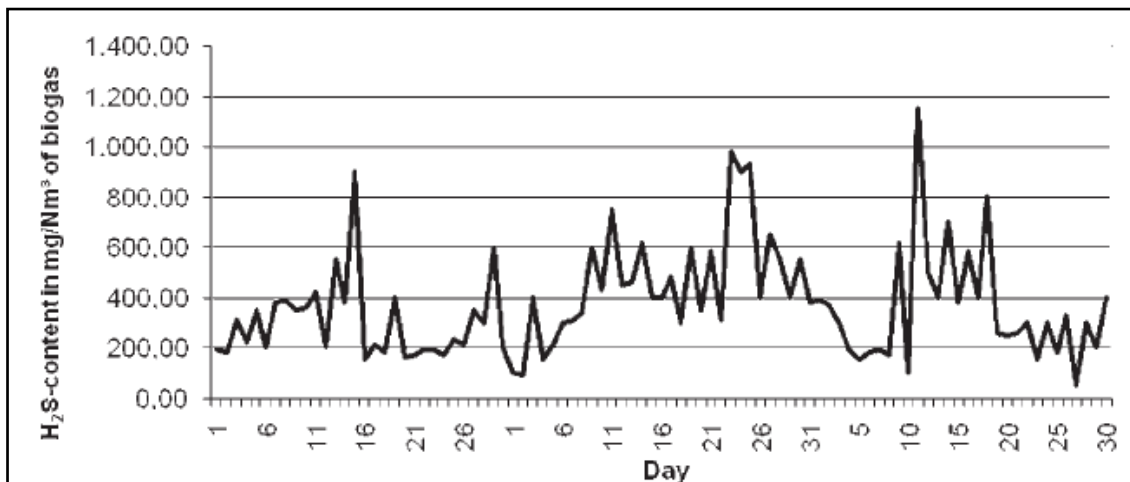
### 5.2.3. Sulfuro de Hidrógeno

El contenido de sulfuro de hidrógeno en el gas depende del proceso y el tipo de desecho. Sin un paso de desulfuración, la concentración de  $H_2S$  normalmente excederá el 0.2 % en volumen. Si un sustrato viscoso es fermentado, el contenido de  $H_2S$  es más bajo que cuando se usa un sustrato líquido.

Además es más bajo con desperdicios biológicos comparado con sobras, estiércol líquido, y co-sustratos agrícolas.

El contenido de sulfuro de hidrógeno en el biogás esta sujeto a variación considerable en el curso del día, véase la Figura 5.2.

**Figura 5.2. Contenido de  $H_2S$  en el biogás dependiendo de los días**



Fuente: Dieter Deublein and Angelika Steinhauser "Biogas from waste and renewable resources"  
Wiley-VCH, 2008

Deberá ser objetivo del proceso tratar de mantener el contenido de sulfuro de hidrógeno lo más bajo posible, para no dañar los equipos expuestos al gas natural. Por lo tanto usualmente el gas se desulfura mientras aún se encuentra en el reactor. Este paso de desulfuración se lleva a cabo al aplicar una pre-desulfuración en el reactor. Este paso intermedio puede ayudar a reducir el contenido de sulfuro de hidrógeno a menos de 70 mg/m<sup>3</sup> cuando se usan co-substratos o menores a 310 mg/m<sup>3</sup> en plantas con estiércol líquido puro para la fermentación. Pero aún con la desulfuración el contenido en el biogás es relativamente alto.

#### 5.2.4. Otros compuestos del Biogás

En el Tabla 5.4 se muestran otros componentes del Biogás que se encuentran en menores proporciones.

**Tabla 5.4. Algunos componentes del Biogás que se encuentran a bajas concentraciones**

Componente	Observación
Monóxido de Carbono	La concentración en el biogás esta abajo del limite de detección de 0.2% en volumen
Amoniaco	La concentración se encuentra usualmente muy baja (< 0.1 mg/m <sup>3</sup> de biogás) Concentraciones mayores a 150 mg/m <sup>3</sup> perjudica el comportamiento de combustión
Cloruros, Fluoruros y Mercaptanos	El biogás puede tener concentraciones más bajas que el limite de detección de 0.1 mg/m <sup>3</sup>
Benceno, Tolueno y Xileno	El biogás puede tener concentraciones más bajas que el limite de detección de 1 mg/m <sup>3</sup>
Hidrocarburos aromáticos policíclicos	Máximo de concentración en el biogás de 0.03 µg/m <sup>3</sup>

*Fuente: Adaptado, Dieter Deublein and Angelika Steinhauser "Biogas from waste and renewable resources" Wiley – VCH, 2008*

### **5.3. Biofertilizante**

Los biofertilizantes o biopreparados se originan a partir de la fermentación de materiales orgánicos, como estiércoles de animales, plantas verdes y frutos. La fermentación puede ocurrir con la presencia de oxígeno, caso en el cual se le llama aeróbica, o sin su presencia, caso en el cual se le denomina anaeróbica.

El biofertilizante se origina a partir de intensa actividad de microorganismos que se encuentran disponibles en la naturaleza. Estos microorganismos son muy beneficiosos en la agricultura.

Los biofertilizantes pueden ser aplicados directamente sobre los cultivos por vía foliar o sobre suelos preferencialmente cuando estén con coberturas. También pueden ser aplicados directamente sobre las aboneras para enriquecerlas.

#### **5.3.1. Biol (Fertilizante Foliar Líquido)**

Según Aparcana et Jansen, (2008), el biol es la fracción líquida resultante del fango proveniente del fermentador o biodigestor. Este “fango” es decantado o sedimentado obteniéndose una parte líquida a la cual se le llama “Biol”. Aproximadamente el 90% del material que ingresa al Biodigestor se transforma a Biol. Esto depende naturalmente del tipo de material a fermentar y de las condiciones de fermentación. En la Tabla 5.5 se presentan las composiciones de cuatro tipos diferentes de Biol.

**Tabla 5.5. Composición Química del Biol**

<b>Componente</b>	<b>Fuente 1</b>	<b>Fuente 2</b>	<b>Fuente 3</b>	<b>Fuente 4</b>
pH	7.96	8.1	No menciona	6.7-7.9
Materia Seca	4.18%	4.2%	No menciona	1.4%
Nitrógeno Total	2.63 g/Kg	2.4 g/Kg	0.2 g/Kg	0.9 g/Kg
NH <sub>4</sub>	1.27 g/Kg	1.08 g/Kg	No menciona	No menciona
Fósforo	0.43 g/Kg	1.01 g/Kg	0.076 g/Kg	0.048 mg/Kg
Potasio	2.66 g/Kg	2.94 g/Kg	4.2 g/Kg	0.29 mg/Kg
Calcio	1.05 g/Kg	0.50 g/Kg	0.056 g/Kg	2.1 g/Kg
Magnesio	0.38 g/Kg	No menciona	0.131 g/Kg	0.135%
Sodio	0.404 g/Kg	No menciona	2.1 g/Kg	No menciona
Azufre	No menciona	No menciona	6.4 g/Kg	0.33 mg/L
Carbono	No menciona	No menciona	1.1 g/Kg	0.23-0.30
Aluminio	No menciona	No menciona	0.04 mg/Kg	No menciona
Boro	No menciona	No menciona	0.56 mg/Kg	No menciona
Zinc	No menciona	No menciona	No menciona	0.05 mg/L

*Fuente 1: biol de estiércol de vacuno (Pötsch, 2004)*

*Fuente 2: Biol de mezcla de sustratos: estiércol de vacunos y restos de comida casera (Zethner, G., 2002)*

*Fuente 3: Biol de banano promedio hojas, tallos y frutos Clark et Al (2007)*

*Fuente 4: Biol de Estiércol de vacuno. ITINTEC, 1980.*

Como se observa, la composición depende mucho del tipo de residuos que entran en el biodigestor. Se puede decir que cada Biol es "único". De los datos reportados en el tabla se puede observar que el Biol presenta en lo común, una baja presencia de materia seca (sólidos totales) que van entre 1-5%. Respecto a la cantidad de sus nutrientes (Nitrógeno, Fósforo, Potasio, Magnesio, etc.) estos varían según la materia prima que haya sido fermentada. El ratio de N-P-K-Mg, etc. del material saliente (ya fermentado entonces Biol y Biosol) sería casi 1:1 con respecto al material entrante (materia prima ingresada al biodigestor) También la disponibilidad de estos nutrientes para la planta mejora notablemente (ejemplo: aumenta el nitrógeno del Amonio).

El uso del Biol es principalmente como promotor y fortalecedor del crecimiento de la planta raíces y frutos, gracias a la producción de hormonas vegetales, las cuales son desechos del metabolismo de las bacterias típicas de este tipo de fermentación anaeróbico (que no se presentan en el compost) Estos beneficios hacen que se requiera menor cantidad de fertilizante mineral u otro empleado.

Las hormonas vegetales o fitohormonas se definen como fitorreguladores del desarrollo producidas por las plantas. A bajas concentraciones regulan los procesos fisiológicos y promueven el desarrollo físico de las plantas.

Hay cinco grupos hormonales principales: Adeninas, Purinas, Auxinas, Giberelinas y Citoquininas, todas estas estimulan la formación de nuevas raíces y su fortalecimiento. También inducen la floración, tienen acción fructificante, estimulan el crecimiento de tallos, hojas, etc. El Biol, cualquiera que sea su origen, cuenta con estas fitohormonas por lo que encuentra un lugar importante dentro de la práctica de la Agricultura Orgánica, al tiempo que abarata costos y mejora la productividad y calidad de los cultivos.

### **5.3.2. Ventajas del uso del Biol como fertilizante**

Entre las ventajas por el uso del Biol como fertilizante pueden mencionarse (*Aparcana et Jansen, 2008*):

- El uso del Biol permite un mejor intercambio catiónico en el suelo. Con ello se amplía la disponibilidad de nutrientes del suelo. También ayuda a mantener la humedad del suelo y a la creación de un microclima adecuado para las plantas.
- El Biol se puede emplear como fertilizante líquido, es decir para aplicación por rociado.
- También se puede aplicar junto con el agua de riego en sistemas automáticos de irrigación.

- Siendo el Biol una fuente orgánica de fitoreguladores en pequeñas cantidades es capaz de promover actividades fisiológicas y estimular el desarrollo de las plantas, sirviendo para: enraizamiento (aumenta y fortalece la base radicular), acción sobre el follaje (amplía la base foliar), mejora la floración y activa el vigor y poder germinativo de las semillas, traduciéndose todo esto en un aumento significativo de las cosechas.
- Pruebas realizadas con diferentes cultivos muestran que usar Biol solo sería suficiente para lograr la misma o mayor productividad del cultivo que empleando fertilizantes químicos.

### **5.3.3. Biosol (fertilizante sólido similar al compost)**

Según AparcanaJansen, (2008), el Biosol es el resultado de separar la parte sólida del “fango” resultante de la fermentación anaeróbica dentro del Fermentador. Dependiendo de la tecnología a emplear, este Biosol tratado puede alcanzar entre 25% a solo 10% de humedad (de hecho esa humedad es principalmente Biol residual) Su composición depende mucho de los residuos que se emplearon para su fabricación (en el fermentador) Se puede emplear solo o en conjunto con compost o con fertilizantes químicos.



**Tabla 5.6. Características Generales del Biosol Fresco (Fertilizante Sólido) después de la Fermentación del Estiércol Vacuno**

<b>Composición</b>	<b>[%]</b>
Agua	15.7
Sustancia Orgánica Seca	60.3
pH	7.6
Nitrógeno Total	2.7
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	1.6
Potasio (K <sub>2</sub> O)	2.8
Calcio (CaO)	3.5
Magnesio (MgO)	2.3
Sodio (Na)	0.3
Azufre (S)	0.3
Boro (B) (ppm)	64.0

*Fuente: Aparcana, S. (2005)*

La composición detallada en el tabla 5.6 corresponde a un Biosol proveniente de estiércol de vacuno, que es el más común, pero a la vez uno de los más bajos en nutrientes ya que el estiércol es un material que ya ha sido digerido parcialmente por el animal, por lo que no contiene muchos nutrientes. Como se dijo anteriormente, para mejorar la calidad del Biosol, este debe provenir de una mezcla de residuos más rica y variada.

En el tabla 5.7 se puede comparar la diferencia entre el contenido de nutrientes entre los bioabonos a partir de guano de vaca y la mezcla del mismo con residuos vegetales.

**Tabla 5.7. Comparación de la composición de Nutrientes del Estiércol Vacuno y Mezclas de Biol + Biosol (% en peso de materia seca)**

Sustrato	Materia Seca	Materia Seca Orgánica	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO
Guano de Vaca (input)	6.6	80	6.2	2.7	4.3	0.9
Biol + Biosol a partir de guano de vaca	4.0	65	8.6	4.1	7.3	0.4
Biol + Biosol a partir de residuos vegetales (frutas, verduras, etc.)	2.9	60	11.1	22.0	5.2	1.6

Fuente: Manual de Biogás (2003)

#### 5.3.4. Ventajas en el uso del Biosol (fertilizante sólido)

Entre las ventajas por el uso del Biosol como fertilizante pueden mencionarse (Aparcana et Jansen, 2008):

- El uso de este abono hace posible regular la alimentación de la planta. Los cultivos son fortalecidos y ocurre una mejora del rendimiento. El uso del Biosol permite el uso intensivo del suelo mejorando a la vez la calidad del mismo.
- El Biosol confiere a los suelos arenosos una mayor cohesión mejorando con ello la retención de los nutrientes en el suelo.
- El Biosol mejora la estructura del suelo y la capacidad de retención de la humedad del mismo, esto favorece la actividad biológica en el suelo. Mejora la porosidad, y por consiguiente la permeabilidad y ventilación.
- También el Biosol puede ser combinado con la materia que va a ser compostada, con el fin de acelerar el proceso de compostaje.
- Una de las ventajas de usar el Biosol como fertilizante es que se reduce la necesidad del abono, es decir solo se necesita de 2 - 4 Ton/Ha. Si se empleara solo estiércol se necesitaría 15 - 30 Ton/Ha y si se empleara

compost se necesitaria 10 - 20 Ton /Ha. No se debe olvidar que estas cantidades son relativas y dependen mucho del tipo de suelo y del cultivo.

- Inhibe el crecimiento de hongos y bacterias que afectan a las plantas.
- Reduce la erosion del suelo.
- El Biosol cuenta con una mayor disponibilidad de nutrientes (nitrogeno, fósforo, potasio, hierro y azufre) a comparación con el estiercol, entonces esto mejora la disponibilidad del nutriente para la planta.

## 6. PROPIEDADES DE FLUJO Y TERMODINAMICAS DE LOS GASES NATURALES

Las propiedades que deben ser determinadas al trabajar con gases naturales son: gravedad específica, presión y temperatura pseudocrítica, viscosidad, factor de compresibilidad y coeficiente de compresibilidad del gas.

El conocimiento de estas propiedades es esencial para el diseño de sistemas que trabajan con estos gases.

Debido a que el biogás es una compleja mezcla de hidrocarburos livianos con una menor cantidad de compuestos inorgánicos, es siempre deseable encontrar la composición del biogás mediante mediciones y una vez la composición del gas es conocida, las propiedades antes mencionadas pueden ser estimadas usando correlaciones establecidas.

Esta sección se enfocará en la determinación de las propiedades del biogás mediante correlaciones desarrolladas por varias medidas de laboratorio.

### 6.1. Gravedad específica

La gravedad específica es definida como la razón del peso molecular aparente del gas con el del aire, que a su vez es una mezcla de gases.

El peso molecular del aire se toma usualmente como 28.97 (aproximadamente 79% es nitrógeno y el 21% es oxígeno). Por lo tanto la gravedad específica del gas a condiciones estándar será:

$$\gamma_g = \frac{MW_g}{28.97} \quad 6.1$$

Donde el peso molecular aparente del gas puede ser calculado sobre la base de la composición del gas. La composición del gas es usualmente determinada en un laboratorio y reportada como fracciones molares de los componentes del gas.

Si definimos la fracción molar por  $y_i$  del componente  $i$ -ésimo, el peso molecular aparente del gas puede ser formulado siguiendo la regla de mezclado como:

$$MW_a = \sum_{i=1}^{N_c} y_i MW_i \quad 6.2$$

Donde  $MW_i$  es el peso molecular del  $i$ -ésimo componente, y  $N_c$  es el número de componentes. Los pesos moleculares de los componentes ( $MW_i$ ) pueden ser encontrados en libros de texto de química orgánica o inorgánica. El metano puro tiene una gravedad específica igual a  $16.04/28.97 = 0.55$ .

Debido a que el gas natural es compresible, su densidad depende de la presión y la temperatura. La densidad del gas puede ser calculada a partir de la ley de los gases ideales con buena exactitud (Boyun, 2005):

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{MW_a P}{zRT} \quad 6.1.1$$

Donde  $m$  es la masa del gas y  $\rho$  es la densidad del gas. Tomando el peso molecular del aire como: 29 y  $R = 10.73 \text{ psia} - \text{ft}^3 / \text{mol} - {}^{\circ}\text{R}$ , la ecuación 6.1.1 puede ser reordenada así:

$$\rho = \frac{2.7\gamma_g p}{zT} \quad 6.1.2.$$

Donde la densidad del gas es dada en  $\text{lbm}/\text{ft}^3$ .

## 6.2. Propiedades Pseudocríticas

Similar al peso molecular aparente de un gas, las propiedades críticas de un gas pueden ser determinadas en base a las propiedades críticas de los componentes del gas natural mediante reglas de mezclado. Las propiedades críticas determinadas de esta forma son conocidas como “propiedades pseudocríticas”.

La presión pseudocrítica del gas ( $P_{pc}$ ) y temperatura pseudocrítica ( $T_{pc}$ ) son expresadas respectivamente como (Boyun, 2005):

$$P_{pc} = \sum_{i=1}^{N_c} y_i P_{ci} \quad 6.3$$

□

$$T_{pc} = \sum_{i=1}^{N_c} y_i T_{ci} \quad 6.4$$

Donde  $P_{ci}$  y  $T_{ci}$  son la presión crítica y la temperatura crítica del componente  $i$ , respectivamente.

Si la composición del gas no es conocida pero la gravedad específica está dada, la presión pseudocrítica y temperatura pueden ser determinadas mediante correlaciones como las planteadas por Boyun 2005:

$$P_{pc} = 709.64 - 58.718\gamma_g \quad 6.5$$

$$T_{pc} = 709.64 - 58.718\gamma_g \quad 6.6$$

Las cuales son válidas para  $H_2S < 3\%$ ,  $N_2 < 5\%$ , y un total de contenido inorgánico menor al 7%.

Las correcciones por impurezas siempre son necesarias. Las correcciones pueden ser hechas usando ya sea tablas o correlaciones, (Boyun, 2005) cita a (Wichert-Aziz, 1972):

$$A = y_{H_2O} + y_{CO_2} \quad 6.7$$

$$B = y_{H_2S} \quad 6.8$$

$$\varepsilon_3 = 120(A^{0.9} - A^{1.6}) + 15(B^{0.5} - B^{4.0}) \quad 6.9$$

$$T_{pc}' = T_{pc} - \varepsilon_3 \quad (\text{Temperatura crítica corregida}) \quad 6.10$$

$$P_{pc}' = \frac{P_{pc} T_{pc}'}{T_{pc} + B(1 - B)\varepsilon_3} \quad (\text{Presión crítica corregida}) \quad 6.11$$

Correlaciones para correcciones debidas a impurezas para mezclas pseudocríticas están también disponibles (*Ahmed 1989 citado por Boyun, 2005*):

$$P_{pc} = 678 - 50(\gamma_g - 0.5) - 206.7y_{N_2} + 440y_{CO_2} + 606.7y_{H_2S} \quad 6.12$$

$$T_{pc} = 326 - 315.7(\gamma_g - 0.5) - 240y_{N_2} - 83.3y_{CO_2} + 133.3y_{H_2S} \quad 6.13$$

Cuando se aplican la presión y temperatura pseudocrítica en la ingeniería del gas natural, usualmente se deducen mediante presión y temperatura pseudoreducida definidas como sigue:

$$P_{pr} = \frac{P}{P_{pc}} \quad 6.14$$

$$T_{pr} = \frac{T}{T_{pc}} \quad 6.15$$

### 6.3. Viscosidad

La viscosidad de un gas es la medida con la que un gas se resiste al flujo. La viscosidad dinámica  $\mu_g$  en centipoises (cp) es usualmente utilizada en la ingeniería del gas natural (Boyun, 2005):

$$1 \text{ cp} = 6.72 \times 10^{-4} \text{ lb/ft} \cdot \text{sec}$$

La viscosidad cinemática  $\nu_g$  se relaciona con la viscosidad dinámica mediante la densidad  $\rho_g$

$$\nu_g = \frac{\mu_g}{\rho_g} \quad 6.16$$

La viscosidad cinemática no se usa normalmente en la ingeniería del gas natural.

Para un gas nuevo se prefieren medidas directas de la viscosidad. Si la composición y viscosidades de los componentes del gas son conocidas, la regla de mezclado puede ser usada para determinar la viscosidad del gas en forma de mezcla:

$$\mu_g = \frac{\sum(\mu_{gi} y_i \sqrt{MW_i})}{\sum(y_i \sqrt{MW_i})} \quad 6.17$$

La viscosidad de los gases usualmente es estimada mediante tablas o correlaciones desarrolladas en base a las tablas. La correlación para la viscosidad de Carr, Kobayashi, y Burrows, 1954 (Boyum, 2005) envuelve un procedimiento de dos pasos: la viscosidad del gas a temperatura y presión atmosférica es estimada primero de la gravedad específica del gas y el contenido de compuestos inorgánicos.



La condición atmosférica es entonces ajustada a las condiciones de presión mediante un factor de corrección en base a la temperatura reducida y presión de estado del gas.

La viscosidad a presión atmosférica ( $\mu_1$ ) puede ser expresada como:

$$\mu_1 = \mu_{1HC} + \mu_{1N_2} + \mu_{1CO_2} + \mu_{1H_2S} \quad 6.18$$

Donde:

$$\mu_{1HC} = 8.188 \times 10^{-3} - 6.15 \times 10^{-3} \log(\gamma_g) + (1.709 \times 10^{-5} - 2.062 \times 10^{-6} \gamma_g) T \quad 6.19$$

$$\mu_{1N_2} = (9.59 \times 10^{-3} + 8.48 \times 10^{-3} \log(\gamma_g)) y_{N_2} \quad 6.20$$

$$\mu_{1CO_2} = (6.24 \times 10^{-3} + 9.08 \times 10^{-3} \log(\gamma_g)) y_{CO_2} \quad 6.21$$

$$\mu_{1H_2S} = (3.73 \times 10^{-3} + 8.49 \times 10^{-3} \log(\gamma_g)) y_{H_2S} \quad 6.22$$

Boyun(2005), cita a Dempsey(1965), quien desarrolló la siguiente relación:

$$\mu_r = \ln\left(\frac{\mu_g}{\mu_1} T_{pr}\right)$$

$$\begin{aligned} \mu_r = & a_0 + a_1 P_{pr} + a_2 P_{pr}^2 + a_3 P_{pr}^3 + T_{pr}(a_4 + a_5 P_{pr} + a_6 P_{pr}^2 + a_7 P_{pr}^3) \\ & + T_{pr}^2(a_8 + a_9 P_{pr} + a_{10} P_{pr}^2 + a_{11} P_{pr}^3) \\ & + T_{pr}^3(a_{12} + a_{13} P_{pr} + a_{14} P_{pr}^2 + a_{15} P_{pr}^3) \quad 6.23 \end{aligned}$$

Donde:

$$a_0 = -2.46211820$$

$$a_1 = 2.97054714$$

$$a_2 = -0.28626405$$

$$a_3 = 0.00805420$$

$$\begin{aligned}
a_4 &= 2.80860949 \\
a_5 &= -3.4983305 \\
a_6 &= 0.36037302 \\
a_7 &= -0.01044324 \\
a_8 &= -0.79338568 \\
a_9 &= 1.39643306 \\
a_{10} &= -0.14914493 \\
a_{11} &= 0.00441016 \\
a_{12} &= 0.08393872 \\
a_{13} &= -0.18640885 \\
a_{14} &= 0.02033679 \\
a_{15} &= -0.00060958
\end{aligned}$$

Así cuando el valor de  $\mu_r$  se ha determinado del lado derecho de esta ecuación, la viscosidad del gas a presión elevada puede ser calculada mediante la siguiente relación:

$$\mu_g = \frac{\mu_1}{T_{pr}} e^{\mu_r} \quad 6.24$$

Otras correlaciones para la viscosidad del gas incluyen a Dean-Stiel (1958) y Lee-Gonzales-Eakin (1966).

#### 6.4. Factor de compresibilidad

El factor de compresibilidad de un gas también llamado factor de desviación o factor “Z”, es un valor que refleja que tanto un gas real se desvía de comportarse como gas ideal a la presión y temperatura dada.

La definición del factor de compresibilidad de un gas se expresa como (Boyun, 2005):

$$z = \frac{V_{real}}{V_{gasideal}} \quad 6.25$$

Al introducir el factor Z a la ecuación de gases ideales resulta en la ley de gases reales como:

$$pV = nZRT \quad 6.26$$

Donde n es el número de moles del gas. Cuando la presión P es expresada en psia, el volumen V en ft<sup>3</sup>, y la temperatura en °R, la constante del gas es:

$$10.73 \text{ psia pie}^3 / \text{mol} - R$$

El factor de compresibilidad puede ser determinado sobre la base de medidas PVT en laboratorios. Para una cantidad dada de gas, si la temperatura se mantiene constante y el volumen es medido a 14.7 psia y una presión elevada p1, el factor Z puede ser determinado con la siguiente ecuación:

$$z = \frac{P_1 V_1}{14.7 V_0} \quad 6.27$$

Donde V<sub>0</sub> y V<sub>1</sub> son volúmenes medidos a 14.7 psia y p<sub>1</sub>, respectivamente.

Es muy común que el factor Z sea estimado a partir de tablas desarrolladas por Standing y Katz (1942). Esta tabla ha sido elaborada mediante solución computacional por muchos individuos. Brill y Beggs (1974) predicen un factor Z lo suficiente exacto para muchos cálculos ingenieriles. El factor de Brill y Beggs es calculado con la correlación siguiente:

$$A = 1.39(T_{pr} - 0.92)2^{0.5} - 0.36T_{pr} - 0.10 \quad 6.28$$

$$B = (0.62 - 0.23T_{pr})P_{pr} + \left( \frac{0.066}{T_{pr} - 0.86} - 0.037 \right) P_{pr}^2 + \frac{0.32P_{pr}^6}{10^E} \quad 6.29$$

$$(C = 0.132 - 0.32 \log(T_{pr})) \quad 6.30$$

$$D = 10^F \quad 6.31$$

$$E = 9(T_{pr} - 1) \quad 6.32$$

$$F = 0.3106 - 0.49T_{pr} + 0.1824T_{pr}^2 \quad 6.33$$

$$z = A + \frac{1 - A}{e^B} + Cp_{pr}^D \quad 6.34$$

Hall y Yarborough (1973) presentaron una correlación más precisa para estimar el factor z para el gas natural. Esta correlación se resume así:

$$t = \frac{1}{T_{pr}} \quad 6.35$$

$$A = 0.06125 te^{-1.2(1-t)^2} \quad 6.36$$

$$B = t(90.7 - 242.2t + 42.4t^2) \quad 6.37$$

$$C = t(90.7 - 242.2t + 42.4t^2) \quad 6.38$$

$$D = 2.18 + 2.82t \quad 6.39$$

$$z = \frac{AP_{pr}}{Y} \quad 6.40$$

Donde Y es la densidad reducida a ser obtenida a partir de

$$f(Y) = \frac{Y + Y^2 + Y^3 - Y^4}{(1 - Y)^3} - AP_{pr} - BY^2 + CY^D = 0 \quad 6.41$$

Si el método iterativo de Newton – Raphson es usado para resolver la ecuación 6.41 para Y, la siguiente derivada será necesaria:

$$\frac{df(Y)}{dY} = \frac{1 + 4Y + 4Y^2 - 4Y^3 + Y^4}{(1 - Y)^4} - 2BY + CDY^{D-1} \quad 6.42$$

## 6.5. Compresibilidad del gas natural

El coeficiente de compresibilidad isotérmica de una sustancia pura se define como:

$$C_g = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_T \quad 6.43$$

Tomando el comportamiento volumétrico del gas descrito como  $PV = zRT$ , entonces

$$\left( \frac{\partial V}{\partial P} \right) = nRT \left( \frac{1}{p} \frac{\partial z}{\partial p} - \frac{z}{P^2} \right) \quad 6.44$$

Al sustituir la ecuación 6.46 en la ecuación 6.45, resulta:

$$C_g = \frac{1}{P} - \frac{1}{z} \frac{\partial z}{\partial p} \quad 6.45$$

En la tabla 6.1. se presentan en forma resumida la forma de cálculo de las propiedades expuestas en esta sección.

**Tabla 6.1. Resumen de propiedades de flujo y termodinámicas de los gases naturales**

Propiedad	Referencia	Cálculo	Variables
Peso molecular aparente		$MW_a = \sum_{i=1}^{N_c} y_i MW_i \quad 6.2$	MW <sub>i</sub> es el peso molecular del i-ésimo componente, N <sub>c</sub> es el número de componentes
Presión pseudocrítica	Boyun (2005)	$P_{pc} = \sum_{i=1}^{N_c} y_i P_{ci} \quad 6.3$	Donde P <sub>ci</sub> y T <sub>ci</sub> es la presión crítica componente i
Temperatura pseudocrítica	Boyun (2005)	$T_{pc} = \sum_{i=1}^{N_c} y_i T_{ci} \quad 6.4$	Donde T <sub>ci</sub> es la temperatura crítica del componente i
Presión y temperatura pseudocrítica	Boyun (2005)	$P_{pc} = 709.64 - 58.718\gamma_g \quad 6.5$ $T_{pc} = 709.64 - 58.718\gamma_g \quad 6.6$	Cuando no se conoce composición del gas pero si se conoce la gravedad específica, valida si H <sub>2</sub> S < 3%, N <sub>2</sub> < 5%, y un total de contenido inorgánico menor al 7%
Correcciones de impurezas para temperatura y presión crítica	(Wichert-Aziz, 1972)	$\varepsilon_3 = 120(A^{0.9} - A^{1.6}) + 15(B^{0.5} - B^{4.0}) \quad 6.9$ $T_{pc}' = T_{pc} - \varepsilon_3 \quad (\text{Temperatura crítica corregida}) \quad 6.10$ $P_{pc}' = \frac{P_{pc} T_{pc}'}{T_{pc} + B(1-B)\varepsilon_3} \quad (\text{Presión crítica corregida}) \quad 6.11$	$A = y_{H_2O} + y_{CO_2} \quad 6.7$ $B = y_{H_2S} \quad 6.8$
Factor de compresibilidad	Hall y Yarborough (1973)	$t = \frac{1}{T_{pr}} \quad 6.35$ $A = 0.06125 t e^{-1.2(1-t)^2} \quad 6.36$ $B = t(90.7 - 242.2t + 42.4t^2) \quad 6.37$ $C = t(90.7 - 242.2t + 42.4t^2) \quad 6.38$ $D = 2.18 + 2.82t \quad 6.39$ $z = \frac{AP_{pr}}{Y} \quad 6.40$ $f(Y) = \frac{Y + Y^2 + Y^3 - Y^4}{(1 - Y)^3} - AP_{pr} - BY^2 + CY^D = 0 \quad 6.41$	Donde Y es la densidad reducida a ser obtenida a partir de la ecuación f(Y)

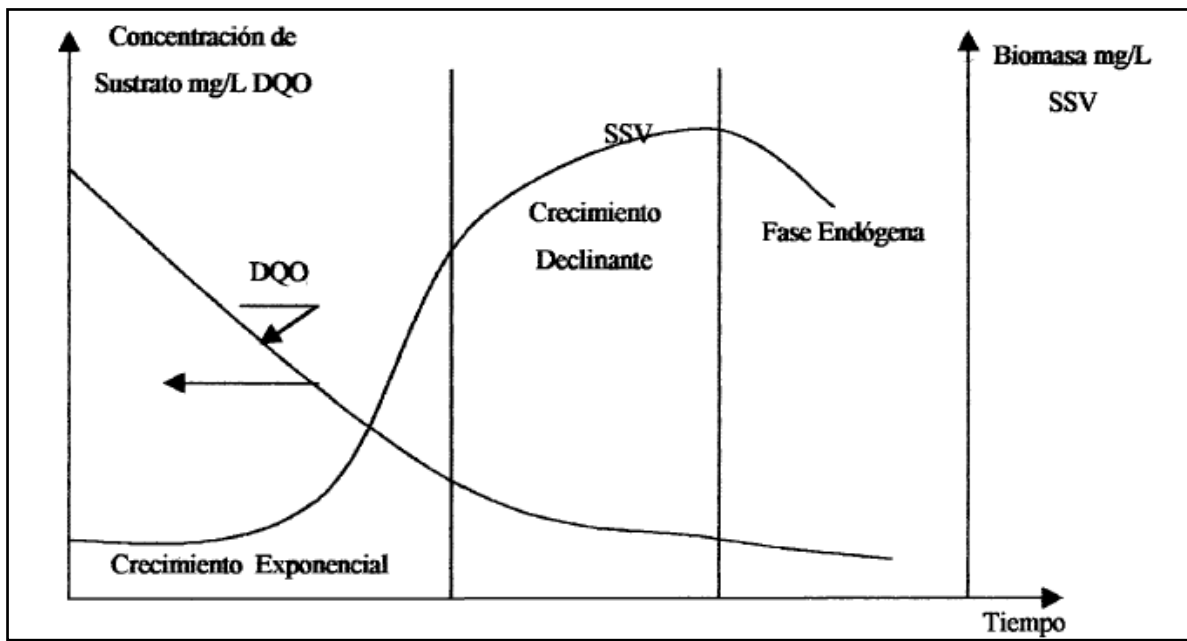
<i>Propiedades de flujo</i>			
<i>Gravedad específica</i>		$\gamma_g = \frac{MW_a}{28.97}$ 6.1	MW <sub>a</sub> es el peso molecular aparente, 28.97 peso molecular del aire
<i>Viscosidad (a presión atmosférica)</i>	<i>Kobayashi y Burrows (1954)</i>	$\mu_1 = \mu_{1HC} + \mu_{1N_2} + \mu_{1CO_2} + \mu_{1H_2S}$ 6.18 Donde: $\mu_{1HC} = 8.188 \times 10^{-3} - 6.15 \times 10^{-3} \log(\gamma_g) + (1.709 \times 10^{-5} - 2.062 \times 10^{-6} \gamma_g) T$ 6.19 $\mu_{1N_2} = (9.59 \times 10^{-3} + 8.48 \times 10^{-3} \log(\gamma_g)) y_{N_2}$ 6.20 $\mu_{1CO_2} = (6.24 \times 10^{-3} + 9.08 \times 10^{-3} \log(\gamma_g)) y_{CO_2}$ 6.21 $\mu_{1H_2S} = (3.73 \times 10^{-3} + 8.49 \times 10^{-3} \log(\gamma_g)) y_{H_2S}$ 6.22	
<i>Densidad del gas</i>	<i>Boyun (2005)</i>	$\rho = \frac{2.7 \gamma_g p}{zT}$ 6.1.2.	Tomando el peso molecular del aire como: 29 y R = 10.73 psia – ft <sup>3</sup> / mol – °R



## 7. CINÉTICA DE LA GENERACIÓN DEL BIOGAS

Según plantea *Expósito Vélez, (2004)*, el crecimiento bacterial se puede describir cinéticamente por la Ecuación de Monod, y gráficamente se puede observar en la Figura 7.1 que muestra la variación del sustrato y la biomasa con el tiempo en un cultivo por lotes a diferentes concentraciones de sustrato:

**Figura 7.1. Variación del sustrato y la biomasa con el tiempo en un cultivo por lotes**



Fuente: Referido a "MODELIZACIÓN DE PROCESOS BIOLÓGICOS PARA LA ELIMINACIÓN DE RESIDUOS GANADEROS, TENIENDO EN CUENTA SUS CONDICIONES ESPECIALES". Expósito Vélez, Germán Antonio.

Ecuación de Monod:

$$\mu = \frac{\mu_m S}{K_s + S} \quad 7.1$$

Donde:

$$\mu: \text{tasa neta de crecimiento bacterial} = \frac{dX}{Xdt}$$

$\mu_m$ : tasa neta máxima de crecimiento bacterial

$$S: \text{sustrato } \left( \frac{\text{mgDQO}}{\text{L}} \right)$$

$K_s$ : constante de saturación del sustrato

La Tabla 7.1 muestra las constantes cinéticas y estequiométricas de la digestión anaerobia a 35°C, presenta los valores de  $\mu_m$  y  $K_s$  para varios microorganismos y procesos metabólicos de la digestión anaerobia. También se da el coeficiente de producción y  $\left( \frac{\text{gSSV}}{\text{gDQO}} \right)$  y el coeficiente endógeno  $K_e (\text{día}^{-1})$

**Tabla 7.1. Constantes cinéticas y estequiométricas de la digestión anaerobia a 35°C**

<b>Proceso</b>	<b>Microorganismo</b>	$\mu_m (\text{día}^{-1})$	$K_s (\text{gDQO}/\text{m}^3)$	$\gamma (\text{gSSV}/\text{gDQO})$	$K_e (\text{día}^{-1})$
Acidogénesis	Fermentativos	2.0	200	0.16	0.015
Metanogénesis Acetoclástica	Metanosarcina	0.30	300	0.04	0.015
Acetogénesis Acetoclástica	Metanothrix	0.10	30	0.04	0.015
Acetogénesis del propionato	Syntrophobacter-Wolinii	0.31	60	0.04	0.015

*Fuente: Referido a "MODELIZACIÓN DE PROCESOS BIOLÓGICOS PARA LA ELIMINACIÓN DE RESIDUOS GANADEROS, TENIENDO EN CUENTA SUS CONDICIONES ESPECIALES". Expósito Vélez, Germán Antonio.*

Con los datos de la Tabla 7.1 se puede calcular  $k$  para cada proceso.

Para predecir la tasa de biodegradación en la digestión anaerobia de la fracción orgánica, debe entenderse de buena forma la cinética, usualmente se utiliza la ecuación de Monod con resultados satisfactorios, pero solo es usada para sistemas con sustratos solubles tales como glucosa y ácidos grasos volátiles.

De estudios anteriores realizados por Faire y Moore (1932) y en un trabajo de Eastman y Ferguson (1981) concerniente a la digestión con sustratos en forma

particulada, se determinó que una cinética de primer orden es más factible. La ecuación para remoción de sustrato es:

$$r = \frac{ds}{dt} = -K * S \quad 7.2$$

Donde K es la constante de primer orden.

Aunque la Ecuación de Monod es ampliamente usada en estudios de digestión de desechos complejos, tales como aguas residuales, fracción orgánica de los desechos sólidos municipales y desechos de trigo, es dudoso si la concentración del sustrato S fue realmente establecida durante los estudios realizados.

Estos sustratos contienen una fracción soluble y varios polímeros en forma particulada tales como proteínas, lípidos y celulosa. Estos componentes presentan diferentes tasas de degradación durante condiciones anaerobias y son la mayoría de las veces la tasa limitante.

Estudios concernientes a la cinética de la hidrólisis en digestión anaerobia de desechos complejos no están disponibles en la literatura. La tasa de la hidrólisis depende del tipo de sustrato, pH, temperatura y presumiblemente de la presencia de componentes inhibidores.

Un periodo corto de varias horas después de iniciar la digestión las partículas son cubiertas por bacterias fermentativas que producen enzimas hidrolíticas, tomando un tiempo para una producción suficiente, relativamente corto comparado con el tiempo total de digestión, por esto la tasa del proceso es relacionada al área específica superficial de las partículas de sustrato que puede ser atacada por las enzimas hidrolíticas, en vez de relacionarla a la concentración de biomasa o del sustrato.

Para un sustrato particulado heterogéneo, con una composición establecida con algo de dificultad, la cinética de la digestión de primer orden muestra una simple

descripción, lo más real posible, de todos los procesos. Sin embargo, una cierta fracción (10-13% de los Sólidos Volátiles) de los componentes orgánicos del sustrato es digerida a tasas mayores que la otra fracción, pero la cual también sigue una reacción de primer orden. Muy probablemente esta fracción este formada por azúcares y aminoácidos, porque estos componentes tienen una tasa de remoción significativamente mayor que la celulosa.

Una tercera fracción esta presente, la cual esta formada por los ácidos grasos volátiles producidos durante el almacenamiento de los desechos. Sin embargo, desde que esta fracción no esta siempre presente, su efecto en la cinética es ignorado. La ecuación que describe la tasa de remoción de sustrato en digestión anaerobia consiste en dos componentes, llegando a ser:

$$\gamma = \frac{ds}{dt} = \frac{dS_1}{dt} + \frac{dS_2}{dt} = -(k_1S_1 + k_2S_2) \quad 7.3$$

Donde  $S_1$  y  $S_2$  se refieren a la concentración de sólidos volátiles, siendo  $k_1$  y  $k_2$  las constantes de primer orden de los componentes 1 y 2. Se puede escribir:

$$\gamma = -(k_1SV_1 + k_2SV_2) \quad 7.4$$

En donde  $SV_1$  y  $SV_2$  son las concentraciones de sólidos volátiles de los componentes 1 y 2 respectivamente. Debido a que las concentraciones  $SV_1$  y  $SV_2$  son difíciles de medir durante la digestión, la ecuación 7.4, es de menos importancia para situaciones prácticas. Sin embargo, con las constantes  $k_1$  y  $k_2$  pueden ser determinadas separadamente en forma experimental bajo condiciones controladas con componentes puros, tales como glucosa y celulosa, la ecuación 7.4 puede dar un indicativo acerca de la tasa de remoción de los sólidos volátiles.

En la práctica la concentración de sólidos volátiles remanentes  $SV = SV_1 + SV_2$ , puede ser determinada por la medición de la producción de metano. Para un proceso de digestión balanceado, la tasa de remoción de sólidos volátiles

biodegradables (SVB) es casi igual a la tasa de producción de metano (*Gujer y Zehnder, 1983*) debido a que la producción de biomasa puede llegar a ser despreciable. Obteniendo la ecuación 7.5:

$$\gamma = -\gamma_{CH_4} \quad 7.5$$

En donde es la tasa de producción de metano, expresando la cantidad de SV como DQO. Como la cantidad de metano también puede ser expresada en términos de DQO, la cantidad de SV degradados puede estimarse como sigue:

$$\gamma = \frac{dSV}{dt} = -kSV \quad 7.6$$

Donde k es la constante de la tasa total  $\left(\frac{1}{d}\right)$ , la cual después de integrar, se obtiene:

$$\frac{VSt}{Sv_0} = Exp(-kt) \quad 7.7$$

Un balance de DQO sobre los SV:

1 Kg SV biodegradables	a Kg DQO
1 kg CH <sub>4</sub>	4 Kg DQO
1 Kg SV	a/4 Kg DQO

Donde “a” es la constante característica para cada tipo de componente y es valorado para cada sustrato. La ecuación 7.5 puede ser escrita como sigue:

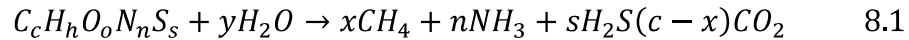
$$Ln\left(\frac{1 - CH_4t}{CH_4max}\right) = Exp(-kt) \quad 7.8$$

$CH_4t$  es la cantidad de metano producida a cierto tiempo  $t$  mientras que  $CH_4max$  es la cantidad de metano que puede ser producido del sustrato orgánico. Midiendo la producción, la tasa de degradación de sólidos volátiles puede ser fácilmente seguida.

Se puede concluir de algunos de los datos disponibles en la literatura que la hidrólisis en la digestión anaerobia procede de acuerdo a una cinética de primer orden. Dos tipos de componentes parecen gobernar las tasas de degradación de los SVB: los componentes fácilmente degradables, consistentes en azúcares y aminoácidos son convertidos a alta tasa a hidrógeno y ácidos grasos volátiles mientras que el material particulado, compuesto principalmente de celulosa, son degradados a una tasa relativamente baja.

## 8. ESTUDIO DEL PROCESO DE FERMENTACION: REACCIÓN BIOQUÍMICA

Bajo una perspectiva bioquímica, la formación de metano a partir de biomasa y gracias a la acción bacteriológica, en general sigue la ecuación:



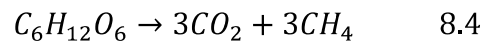
$$x = \frac{1}{8}(4c + h - 20 - 3n - 2s) \quad 8.2$$

$$y = \frac{1}{4}(4c - h - 20 + 3n + 3s) \quad 8.3$$

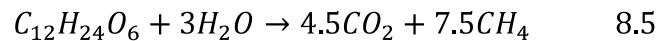
Los insumos deben incluir carbohidratos, grasas y proteínas, que son los principales componentes de la materia prima para desarrollar un proceso de digestión.

La descomposición de estos compuestos para su ejemplificación se describe con casos concretos y se describe en las siguientes reacciones:

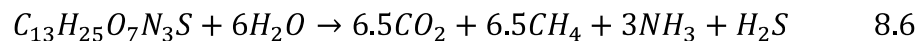
Carbohidratos:



Grasas:



Proteínas:

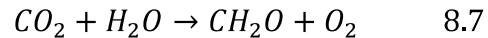


Debido a la presencia de azufre en la materia prima, y que parte del  $CO_2$  se une al  $NH_3$ , en general la composición de biogás es  $CH_4:CO_2 = 71\%:29\%$

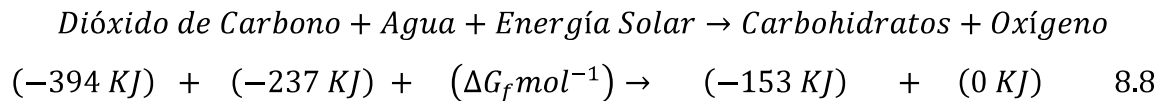
La proporción de las emisiones de  $CO_2$  a  $CH_4$  se determina según la reducción de la materia prima orgánica, que es determinada por la acción de las bacterias metanogénicas y las no metanogénicas, de manera que sus cantidades y proporciones son vitales para el proceso de digestión

El balance de energía puede calcularse como sigue:

La materia orgánica, la cual es construida por el proceso de fotosíntesis puede describirse con el siguiente ejemplo:



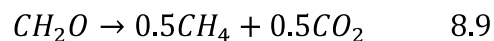
La luz solar provee la energía necesaria para desarrollar esta reacción, que puede explicarse así:



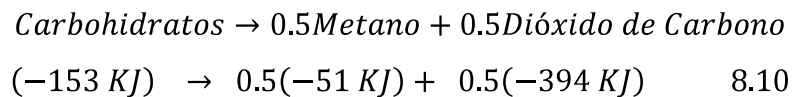
Por lo tanto la cantidad de energía solar absorbida en este proceso es:

$$\Delta G_f \text{ mol}^{-1} = 478 \text{ KJ/mol}, \quad \text{con un pH} = 7$$

Ahora la degradación de la materia orgánica a biogás se explica como sigue:



De manera que en esta reacción se obtiene la siguiente descarga de energía:

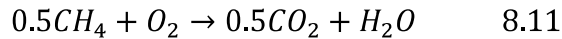


Resultando:

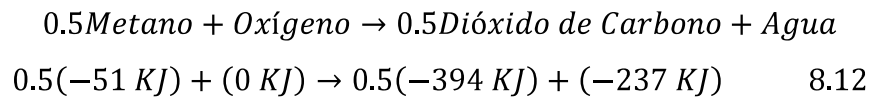
$$\Delta G_f \text{ mol}^{-1} = -70 \text{ KJ/mol}$$



En la combustión de metano se produce dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y agua (H<sub>2</sub>O), los cuales son utilizados para llevar a cabo el proceso de fotosíntesis, que puede explicarse así:



De manera que el ciclo de energía se cierra con esta reacción, puesto que:



Resolviendo tenemos:

$$\Delta G_f \text{ mol}^{-1} = -408 \text{ KJ/mol}$$

Pueden ser ganados 478 KJ.mol<sup>-1</sup> de carbón como energía libre por la degradación de 1 Kmol de glucosa a CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, mientras que quemando 0.5 mol de metano se pueden obtener 408 KJ.mol<sup>-1</sup>.

Como el balance de energía muestra, el calor necesario esta estrictamente relacionado con las reacciones anaeróbicas bioquímicas. Por lo tanto los biodigestores deben tener la temperatura adecuada y deben estar bien aislados para que el proceso de desarrolle adecuadamente.

La energía que se libera cuando se quema biomasa, corresponde teóricamente a la energía que se libera cuando se produce el biogás más la energía que se libera cuando se quema el metano. Esta suma de energía es la equivalente a la necesaria para que el proceso de fotosíntesis se lleve a cabo.

Pero el calor producido durante el proceso de digestión generalmente no es usado, además la conversión del sustrato a biogás y biofertilizante no es completa, de manera que, como en cualquier proceso, cierta cantidad de energía se pierde.

## **9. DISEÑO DE DIGESTORES**

En esta sección se expondrán los diseños de biodigestores con los que más se ha trabajado a nivel mundial y de los cuales se tiene mayor información.

### **9.1. Tipo de digestores**

Dependiendo de la forma de contacto entre el material o sustrato fermentante y la población bacteriana dentro del reactor, se definen dos tipos de digestores anaeróbicos.

#### **a) Digestor de mezcla completa**

Denominados así porque el sustrato a ser digerido y los microorganismos encargados de su degradación se encuentran formando una sola unidad, dentro del cuerpo del digestor, originándose la fermentación de la materia orgánica. Como ejemplo de esto se tienen los digestores rurales, de fácil operación así como los digestores construidos en Francia, China y la India. Los modelos de digestores clásicos industriales son esencialmente de tipo de mezcla completa con una recirculación del líquido en suspensión y con agitación mecánica.

#### **b) Reactores de filtro anaeróbico, lechos expandidos y fluidizados y las unidades U.A.S.B. (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)**

Todos estos reactores están basados en la tendencia que tienen las bacterias, especialmente las metanogénicas a fijarse sobre superficies sólidas.

La carga incremental en un reactor de flujo continuo sin retención de microorganismos y/o materia orgánica ocasiona un lavado y por lo tanto una disminución del proceso ya iniciado. De ahí que se han intentado algunos mecanismos en los cuales se busca separar los sólidos del efluente y recargarlos al

cuerpo del reactor o también retornar parte del efluente con sólidos en suspensión al cuerpo del mismo. En los reactores de filtro fijo, las bacterias se adhieren sobre soportes estacionarios y especialmente provistos para tal fin, en cambio en las U.A.S.B. y reactores similares, la adherencia se da entre las propias bacterias formándose flóculos que tienen la capacidad de sedimentar a velocidades superiores que la velocidad neta del líquido.

El sistema que ha obtenido éxito en el medio rural es el digestor con filtro anaeróbico donde el agua residual al entrar en el digestor se le hace pasar a través de una cama de soporte de material poroso inerte, que contiene gravas, rocas, carbón activado, ladrillos triturados, sepiolita, conchas marinas, o multitud de materiales plásticos, como anillos de PVC o de poliuretano, silicatos, saponita, etc.

El filtro anaeróbico tienen la característica de aumentar el tiempo de residencia de los microorganismos en su interior, por estar formando por una matriz que posee una mayor superficie de contacto, donde se fijan las bacterias metanogénicas.

Con estos procesos de biomasa retenida, se consiguen tiempo de retención de sólidos entre 10 a 100 veces mayores que en los digestores convencionales de mezcla completa. Con lo cual se obtienen tiempos hidraulicos de retención notablemente inferiores y permiten un incremento en la cantidad o volumen de carga a degradar.

Estos reactores son operados basicamente en forma continua con cargas diarias o interdiarias, en las cuales el material a fermentar se encuentra suspendido en la solución.

## 9.2. Modelos de biodigestores

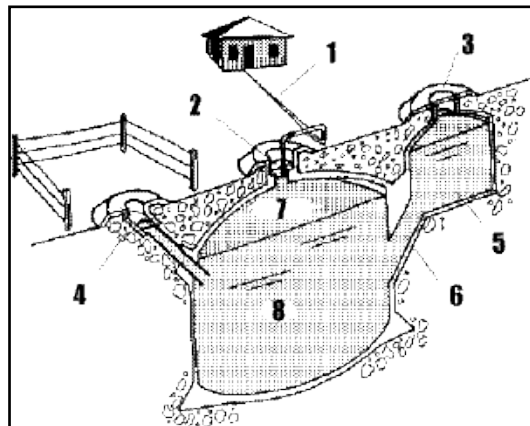
Existen muchos modelos de biodigestores, entre los más populares se encuentran el Modelo Chino, el Modelo Hindú, el Modelo Olade de Guatemala, el Modelo Xochicalli, los modelos Plásticos Tubulares y Rectangulares, etc. Los materiales con que son construidos varían desde mampostería, prefabricados, hasta metálicos de diferentes aleaciones, lo importante es que estén bien construidos, para que se pueda cumplir el proceso.

### 9.2.1. Modelo Chino

Este modelo está muy difundido en China, es un digestor de cúpula fija en forma cilíndrica, enterrados con cámaras de Hidropresión.

La estructura puede ser de hormigón, de ladrillos, bloques y adobes, se le puede adicionar el gasómetro. Este digestor por estar enterrado favorece el proceso fermentativo, con poca influencia por los cambios de temperatura, la desventaja que presenta es que la presión del gas es variable dependiente del volumen acumulado. En la Figura 9.1. se presentan esquemas de este biodigestor.

**Figura 9.1. Esquemas del biodigestor chino**



1. tubería de salida del gas; 2. Sello removible; 3. Tapa móvil; 4. Entrada; 5. Tanque de desplazamiento; 6. Tubería de salida; 7. Almacenamiento de gas; 8. Materia orgánica. Fuente:

<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/ENERGIA22/HTML/articulo04.htm>



<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/ENERGIA22/HTML/articulo04.htm>

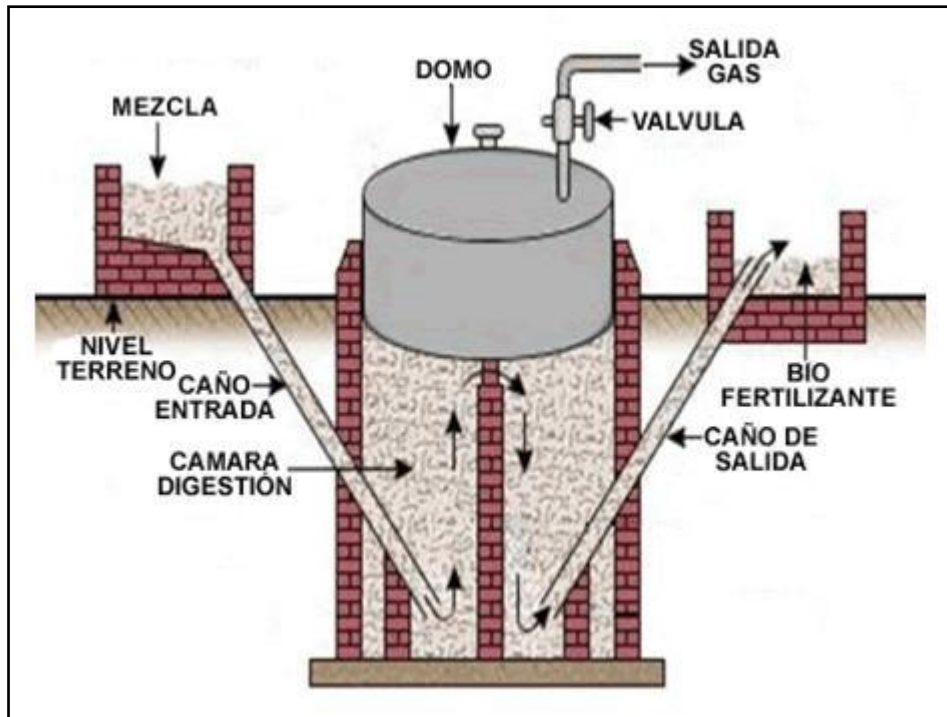
### **9.2.2. Modelo Hindú**

Es originario de la india y se ha difundido mucho porque mantiene una presión de trabajo constante, generalmente son verticales, con el gasómetro incorporado (por lo que se llama digestor de cúpula móvil), la estructura se construye de bloques y concreto, y el gasómetro es de acero, lo que lo hace costoso.

Este gasómetro posee una camisa que se desliza en un eje y lo mantiene centrado para que no roce con las paredes ni escorree, este eje descansa en una viga transversal de concreto armado enjaulado.

Estos digestores son de alimentación continua, se construyen generalmente enterrados quedando la cúpula sin gas en un nivel cercano a la superficie del terreno. Figura 9.2.

**Figura 9.2. Esquemas de un biodigestor Hindú**



Fuente: <http://www.energia.org.ec/Biodigestores.html>

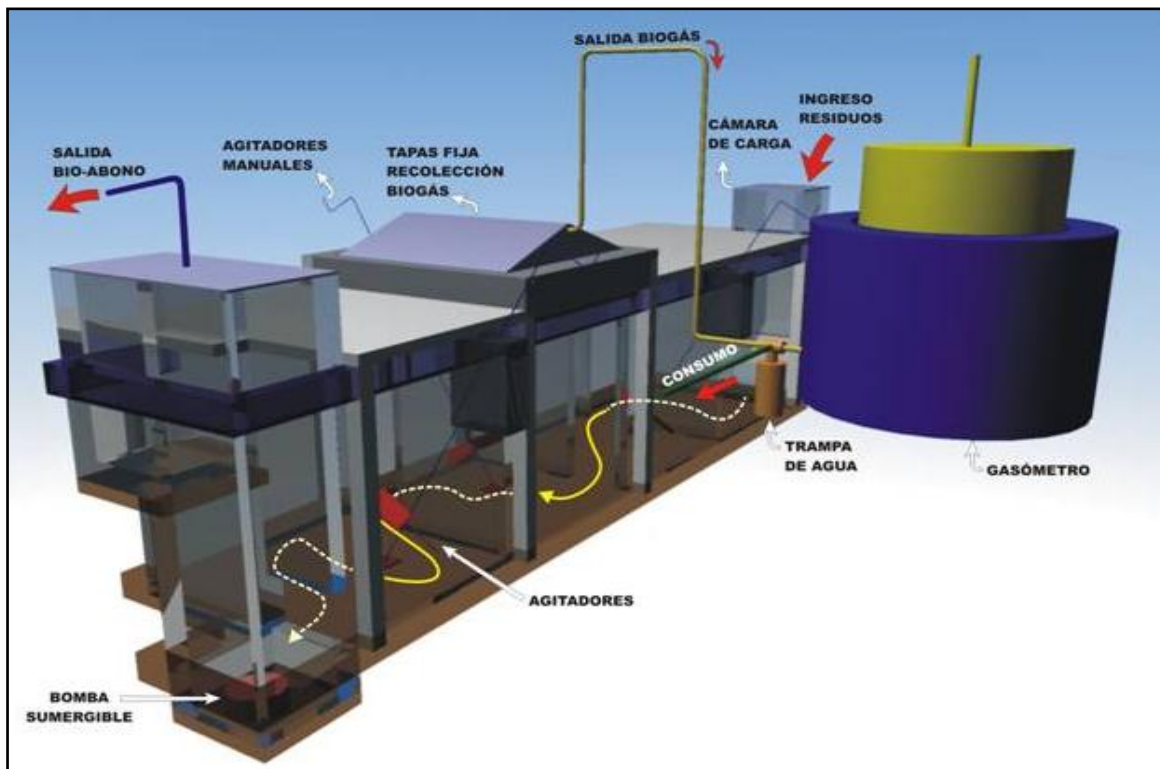


### 9.2.3. Modelos Horizontales

Se refiere a aquellos que no profundizan en el suelo, son de forma rectangular, aunque pueden ser cuadrados, se caracterizan por ser en su mayoría de concreto armado debido a las presiones que están sometidos. Su uso es generalmente para el saneamiento de descargas cloacales, y que su conformación alargada garantiza que el efluente al salir del cuerpo del digestor, debido al flujo pistón y al tiempo de retención sean debidamente degradados.

Estos digestores llevan generalmente en la parte superior una pequeña cúpula metálica desmontable que sirve de boca de visita, la presión se controla por el sello de agua, además requieren gasómetro adicional debido a la poca capacidad de almacenamiento de la cúpula y el cuerpo del digestor, en la figura 9.3 se presentan esquemas de un biodigestor horizontal.

**Figura 9.3. Esquemas de un Modelo de Biodigestor Horizontal**





Fuente: <http://www.eg-ingenieria.com.ar/biodigestores-desplazamiento-horizontal.html>



#### **9.2.4. Modelos Batch por lotes**

Estos digestores se caracterizan porque se cargan una sola vez, tienen una cúpula metálica con sello de agua, la estructura se construye con bloques y concreto reforzado; la desventaja es que se debe construir obligatoriamente un gasómetro y al ser aéreos están afectados por la temperatura ambiental, se utiliza para degradar materias primas sólidas, como restos vegetales, desechos sólidos orgánicos, el requisito básico es utilizar una buena inoculación (5% al 10% en base al peso), para garantizar una buena fermentación.

El rendimiento volumétrico de gas es superior a cualquier digestor continuo (debido al contenido de sólidos totales), igualmente el rendimiento de abonos sólidos es elevado, por eso este método permite el tratamiento sanitario de desperdicios orgánicos, el control satisfactorio de toda clase plagas, así como la proliferación de moscas, así mismo la recuperación eficiente y económica del metano y la retención humus e ingredientes para uso de fertilizantes.

### **9.3. DISEÑO DE BIODIGESTORES**

En el diseño de biodigestores se cuenta con elementos y parámetros generales que definen el modelo a construir.

Algunos de los elementos básicos a tener en cuenta en el diseño de biodigestores serán discutidos a lo largo de la sección 9.4

Indicaciones generales para el manejo y funcionamiento de los sistemas serán dados en la sección 9.5.

### **9.4. Consideraciones del diseño de biodigestor**

Para realizar un Diseño Preliminar de una Planta de producción de Biogás se deben considerar los siguientes aspectos:

- Formas de alimentación.
- Numero de etapas de la reacción.
- Componentes de un biodigestor.
- Métodos de recolección del gas.
- Distribución del gas.

A continuación serán descritos en las secciones 9.4.1. a 9.4.5.

#### **9.4.1. Formas de alimentación**

**Forma de alimentación continua:** Cuando la fermentación en el digester es un proceso ininterrumpido, el efluente que descarga es igual al material que entra, la producción de gas es uniforme con el tiempo, este proceso se aplica a zonas con ricas materias residuales y exige un digester de tamaño grande (mayor a 15 m<sup>3</sup>) o mediano (6.3 m<sup>3</sup> y 15 m<sup>3</sup>).

**Fermentación semicontinua:** La primera carga que se introduce, consta de gran cantidad de materiales; cuando va disminuyendo gradualmente el rendimiento del gas se agregan nuevas materias primas y se descarga el efluente regularmente en la misma cantidad.

El sustrato a degradar ocupa un volumen en el digestor del 80%, mientras el resto del volumen (20%) es reservado para realizar cargas continuas diarias o intermedias, a medida que va disminuyendo gradualmente el rendimiento del gas (Guevara, 1996).

Esta operación reúne las ventajas y desventajas del batch, pero en el caso del biofertilizante, por la adición continua de materia rica en nutrientes incrementa más su calidad.

Una forma de operación podría ser: se incorpora al digestor una carga batch de grama y se carga continuamente con restos alimenticios de la cafetería.

Debido a que el suministro de lodos frescos no es constante el proceso se hace bastante largo, por esta razón en la práctica se acelera mediante la utilización o control de factores favorables.

**Fermentación por lotes (batch):** Los digestores se cargan con material en un solo lote, cuando el rendimiento de gas decae a un bajo nivel, después de un periodo de fermentación, se vacían los digestores por completo y se alimenta de nuevo.

El material de carga se caracteriza, por una alta concentración de sólidos, el cual debe ser adecuadamente inoculado, sobre todo cuando se fermentan materiales vegetales.

Las ventajas operativas es que el proceso una vez iniciado llega al final sin contratiempos, necesitando mano de obra solo al momento de carga y descarga. La desventaja es que al tratarse de manejo de sólidos sobre todo cuando son grandes

volúmenes requiere mecanizarlo, no obstante hay gran producción de gas por unidad de volumen y un bioabono de buena calidad.

#### **9.4.2. Número de etapas de la reacción**

**Fermentación de una sola etapa:** Cuando la digestión se realiza en un solo depósito de fermentación, su estructura es simple, fácil de operar y de bajo costo, se usa mucho en las zonas rurales.

**Fermentación en dos o más etapas:** La digestión ocurre en dos o más depósitos de fermentación, el material de la carga primero se degrada y produce gas en la primera etapa; luego el efluente de la primera etapa sufre un nuevo proceso de digestión en la segunda etapa. Con este principio se pueden construir digestores de 3 o 4 etapas.

Los digestores de etapas múltiples se caracterizan por un largo periodo de retención, buena descomposición de la materia orgánica y una alta inversión.

#### **9.4.3. Componentes de un biodigestor**

El biodigestor es una planta de fermentación anaeróbica para la fabricación de biogás, y está compuesto por las siguientes partes (*Guevara, 1996*):

1. Tubo de entrada de la materia orgánica
2. Cámara de fermentación o cuerpo del digestor
3. Cámara de depósito de gas
4. Cámara de salida de materia estabilizada o fermentada
5. Conducto de gas que lleva el gas a ser usado
6. Tapa hermética
7. Gasómetro

Según el almacenamiento del gas puede ser:

- a. Cúpula fija
- b. Cúpula móvil
- c. Depósito flotante, o de presión constante
- d. Gasómetro de caucho o material plástico en forma de bolsa

Según su forma geométrica, puede ser:

- a. Cámara vertical cilíndrica
- b. Cámara esférica
- c. Cámara ovalada
- d. Cámara rectangular
- e. Cámara cuadrada

Materiales de construcción:

- a. Ladrillo
- b. Mampostería
- c. Hormigón
- d. Hormigón armado
- e. Plástico

Según la posición respecto a la superficie terrestre:

- a. Superficiales
- b. Semienterrados
- c. Subterráneos

#### **9.4.4. Métodos de recolección del gas**

Cuando el sistema usa tanques Imhoff es económico ultimar las cámaras de sedimentación para almacenar el gas, de esta forma se aprovecha el área destinada a la espuma para la liberación y pequeña acumulación del gas mediante una cubierta adecuada.

Cuando las instalaciones tienen digestores separados se presentan los siguientes casos:

- Digestores de cúpula fija
- Digestores de cúpula flotante

En el primer caso es necesario evitar la formación de vacío parcial, para esto se utiliza lo siguiente:

- Digestores de cúpula fija con mezcla directa de gas a un secundario de cúpula móvil.
- Digestores de cúpula fija con mezcla directa de gas a un gasómetro

Los digestores de cúpula flotante constituyen el tipo más seguro y conveniente pero su costo es relativamente alto.

#### **9.4.5. Gasómetros**

Estos se utilizan para regular la presión del gas, establecen el equilibrio entre la producción y el consumo.

Los gasómetros pueden ser de baja presión y de alta presión.

Los de baja presión son del tipo flotante en donde la presión interna se establece por el propio peso de la estructura flotante. Esta compresión esta entre 7.5 y 30 cm de columna de agua, en la parte superior se debe colocar una válvula de seguridad para evitar el vacío y el exceso de presión (*Guevara, 1996*).

Los gasómetros de alta presión, son tanques esféricos comercialmente conocidos como "Hortonsphere" y son operados entre presiones de 1.5 y 3.5 atmósferas, estos requieren compresores y equipos de seguridad automáticos de gran efectividad. Estos gasómetros comprimen el gas en un tercio o un cuarto de su volumen a condiciones normales, ocupando un área menor. Para la construcción del gasómetro se utilizan láminas de acero de 6 mm, a un ¼ de pulgada de espesor y recubierto de pintura anticorrosivas.

Es muy conveniente utilizarlo como complemento al sistema de digestión, ya que garantiza presiones estables y constantes de trabajo y le confiere al sistema mayor autonomía en lo referente al almacenamiento de gas a baja presión y el gas no necesita tratamientos especiales.

Estos gasómetros están conformados por dos partes, una parte inferior compuesta por tanque de agua, y la superior un recipiente de gas, que es una cubierta flotante provista por un sello para evitar el escape del gas y la admisión de aire; pueden estar contruidos de concreto reforzado, mampostería, metal o fibra de vidrio o plástico.

El peso de la cubierta flotante mantiene la presión necesaria para que varíe entre 5-20 cm de columna de agua, esta cubierta se mueve hacia arriba o debajo de acuerdo a la cantidad de gas que reciba el digestor, la forma más conveniente es la circular.

La cubierta esta hecha usualmente de laminas de acero de 2 a3 mm de espesor y para guiar la cubierta flotante en su movimiento vertical se coloca un sistema de rodillos y un perfil de V de acero, se acostumbra colocar una o más aberturas que distan de cinco centímetros del fondo de la cubierta, a través de los cuales el exceso

de gas puede escapar cuando el recipiente se aproxime a su máximo desplazamiento.

Debido a que el peso de la cubierta flotante mantiene baja la presión del gas, si la cubierta es muy pesada se hace necesario instalar, un contrapeso para reducir la excesiva presión del gas en el punto de uso, si por el contrario la cubierta es muy liviana debe proveerse de pesos adicionales para dar una presión al gas de 10-20 g/cm<sup>2</sup>. Para calcular la presión de la cúpula flotante sobre el gas, se determina el peso de la cúpula flotante y se divide entre el área de la tapa.

Se recomienda almacenar el volumen medio diario de producción, sin embargo el volumen del gasómetro puede estar entre el 20% y el 100% de la producción media diaria.

#### **9.4.6. Distribución del gas**

Para llevar el gas desde donde está almacenado, hasta los puntos de consumo, se necesita una presión inicial, que varía de 100 cm a 10 cm de agua. Cuando se dispone de gasómetro se debe trabajar con presiones bajas, el sistema debe proyectarse con la mayor sencillez evitando codos y accesorios innecesarios, la velocidad para conducir el gas debe estar entre 3 – 10 m/s según Herning (1975)

#### **9.4.7. Producción de biofertilizantes**

Como subproductos después de la generación del metano y en función a la carga utilizada y el método seguido se pueden obtener dos tipos de abonos: líquidos o sólidos.

**Líquidos:** Proviene de digestores continuos de alta tasa de carga, con bajo contenido de sólidos totales, (inferior al 12 %), el inconveniente de este abono es su comercialización por el estado físico de su presentación.



**Sólidos:** Proviene de digestores batch o semicontinuos, estos producen residuos sólidos de buen poder fertilizante y que luego de secados se pueden comercializar sin problema.

## **9.5. Secuencia de actividades para operar digestores**

Se debe procurar un ambiente estrictamente anaeróbico, ya que las bacterias metanogénicas son muy sensibles al oxígeno y expuestas al aire, por eso el digestor debe estar perfectamente sellado.

### **9.5.1. Prueba de los nuevos digestores y mantenimiento de antiguos**

Es necesario examinar detenidamente los nuevos digestores, para comprobar que no tienen fugas ni filtraciones, deben verificarse y probarse antes de ponerse en marcha. Cuando un digestor ya tiene más de un año en uso, se le debe hacer mantenimiento verificando su impermeabilidad y sellado.

### **9.5.2. Preparación de carga**

Sobre todo cuando se utilizan digestores de Batch, se debe reunir material suficiente con 20-30 días antes de empezar el proceso, los tallos y otros residuos de jardín deben picarse en trozos de 2 – 9 cm, antes de alimentar el digestor, si es posible se debe machacar, moler o licuar estos materiales almacenados por un tiempo, al sacarlos y tratarlos térmicamente se favorece la fermentación.

En algunos casos, como las excretas de aves que contienen alto contenido de amoníaco, o residuos vegetales poco degradables, como cortezas de árboles o semillas de cereales, se puede aplicar un tratamiento químico.

Para el caso de los residuos generados en las cafeterías, por ser de tipo doméstico, no requieren preparación, sin embargo es conveniente analizar que no coexistan inhibidores del proceso.

### **9.5.3. Llenado del digestor**

**Tipo Batch:** Podría mezclarse suelo, residuos de jardinería junto con residuos de cafetería, el inóculo o material de arranque y el agua, luego se uniformiza y se llena el digestor.

Si no fueran posibles estas operaciones, se puede cargar el digestor por etapas alternadas y no muy gruesas de materias primas e inóculos, tallos en la primera capa, luego excretas y a continuación el inóculo, las capas pueden comprimirse.

En algunos casos cuando no hay inóculo, se debe dejar fermentar la materia prima por espacio de 1-2 semanas y luego introducirlas en el digestor. La mezcla se introduce por la cúpula aplastando cada capa.

Después de llenado el digestor se deja en compostación de 1-3 días, no debe cerrarse el digestor en esta etapa para que pueda desarrollarse la digestión con bacterias facultativas y aeróbicas.

Cuando la temperatura llega a 40-60 °C se agrega el agua por las bocas de toma y salida (evítese el uso de agua con cloro), al terminar se determina el pH de la masa de fermentación.

El digestor puede sellarse con su cubierta móvil cuando el pH sube a 6, sino alcanza este valor será preciso ajustar la acidez, agregando cenizas, agua amoniacal o incluso cal hasta que llegue a 7 y entonces tapar el digestor.

Después de sellar el digestor deben terminarse de instalar las válvulas, conexiones para el gas, asimismo la llave de paso debe estar cerrada.

Recomendación: El inoculo puede ser de aguas municipales, lodos del fondo de lagos, lagunas y estercoleros, lodos de mataderos, etc. Deben ofrecer un medio favorable para los microbios metanogénicos, también se puede utilizar lodo activo de las alcantarillas y el lodo del propio digestor. El inoculo debe ser del 10-15%, o un 30% cuando proviene del mismo digestor.

Después de cierto tiempo de descomposición, los excrementos humanos (si los hubiese), de animales y otras materias primas de fermentación, así como material de carga descompuesto con anterioridad, más un lodo activo, pueden servir como material de arranque.

**Digestor continuo:** La carga inicial, en este caso se inocula preferiblemente con aguas de lagunas de oxidación, el manejo se limita a un manejo hidráulico del sistema, para llenar el digestor se calcula la carga diaria que viene dada por (Guevara, 1996):

$$\frac{\text{Volumen de Carga}}{\text{Día}} = \frac{\text{Volumen de Carga de fermentación}}{\text{Tiempo de retención}} \quad 9.1$$

El tiempo de retención se estima en función de la reducción diaria de sustrato, y es el tiempo que va a estar dentro del reactor la carga diaria que se introduce, antes de su disposición final.

Cada día se introduce la carga diaria por la cámara de entrada, la cual al llegar a la cámara de fermentación va a desplazar una cantidad equivalente de materia estabilizada que saldrá por el tubo de salida.

**Digestor semicontinuo:** Se deben agregar nuevas cargas de materias primas cada 5-6 días, en un volumen equivalente al 4 o 5% del volumen total.

#### **9.5.4. Producción del gas**

El gas inicial contendrá un alto contenido de CO<sub>2</sub>, se debe esperar hasta que los gases de escape permitan una llama continua.

En el caso del digestor continuo se debe esperar a que el digestor este en “régimen estable”, es decir cuando el volumen de gas producido a diario se ha estabilizado, se espera una variación diaria de entre +- 25%

El gas producido se debe almacenar en un gasómetro para su posterior uso.

#### **9.5.5. Descarga**

Antes de descargar el digestor se debe sacar todo el gas remanente que tenga dentro, luego se quita la cubierta para hacer la limpieza.

Se debe dejar el 10% del lodo del fondo o 10-30% del efluente como inóculo.

#### **9.5.6. Actividades cotidianas**

Se recomienda llevar un control de temperatura, para ello se puede utilizar un medidor de resistencia (multitester) u otro método.

También se debe llevar un control de las presiones generadas en el proceso, medido en cm de agua a fin de evitar daños al sistema por exceso de presión.

Observación frecuente de los dispositivos para detectar fugas, filtraciones o conexiones dañadas para su reparación inmediata.

## **Capítulo III: Diseño Experimental**

### **10. METODOLOGÍA PARA EL PROCESO EXPERIMENTAL**

En esta sección se plantean los puntos más importantes del diseño experimental, como los parámetros para la selección del sustrato, concentraciones necesarias para que se lleve a cabo el proceso metanogénico y método para el cálculo de la relación carbono:nitrógeno.

Además se explican los parámetros fisicoquímicos a controlar en el proceso de la biodigestión y el impacto que estos pudieran tener en los resultados.

#### **10.1. Selección del Sustrato**

Para escoger el sustrato a utilizar para la generación de biogás se deben tener en cuenta los siguientes criterios:

1. Esta materia se debe encontrar en abundantes cantidades.
2. Debe tener bajo costo de adquisición (o nulo).
3. Debe representar un factor de contaminación ambiental.
4. Debe producir una cantidad de biogás razonable.
5. Debe producir abonos orgánicos (biol) con un contenido de nutrientes aceptable.

Se ha escogido como sustrato para la producción de biogás los residuos orgánicos que se generan en el Campus Central de la Universidad de El Salvador, en base a los primeros tres criterios. Esta investigación dará una idea si estos residuos orgánicos cumplen con los otros dos. Los residuos incluyen aquellos que provienen de la cafetería (resultado de la preparación de alimentos y los residuos de comida

preparada) y la grama residual de jardinería que es del tipo *PaspalumNotatum*, grama bahía o grama negra.

En la investigación bibliográfica realizada, no se encontró un trabajo en el cual se estudien este tipo de sustratos, ya que tienen una composición muy variable. Pero nuestra justificación para tomar este tipo de residuos fue que el volumen de ellos dentro de la Universidad es grande y es importante encontrar una forma de sacarle provecho. Con el crecimiento poblacional el volumen de basura generada se ha convertido en un problema al cual se le debe encontrar una solución que sea de bajo costo y cuyos productos sean de utilidad.

Como la composición de estos residuos es variable, solo se tomaron en cuenta algunos de ellos como sustrato, en especial de aquellos que se conoce su relación Carbono/Nitrógeno (C/N), o de los cuales se tiene información que son buenos sustratos para la producción de biogás, como por ejemplo, los residuos de césped.

Por ejemplo los residuos provenientes de maíz, resultan atractivos en la producción de biogás, pues aportan un considerable contenido de carbono a la mezcla, en países como Alemania se está aprovechando recientemente los residuos del maíz como sustrato en la producción de biogás, de igual forma residuos de poda junto a residuos de granjas animales.

Conociendo la relación C/N de los residuos de la cafetería se pudo llegar a una composición del sustrato representativa y con la relación C/N adecuada a partir del balance de masa. Lastimosamente no para todos los residuos existen datos de relación C/N, pero esta relación se puede encontrar experimentalmente.

La grama *PaspalumNotatum*, grama bahía o grama negra, tiene un contenido de nitrógeno de 2.80% y la razón de carbono nitrógeno es de 15/1-25/1, por lo que en promedio se diría que contiene una alta cantidad de nitrógeno.

Las hojas representan una fuente baja de nitrógeno, aprox. 0.7% y la razón C/N es del 40/1-80/1, siendo estas una excelente fuente de carbono.

Los residuos de frutas en general tienen un promedio de 1.5% de contenido de nitrógeno (Base seca) y una razón C/N de 25/1-45/1, por lo que son una buena fuente de carbono.

Las bacterias responsables del proceso anaeróbico consumen carbono alrededor de 30 veces más rápido que el nitrógeno. Se recomienda un rango óptimo de 20:1-30:1 (Sievers, 1974)

A continuación se muestra un ejemplo de cómo se calculan las cantidades de materias para el sustrato o la relación C/N de la mezcla, conociendo el porcentaje de carbono y nitrógeno de los componentes.

Utilizando la ecuación 9.1 (Guevara, 1996):

$$K = \frac{C_1X_1 + C_2X_2 + C_3X_3 + \dots + C_nX_n}{N_1X_1 + N_2X_2 + N_3X_3 + \dots + N_nX_n} = \frac{\sum C_iX_i}{\sum N_iX_i} \quad 9.1$$

En donde:

$C$  = Porcentaje de Carbono en la materia prima

$N$  = Porcentaje de Nitrógeno en la materia prima

$X$  = Peso de las materias primas

$K$  = C/N de la mezcla de las materias primas

Por ejemplo se tiene 100 Kg de excretas de humanos (C: 2.5%, N: 0.85%), 100 Kg de estiércol de cerdos (C: 7.8%, N: 0.6%) y X Kg de paja de arroz (C: 42%, N: 0.63%). Calcular la cantidad de paja de arroz que se necesita agregar para tener una mezcla de esos componentes cuya relación C/N sea de 25:1.

Aplicando la ecuación 9.1 se tiene:

$$25 = \frac{2.5\% * 100 + 7.8\% * 100 + 42\% * X_3}{0.85\% * 100 + 0.6\% * 100 + 0.63\% * X_3}$$

Desarrollando

$X_3 = 98.9$  Kg de paja de arroz se necesitan agregar para tener una relación  $C/N$  de 25  
(Guevara Vera, 1996)



## 10.2. Obtención de las materias para el sustrato y preparación

Como se mencionó en la sección 10.1, en base a los datos de la relación C/N de las materias se preparó la muestra que se utilizó como sustrato. Estas materias se obtuvieron de los desechos de la Cafetería Universitaria del Campus Central, por la preparación de los alimentos y los residuos de alimentos después del consumo del mediodía, ya que se considera que a esta hora del día es más variada su composición (por tanto más representativa). Entre los residuos que se encontraron están los expuestos en la tabla 10.1:

**Tabla 10.1. Residuos en una muestra de basura proveniente de la Cafetería del Campus Central de la UES**

Cáscaras de Zanahoria	Huesos de pollo	Cáscaras de papa	Restos de pan
Tortillas	Cáscaras de Papaya	Restos de sopas	Servilletas usadas
Arroz	Cáscaras y hojas de piña	Grasa de pollo	Tallos de cebolla
Restos de lechuga	Cáscaras de naranja	Restos de chiles	Hierbas
Cáscaras de pepino	Cáscaras de limón	Hojas de repollo	Semillas de frutas

Para obtener estos residuos se le pidió a las encargadas de cada una de las cafeterías que introdujeran en bolsas (previamente identificadas) todos los residuos, y posteriormente se les clasificaron de la siguiente forma:

1. Se identificaron visualmente los residuos.
2. Se eliminaron los materiales no aptos como sustrato. Ejemplo: Huesos de pollo.

3. Se clasificaron los residuos según aquellos que representaron el mayor porcentaje en la basura.
4. Se molieron los residuos en molino de laboratorio.
5. Se pesaron cada uno de los residuos.

De estos residuos se hicieron mezclas para sacar la relación carbono nitrógeno de cada una, para lo cual se sacaron muestras de 200 g. A esta mezcla se le realizaron los siguientes análisis:

- Porcentaje de Humedad
- Porcentaje de Cenizas
- Porcentaje de Nitrógeno

Los cuales se realizaron en el Laboratorio de Química Agrícola del CENTA (Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal).

Según un estudio que se realizó en Laboratorio Rafaela, INTA en 1996, para conocer la cantidad de carbono se necesitan datos de Proteína Bruta, Fibra Cruda, Fibra Detergente Ácido, Fibra Detergente Neutro, Lignina Detergente Ácido y Extracto Etéreo. La suma de estos valores es la Materia Orgánica, la cual se divide entre 1.724 para obtener el porcentaje de carbono. Para el contenido de nitrógeno se divide la Proteína Bruta entre 6.25, y luego el Carbono se divide entre el Nitrógeno para obtener la relación.

Debido a que los costos de estos análisis son elevados y no se puede hacer el de Lignina Detergente Ácido, se va a obtener la Materia Orgánica de la siguiente manera:

$$M.O. = 100\% - \%Humedad - \%Cenizas(base húmeda) \quad 9.2$$

Ya que el 100% menos el porcentaje de Humedad es la Materia Seca y esta última está conformada por la Materia Orgánica e Inorgánica. La Materia Inorgánica es la Ceniza, así que restando esta cantidad obtendríamos una aproximación de la Materia Orgánica, la cual se divide entre 1.724 para obtener el contenido de carbono. Pero es importante mencionar que este valor es una aproximación y un método alternativo en vista que no se puede calcular exactamente el contenido de Materia Orgánica.

El factor para el Carbono Orgánico es el factor de Van Bemmelen de 1.724 a partir del contenido de Materia Orgánica (MO).

$$C.O. = 1/0.58 = 1.724$$

Se considera que la materia orgánica tiene un promedio de 58% de carbono. En donde 1.724 es la constante del contenido de carbono orgánico por cada 1% de materia orgánica.

Después de obtener la relación C/N de la mezcla de residuos de la Cafetería Universitaria (llamada MCU) y con los datos de relación C/N de la grama (MGN), se harán los cálculos para el sustrato final con la ecuación 9.1. Los valores de relación C/N de las mezclas finales serán aproximadamente 25:1 y 30:1.

### **10.3. Otras consideraciones para el diseño del experimento**

A continuación se exponen las consideraciones respecto a otras variables en el experimento:

#### **10.3.1. Concentración de Sólidos**

En lo referente a la concentración de sustratos, la mayoría de fuentes de información concuerdan que no debe ser muy alta, la mayoría concuerda con un 8%, en una investigación llevada a cabo por (Mahanta et al, 2005) se probaron concentraciones

de 2.5%, 8% y 12.5% de residuos de ganado, el experimento demostró mayor producción de gas a una concentración del 8% a temperatura de 35°C

### **10.3.2. Efecto de la Luz**

La luz no es letal para los organismos metanogénicos, pero inhibe la metanogénesis, por lo tanto se requiere completa oscuridad. Además el ingreso de luz solar puede favorecer el crecimiento de algas al interior del reactor dando como resultado interferencia.

### **10.3.3. Efecto de la Temperatura**

La mayoría de los microorganismos metanogénicos son mesofílicos, las temperaturas con las que contamos por naturaleza en El Salvador favorecen la fermentación

### **10.3.4. Efecto del pH**

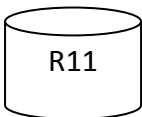
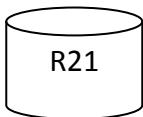
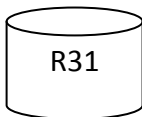
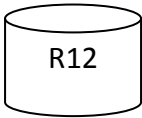
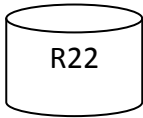
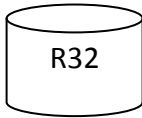
El pH óptimo de los microorganismos metanogénicos es de 6.7 – 7.5, por lo tanto en una segunda fase es necesario mantener un pH alto, solo la *Metanosarcina* es capaz de sobrevivir a pH más bajos de 6.7 (hasta 6.5).

Con otra bacteria, el metabolismo se suprime a pH<6.7, si se baja de 6.5 la producción de ácidos orgánicos lleva a un más bajo pH por las bacterias hidrolíticas y posiblemente se detenga el proceso de fermentación.

## **10.4. Niveles de Tratamiento**

En este estudio se realizaron dos niveles de tratamiento los cuales se diferenciaron por las composiciones iniciales del sustrato, y con fines estadísticos de cada nivel se realizaron tres repeticiones con igual estructura de cada reactor, como se representa en la Figura 10.1.

**Figura 10.1. Esquema de los niveles de tratamiento y sus ensayos definidos en el experimento**

	Repeticiones		
Niveles de Tratamiento	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Tratamiento 1	 R11	 R21	 R31
Tratamiento 2	 R12	 R22	 R32

### 10.5. Variable independiente

La variable independiente para este experimento es la composición inicial del sustrato la cual se ha expresado por la relación Carbono Nitrógeno de la mezcla. Se trabajó con relaciones Carbono Nitrógeno de 25:1 y de 30:1, las cuales se calcularon en base a los resultados obtenidos con el trabajo de laboratorio.

### 10.6. Variables dependientes

Las variables que se tomaron como dependientes en este experimento y las cuales se van a tomar mediciones son:

- Volumen de biogás
- Composición de biogás
- Características del biofertilizante

A continuación se presenta la descripción general referente a la manipulación que se le dio a estas variables respuestas:

#### **10.6.1. Volumen de Biogás**

Esta variable se midió con gasómetros similares a botellas de Marriot dentro de las cuales se almacenó el biogás, desplazando un volumen de agua equivalente al volumen de biogás admitido durante todo el proceso de fermentación. Con esto se obtuvieron una serie de datos que permitieron conocer el volumen de gas producido y almacenado en función del tiempo.

#### **10.6.2. Composición del Biogás**

Al concluir la producción significativa de biogás, se determinó en forma experimental la composición del mismo, para evaluar hasta qué grado puede ser aprovechado energéticamente.

#### **10.6.3. Características del biofertilizante**

Después de haber realizado el proceso de producción y haber realizado los muestreos del biogás se extrajeron muestras del biofertilizante de los reactores, que posteriormente fueron analizadas en el laboratorio de Química Agrícola del CENTA.

## 11. CARACTERIZACIÓN DEL SUSTRATO

A continuación se muestran los resultados obtenidos del análisis para la caracterización de las muestras de residuos tomadas en la Cafetería Universitaria y los residuos de jardinería.

### 11.1. Preparación del sustrato para el análisis en laboratorio

Después de tres muestreos se determinaron los residuos más representativos desechados en la Cafetería Universitaria. Estos datos se reportan en la tabla 11.1, los porcentajes se basan en los pesos de las muestras en los diferentes muestreos.

**Tabla 11.1. Peso de muestra de residuos de la Cafetería Universitaria (residuos más representativos) y porcentaje en la mezcla total**

<b>Muestra</b>	<b>Peso de la Muestra (g)</b>	<b>Fracción</b>
Cáscaras de Plátano	68.3	0.34
Restos de Arroz	8.3	0.04
Restos de Tortilla	32.4	0.16
Cáscara de Güisquil	32.9	0.16
Cáscara de Zanahoria	24.3	0.12
Cáscara de Papa	36.52	0.18
Total	202.72	1

De estos residuos se hizo una mezcla a la cual se le determinó el porcentaje de humedad, cenizas y nitrógeno total (Figura 11.1) Los resultados obtenidos de cada una de estas pruebas se presentan en las secciones 11.2 hasta 11.5. (Los pesos se presentan en gramos)

**Figura 11.1. Grama PaspalumNotatum y Residuos de Cafetería Universitaria secados y homogenizados en molino de laboratorio para análisis**



### 11.2. Determinación del porcentaje de Humedad

Esta determinación se hizo tomando el peso de la muestra húmeda colocándola en una capsula de porcelana grande. Luego se seco en una estufa a 50°C para evitar la perdida de nitrógeno. La muestra seca se volvió a pesar. Los resultados se muestran en la tabla 11.2.

**Tabla 11.2. Cálculo del % de Humedad en grama y residuos**

Muestra	W <sub>Cápsula</sub>	W <sub>Cápsula+Muestra</sub>	W <sub>Muestra</sub>	W <sub>Cápsula+Muestra Seca</sub>	Humedad	%Humedad
Gramma	549.13	699.4	150.27	581.55	117.85	78.43
Residuos	549.04	751.76	202.72	589.93	161.83	79.83

### 11.3. Determinación del porcentaje de Cenizas

Esta determinación se hizo con la siguiente metodología: "Ash of Animal Feed. Final Action.N°942.05".Official Methods of Analysis 15th Edition, 1990.Association of Official Analytical Chemist, Vol 1.Página 70.Los resultados se muestran en la tabla 11.3.



**Tabla 11.3. Cálculo del porcentaje de cenizas base seca en grama y residuos**

Muestra	W <sub>Crisol</sub>	W <sub>Crisol+Muestra</sub>	W <sub>Muestra</sub>	W <sub>Crisol+Cenizas</sub>	Cenizas	%Cenizas	Promedio base seca	Promedio base húmeda
Ga	29.0753	30.1062	1.0309	29.1804	0.1051	10.19	10.17%	2.19%
Gb	30.5133	31.6256	1.1123	30.6261	0.1128	10.14		
Ra	28.6885	29.7071	1.0186	28.7555	0.0670	6.58	6.61%	1.33%
Rb	30.5130	31.5531	1.0401	30.5821	0.0691	6.64		

#### 11.4. Determinación del porcentaje de Nitrógeno

Esta determinación se hizo con la siguiente metodología: “Microchemical Determination of Nitrogen, Microkjeldahl Method N°960.52. Ref.: JAOAC 32, 561 (1949); 33, 179 (1950); 43, 689 (1960). CAS-7727-37-9 (Nitrogen)”. Official Methods of Analysis 15th Edition, 1990. Association of Official Analytical Chemist, Vol 1. Página 342. Los resultados se muestran en la tabla 11.4.

**Tabla 11.4. Cálculo del porcentaje de Nitrógeno en grama y residuos**

Muestra	W <sub>Muestra</sub>	ml gastados	% Nitrógeno	Promedio base seca	Promedio base húmeda
Ga	0.1042	8.15	2.739	2.747%	0.593%
Gb	0.1029	8.1	2.757		
Gc	0.1135	8.9	2.746		
Ra	0.1057	5.12	1.696	1.688%	0.340%
Rb	0.1252	5.99	1.675		
Rc	0.1070	5.17	1.692		

#### 11.5. Relación Carbono/Nitrógeno del sustrato

Utilizando los datos de humedad y cenizas se calcula el contenido de materia orgánica, y con el dato de nitrógeno se obtiene la relación Carbono/Nitrógeno de la mezcla. Tabla 11.5.

**Tabla 11.5. Cálculo del porcentaje de Carbono y relación C/N en grama y residuos**

<b>Muestra</b>	<b>% Humedad</b>	<b>% Cenizas base húmeda</b>	<b>% Materia Orgánica base húmeda</b>	<b>% Carbono base húmeda</b>	<b>% Carbono base seca</b>	<b>Relación C/N</b>
Grama	78.43	2.19	19.38	11.24	52.11	18.97
Residuos	79.83	1.33	18.84	10.93	54.19	32.10

## 12. CÁLCULO DE CANTIDAD DE SUSTRATOS PARA LA CARGA DE DIGESTORES

En promedio cada digestor contiene una cantidad de sustrato equivalente al 80% del volumen total del digestor. Los cálculos que se hicieron para la preparación del sustrato se presentan a continuación:

$$\begin{aligned} &\text{Volumen del reactor 4 L} \\ &4 \text{ L} * 0.8 = 3.2 \text{ L } \vee 3200 \text{ ml} \end{aligned}$$

La cantidad de sólidos totales definida para este experimento es de 8%, por tanto:

$$3200 \text{ ml de mezcla} * \frac{8 \text{ g de sólidos secos}}{100 \text{ ml de mezcla}} = 256 \text{ g de sólidos por cada reactor}$$

$$256 \text{ g de sólidos} * 6 = 1536 \text{ g de sólidos totales secos}$$

De la relación C/N encontrada en el trabajo experimental se calculó la cantidad de grama y de residuos para una relación C/N de 25 y 30:

Ecuaciones para C/N = 25:

$$256 \text{ g} = X_G + X_R$$

$$25 = \frac{52.11 * X_G + 54.19 * X_R}{2.747 * X_G + 1.688 * X_R}$$

Resolviendo para ambas ecuaciones:

$$X_G = 107.49 \text{ g de grama seca } \wedge X_R = 148.51 \text{ g de residuos secos}$$

Sin embargo se debe tomar en cuenta que esta cantidad de grama y residuos son secos, en base húmeda:

$$X_G = 498.34 \text{ g de grama húmeda} \wedge X_R = 736.29 \text{ g de residuos húmedos}$$

La cantidad de residuos en el sustrato para cada reactor, fueron:

**Tabla 12.1. Masa de los residuos en el sustrato para cada reactor de C/N 25**

Muestra	Fracción	Masa de muestra húmeda (g)
Cáscaras de Plátano	0.34	250.34
Restos de Arroz	0.04	29.45
Restos de Tortilla	0.16	117.81
Cáscara de Güisquil	0.16	117.81
Cáscara de Zanahoria	0.12	88.35
Cáscara de Papa	0.18	132.53
Total	1	736.29

Ecuaciones para C/N = 30:

$$256 \text{ g} = X_G + X_R$$

$$30 = \frac{52.11 * X_G + 54.17 * X_R}{2.747 * X_G + 1.688 * X_R}$$

Resolviendo para ambas ecuaciones:

$$X_G = 26.85 \text{ g de grama seca} \wedge X_R = 229.15 \text{ g de residuos secos}$$

$$X_G = 124.48 \text{ g de grama húmeda} \wedge X_R = 1136.09 \text{ g de residuos húmedos}$$

La cantidad de residuos que se van a tratar son las siguientes (para cada reactor)

**Tabla 12.2. Masa de los residuos en el sustrato para cada reactor de C/N 30**

<b>Muestra</b>	<b>Fracción</b>	<b>Masa de muestra húmeda (g)</b>
Cáscaras de Plátano	0.34	386.27
Restos de Arroz	0.04	45.44
Restos de Tortilla	0.16	181.775
Cáscara de Güisquil	0.16	181.775
Cáscara de Zanahoria	0.12	136.33
Cáscara de Papa	0.18	204.50
Total	1	1136.09

Las siguientes tablas muestran la cantidad de residuos total que se peso para la preparación del sustrato de los tres digestores de C/N 25 y los tres digestores de C/N 30.

**Tabla 12.3. Total de residuos pesados para llenar tres digestores de C/N 25**

<b>Muestra</b>	<b>Fracción</b>	<b>Peso de muestra (g)</b>	<b>Total para 3 reactores (g)</b>
Cáscaras de Plátano	0.34	250.34	751.02
Restos de Arroz	0.04	29.45	88.35
Restos de Tortilla	0.16	117.81	353.43
Cáscara de Güisquil	0.16	117.81	353.43
Cáscara de Zanahoria	0.12	88.35	265.05
Cáscara de Papa	0.18	132.53	397.59
Total	1	736.29	2208.87

Total de grama a pesar para los 3 reactores de 25 C/N 1495.02 g de grama húmeda

**Tabla 12.4. Total de residuos pesados para llenar tres digestores de C/N 30**

<b>Muestra</b>	<b>Fracción</b>	<b>Peso de muestra (g)</b>	<b>Total para 3 reactores (g)</b>
Cáscaras de Plátano	0.34	386.27	1158.81
Restos de Arroz	0.04	45.44	136.32
Tortilla	0.16	181.775	545.325
Cáscara de Güisquil	0.16	181.775	545.325
Cáscara de Zanahoria	0.12	136.33	408.99
Cáscara de Papa	0.18	204.50	613.5
Total	1	1136.09	3408.27

Total de grama a pesar para los 3 reactores de 30 C/N 373.44 g de grama húmeda

Corroborando cálculos:

$$2208.87 * (1 - 0.7983) + 1495.02 * (1 - 0.7843) + 3408.27 * (1 - 0.7983) + 373.44 * (1 - 0.7843) = 1536 \text{ g de sólidos totales}$$

### **13. PREPARACIÓN DEL SUSTRATO Y PUESTA EN MARCHA DEL EXPERIMENTO**

Después de calcular la cantidad de residuos se procedió a la preparación del sustrato. Se pesaron las cantidades que se muestran en las Tablas 12.1 y 12.2 para los reactores de C/N 25 y C/N 30 respectivamente, en una balanza granataria.

Los residuos se licuaron en una licuadora de cocina con una cantidad de agua determinada la cual se calculó en base a la humedad del sustrato y el contenido de sólidos totales que debe tener el digestor.

El agua utilizada para la preparación del sustrato fue agua lluvia recogida durante la época lluviosa del mes de octubre, para evitar la inhibición de los microorganismos en el sustrato debido a la presencia de compuestos como el cloro residual en agua potable.

La grama se homogenizó cortando las hojas hasta un tamaño de aproximadamente 1 pulgada de largo. Se introdujeron capas de grama y de residuos de cafetería alternadamente en los reactores y se comprimieron para reducir el volumen. Este proceso se repitió con los todos los reactores tanto de C/N 25 y C/N 30.

Se le realizaron de 3 a 4 lavados a la licuadora con agua lluvia y esta agua de lavado se introdujo al reactor como parte del agua medida para cada reactor, todo esto para evitar dejar residuos que ya estaban pesados y que debían ser parte del sustrato y así transferir cuantitativamente.

Los materiales para cada unidad de digestión:

1. Botella de 4 L de vidrio ámbar con tapón de plástico
2. Botella de 2.5 L de vidrio claro con tapón de plástico
3. Manguera de plástico transparente No. 8
4. Termómetro de inmersión parcial de mercurio rango  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $110^{\circ}\text{C}$
5. Silicón
6. Recipiente recolector de agua

En la figura 13.1 se muestran como estaban dispuestos los biodigestores.



**Figura 13.1. Biodigestores para la producción de biogás y biofertilizante, contruidos a partir de materiales reciclados**



### **13.1. Marcha del digestor**

El inóculo del digestor fue estiércol de vaca. Se agregó al digestor una cantidad equivalente al 20% de la masa total de los sólidos secos. El estiércol se recogió fresco y se investigó si al ejemplar se le había suministrado antibiótico ya que esto puede afectar al proceso de fermentación por la presencia de inhibidores.

No se consideró en la relación C/N del sustrato la presencia del inóculo, ya que la cantidad se consideró pequeña como para que afecte esta relación.

Después de cargar el digestor se tomó el pH de la mezcla, se selló completamente y se tapó cualquier orificio con silicón, los resultados obtenidos en estos experimentos se muestran en el Capítulo IV.

### **13.2. Muestreo del gas contenido en los biodigestores**

Para el muestreo del biogás producido se usaron botellas “Rotaflow” especializadas para el muestreo de gases, en estas se tenía contenida una solución concentrada de NaOH 4N, de tal forma que a medida que el biogás burbujeaba a través de estas soluciones de pH alto, el CO<sub>2</sub> del biogás se convertía en carbonato y era absorbido dentro del líquido.

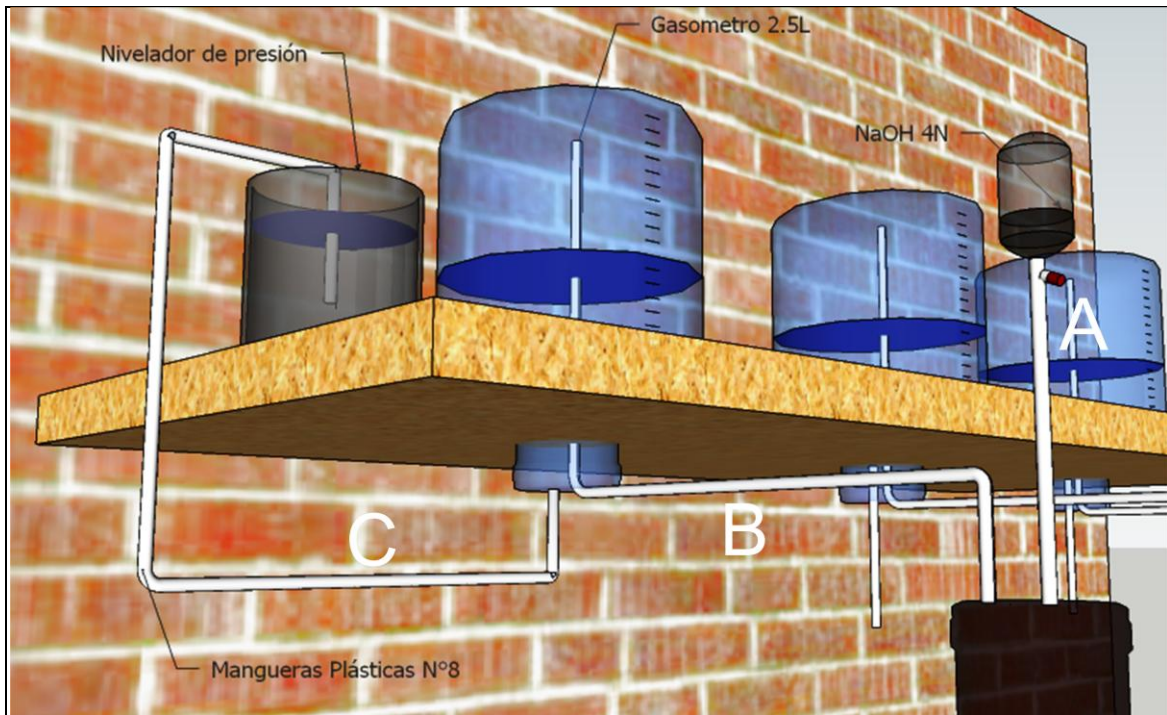
El volumen de gas metano muestreado fue determinado experimentalmente mediante el desplazamiento del líquido contenido en el gasómetro, debido a que únicamente el gas metano pasa a través de la solución y un volumen equivalente es impulsado en el gasómetro.

Al tener el gasómetro graduado se puede hacer la diferencia de volumen inicial y volumen final, para así obtener el total de biogás muestreado y posteriormente con el volumen de la botella Rotaflow conocer la fracción de metano obtenido.

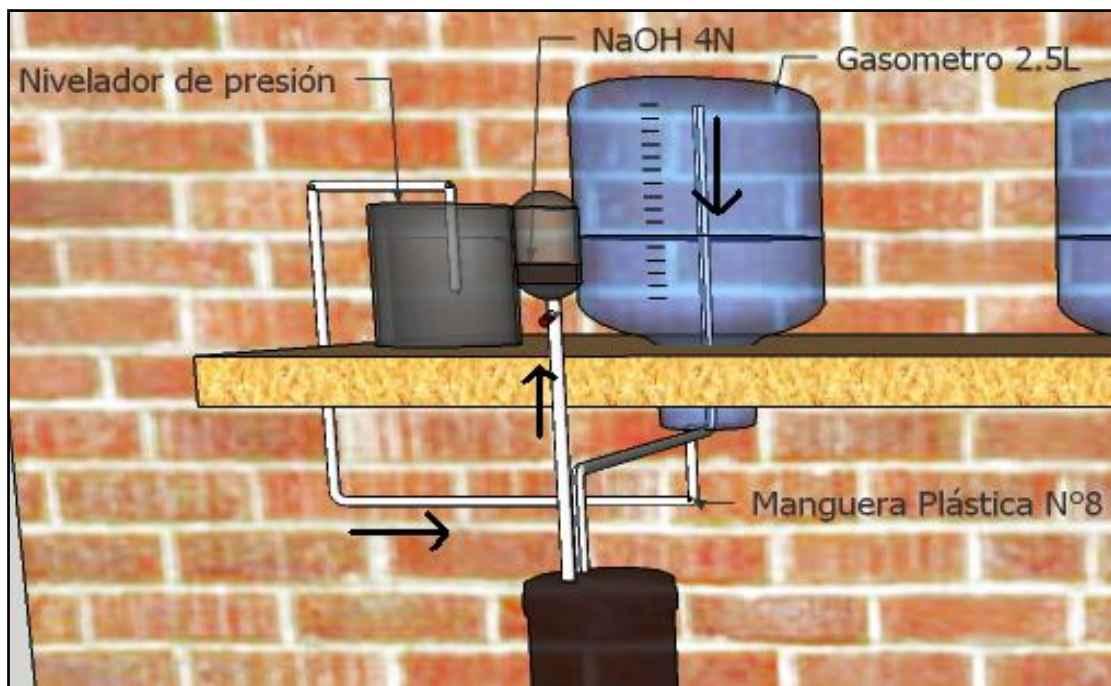
#### Procedimiento de muestreo:

1. Mediante una bomba se creó vacío dentro de la botella “Rotaflow”, para que de esta forma el gas fluyera desde el biodigestor hacia la botella Rotaflow conteniendo la solución saturada de NaOH.
2. Se pesó la botella Rotaflow junto a la solución de NaOH 4N y se anotó el peso.
3. Se conectó la manguera de muestreo “A” (véase figura 13.2) del biodigestor a la botella Rotaflow con la válvula cerrada.
4. Se introdujo la manguera de desalojo “C” (llena de agua) a un recipiente conteniendo agua, para que al abrir la válvula de la botella Rotaflow, el gas desplazado del gasómetro sea compensado con agua, de esta forma la diferencia de volumen era proporcional al gas muestreado.
5. Se procedió a colocar los niveles de líquido a la misma altura (Véase figura 13.3) para que al final del experimento la botella Rotaflow y el gasómetro estuvieran a P atm.
6. Se abrió la válvula de la botella Rotaflow lentamente para hacer que el gas burbujeará a través de la solución saturada de NaOH, para remover el CO<sub>2</sub> del biogás y conocer una fracción volumétrica de biogás.
7. Al finalizar el burbujeo se cerró la válvula Rotaflow y se procedió a sellar nuevamente el biodigestor y el gasómetro. Se anotaron los resultados obtenidos

**Figura 13.2. Muestreo de biodigestores**



**Figura 13.3. Niveles de agua de medidor de nivel y gasómetro al momento de muestreo**



## Capítulo IV: Resultados de la Etapa Experimental

### 14.RESULTADOS OBTENIDOS DEL EXPERIMENTO

Como se describió en el Capítulo III las variables a medir son: Volumen final del biogás, composición del biogás y rendimiento de los residuos.

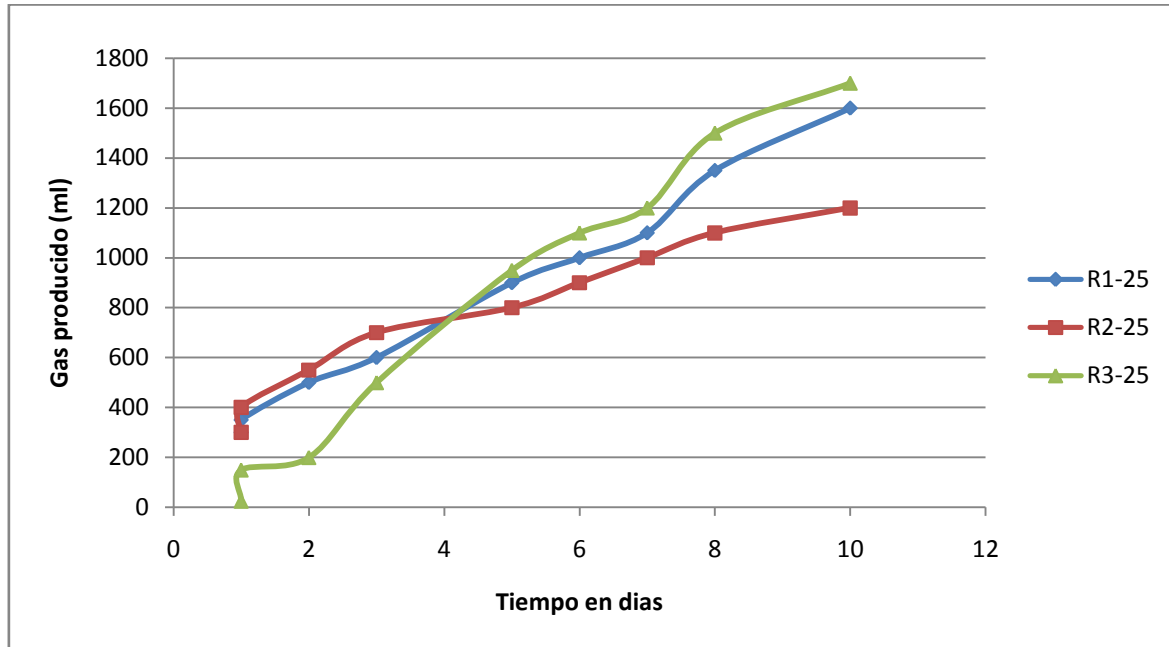
#### 14.1. Volumengenerado de biogás

En la tabla 14.1 se muestra el volumen de biogás producido como función del tiempo, para los seis digestores experimentales, lo cual se representa gráficamente en las figuras 14.1 y 14.2.

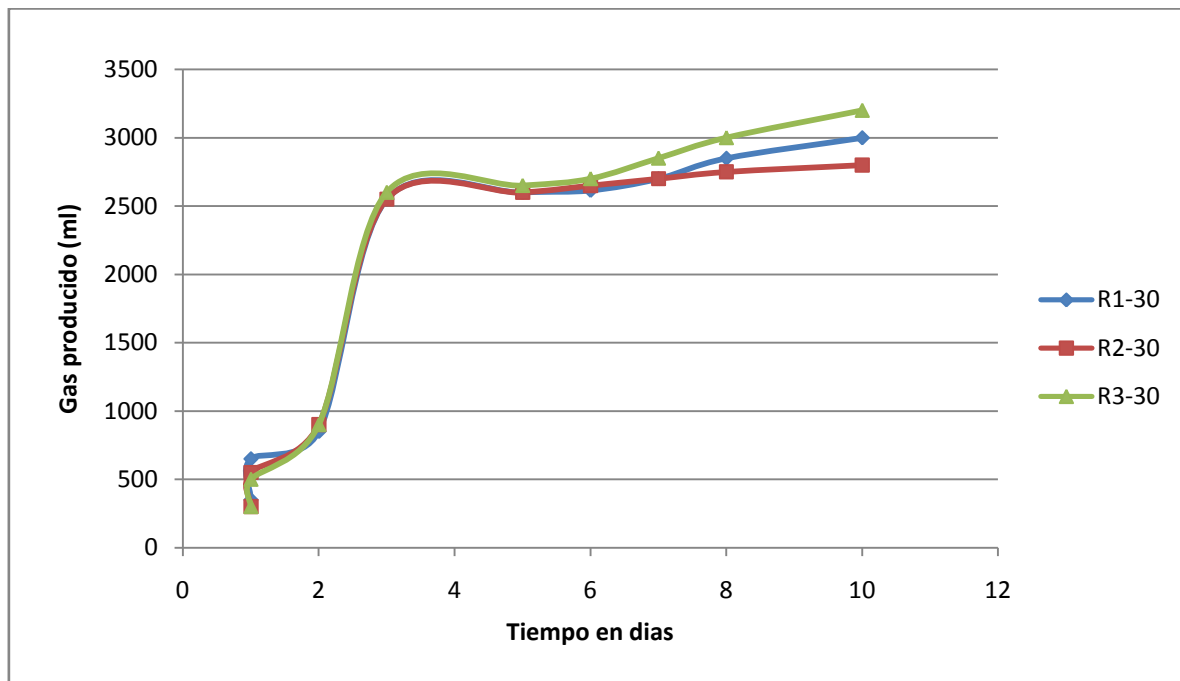
**Tabla 14.1. Producción de gas en ml para los 6 digestores anaeróbicos de relación C/N 25 y C/N 30 para diferentes tiempos, en días**

Día	R1-25	R2-25	R3-25	R1-30	R2-30	R3-30
1	300	300	25	350	300	300
1	350	400	150	650	550	500
2	500	550	200	850	900	900
3	600	700	500	2550	2550	2600
5	900	800	950	2600	2600	2650
6	1000	900	1100	2615	2650	2700
7	1100	1000	1200	2700	2700	2850
8	1350	1100	1500	2850	2750	3000
10	1600	1200	1700	3000	2800	3200

**Figura 14.1. Gráfico que muestra la producción de Biogás para 3 reactores con relación C/N de 25**

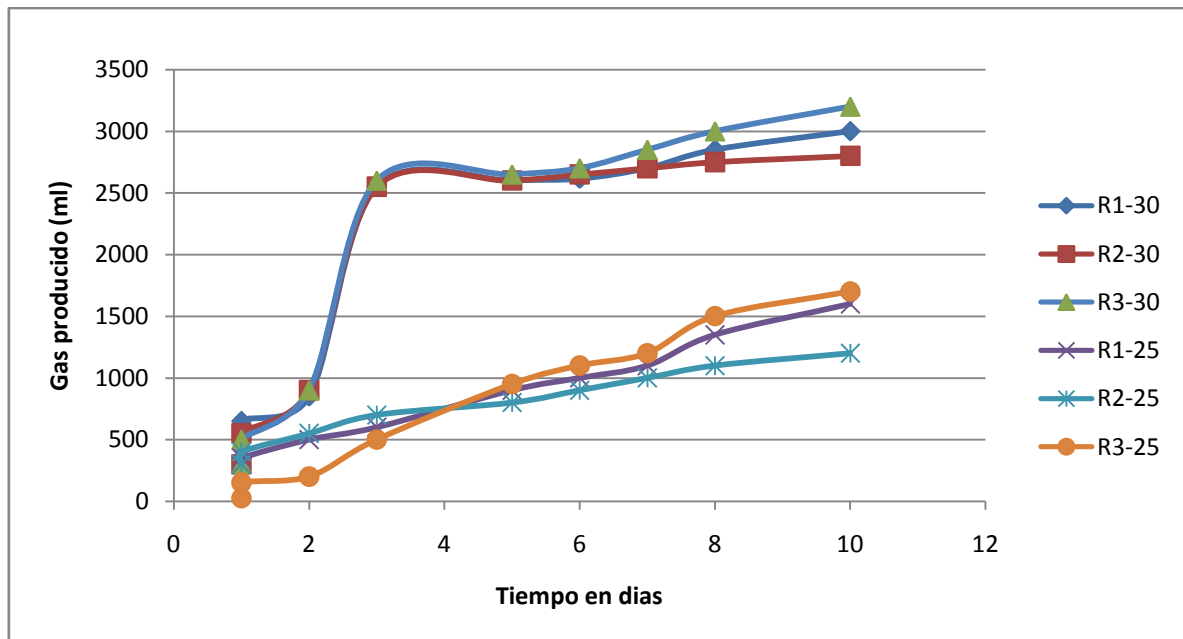


**Figura 14.2. Gráfico que muestra la producción de Biogás para 3 reactores con relación C/N de 30**



El gráfico 14.3 muestra la comparación entre la producción de biogás en los seis biodigestores para las relaciones C/N de 25 y 30

**Figura 14.3. Gráfico que muestra la comparación de la producción de biogás para los digestores de C/N 30 y C/N 25**



## 14.2. Resultados de las densidades obtenidas del muestreo del biogás

Para conocer la densidad del biogás generado se midió el volumen inicial y final de los gasómetros al momento del muestreo, y se pesaron las ampollas Rotaflow al inicio (Rotaflow + NaOH) y al final. Los resultados se presentan en la tabla 14.2.

**Tabla 14.2. Resultados de densidades del muestreo del biogás para los digestores anaeróbicos de relación C/N 25 y C/N 30**

Reactor	Peso inicial Rotaflow + NaOH (g)	Peso final Rotaflow + NaOH + Gas (g)	Peso biogas muestreado (g)	Vol.o Gasómetro (ml)	Vol.f Gasómetro (ml)	Vol. Biogas muestreado (ml)	$\rho$ (g/ml)	T (°C)
R1-25	225,97	226,75	0.78	1300	1850	550	0,00142	25
R2-25	407,44	408,02	0.58	1450	1850	400	0,00145	25
R3-25	476,41	477,12	0.71	1354	1684	330	0,00215	25
R1-30	226,51	227,11	0.6	650	1150	500	0,00120	23.5
R2-30	406,64	406,97	0.33	1425	1650	225	0,00147	22
R3-30	473,18	473,35	0.17	1450	1625	175	0,00097	22

En la tabla 14.3 se presentan los resultados de densidades para los datos experimentales en unidades del sistema inglés e Internacional.

**Tabla 14.3. Densidades del biogás calculadas para los digestores anaeróbicos de relación C/N 25 y C/N 30**

C/N	lb/pe <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>
25-1	0.0885	1.42
25-2	0.0905	1.45
25-3	0.1343	2.15
30-1	0.0916	1.20
30-2	0.0606	0.47
30-3	0.0749	0.97



En la tabla 14.4 se presentan los resultados de densidades promedios y desviaciones estándar para cada nivel de tratamiento y calculados a partir de los análisis por triplicado.

**Tabla 14.4. Promedio de densidad y desviación estándar del biogás muestreado**

Relación C/N	$\rho$ (Lb/ft <sup>3</sup> )	$\sigma$ (Lb/ft <sup>3</sup> )
25	0.1045 $\pm$ 0.0293	0.0259
30	0.0757 $\pm$ 0.01754	0.0155

Al comparar las densidades obtenidas (Tabla 14.4) con los datos de la tabla 14.5 obtenidos de la investigación de *Ludington (2002)*, se observa que para el rango de composición de metano del 40% al 70% en volumen, base seca (CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> únicamente) las fracciones de metano presentes en las muestras son menores de 19.6% p/p (<40% v/v) para la relación C/N de 25, y oscila en el rango de 35.4% a 47.3% p/p (60%-62% v/v) para la relación C/N de 30, lo que se resume en la tabla 14.6.

**Tabla 14.5. Propiedades del biogás a condiciones estándar. Biogás seco (CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>) a 32°F y 1 atm**

% V/V CH <sub>4</sub>	Peso (g mol)	%P/P CH <sub>4</sub>	$\rho$ (lb/ pie <sup>3</sup> )	Energía en forma de calor(BTU/ft <sup>3</sup> )
40	32.8	19.6	0.0916	385
42	32.3	20.9	0.0900	405
44	31.7	22.3	0.0885	424
46	31.1	23.7	0.0869	443
48	30.6	25.2	0.0854	463
50	30.0	26.7	0.0838	482
52	29.5	28.3	0.0822	501
54	28.9	30.0	0.0807	520
56	28.4	31.7	0.0791	540

**Tabla 14.5. (continuación) Propiedades del biogás a condiciones estándar.  
Biogás seco (CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>) a 32°F y 1 atm**

% V/V CH <sub>4</sub>	Peso (g mol)	%P/P CH <sub>4</sub>	ρ (lb/ pie <sup>3</sup> )	Energía en forma de calor (BTU/ft <sup>3</sup> )
58	27.8	33.5	0.0776	559
60	27.2	35.4	0.0760	578
62	26.7	37.3	0.0744	598
64	26.1	39.3	0.0729	617
66	25.6	43.7	0.0713	636
68	25.0	43.7	0.0698	655
70	24.4	40.0	0.0682	675

Fuente: "Calculating the heat value of biogas", David Ludington, president Dtech INC, Ithaca NY

Al comparar la densidad obtenida experimentalmente en la tabla 14.4. con los valores teóricos presentados en la tabla 14.5. se puede obtener un estimado de la concentración de metano contenida en el biogás, dichos valores aproximados se presentan en la tabla 14.6.

**Tabla 14.6. Composiciones aproximadas de las muestras obtenidas en base a la comparación con la Tabla 14.5**

Relación C/N	Densidad media (Lb/ft <sup>3</sup> )	σ	% P/P <sub>CH<sub>4</sub></sub>	%V/V <sub>CH<sub>4</sub></sub>
25	0.1045 ± 0.0293	0.0259	< 19.6 %	< 40 %
30	0.0757 ± 0.01754	0.0155	35.4 % - 47.3 %	60% - 62%

### 14.3. Resultados de las composiciones obtenidas del muestreo del biogás

Para determinar experimentalmente la composición del biogás, expresada en fracciones volumétricas, se siguió el método práctico descrito en la sección 13.2, dichos resultados se presentan a continuación en la sección 14.3.1.

### 14.3.1. Determinación de las fracciones del gas metano

Para conocer la fracción de metano se midió el volumen vacío que se produjo en las Rotaflow después del muestreo por diferencia de volumen de la solución de NaOH (la cual absorbió los gases ácidos como CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S en su mayoría pues el resto se consideran trazas, incluso el H<sub>2</sub>S pero es más representativo que el resto) y el volumen total de la ampolla Rotaflow, el cual posteriormente se dividió entre el volumen de biogás muestreado de los gasómetros para cada repetición. Los cuales fueron presentados en la Tabla 14.2.

En la tabla 14.7 se presentan los resultados de los cálculos desarrollados para medir la composición del gas metano

**Tabla 14.7. Resultados de fracciones volumetricas del muestreo del biogás para los digestores anaeróbicos de relación C/N 25 y C/N 30**

Reactor	VolNaOH (ml)	Volrotaflow (ml)	Vol CH <sub>4,atm</sub> (ml)	Vol biogás muestreado (ml)	X <sub>CH<sub>4</sub></sub>
R1-25	50	345	295	550	0,536
R2-25	180	345	165	400	0,413
R3-25	250	345	95	330	0,288
R1-30	49,5	349	299,5	500	0,599
R2-30	180	349	169	225	0,751
R3-30	250	349	99	175	0,566

En la tabla 14.8 se hace una comparación de los promedios de las composiciones experimentales presentadas en la tabla 14.7 con los resultados que según la teoría se podrían esperar, los cuales fueron tomados de la tabla 5.2 para biogás de residuos agrícolas, y las composiciones teóricas esperadas según la tabla 14.5.

Se puede observar como los resultados experimentales no difieren mucho de los resultados esperados según las fuentes bibliográficas.

**Tabla 14.8. Comparación de resultados experimentales con datos teóricos para la fracción de metano**

Reactor	$X_{CH_4}$	Promedios de $X_{CH_4}$	$X_{CH_4}$ teórico para residuos agro	$X_{CH_4}$ (según tabla 14.5)	$\sigma$	
R1-25	0,536	0,412 ± 0.1403	0,45-0,75 (tomado de tabla 5.2)	< 0.40	0,124	
R2-25	0,413					
R3-25	0,288					
R1-30	0,599	0,639 ± 0.1120		0.60 - 0.62		0,099
R2-30	0,751					
R3-30	0,566					

La fracción de  $CO_2$  presente en las muestras fue determinado tomado consideraciones teóricas sobre las trazas de componentes presentes de acuerdo a la información presentada en la tabla 5.3:

$$X_{H_2S}=0,0025,$$

$$X_{H_2O}=0,025,$$

$$X_{N_2}=0,025,$$

De esta forma la fracción de dióxido de carbono se determinó con la siguiente ecuación:

$$X_{CO_2} = 1 - X_{CH_4} - X_{H_2S} - X_{H_2O} - X_{N_2} \quad 14.1$$

En la tabla 14.9 se presentan los datos de la composición de  $CO_2$  estimada para las 6 muestras.

**Tabla 14.9. Comparación de resultados experimentales con datos teóricos para la fracción de Dióxido de Carbono**

Reactor	$X_{CO_2}$	Promedios de $X_{CO_2}$	$X_{CO_2}$ teórico	$\sigma$	
R1-25	0,411	0,535 $\pm$ 0.140	0,25-0,50 (tomado de tabla 5.3)	0,124	
R2-25	0,535				
R3-25	0,660				
R1-30	0,349	0,309 $\pm$ 0.112		0,25-0,50 (tomado de tabla 5.3)	0,099
R2-30	0,196				
R3-30	0,382				

En la tabla 14.10 se presenta la composición estimada del gas, para las pruebas con relación C/N 25 y 30.

**Tabla 14.10. Composición experimental del biogás producido para relación C/N 25 y C/N 30**

Componente	Relación C/N 25	Relación C/N 30
CH <sub>4</sub>	0,4122 $\pm$ 0,1403	0,6386 $\pm$ 0,1120
CO <sub>2</sub>	0,5352 $\pm$ 0,140	0,3089 $\pm$ 0,1120
H <sub>2</sub> S	0,0025	0,0025
H <sub>2</sub> O	0,025	0,025
N <sub>2</sub>	0,025	0,025

El rendimiento del proceso, calculado como volumen de biogás producido por gramo de mezcla seca agregada, oscila en el rango de 0.0058 $\pm$ 0.0012 litros de biogás por gramo de mezcla seca para la relación C/N de 25, y en el rango de 0.0117 $\pm$ 0.0008 litros de biogás por gramo de mezcla seca para la relación C/N de 30. Ver tabla 14.11.

**Tabla 14.11. Rendimientos de gas producido por materia prima**

<b>Relación C/N</b>	<b>Media de gas producido (ml) en 10 días</b>	<b>Mezcla agregada seca (g)</b>	<b>Mezcla agregada húmeda (g)</b>	<b>Litros de biogás por g de mezcla seca (L/g)</b>
25	1500 ± 299.39	256	1234.63	0.0058 ± 0.0012
30	3000 ± 226.31	256	1260.57	0.0117 ± 0.0008

#### **14.4. Análisis del Biofertilizante**

Las características de los biofertilizantes obtenidos en el experimento para las seis muestras fueron determinadas en el laboratorio del Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal “CENTA”. Las características analizadas fueron:

- Contenido de Humedad
- Contenido de Cenizas
- pH
- Nitrógeno Total
- Fósforo Insoluble en citrato
- Potasio Total
- Macroelementos: Calcio, Magnesio, Sodio
- Microelementos: Hierro, Zinc, Cobre, Manganeseo

##### **14.4.1. Determinación de Humedad en los biofertilizantes**

Tal como en el análisis del sustrato las muestras se homogenizaron para obtener el contenido de humedad. Luego se secaron en estufa a 50°C para evitar la pérdida de Nitrógeno. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 14.12:

**Tabla 14.12. Contenido de Humedad en biofertilizante**

<b>Nivel de Tratamiento</b>	<b>%Humedad<math>\bar{x}</math></b>	<b><math>\sigma</math> (%)</b>	<b>% Precisión Relativa</b>
Relación C/N 25	92.14% $\pm$ 1.77	1.563	1.6961
Relación C/N 30	92.67% $\pm$ 0.86	0.766	0.8267

#### 14.4.2. Determinación de Cenizas en los biofertilizantes

La cantidad de cenizas se analizó con la misma metodología utilizada para el sustrato. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 14.13:

**Tabla 14.13. Contenido de Cenizas en biofertilizantes en base húmeda**

<b>Nivel de Tratamiento</b>	<b>Prom % Cenizas</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>% Precisión Relativa</b>
Relación C/N 25	0.6675% $\pm$ 0.033	0.029	4.33
Relación C/N 30	0.6339% $\pm$ 0.027	0.024	3.74

Base Húmeda

#### 14.4.3. Determinación de Nitrógeno Total en los biofertilizantes

Dado que el uso proyectado de este subproducto es el de abono orgánico, la metodología para la determinación del nitrógeno total es la misma que para fertilizantes: "Nitrogen (Total) in Fertilizers. Kjeldahl Method. Final Action. N°955.04. Ref.: JAOAC 51, 446 (1968). CAS-7727-37-9 (Nitrogen)". Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 14.14:

**Tabla 14.14. Contenido de Nitrógeno Total en biofertilizantes**

<b>Nivel de Tratamiento</b>	<b>Prom % Nitrógeno Total</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>% Precisión Relativa</b>
Relación C/N 25	0.2415% $\pm$ 0.0407	0.0360	14.93
Relación C/N 30	0.2248% $\pm$ 0.0195	0.0173	7.71

Base Húmeda

#### 14.4.4. Determinación de Fósforo Insoluble en Citrato

La metodología para el análisis de Fósforo se basa en la metodología de la AOAC para alimento animal: “Phosphorus in Animal Feed. Photometric Method. First Action 1965. Final Action 1966. N°965.17. Ref.: JAOAC 48, 654(1965); 59, 937(1976). CAS-7723-14-0 (phosphorus)”. Official Methods of Analysis 15th Edition, 1990. Association of Official Analytical Chemist, Vol 1. Los resultados en base húmeda se presentan en la tabla 14.15.

**Tabla 14.15. Contenido de Fósforo en biofertilizantes**

Nivel de Tratamiento	Prom Fósforo (ppm)	$\sigma$	% Precisión Relativa
Relación C/N 25	345	0.001801	5.23
Relación C/N 30	249	0.001731	6.95

Base Húmeda

#### 14.4.5. Determinación de Macro y Microelementos en los biofertilizantes

Para estas determinaciones se utilizaron las siguientes metodologías:

1. “Minerals in animal Feed. Atomic Absorption, Spectrophotometric Method. First Action 1968. Final Action 1969. N°968.08” Dry Ashing (not applicable to mineral- mix feeds) Official Methods of Analysis 15th Edition, 1990. Association of Official Analytical Chemist, Vol 1.
2. “Other Elements Nutrients (Minor) in Fertilizers. Atomic Absorption, Spectrophotometric Method. First Action 1965. Final Action 1969. N°965.09” Official Methods of Analysis 15th Edition, 1990. Association of Official Analytical Chemist, Vol 1.

El Potasio se lee por emisión, los demás elementos se determinaron por absorción. Los resultados se muestran en las tablas 14.16 y 14.17:



**Tabla 14.16. Contenido de Potasio Total en biofertilizantes**

<b>Nivel de Tratamiento</b>	<b>Prom % Potasio Total</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>% Precisión Relativa</b>
Relación C/N 25	0.1751 $\pm$ 0.0070	0.00627	3.58
Relación C/N 30	0.2001 $\pm$ 0.0136	0.01208	6.03

Base Húmeda

**Tabla 14.17. Contenido de Microelementos**

<b>Elemento</b>	<b>Relación C/N 25</b>	<b>Relación C/N 30</b>
Calcio (%p/p)	0.03514 $\pm$ 0.00286	0.02169 $\pm$ 0.00149
Magnesio (%p/p)	0.01126 $\pm$ 0.00048	0.01086 $\pm$ 0.00146
Cobre (ppm)	0.7148 $\pm$ 0.0995	0.8217 $\pm$ 0.0848
Zinc (ppm)	5.58 $\pm$ 1.19	4.55 $\pm$ 0.49
Manganeso (ppm)	2.944 $\pm$ 0.172	2.511 $\pm$ 0.061
Hierro (ppm)	43.80 $\pm$ 8.26	56.71 $\pm$ 5.62

Base Húmeda

## **Capítulo V:**

# **Diseño preliminar de un biodigestor para la producción de Biogás**

### **15. Diseño de biodigestor**

El diseño de biodigestores debe responder tanto al lugar como al grado de aplicación y a la finalidad de la tecnología.

Conociendo la localidad, el lugar donde estará ubicada la planta, y en función a la carga disponible, se seleccionara el sistema más adecuado, de acuerdo a una secuencia o flujo que permita tener una idea clara del tamaño y forma del digestor necesario.

El diseño abarca una serie de actividades que van desde la etapa preliminar hasta el calculo de materiales y planos de construcción, para los fines del presente trabajo de investigación se propondrá una metodología general para el diseño y aplicación de biodigestores en base a los resultados obtenidos.

#### **15.1.1. Datos de la zona de estudio**

En este punto se recolecta información de la posible demanda del biogas y fuentes de materiales para la carga.

Como es el caso un diseño de biodigestor para la alimentación de la planta piloto de la Escuela de ingeniería química, nos concentraremos en la demanda que los laboratorios tienen, según datos reportados el consumo es de 100 lbs de gas propano al año.

### **15.1.2. Selección del modelo de biodigestor más factible**

Es conveniente relacionar el objetivo y el régimen de operación, con los recursos técnicos, económicos y materiales con que se cuentan.

En vista que se desea contar con cierta cantidad de biogás al día y por la versatilidad del diseño, se puede hacer uso de un biodigestor semicontinuo.

### **15.1.3. Especificaciones para el diseño de biodigestores**

Dado que el objetivo es la producción de biogás, los cálculos pueden hacerse partiendo de dos criterios

- Utilizar todos o una determinada parte de los desechos orgánicos originados y disponibles para producir gas.
- Producir una cantidad determinada de gas para satisfacer una demanda.

Ambos casos dependen de la cantidad de materia prima disponible en el lugar, en base al trabajo de investigación de Núñez et. Al (2000) en su trabajo de investigación, se pueden calcular las cantidades de materias primas producidas, que se muestran en la tabla 15.1.

**Tabla 15.1. Cálculos de la producción de residuos orgánicos diarios en la Universidad de El Salvador**

Áreas	Residuos de comida (kg)	Residuos de jardín (kg)
Contenedores	5.92	115.93
Cafeterías	25.83	6.64
<b>Total</b>	<b>31.75</b>	<b>122.58</b>

Fuente: Núñez, Ramírez y Yanes "Propuesta para la gestión de residuos sólidos en La Universidad de El Salvador", tesis para optar al título de Ingeniero Químico, 2000

En vista de los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación expuestos en la tabla 14.10, se comprueba como la mezcla de relación C/N de 30 es la mejor para la producción de biogás, por lo tanto si se tomara toda la producción de residuos de las cafeterías de la Universidad de El Salvador, diariamente podemos agregar aproximadamente 30 kg de residuos de comida base húmeda, a los cuales corresponden 3.28 kg de grama, para llegar a una mezcla de relaciónC/N de 30, la suma es de33.28 kg de residuos.

En el experimento, se obtuvo la mayor producción de biogás a los 10 días, entonces se agregaran al biodigestor:

$$\frac{33.28 \text{ Kg de residuos}}{\text{Día}} * 10 \text{ Días} = 332.8 \text{ Kg de residuos húmedos}$$

Tomando en cuenta la humedad de la mezcla se agregaran, 1.74 litros de agua por kg de residuos húmedos, para lograr así la concentración del 8% de sólidos.

Por lo que será necesario disponer de 57.90 litros de agua diarios para cargar al reactor junto con los 33.28 kg de residuos (30 kg de residuos de cafetería y 3.28 de grama).

El peso total a cargar durante 10 días será de  $332.8 \text{ kg} + 579 \text{ kg} = 911.80 \text{ kg}$

Por lo tanto si la densidad de la mezcla a cargar junto con agua es de  $1.080 \text{ kg/l}$  entonces el volumen de la carga total será de:

$$\frac{911.80 \text{ Kg}}{1.080 \text{ Kg/L}} = 844.26 \text{ L}$$

Eso conlleva al cálculo del volumen de la cámara de fermentación.

La ecuación a utilizar es la siguiente:

$$VCF = VCT + 5\%VCT \quad 15.2$$

Donde

**VCF:** Volumen de la cámara de fermentación

**VCT:** Volumen de la carga total

Entonces el volumen de la carga total de fermentación es  $844.26 \text{ litros}$  o  $0.844 \text{ m}^3$ , al sumar el 5% nos da como resultado una cámara de fermentación de  $0.886 \text{ m}^3$

El rendimiento puede ser expresado en  $\text{m}^3/\text{kg}$  de sólidos húmedos, sólidos secos, sólidos volátiles o ácidos volátiles. En el experimento se obtuvo un rendimiento según la tabla 14.11 de:

$0.0117 \text{ litros}$  de biogás por gramo de mezcla seca agregada

Por lo tanto si la humedad de la mezcla agregada es de  $0.796$  tenemos que diariamente se agregaran  $6.75 \text{ kg}$  de mezcla seca de residuos provenientes de la Universidad de El Salvador, es decir que diariamente se tendrá disponible:

$$6.75 \text{ Kg} * \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ Kg}} * \frac{0.0117 \text{ L de biogás}}{1 \text{ g de mezcla}} = 0.078 \text{ m}^3$$

Lo cual es igual a decir que del biodigestor se producirán aproximadamente 0.078 m<sup>3</sup> de biogás diarios.

Si la planta piloto de la escuela de ingeniería química de La Universidad de El Salvador tiene un consumo de 1 cilindro de 100 lb de gas propano por año, en términos energéticos consume:

$$100 \text{ lb} * \frac{1 \text{ gal}}{4.68 \text{ lb}} * \frac{26926.9 \text{ KWh}}{1 \text{ gal}} = 575159 \text{ KWh propano/año}$$

Por ello en base diaria sería 1.57 KWh/día

Sabiendo que el contenido energético promedio del biogás es 6.25 KWh / m<sup>3</sup>, y dado que el biodigestor producirá 0.078 m<sup>3</sup> de biogás al día, la cantidad de energía a obtener diariamente por el uso del biodigestor será:

$$6.25 \text{ KWh/m}^3 * 0.078 \text{ m}^3 = 0.49 \text{ KWh/día}$$

De esta forma, un biodigestor semicontinuo puede sustituir la demanda energética de la planta piloto en un 31.05% tomando en cuenta que se aprovechen todos los residuos de las cafeterías, y en el entendido que la producción de residuos orgánicos de las cafeterías no ha disminuido respecto a lo reportado en el 2000 por Núñez et. Al, en la tabla 15.2 se encuentra un resumen de los parámetros de diseño obtenido.

**Tabla 15.2. Resumen de parámetros de diseño obtenidos**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Tiempo de retención	10 días
Carga de residuos de cafetería al día	30 kg
Carga de residuos de jardinería al día	3.28 kg
Agua a agregar al día	57.90 litros
Volumen de la cámara de fermentación	0.866 m <sup>3</sup>
Producción diaria de biogás	0.079 m <sup>3</sup>
Estimado de energía diaria producida	0.49 Kwh/día

#### **15.1.1. Forma geométrica**

En cuanto a su forma geométrica, por fines estructurales se sugiere que sea de forma cilíndrica vertical, enterrado para favorecer el proceso fermentativo por la poca influencia de los cambios de temperatura.

#### **15.1.2. Volumen de la cámara de carga y descarga**

Para el cálculo de la cámara de entrada y salida se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- La cámara de carga esta compuesta por un tubo recto que se coloca en forma oblicua, lo que facilita su construcción, ahorra mano de obra y materiales, asegura una entrada expedita y facilita la agitación del líquido. Ingresa por acción de la gravedad, al estar ubicada sobre el nivel de líquido en el

biodigestor, conviene que sea recta pues al evitar las curvas se logramos que el material no se atasque al ingreso y permite una fácil limpieza.

- La cámara de descarga es por donde se evacuan los materiales de fermentación, posibilita la extracción del material estabilizado, que ha cumplido el tiempo de residencia dentro del biodigestor. Se coloca el extremo del caño de descarga a una cota tal con respecto al nivel del terreno, que permita la salida del residuo por el principio de “vasos comunicantes”. Esto significa que al ingresar una cantidad determinada de mezcla de alimentación a digerir, se descargara automáticamente un volumen igual de mezcla de residuos digeridos.

### **15.1.3. Variables a considerar en el requerimiento de materiales y cálculos estructurales.**

Para determinar la cantidad de materiales que requiere el digestor es necesario determinar sus principales formas geométricas para que conjuntamente con las cargas que soporta realizar el cálculo estructural(*Guevara, 1996*).

A continuación se mencionan algunas de estas variables a tener en cuenta para el cálculo de los materiales.

#### **A. Forma de las estructuras:**

Con el fin de calcular las superficies se deben tener presentes las siguientes formas geométricas más comúnmente utilizadas:

- a) Cúpula o techo:**rectangular, cuadrada o circular
- b) Pared:** cilíndrica, rectangular, cuadrada
- c) Piso o fono:** Esfera invertida, plana rectangular, circular



**Cálculo de la superficie:** incluye superficies internas medias y externas del digester, la cantidad de materiales necesarios pueden calcularse de las superficies antes mencionadas de la siguiente forma:

$$A_t = A_1 + A_2 + A_3 = \text{Área (techo + pared + piso)} \quad 15.3$$

$$\text{Cálculo de volumen} = \text{Área base} * \text{Altura} \quad 15.4$$

### **B. Cálculo de las cargas:**

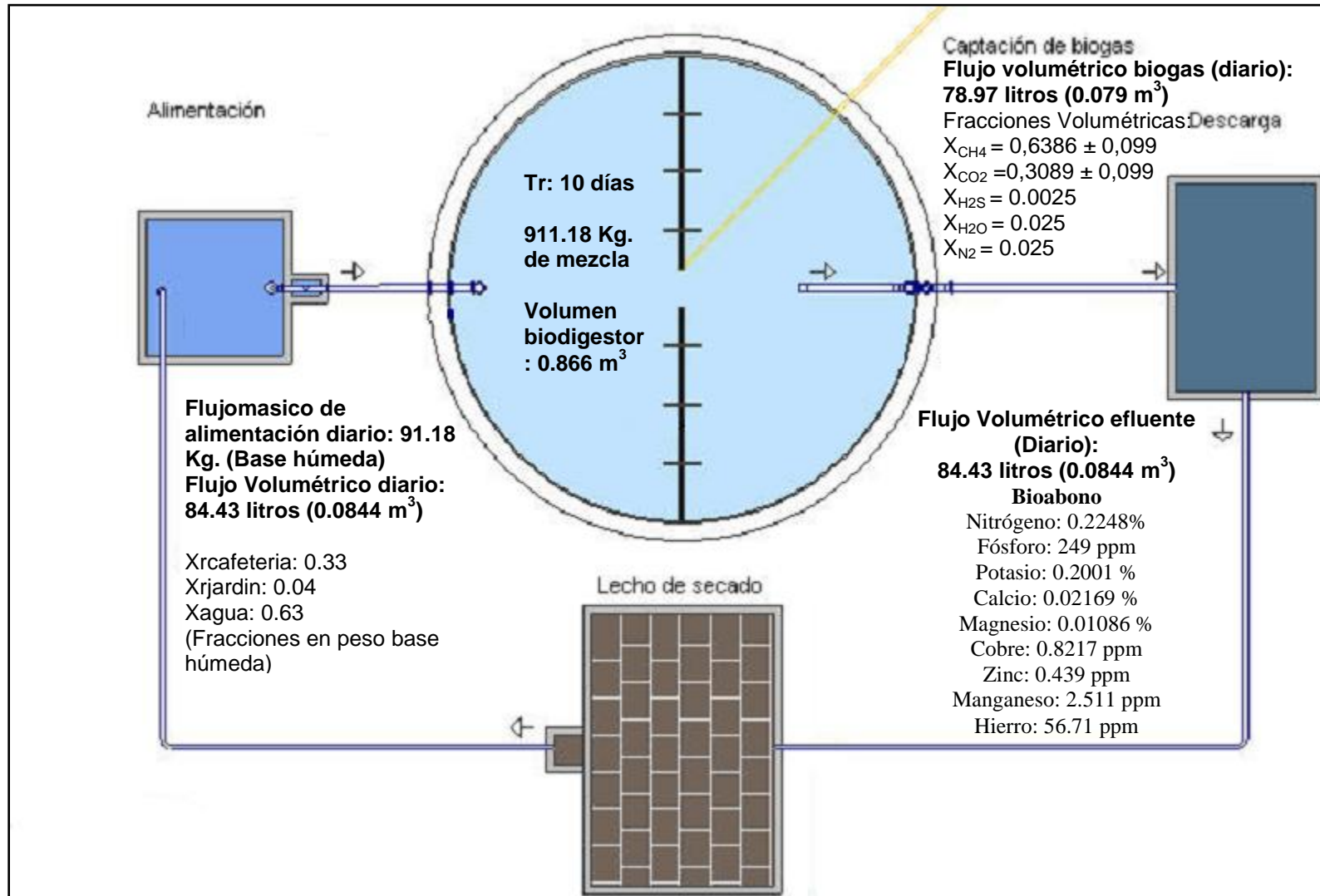
Deben definirse todas las cargas que actúan sobre el biodigestor:

- a) **Techo:** peso cúpula, presión gas, cargas vivas (si está enterrado)
- b) **Pared:** presión lateral de la tierra, presión vertical del gas sobre la pared, carga vertical si tiene cúpula superior, carga muerta por peso de pared
- c) **Piso:** presión del gas, presión hidráulica del material líquido, peso cúpula inferior y reacción de la base

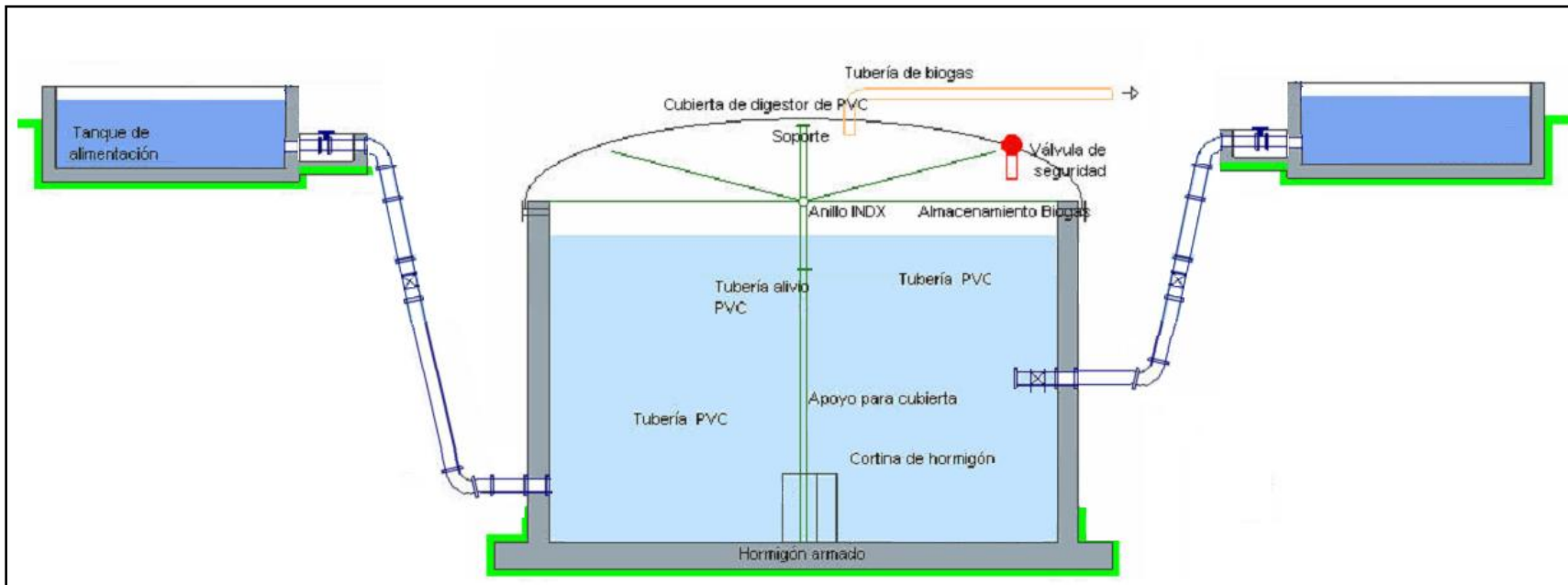
#### **15.1.4. Esquemas del biodigestor propuesto.**

A continuación se presentan los esquemas del biodigestor propuesto, en la figura 15.1. se presenta una vista en planta con la caracterización de los afluentes y efluentes y en la figura 15.2. se representa una vista frontal del biodigestor con los accesorios más relevantes.

**Figura 15.1. Vista superior del biodigestor semicontinuo propuesto**



**Figura 15.2. Vista frontal del biodigestor semicontinuo propuesto**



## 16. CONCLUSIONES

1. Los residuos provenientes de las cafeterías de La Universidad de El Salvador en combinación con residuos de jardinería, generan una cantidad de biogás razonable al ser combinadas para lograr una relación de carbono/nitrógeno de 30:1, presentándose así como una opción atractiva con el fin de sacar provecho de los residuos convirtiéndolos en productos de utilidad.
2. La producción de biogás se da en 10 días a las condiciones ambientales locales, lo que permite que el tiempo de retención en un biodigestor se encuentre alrededor de los 10 días.
3. La relación carbono/ nitrógeno de la mezcla que dio mejores resultados fue de 30:1 al duplicar casi la producción de relación C/N 25, pues en la tabla 14.11 se muestra como el rendimiento de la relación C/N de 30 es  $0.0117 \pm 0.0008$  litros de gas por gramo de mezcla seca, mientras que el rendimiento de la relación carbono: nitrógeno de 25:1 fue de  $0.0058 \pm 0.0012$  Litros de gas por gramos de mezcla seca, es superior casi en un 50%.
4. Al comparar las densidades del biogás obtenido, se observa que el menos denso es el de relación carbono nitrógeno de 30:1 con  $0.0757 \pm 0.01754$  lb/ft<sup>3</sup> contra  $0.1045 \pm 0.0293$  lb/ft<sup>3</sup> correspondiente al de relación C/N de 25:1, lo cual apoya la conclusión que el biogás con mayor concentración de gas metano es el de relación C/N 30:1, pues el gas metano es más ligero que los demás gases.
5. Al evaluar la composición en forma experimental, y despreciando las trazas de otros gases, se encontró que el biogás procedente de la relación carbono nitrógeno de 30:1 contiene una fracción volumétrica de gas metano de  $0,639 \pm 0.1120$ , la cual es mayor al ser comparada con la relación carbono nitrógeno de 25:1 que contiene una relación volumétrica de  $0,412 \pm 0.1403$ .

6. Los residuos utilizados contienen un alto contenido de humedad, 78.43 % para la grama y 79.83 % para los residuos de las cafeterías, lo que conlleva que para lograr 8% de sólidos en el biodigestor, se utilicen mayores cantidades de residuos y menor cantidad de agua fresca agregada, resultando así en un ahorro de agua.
7. La grama *PaspalumNotatum* tiene una relación C/N de 18.97, y los residuos de cafetería contienen una relación C/N de 32.10, mostrando así que la grama es la fuente principal de nitrógeno de la mezcla a cargar y los residuos de cafetería se presentan como la fuente principal de carbono.
8. En base a los resultados obtenidos de la mezcla con la relación C/N de 30, por ser la que produjo más gas y de mejor calidad, se calcularon las dimensiones de un biodigestor que aprovechará la mayor parte de los residuos provenientes de las cafeterías de la Universidad de El Salvador mezclados con residuos de jardinería generados de la misma, el resultado ha sido alentador pues se necesitará un biodigestor semicontinuo con una cámara de fermentación de 0.866 m<sup>3</sup> lo cual es lo suficientemente compacto en vista del espacio disponible, se requerirán 57.90 litros de agua diarios y un tiempo de residencia de 10 días, produciendo diariamente 78.97 litros de biogás conteniendo aproximadamente un fracción volumétrica de metano de 0.6 y pudiendo suplir la demanda de gas de la planta piloto en aproximadamente un 30% del consumo anual.

Teniendo en cuenta que en vista de la experiencia, es mejor seleccionar los residuos de cafeterías dando prioridad a cáscaras de frutas y verduras junto con carbohidratos como el arroz, tortilla y papas, de preferencia evitar las grasas pues necesitarán más tiempo de retención en el biodigestor y se tendrían que variar algunos parámetros de diseño.

## 17. Recomendaciones para proyectos futuros

1. El uso más propio del biofertilizante obtenido, dependerá del tipo de cultivo en el cual se utilizara en base a los requerimientos nutricionales, sin embargo en términos de abundancia de nutrientes, el biofertilizante obtenido en la relación C/N de 25 es el más completo en nitrógeno y fósforo, así como en la mayoría de micronutrientes, sin embargo, si se desea un fertilizante más rico en potasio, cobre y hierro, se puede utilizar mejor el de C/N de 30, es evidente como las composiciones de los biofertilizantes son determinadas por los desechos que se cargan al biodigestor.

El biofertilizante obtenido, debe ser sometido a un proceso de estabilización y acondicionamiento antes de ser utilizado, nótese que el alto contenido de humedad de 92.14% y 92.67% para las relaciones de 25 y 30 respectivamente, puede dar lugar al crecimiento de hongos, por lo tanto deberá ser sometido a un proceso de secado, bien pudiendo ser solar, para estabilizarlo.

Además, el biofertilizante obtenido en este estudio tiene un pH muy bajo para poder usarse directamente en el suelo. En estos casos se recomienda que se corrija el pH con cal pues la cal se utiliza en la enmienda de suelos ácidos. Sin embargo lo recomendable antes de aplicar cualquier fertilizante es realizar un análisis de suelo para determinar su contenido de minerales, pH, textura, y contenido de materia orgánica, y que un ingeniero agrónomo de las recomendaciones en la dosificación de los biofertilizantes.

2. Para implementar un sistema de biodigestión dentro de la Universidad de El Salvador es importante desarrollar una cultura enfocada al reciclaje por parte de los focos productores de los residuos utilizables para esta tecnología, y cuidar el medio ambiente, pues la mejor solución es siempre disminuir los residuos, por lo que es importante emprender proyectos de ingeniería sostenible y de culturización, además que se fortalezca la vinculación – cooperación del programa de ingeniería química con entes internos de la

Universidad de El Salvador y con entes externos a nivel gubernamental, empresa privada y ONG's

3. Para realizar los balances de materia, se tomó una base de cálculo producida en el año 2000, por lo tanto, para implementar un sistema digestivo que trate de manera más actual el problema de los residuos producidos en la Universidad de El Salvador, es fundamental determinar las cantidades y composiciones actuales de los residuos.
4. Para estudios futuros se recomienda permitir tiempos de retención más altos que los utilizados en este estudio, para evaluar si de esta manera se podría mejorar aún más la calidad del biogás y/o el rendimiento del biogás producido.

## 18. BIBLIOGRAFIA

Ardón, et al, 1992. *Diseño y construcción de un sistema para la obtención y utilización de biogás, a través de desechos orgánicos diversos, para uso del campo experimental de la facultad de ciencias agronómicas de la U.E.S.* , Universidad de El Salvador, tesis para optar al título de Ingeniero Mecánico.

BoyunGuo, AliGhalambor, 2005, *Natural Gas Engineering Handbook*, University of Louisiana at Lafayette, GPC.

Contreras, L, 2006, *Producción de biogás con fines energéticos. De lo histórico a lo estratégico*, Revista futuros, Volumen VI

Decara Lorena, Sandoval, Gabriela, Funes Claudio, 2004, *El uso de biodigestores en sistemas caprinos de la provincia de Córdoba*, Universidad Nacional Rui Cuarto-Facultad de Agronomía y veterinaria

Dieter Deublein, Angelika Steinhauser, 2008. *Biogas from waste and renewable resource*. Alemania: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

Fonaes (Ed), Octubre 2008. *Impacto Ambiental*, Revista N. 9

Guevara Vera, 1996. *Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, División de Salud y Ambiente: OPS

Field, Jim, 1987. *Medición de Parámetros operativos del reactor de manto de lodos anaeróbicos de flujo ascendente*. Agricultural University of Wageningen, p.C1-C5



Herreo, Jaime Marti, 2008. Biodigestores Familiares: *Guía de diseño y manual de instalación, Biodigestores de polietileno tubular de bajo costo para trópico, valle y altiplano*, Bolivia

Lemus R. Gladis, 1997. *¿Qué se puede hacer con la basura? Compost y compostaje*, Revista: Desde la ciencia

MARN, 2003. *Medio Ambiente en Cifras*, informe 2003, El Salvador

MARN, 2006. *Geo El Salvador 2003-2006*. Informe del Estado del Medio Ambiente de El Salvador: PNUMA

Mejía Barrera, Mejía Terezón, Ramírez Bermúdez, 2005. *Estudio de factibilidad técnicoeconómico para la implantación de una planta productora de biogás a partir de desechos orgánicos*. Universidad de El Salvador: tesis para optar al título de Ingeniero Químico

Meléndez Avalos, Carlos Eduardo, 2006, *Estudio sobre el mercado potencial de reciclaje en El Salvador*, MARN, San Salvador, 2006

Merlos Enrique, 1998. *La Basura problema de todas y todos...Serie Alternativas para el Desarrollo*, Fundación del desarrollo de El Salvador

Núñez, Ramírez y Yanes, 2000. *Propuesta para la gestión de residuos sólidos en La Universidad de El Salvador*, Ciudad Universitaria: tesis para optar al título de Ingeniero Químico

Pasma-Danida, 2006. Programa de Apoyo al Sector Medio Ambiente. *Guía técnica el biodigestor, una fábrica casera de gas*, Nicaragua: Editorial Enlace

Vásquez y Rodríguez, 2001. *Transformación sostenible del procesamiento de café, para una producción más limpia, generando energía a partir de los desechos del proceso*. Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas" (UCA), Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. El Salvador, 2001.

Y. Kuang, 2002. *Enhancing anaerobic degradation of lipids in wastewater by addition of co-substrate*. Murdoch University: School of Environmental Science

Corporación para la Investigación Energética CIE, 2007. *Proyecto Bolívar CIE-PNUD*. Obtenida el 27 de junio del 2009 de <http://www.energia.org.ec/Biodigestores.html>

eg – ingeniería, 2010. *Biodigestor con desplazamiento horizontal*. Obtenida el 27 de Junio de 2010 de <http://www.eg-ingenieria.com.ar/biodigestores-desplazamiento-horizontal.html>

Bárbaro Lugones López, N.D. *Análisis de biodigestores*. Obtenida el 29 de Junio de 2009 <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/ENERGIA22/HTML/articulo04.htm>

Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, Rio de Janeiro República Federativa de Brasil, 1992. *Agenda 21, Capítulo 21*. Obtenida e mayo de 2010, tomado de <http://www2.medioambiente.gov.ar/acuerdos/convenciones/rio92/agenda21/age21.htm>

## 19. ANEXOS

### Anexo 19.1. Características generales del biogás

<i>Composition</i>	55–70% methane (CH <sub>4</sub> ) 30–45% carbon dioxide (CO <sub>2</sub> ) Traces of other gases
Energy content	6.0–6.5 kWh m <sup>-3</sup>
Fuel equivalent	0.60–0.65 L oil/m <sup>3</sup> biogas
Explosion limits	6–12% biogas in air
Ignition temperature	650–750 °C (with the above-mentioned methane content)
Critical pressure	75–89 bar
Critical temperature	–82.5 °C
Normal density	1.2 kg m <sup>-3</sup>
Smell	Bad eggs (the smell of desulfurized biogas is hardly noticeable)
Molar Mass	16.043 kg kmol <sup>-1</sup>

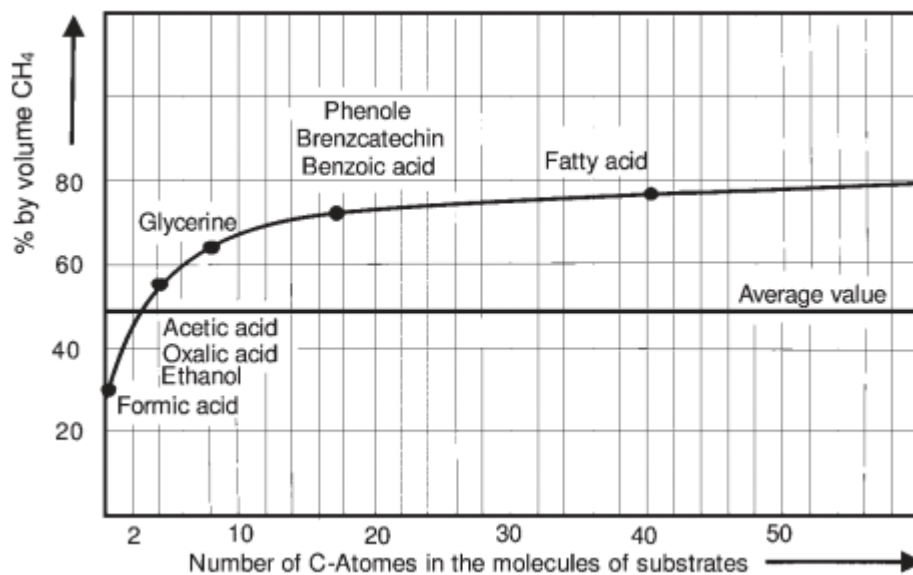
Fuente: Dieter Deublein, Angelika Steinhauser, 2008. *Biogas from waste and renewable resource. Alemania: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim*

### Anexo 19.2. Características del metano

	<i>Temperature</i>		<i>Pressure [bar]</i>	<i>Density [kg L<sup>-1</sup>]</i>
Critical point	–82.59 °C	(190.56 K)	45.98	0.162
Boiling point at 1.013 bar	–161.52 °C	(111.63 K)	–	0.4226
Triple point	–182.47 °C	(90.68 K)	0.117	–

Fuente: Dieter Deublein, Angelika Steinhauser, 2008. *Biogas from waste and renewable resource. Alemania: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim*

**Anexo 19.3. Correlación entre contenido de metano en el biogás y largo de la cadena hidrocarbonada de los sustratos de los que parte**



Fuente: Dieter Deublein, Angelika Steinhauser, 2008. *Biogas from waste and renewable resource*. Alemania: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim



Fat from the separator used in gelatine production	25 92	– –	H, I
Animal fat	–	1.00 33	H, I
Homogenized and sterilized animal fat	–	1.14 62	H, I
Blood liquid	18 96	680 –	H, I
Blood meal	90 80	0.65–0.9 34–62	H, I
<hr/>			
<b>Substrate for biogas production<sup>16),17),18),19),20)</sup></b>	<b>DM [%] oDM in DM [%]</b>	<b>Biogas yield [m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup> oTS] Retention time [d]</b>	<b>Production advice</b>
<hr/>			
Stomach content of pigs	12–15 80–84	0.3–0.4 62	H, I Abrasion through sand
Rumen content (untreated)	12–16 85–88	0.3–0.6 62	H, I Floating sludge formation
Rumen content (pressed)	20–45 90	1.0–1.1 62	H, S, II Floating sludge formation
Greens, gras, <sup>21)</sup> cereals, vegetable wastes			
Vegetable wastes	5–20 76–90	0.4 8–20	U, S, II
Leaves	– 82	0.6 8–20	U, S, II Inhibition through trash
Greens (fresh)	12–42 90–97	0.4–0.8 –	U, S, II
Grass cuttings from lawns	37 93	0.7–0.8 10	U, S, II Earth content
Grass ensilage	21–40 76–90	0.6–0.7 –	U, S, II
Hay	86 90–93	0.5 –	U, S, II
Meadow grass, clover	15–20 89–93	0.6–0.7 –	U, S, II
Market wastes	8–20 75–90	0.4–0.6 30	U, S, III pH value decrease
Leaves of sugar beet/fodder beet ensilaged	15–18 78–80	0.4–0.8 –	U, S, II
Sugar beet/fodder beet	12–23 80–95	0.7 –	U, S, II

Fodder beet mash <sup>22)</sup>	22–26 95	0.9 <sup>23,24)</sup> –	U, S, II
Potato haulm	25 79	0.8–1.0 –	U, S, II
Clover	20 80	0.6–0.8 –	U, S, II
Maize ensilaged	20–40 94–97	0.6–0.7 –	U, S, II
Colza	12–14 84–86	0.7 –	U, S, II
Sunflower	35 88	– –	U, S, II
Sorghum	24–26	–	U, S, II
<hr/>			
<b>Substrate for biogas production<sup>6),17),18),19),20)</sup></b>	<b>DM [%]</b>	<b>Biogas yield [m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup> oTS]</b>	<b>Production advice</b>
	<b>oDM in DM [%]</b>	<b>Retention time [d]</b>	
<hr/>			
Diverse kinds of cereals	85–90 85–89	0.4–0.9 –	U, S, II
Straw from cereals	86 89–94	0.2–0.5 –	U, II
Maize straw	86 72	0.4–1.0 –	U, II
Rice straw	25–50 70–95	0.55–0.62 –	U, II
Wastes from the food and fodder industry			
Potato mash, potato pulp, potato peelings	6–18 85–96	0.3–0.9 3–10	U, S, II Inhibition through volatile fatty acids
Potato pulp dried, potato shred, potato flakes	88 94–96	0.6–0.7 –	U, S, II
Cereal mash	6–8 83–90	0.9 3–10	U, S, II Inhibition through volatile fatty acids
Mash from fermentations	2–5 90–95	0.5–85 35–60	S, II
Mash from distillations	2–8 65–85	0.42 14	U, I
Mash from fruits	2–3 95	0.3–0.7 –	S, II
Oilseed residuals (pressed)	92 97	0.9–1.0 –	S, II

Colza/flax extraction shred	88–89	0.4–0.9	S, II
	92–93	–	
Colza/flax cake	90–91	0.7	S, II
	93–94	–	
Castor oil shred	90	–	S, II
	81	–	
cocoa husks	95	–	S, III
	91	–	
Pomace	63	–	S, II
	53	–	
Molasses	77–90	0.3–0.7	S, II
	85–95	–	
Molasse of lactose	30	0.7	S, II
	74	–	
Waste from tinned food industry	–	–	U, II
	–	–	
Wheat flour	88	0.7	U, I
	96	–	

<i>Substrate for biogas production</i> <sup>16),17),18),19),20)</sup>	<i>DM [%] oDM in DM [%]</i>	<i>Biogas yield [m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup> oTS] Retention time [d]</i>	<i>Production advice</i>
Wheat bran, wheat powder bran	87–88	0.5–0.6	U, I
	93–95		
Malt germ	92	0.6	U, I
	93	–	
Wastes from households and gastronomy			
Bio waste	40–75	0.3–1.0	H, S, SCH, III
	30–70	27	Extensive pretreatment
Leftovers (canteen kitchen)	9–37	0.4–1.0	H, S, SCH, III
	75–98		
Dry bread	65–90	0.8–1.2	H, I
	96–98		
Sewage sludge (households)	–	0.20–0.75	H, S, I
	–	17	
Leftovers, overstored food	14–18	0.2–0.5	H, SCH, III
	81–97	10–40	Trash (bones, packings)
Fat removal tank flotage, fat residues from gastronomy	2–70	0.6–1.6	H, II
	75–98	–	Trash possible (bones, packings)
Mixed fat	99.9	1.2	H, I
	99.9	–	
Sewage sludge (industry)	–	0.30	H, I
	–	20	
Flotation sludge	5–24	0.7–1.2	H, II
	90–98	12	



Wastes from pharmaceutical and other industries

Vegetable extraction residues	-	0.2-0.75	H, S, I
	-	-	
Egg waste	25	0.97-0.98	H, I
	92	40-45	Sediments of the eggshell Ammonia from proteins
Blood plasma	30-40	0.66-1.36	H, I
	95-98	43-63	Ammonia from proteins
Waste from paper and carton production	-	0.2-0.3	U, III
	-	-	
Pulp	13	0.65-0.75	U, III
	90		
Biological oils and lubricants	-	>0.5	U, III
	-	-	
Crude glycerine (RME production)	>98	1.0-1.1	U, I
	90-93	-	
Biologically degradable packaging/ plastics (e.g. Polyhydroxybutyric acid)	-	0.64	U, I
	-		

<i>Substrate for biogas production</i> <sup>16,17,18,19,20</sup>	<i>DM [%]</i> <i>oDM in DM [%]</i>	<i>Biogas yield [m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup> oTS]</i> <i>Retention time [d]</i>	<i>Production advice</i>
--	---------------------------------------	--	--------------------------

Productive livestock husbandry

Liquid manure from cattle	6-11	0.1-0.8	U, I
	68-85	-	
Excreta from cattle (fresh)	25-30	0.6-0.8	U, I
	80	-	
Liquid manure from pigs	3-10	0.3-0.8	U, I
	77-85	-	
Excreta from pigs	20-25	0.27-0.45	U, I
	75-80	-	
Excreta from chicken	10-29	0.3-0.8	U, I
	67-77	-	
Excreta from sheep (fresh)	18-25	0.3-0.4	U, I
	80-85	-	
Excreta from horses (fresh)	28	0.4-0.6	U, I
	25	-	
Low-fat milk	8	0.7	
	92	-	
Whey	4-6	0.5-0.9	U, I
	80-92	3-10	pH value decrease
Whey without sugar	95	0.7	
	76	-	
Starch sludge	-	-	U, I
	-	-	

Fuente: Dieter Deublein, Angelika Steinhauser, 2008. *Biogas from waste and renewable resource. Alemania: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim*

## Anexo 19.5. Liberación de Energía por la degradación de biomasa

(C<sub>org</sub> = organically bound carbon C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> = short chain carbonic acids (C<sub>1</sub>-, C<sub>2</sub>-molecules) EG = released energy<sup>(33)</sup> as a % of the total energy content; ΔE<sub>o</sub> = difference between the standard redox potentials in mV for pH = 7).

Type of degradation	Biochemical reactions	EG%	ΔE <sub>o</sub> mV
Aerobic	Glucose (C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> ) + 6O <sub>2</sub> → 6CO <sub>2</sub> + 6H <sub>2</sub> O	100	1230
Anaerobic			
Denitrification	Glucose (C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> ) + 12NO → 6CO <sub>2</sub> + 6 N <sub>2</sub> + 6H <sub>2</sub> O	94	950
Desulfurication	Glucose (C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> ) + 6SO → 6CO <sub>2</sub> + 6 H <sub>2</sub> S	15	250
Alcohol fermentation	Glucose (C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> ) + C <sub>org</sub> → Alcohols, reducing acids + C <sub>org</sub> + H <sub>2</sub> O	7	190
Methane production	Acetate C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> → CO <sub>2</sub> + CH <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O	5	190–260

Fuente: Dieter Deublein, Angelika Steinhauser, 2008. *Biogas from waste and renewable resource. Alemania: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim*

## Anexo 19.6. Concentraciones de metales inhibidores y sustancias inhibidoras

Substances	Minimum amount required as trace element [mg/L]	Parameters affected	Concentration at which inhibition starts [mg/L]		Toxicity [mg/L] for adapted MO
			Free ions	As carbonate	
Cr	0.005–50	–	28–300	530	500
Fe	1–10	–	n.a.	1750	n.a.
Ni	0.005–0.5	–	10–300		30–1000
Cu	Essentially with acetogenic MO	–	5–300	170	170–300
Zn	Essentially with acetogenic MO	–	3–400	160	250–600
Cd	n.a.	–	70–600	180	20–600
Pb	0.02–200	–	8–340	n.a.	340
Na	n.a.	pH – Wert	5000–30 000	n.a.	60000
K	n.a.	Osmosis of the methane formers	2500–5 000	n.a.	n.a.
Ca	n.a.	Long-chain fatty acids	2500–7 000	n.a.	n.a.
Mg	Essentially with acetogenic MO	Fatty acids	1000–2 400	n.a.	n.a.
Co	0.06	–	n.a.	n.a.	n.a.
Mo	0.05	–	n.a.	n.a.	n.a.
Se	0.008	–	n.a.	n.a.	n.a.
Mn	0.005–50	–	1500	n.a.	n.a.
HCN	0.0	–	5–30	n.a.	n.a.
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O	Inhibiting until the microorganisms are adapted. Then it is completely degraded.				

Substance	Concentration at which inhibition starts [mg/L]	Toxicity [mg/L] for adapted MO
Chloroform	40	n.a.
Chlorofluorohydrocarbons etc.	50	n.a.
Formaldehyde	100	1200
Ethene and terpenes	1–50	n.a.
Disinfectants and antibiotics	1–100 (not necessarily)	n.a.

Fuente: Dieter Deublein, Angelika Steinhauser, 2008. *Biogas from waste and renewable resource*. Alemania: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

**Anexo 19.7. Viabilidad de materiales para la construcción de las diversas partes de un biodigestor**

**Nomenclatura**

- |  |  |
|--|--|
| <b>++:</b> Resistente a la corrosión                         | <b>+:</b> Resistente a la corrosión pero no es accesible |
| <b>-:</b> Puede resistir a la corrosión pero no es accesible | <b>--:</b> No es viable                                  |

<i>Material</i>	<i>Preparation tank</i>	<i>Bioreactor</i>	<i>Residue storage tank</i>	<i>Gasholder tank</i>
Reinforced concrete	++	++	++	--
Concrete blocks, sometimes with coating	++	++	++	--
Sheet steel (welded on-site, parallel fold)	+	+	+	+
Wood	-	-	-	-
GRP (glass fiber-reinforced plastic)	+	+	+	+
Thick plastic		-- (suitable for very small tanks only)		
Plastic canvas cover		+ (suitable for basins)		

*Fuente: Dieter Deublein, Angelika Steinhäuser, 2008. Biogas from waste and renewable resource. Alemania: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim*

## Anexo 19.8. Prueba de biodegradabilidad

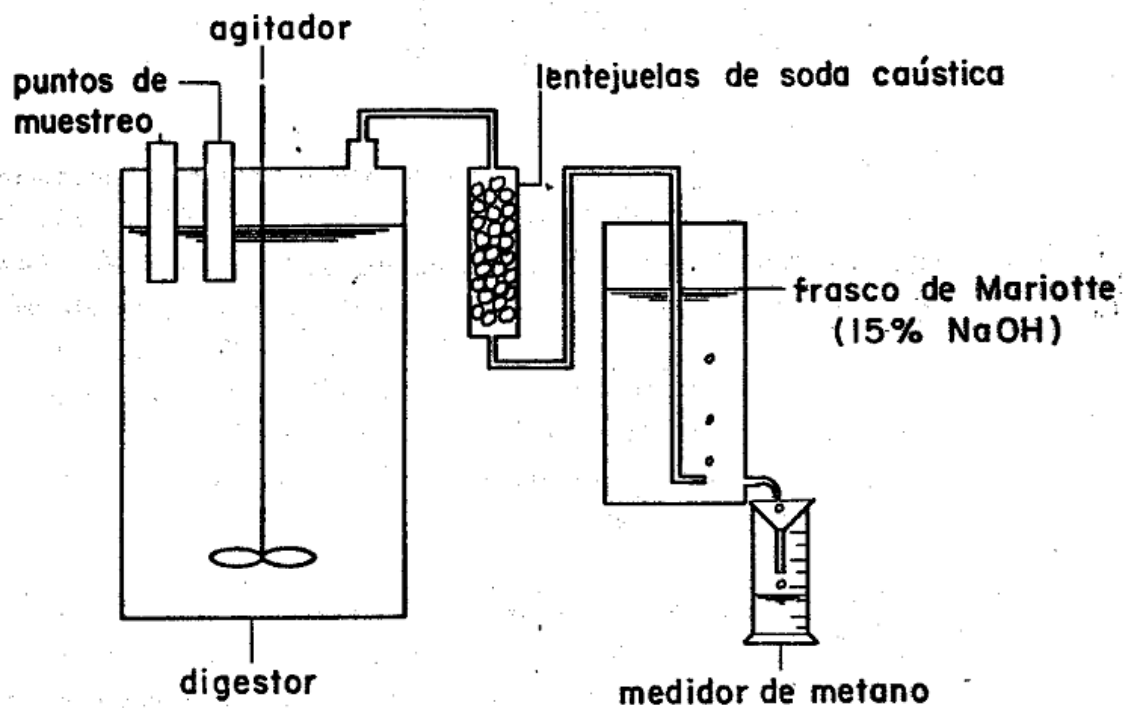
### 1 METANO

#### 1.1. SISTEMAS DE DESPLAZAMIENTO DE LIQUIDO

El volumen de gas metano producido en experimentos de laboratorio puede medirse por desplazamiento de un líquido. El método más común es el que utiliza la "botella de Mariotte". Figura 14. También pueden usarse botellas de suero, como sistema menor de desplazamiento de líquido, como se muestra en la Figura 15. El líquido utilizado es una solución concentrada de NaOH o KOH en un rango entre 15 - 20 g/L. A medida que el biogás, pasa a través de estas soluciones de pH alto, el CO<sub>2</sub> del biogás se convierte en carbonato y es absorbido dentro del líquido.

Unicamente el gas metano pasa a través de la solución y un volumen equivalente es impulsado afuera de la botella de Mariotte. El líquido desplazado puede medirse en un cilindro graduado o puede pesarse. Si se pesa el líquido, se debe medir también su densidad para calcular el volumen. Las soluciones alcalinas deben contener un gran exceso de equivalentes de hidróxido para estar seguros que todo el CO<sub>2</sub> es absorbido por el líquido. Debe mantenerse como exceso mínimo el doble, esto significa que por cada litro de biogás al menos 2 g de NaOH deben estar presentes en el líquido contenido en la botella de Mariotte. Se puede calcular cuando se necesita reemplazar la solución alcalina como sigue (para una temperatura de 30°C) :

$$\left[ \text{Vol.}_{\text{min}} * \text{Conc.}_{\text{NaOH}} \right] * \frac{0.7}{2.0} = \text{Vol.}_{\text{CH}_4}$$



**FIGURA 14** Ensayo establecido para digestión anaeróbica en reactor de flujo discontinuo y regimen mezclado con una botella de Mariatte para medir la producción de gas metano.

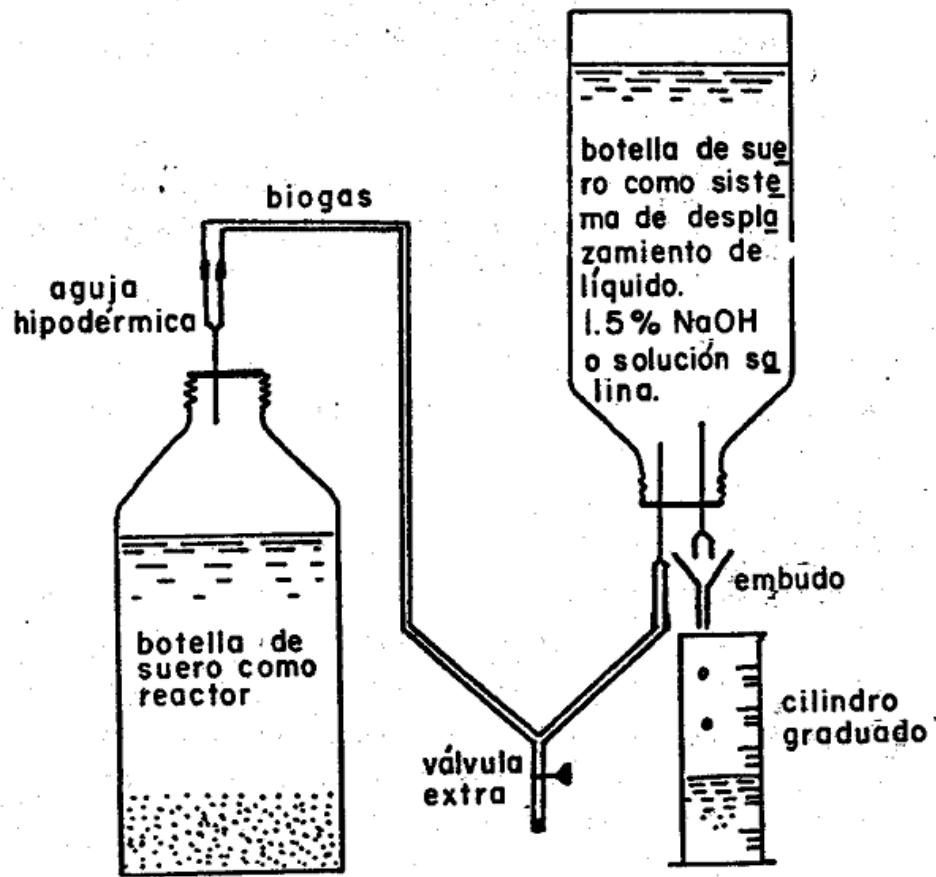


FIGURA 15 Ensayo establecido para digestión anaeróbica en reactores de flujo discontinuo y regimen estático por el sistema de desplazamiento del líquido con botellas de suero, para medir la producción de gas metano.

donde :

Vol.<sub>min</sub> = El mínimo tolerado de solución alcalina dentro de la botella de Mariotte. (L).

Conc.<sub>NaOH</sub> = La concentración de NaOH, de la solución alcalina, cuando se preparó (g/L).

Vol.<sub>CH<sub>4</sub></sub> = Volumen de metano medido en la botella de Mariotte, cuando es tiempo de reemplazar la solución alcalina.

Otro método para la vigilancia de la solución alcalina es medir el pH de la solución. La solución debe reemplazarse cuando el pH es menor o igual que 12.

En los sistemas de desplazamiento, frascos de Mariotte o botellas de suero se deben controlar los escapes (fugas). Los frascos se deben llenar hasta la mitad con solución alcalina, debe cerrarse el tubo de gas y se deja por un día para permitir que el sistema se equilibre a la temperatura del cuarto. La tasa de desplazamiento del líquido debe iniciarse al día siguiente y continuar su control por unos días. Si ocurre algún desplazamiento del líquido, la fuga es evidente.

Los sistemas de desplazamiento de líquido, también pueden fallar si en la solución alcalina hay presente jabón. Se debe tener especial cuidado que todos los residuos de jabón sean enjuagados de las botellas antes de ser usadas.



## 1.2 COMPOSICION DEL BIOGAS

Si solamente se controla el volumen de biogás, puede ser necesario medir la composición del mismo. El  $\text{CO}_2$  y el  $\text{CH}_4$ , gases componentes del biogás, pueden medirse, tomando en una jeringa grande, 100 mL. de la muestra de biogás e impulsándola lentamente (10 mL/min), a través de un sistema de desplazamiento de líquido de 500 mL., botellas de suero.

El volumen de la solución alcalina que es desplazado de la botella, dividido por el volumen de biogás inyectado es igual a la fracción de  $\text{CH}_4$  en el biogás.

*Fuente: Field, Jim, 1987. Medición de Parámetros operativos del reactor de manto de lodos anaeróbicos de flujo ascendente. Agricultural University of Wageningen, p.C1-C5*