



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE QUÍMICA**

---

**IMPLEMENTACIÓN DE UN MEDIDOR VOLUMÉTRICO DE BIOGÁS RICO  
EN METANO A NIVEL DE LABORATORIO EN TRES REACTORES DE  
LECHO DE LODOS DE FLUJO ASCENDENTE (RALLFA) OPERANDO A 45,  
55 Y 65 °C**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA**

**GERARDO EDUARDO VILLALOBOS JUVENAL**



**MÉXICO, D.F.**

**2015**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** MARIA DEL CARMEN DURÁN DOMÍNGUEZ  
**VOCAL:** EDUARDO GUILLERMO RAMÓN MARAMBIO DENNETT  
**SECRETARIO:** LANDY IRENE RAMÍREZ BURGOS  
**1ER. SUPLENTE:** ROLANDO SALVADOR GARCÍA GÓMEZ  
**2° SUPLENTE:** MARISELA BERNAL GONZÁLEZ

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**LABORATORIOS 301, 302 Y 303, CONJUNTO E, FACULTAD DE QUÍMICA,  
UNAM**

**ASESOR DEL TEMA:**

Dra. en Ing. María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa

\_\_\_\_\_

**SUPERVISOR TÉCNICO:**

Dra. Marisela Bernal González

\_\_\_\_\_

**SUSTENTANTE:**

Gerardo Eduardo Villalobos Juvenal

\_\_\_\_\_





## Índice

	Pág.
<b>RESUMEN</b>	<b>10</b>
<b>1. Problemática</b>	<b>11</b>
<b>1.1. Introducción</b>	<b>11</b>
<b>1.2. Objetivos</b>	<b>12</b>
<b>1.2.1. Objetivo general</b>	<b>12</b>
<b>1.2.2. Objetivos particulares</b>	<b>12</b>
<b>1.3. Alcances</b>	<b>12</b>
<b>2. Marco teórico</b>	<b>13</b>
<b>2.1. Fases de la degradación anaerobia<sup>1</sup></b>	<b>13</b>
<b>2.1.1. Bacterias hidrolíticas</b>	<b>14</b>
<b>2.1.2. Bacterias acidogénicas (formadoras de ácido)</b>	<b>15</b>
<b>2.1.3. Bacterias acetogénicas</b>	<b>15</b>
<b>2.1.4. Arqueas metanogénicas</b>	<b>15</b>
<b>2.2. Parámetros que afectan el proceso anaerobio</b>	<b>15</b>
<b>2.2.1. Carga orgánica</b>	<b>16</b>
<b>2.2.2. Temperatura</b>	<b>17</b>
<b>2.2.3. Velocidad volumétrica de flujo</b>	<b>18</b>
<b>2.2.4. Tiempo de residencia hidráulica (TRH)</b>	<b>18</b>
<b>2.2.5. Nutrientes</b>	<b>18</b>
<b>2.2.6. Producción de lodos</b>	<b>18</b>
<b>2.2.7. Alcalinidad y valor de pH</b>	<b>19</b>
<b>2.2.8. Cuantificación de sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV)</b>	<b>19</b>
<b>2.2.9. Determinación de la demanda química de oxígeno (DQO)</b>	<b>20</b>
<b>2.2.10. Análisis de la relación de alcalinidad</b>	<b>20</b>
<b>2.2.11. Ácidos grasos volátiles (AGV)</b>	<b>21</b>
<b>2.2.12. Generación teórica de metano en función de la DQO</b>	<b>21</b>
<b>2.3 Subproductos generados en la degradación anaerobia: biogás</b>	<b>21</b>
<b>2.3.1. Metano</b>	<b>22</b>
<b>2.3.2. Cuantificación del metano en el biogás</b>	<b>23</b>
<b>3. Metodología</b>	<b>24</b>
<b>3.1. Metodologías de los parámetros de seguimiento</b>	<b>25</b>
<b>3.1.1. Producción de biogás (desplazamiento de líquidos)</b>	<b>25</b>
<b>3.1.2. Porcentaje de metano (desplazamiento de líquidos)</b>	<b>26</b>

---

<sup>1</sup> La **digestión** es un proceso inherentemente anaerobio, es decir, se realiza sin la presencia de oxígeno molecular. Por ello, el nombre al proceso “**digestión**” **anaerobia** es un pleonasma. Desafortunadamente, muchos colegas en el mundo siguen usando este pleonasma. En esta investigación se usará la palabra degradación y el adjetivo anaerobia

	<b>Pág.</b>
3.1.3. Análisis estadístico de los datos experimentales	27
<b>4. Resultados y discusión</b>	<b>29</b>
4.1. Parámetros de seguimiento	31
4.1.1. Valor de pH y de alcalinidad	31
4.1.2. Ácidos grasos volátiles, AGV	32
4.1.3. Temperatura	32
4.1.4. Remoción de DQO	34
4.1.5. Sólidos totales y sólidos volátiles removidos	34
4.1.6. Comparación pH y $\alpha$ versus tiempo	35
4.1.7. Comparación de %ST-%SV-%DQO removidos	36
4.2. Producción de metano	38
4.2.1. Volumen de $C_2H_4$ calculado teóricamente y medido experimentalmente	38
4.2.2. Comparación de la producción de metano teórico y experimental	38
4.2.3. Comparación de la calidad del biogás ( $\%CH_4$ ) y su comportamiento	40
4.3. Mantenimiento del sistema	40
4.4. Estabilización del sistema	41
<b>5. Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>42</b>
5.1. Conclusiones	42
5.2. Recomendaciones	43
<b>Anexo 1. Resultados experimentales obtenidos</b>	<b>44</b>
<b>Anexo 2. Resultados del análisis estadístico de los datos</b>	<b>49</b>
<b>Anexo 3. Disposición de residuos generados en esta investigación</b>	<b>59</b>

## **Bibliografía**

### **Tablas, figuras, diagramas y fotografías**

	<b>Pág.</b>
Figura 2.1. Aplicaciones y productos del proceso de la degradación anaerobia (CIEMAT, 1989)	13
Figura 2.2. Fases de la degradación anaerobia y poblaciones de microorganismos (Castro-González, 2004)	14
Figura 2.3. Velocidad o rapidez máxima específica de crecimiento ( $\mu_{max}$ ) a diferentes intervalos de temperatura (psicrofílicos, mesofílicos y termofílicos) (Speece, 1996)	17

	Pág.	
Figura 2.4.	Composición del biogás en función del pH (Varnero, 2011)	19
Figura 2.5.	Equivalencias de biogás con otras fuentes de energía (CIEMAT, 1989)	22
Figura 3.1.	Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) a 45, 55 y 65°C	24
Figura 3.2.	Medidor de gas propuesto (Abhay y Pratap, 2008)	26
Figura 3.3.	Medidor de biogás por desplazamiento	27
Figura 3.4.	Método para determinar el %CH <sub>4</sub> -CO <sub>2</sub> por desplazamiento	27
Figura 4.1.	Valores de pH en RALLFA <sub>45°C</sub>	31
Figura 4.2.	Valores de pH en RALLFA <sub>55°C</sub>	31
Figura 4.3.	Valores de pH en RALLFA <sub>65°C</sub>	31
Figura 4.4.	Valores de α en RALLFA <sub>45°C</sub>	31
Figura 4.5.	Valores de α en RALLFA <sub>55°C</sub>	32
Figura 4.6.	Valores de α en RALLFA <sub>65°C</sub>	32
Figura 4.7.	Valores de AGV en RALLFA <sub>45°C</sub>	32
Figura 4.8.	Valores de AGV en RALLFA <sub>55°C</sub>	32
Figura 4.9.	Valores de AGV en RALLFA <sub>65°C</sub>	33
Figura 4.10.	Valores de acidez total en RALLFA <sub>45°C</sub>	33
Figura 4.11.	Valores de acidez total en RALLFA <sub>55°C</sub>	33
Figura 4.12.	Valores de acidez total en RALLFA <sub>65°C</sub>	33
Figura 4.13.	Valores de temperatura en RALLFA <sub>45°C</sub>	33
Figura 4.14.	Valores de temperatura en RALLFA <sub>55°C</sub>	33
Figura 4.15.	Valores de temperatura en RALLFA <sub>65°C</sub>	34
Figura 4.16.	Valores de DQO <sub>REMOVIDA</sub> en RALLFA <sub>45°C</sub>	34
Figura 4.17.	Valores de DQO <sub>REMOVIDA</sub> en RALLFA <sub>55°C</sub>	34
Figura 4.18.	Valores de DQO <sub>REMOVIDA</sub> en RALLFA <sub>65°C</sub>	35
Figura 4.19.	Valores de ST <sub>REMOVIDOS</sub> en RALLFA <sub>45°C</sub>	35
Figura 4.20.	Valores de ST <sub>REMOVIDOS</sub> en RALLFA <sub>55°C</sub>	35
Figura 4.21.	Valores de ST <sub>REMOVIDOS</sub> en RALLFA <sub>65°C</sub>	35
Figura 4.22.	Valores de SV <sub>REMOVIDOS</sub> en RALLFA <sub>45°C</sub>	35
Figura 4.23.	Valores de SV <sub>REMOVIDOS</sub> en RALLFA <sub>55°C</sub>	36
Figura 4.24.	Valores de SV <sub>REMOVIDOS</sub> en RALLFA <sub>65°C</sub>	36
Figura 4.25.	Comparación de pH y α en RALLFA <sub>45°C</sub>	36
Figura 4.26.	Comparación de pH y α en RALLFA <sub>55°C</sub>	36
Figura 4.27.	Comparación de pH y α en RALLFA <sub>65°C</sub>	37
Figura 4.28.	Porcentajes de remoción de ST, SV y DQO en RALLFA <sub>45°C</sub>	37
Figura 4.29.	Porcentajes de remoción de ST, SV y DQO en RALLFA <sub>55°C</sub>	37
Figura 4.30.	Porcentajes de remoción de ST, SV y DQO en RALLFA <sub>65°C</sub>	37
Figura 4.31.	Volumen de CH <sub>4</sub> Teórico-Experimental en RALLFA <sub>45°C</sub>	38
Figura 4.32.	Volumen de CH <sub>4</sub> Teórico-Experimental en RALLFA <sub>55°C</sub>	38
Figura 4.33.	Volumen de CH <sub>4</sub> Teórico-Experimental en RALLFA <sub>65°C</sub>	38
Figura 4.34.	Volumen de biogás Experimental en los RALLFA	39
Figura 4.35.	Porcentaje de CH <sub>4</sub> Experimental en biogás	39
Figura 4.36.	Comparación del volumen de CH <sub>4</sub> EXPER y α en RALLFA <sub>45°C</sub>	39
Figura 4.37.	Comparación del volumen de CH <sub>4</sub> EXPER y α en RALLFA <sub>55°C</sub>	39
Figura 4.38.	Comparación del volumen de CH <sub>4</sub> EXPER y α en RALLFA <sub>65°C</sub>	39
Figura 4.39.	Fotografía del medidor antiguo	41
Figura 4.40.	Fotografía del medidor instalado	41



	Pág.	
Figura 4.41.	Fotografía del venteo a la atmósfera	41
Figura 4.42.	Válvulas de descarga de biogás	41
Figura 5.1.	Fotografía de la combustión del metano del biogás (Cruz-Juárez, 2010)	43
Figura 5.2.	Esquema del medidor propuesto a futuro (Mattiasson <i>et al.</i> , 2003)	43
Figura A-1.	Distribución de datos. Temperatura del RALLFA <sub>45°C</sub>	49
Figura A-2.	Distribución de datos. Temperatura del RALLFA <sub>55°C</sub>	49
Figura A-3.	Distribución de datos. Temperatura del RALLFA <sub>65°C</sub>	50
Figura A-4.	Distribución de datos. pH del RALLFA <sub>45°C</sub>	50
Figura A-5.	Distribución de datos. pH del RALLFA <sub>55°C</sub>	50
Figura A-6.	Distribución de datos. pH del RALLFA <sub>65°C</sub>	51
Figura A-7.	Distribución de datos. Alcalinidad del RALLFA <sub>45°C</sub>	51
Figura A-8.	Distribución de datos. Alcalinidad del RALLFA <sub>55°C</sub>	51
Figura A-9.	Distribución de datos. Alcalinidad del RALLFA <sub>65°C</sub>	52
Figura A-10.	Distribución de datos. DQO <sub>Removida</sub> del RALLFA <sub>45°C</sub>	52
Figura A-11.	Distribución de datos. DQO <sub>Removida</sub> del RALLFA <sub>55°C</sub>	52
Figura A-12.	Distribución de datos. DQO <sub>Removida</sub> del RALLFA <sub>65°C</sub>	53
Figura A-13.	Distribución de datos. V <sub>CH<sub>4</sub></sub> Teórico del RALLFA <sub>45°C</sub>	53
Figura A-14.	Distribución de datos. V <sub>CH<sub>4</sub></sub> Teórico del RALLFA <sub>55°C</sub>	53
Figura A-15.	Distribución de datos. V <sub>CH<sub>4</sub></sub> Teórico del RALLFA <sub>65°C</sub>	54
Figura A-16.	Distribución de datos. AGV del RALLFA <sub>45°C</sub>	54
Figura A-17.	Distribución de datos. AGV del RALLFA <sub>55°C</sub>	54
Figura A-18.	Distribución de datos. AGV del RALLFA <sub>65°C</sub>	55
Figura A-19.	Distribución de datos. V <sub>CH<sub>4</sub></sub> experimental del RALLFA <sub>45°C</sub>	55
Figura A-20.	Distribución de datos. V <sub>CH<sub>4</sub></sub> experimental del RALLFA <sub>55°C</sub>	55
Figura A-21.	Distribución de datos. V <sub>CH<sub>4</sub></sub> experimental del RALLFA <sub>65°C</sub>	56
Figura A-22.	Distribución de datos. V <sub>BIOGÁS</sub> experimental del RALLFA <sub>45°C</sub>	56
Figura A-23.	Distribución de datos. V <sub>BIOGÁS</sub> experimental del RALLFA <sub>55°C</sub>	56
Figura A-24.	Distribución de datos. V <sub>BIOGÁS</sub> experimental del RALLFA <sub>65°C</sub>	57
Figura A-25.	Distribución de datos. % <sub>CH<sub>4</sub></sub> experimental del RALLFA <sub>45°C</sub>	58
Figura A-26.	Distribución de datos. % <sub>CH<sub>4</sub></sub> experimental del RALLFA <sub>55°C</sub>	58
Figura A-27.	Distribución de datos. % <sub>CH<sub>4</sub></sub> experimental del RALLFA <sub>65°C</sub>	58
Figura A-28.	Diagrama del tratamiento del efluente obtenido, para su disposición	59
Diagrama 3.1.	Actividades de seguimiento	25
Tabla 2.1.	Parámetros de operación (Castro-González, 2004)	16
Tabla 2.2.	Caracterización de la vinaza (Nimbalkar, 2005)	16
Tabla 2.3.	Intervalo de temperatura y tiempo de degradación ( Lagrange, 1979)	17
Tabla 2.4.	Potencial de calentamiento de los gases de efecto invernadero (CNE, 2006)	23
Tabla 3.1.	Parámetros y metodologías	26
Tabla 3.2.	Medidas de dispersión a usar.	28
Tabla 4.1.	Seguimiento de los parámetros	29
Tabla 4.2.	Parámetros de cada RALLFA a 45, 55 y 65°C	29
Tabla 4.3.	Medición de CH <sub>4</sub> de cada RALLFA a 45, 55 y 65°C	30

<b>Tabla A-1.</b>	<b>Resultados experimentales de los parámetros de medición RALLFA a 45°C</b>	<b>44</b>
<b>Tabla A-2.</b>	<b>Resultados experimentales de los parámetros de medición RALLFA a 55°C</b>	<b>45</b>
<b>Tabla A-3.</b>	<b>Resultados experimentales de los parámetros de medición RALLFA a 65°C</b>	<b>47</b>
<b>Tabla A-4.</b>	<b>Análisis estadístico de la temperatura en cada RALLFA a 45, 55 y 65°C</b>	<b>49</b>
<b>Tabla A-5.</b>	<b>Análisis estadístico del pH en cada RALLFA a 45, 55 y 65°C</b>	<b>50</b>
<b>Tabla A-6.</b>	<b>Análisis estadístico de la alcalinidad en cada RALLFA a 45, 55 y 65°C</b>	<b>51</b>
<b>Tabla A-7.</b>	<b>Análisis estadístico de DQO removida en cada RALLFA a 45, 55 y 65°C</b>	<b>52</b>
<b>Tabla A-8.</b>	<b>Análisis estadístico del volumen de metano teórico en cada RALLFA a 45, 55 y 65°C</b>	<b>53</b>
<b>Tabla A-9.</b>	<b>Análisis estadístico de los AGV's en cada RALLFA a 45, 55 y 65°C</b>	<b>54</b>
<b>Tabla A-10.</b>	<b>Análisis estadístico del volumen de metano experimental en cada RALLFA a 45, 55 y 65°C</b>	<b>55</b>
<b>Tabla A-11.</b>	<b>Análisis estadístico del volumen de biogás experimental en cada RALLFA a 45, 55 y 65°C</b>	<b>56</b>
<b>Tabla A-12.</b>	<b>Análisis estadístico del porcentaje de metano experimental en cada RALLFA a 45, 55 y 65°C</b>	<b>57</b>

**Nota: Esta tesis usa el punto decimal**

## RESUMEN

Esta parte de la investigación consistió en complementar el proyecto ambiental del aprovechamiento y tratamiento integral de las aguas residuales (vinazas) de plantas destiladoras de alcohol; siendo la producción de biogás rico en metano uno de los grandes beneficios energéticos y ambientales. A lo largo del estudio bibliográfico y experimental previo, este proyecto eligió el tratamiento de las vinazas en tres reactores biológicos de tipo RALLFA (reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente) cada uno a condiciones de operación a 45, 55 y 65°C, respectivamente. Al ser un tratamiento biológico anaerobio termófilo se consideró a la temperatura como la variable principal, por su facilidad de medición y como un factor importante en el desarrollo de los microorganismos involucrados; así como la conversión de compuestos carbonosos, medidos como demanda química de oxígeno soluble a producción de metano y CO<sub>2</sub>. Para analizar la cantidad y calidad de la producción teórica y real del metano en el biogás producido es necesario determinar la actividad metanogénica con el seguimiento de los parámetros adecuados y su correcta relación. Es importante instalar un sistema de medición automático para cada reactor con objeto de evaluar la mejor temperatura de trabajo, es decir, aquella que mantenga la mejor producción y calidad de metano. Para la instalación del sistema es necesaria la recopilación de información que incluya la planeación y los costos de su implementación, ajustes y correcciones necesarias para su correcta operación. En esta tesis se reportan: El análisis de seguimiento de los reactores a los que se les instalará el sistema de recolección y medición de gases, así como el análisis estadístico de la eficiencia y operación de los sistemas. Se puede concluir de los resultados de esta fase experimental que es necesario realizar una evaluación continua de la cantidad y la calidad del biogás producido, por lo que es recomendable la instalación de un dispositivo automático. En esta investigación no fue posible realizar dicha modificación. La información generada en esta investigación da la base para el seguimiento de esta mejora.

**Palabras clave:** Medidor volumétrico de biogás rico en metano, reactores de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA), termófila

# 1. Problemática

## 1.1. Introducción

En la actualidad, México cuenta con 58 ingenios azucareros con presencia en 15 estados del territorio nacional, siendo Veracruz el de mayor importancia con 22 ingenios. La problemática que enfrenta esta agroindustria es sumamente compleja, especialmente a la luz del impacto sobre el ambiente. Se estima que por una tonelada de caña destilada para la producción de azúcar se obtienen alrededor de 45 kg de melaza que pueden producir 12 litros de alcohol y de 30 a 156 litros de vinaza según los contenidos de sólidos totales (Rincón-Acelas, 2006).

Las vinazas contienen grandes cantidades de materia orgánica provenientes de las materias primas usadas durante la fermentación (Castro-González, 2004). La generación de vinazas por cada litro de alcohol producido varía, dependiendo de muchos factores (desde el tipo de levaduras, su efectividad de producir etanol, la eficiencia de separación durante la producción de azúcar, etc.).

Los parámetros fisicoquímicos de las vinazas son: Contenido de compuestos orgánicos medidos como demanda química de oxígeno soluble, DQO, entre 70 000 y 150 000  $\text{mgL}^{-1}$  y un pH de 4.3 que, comparado con las aguas residuales que se vierten en las casas habitación, que tienen alrededor de 400 y 800  $\text{mg DQO L}^{-1}$ , son de 10 000 a 20 000 veces más contaminantes (Jiménez-Ambríz *et al.*, 1995; Rodríguez-Rivera, 1993).

En los últimos años se han llevado a cabo pruebas de degradación anaerobia termofílica, que es el resultado del efecto de comunidades bacterianas que degradan los diferentes compuestos sin presencia de aire y a temperaturas mayores a  $35^{\circ}\text{C}$ , generando un efluente que contiene una DQO menor, con nutrientes que son útiles como complemento o enmienda de suelos y con la producción de biogás compuesto principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y, en menor cantidad, ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) (Castro-González *et al.*, 2004).

El biogás, eliminando el  $\text{H}_2\text{S}$  y el  $\text{CO}_2$ , puede ser utilizado como fuente de energía (metano) para producir vapor de agua para la fase de destilación, logrando así un ahorro significativo de combustible y, de esta manera, disminuir el impacto ambiental que una destilería genera (Bailey y Ollis, 1986). Por ello, resulta importante evaluar la cantidad de biogás que se produce en un reactor anaerobio termofílico con objeto de determinar la eficiencia de conversión del material carbonoso disuelto en las vinazas a metano y verificar a qué temperatura se obtiene la mayor cantidad.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

Realizar el seguimiento de la producción de metano en tres reactores anaerobios que operan a 45, 55 y 65°C, partiendo de la conversión de compuestos carbonosos medidos como demanda química de oxígeno soluble a metano y CO<sub>2</sub>.

### **1.2.2. Objetivos particulares**

- Adaptar tres medidores volumétricos de biogás rico en metano en tres reactores anaerobios trabajando a condiciones termofílicas
- Determinar la actividad metanogénica en tres reactores anaerobios trabajando a condiciones termofílicas
- Mantener y mejorar la operación de los tres reactores anaerobios trabajando a condiciones termofílicas

## **1.3. Alcances**

- Caracterización de las vinazas provenientes de un ingenio azucarero-alcoholero, midiendo su contenido de material orgánico como DQO y su pH, y a que la composición de las vinazas varía dependiendo de la materia prima utilizada durante la fermentación así como de las condiciones iniciales de destilación
- Determinación de la alcalinidad, pH y DQO de los reactores anaerobios como parámetros de estabilidad de l proceso siguiendo los métodos estandarizados (APHA-AWWA-WPCF, 1985)
- Evaluación del volumen de gas generado con respecto a la carga orgánica alimentada a los reactores, medida como demanda química de oxígeno (DQO), así como del sistema propuesto
- Identificación de la mejor temperatura de trabajo de los reactores anaerobios según la producción de metano, el cual puede ser utilizado como fuente de energía

## 2. Marco teórico

La degradación anaerobia es un proceso biológico en el que la materia orgánica en ausencia de oxígeno y mediante la acción de un grupo de bacterias específicas, se descompone en productos gaseosos o biogás ( $\text{CH}_4$  y trazas de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , etc.), así como de una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca, etc.) y compuestos de difícil degradación (Fig. 2.1). Durante la degradación anaerobia, los microorganismos metanogénicos desempeñan la función de enzimas respiratorias y, junto con las bacterias no metanogénicas, constituyen una cadena alimenticia que guarda relación con las cadenas enzimáticas de células aerobias. De esta forma, los residuos orgánicos se transforman completamente en biogás que abandona el sistema. Éste suele estar contaminado con diferentes componentes, que pueden complicar su manejo y aprovechamiento (Varnero, 2011).

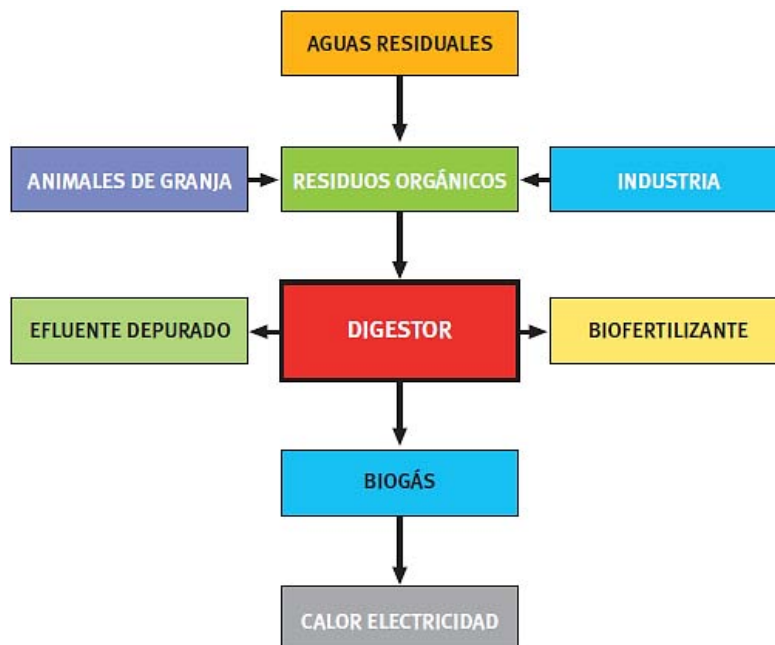


Fig. 2.1. Aplicaciones y productos del proceso de la degradación anaerobia (CIEMAT, 1989)

### 2.1. Fases de la degradación anaerobia<sup>2</sup>

La degradación está caracterizada por la existencia de tres grandes fases presentadas en la Fig. 2.2, las cuales son la hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis (Sanz, 2012). Dichos procesos se realizan consecutivamente y con muchos pasos intermedios.

<sup>2</sup> La **digestión** es un proceso inherentemente anaerobio, es decir, se realiza sin la presencia de oxígeno molecular. Por ello, el nombrar al proceso “**digestión**” **anaerobia** es un pleonismo. Desafortunadamente, muchos colegas en el mundo siguen usando este pleonismo. En esta investigación se usará la palabra degradación y el adjetivo anaerobia (nota de la asesora)

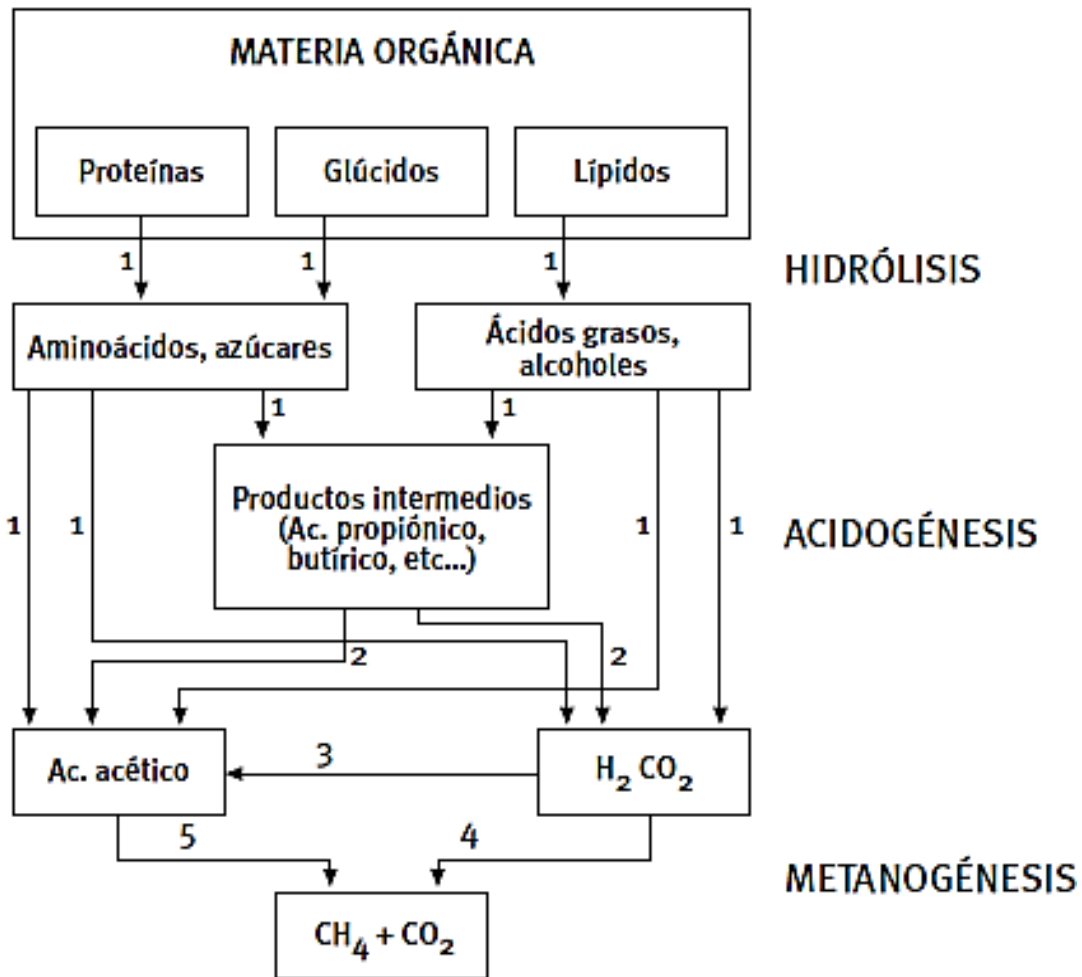


Fig. 2.2. Fases de la degradación anaerobia y poblaciones de microorganismos (Castro-González, 2004)

### 2.1.1. Bacterias hidrolíticas

La materia orgánica polimérica no puede ser utilizada directamente por los microorganismos a menos que se hidrolicen en compuestos solubles que pueden atravesar la membrana celular. La hidrólisis es, por tanto, el primer paso necesario para la degradación anaerobia de sustratos orgánicos complejos. En algunos textos le llaman “**fermentación**”<sup>3</sup>, pero es un término erróneo. Ésta es llevada a cabo por enzimas extracelulares excretadas por las bacterias hidrolíticas. Como resultado, se producen compuestos solubles que serán metabolizados por las arqueas (conocidas coloquialmente como bacterias anaerobias, aunque es incorrecto) (Pavlostathis y Giraldo, 1991). Las bacterias que llevan a cabo estas reacciones son miembros de la familia *Enterobacteriaceae*, pertenecientes de los géneros: *Bacillus*, *Peptostreptococcus*, *Propionibacterium*, *Bacteroides*, *Micrococcus* y *Clostridium*. *Butyvirio*, *Ruminococcus*, *Acetovibrios*, *Streptococcus*, etc. (Díaz et al., 2002).

<sup>3</sup> Louis Pasteur acuñó el término **fermentación** para la conversión anaerobia de glucosa a alcohol etílico usando levaduras *saccharomyces cerevisiae*. Cualquier otra biorreacción no es una fermentación (nota de la asesora)

### 2.1.2. Bacterias acidogénicas (formadoras de ácido)

Este tipo de bacterias utilizan la glucosa para generar una mezcla de ácidos propiónico, acético y butírico, además de hidrógeno y CO<sub>2</sub>. Estos ácidos pueden recuperarse o ser convertidos en metano y CO<sub>2</sub>, los cuales son aprovechables.

Los microorganismos presentes tienen una tasa de reproducción<sup>4</sup> alta con velocidades de duplicación de 30 minutos. Algunos de los presentes en estas etapas son del género *Clostridium* y *Propionibacterium* (Pavlostathis y Giraldo, 1991).

### 2.1.3. Bacterias acetogénicas

Son las encargadas de convertir los ácidos propiónico y butírico en acético además de hidrógeno y CO<sub>2</sub>. Su proliferación es relativamente lenta (tiempo de duplicación de 1.5 a 4 días). Representante de los microorganismos acetogénicos son: *Acetobacterium*, *Acetogenium*, *Eubacterium*, *Pelobacter*, *Metanobacillus omellionskii*, *Syntrophomonas wolfei*, *Syntrophomonas sapovarans*, *Syntrophospora bryantii*, *Syntrophus buswellii* y *Syntrophobacter wolinii*, que pertenecen a un grupo de organismos acetógenos productores obligados de hidrógeno (OHPA, por sus siglas en inglés) (Díaz et al., 2002).

### 2.1.4. Arqueas metanogénicas

Las arqueas metanogénicas son anaerobias estrictas y producen metano como principal producto de sus mecanismos energéticos. Se dividen principalmente, de acuerdo con el tipo de metanogénesis que llevan a cabo, en *acetoclásticas* e *hidrogenofílicas*. Estas controlan el potencial redox del proceso y también la formación de ácidos grasos volátiles, consumen hidrógeno y ácido fórmico para la formación de metano (Castro-González, 2004). Algunos de los microorganismos presentes en esta etapa son: *Methanobacterium*, *Methanobrevibacter*, *Methanococcus*, *Methanomicrobium*, *Metanogenium* y *Metanospirillum*.

Por tanto, el desarrollo estable del proceso global requerirá de un equilibrio que evite la acumulación de inhibidores o la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV), que podrían producir una disminución del pH afectando el desarrollo de los microorganismos deseables, en este caso, las arqueas metanogénicas (que producen metano). Para controlar las condiciones de operación de los sistemas anaerobios es necesario tomar en cuenta las condiciones ambientales y fisicoquímicas del sistema (Castro-González, 2004).

## 2.2. Parámetros que afectan el proceso anaerobio

La Tabla 2.1 presenta los parámetros que pueden afectar el proceso anaerobio.

---

<sup>4</sup> La palabra *grow* en inglés puede traducirse al español como reproducirse, proliferar, desarrollarse o crecer. Siendo las bacterias organismos que realmente no crecen sino que cuando se reproducen lo hacen por división celular, la mejor traducción sería la de reproducirse o proliferar (nota de la asesora)



**Tabla 2.1. Parámetros de operación (Castro-González, 2004)**

✓ Parámetros de operación	✓ Parámetros de control*
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Carga orgánica</li> <li>- Temperatura</li> <li>- Velocidad volumétrica de flujo</li> <li>- Tiempo de residencia hidráulico (TRH)<sup>5</sup></li> <li>- Nutrientes</li> <li>- Producción de lodos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Concentración de ácidos volátiles</li> <li>- Alcalinidad y pH</li> <li>- Sólidos suspendidos, volátiles y totales</li> <li>- Producción de metano y gas total</li> <li>- Determinación de la demanda química de oxígeno</li> </ul>

\*Los parámetros deben ser evaluados diariamente en los reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente, RALLFA

### 2.2.1. Carga orgánica

Las características bioquímicas de la carga orgánica deben permitir el desarrollo y la actividad microbiana del sistema anaerobio. El proceso microbiológico no solo requiere de fuentes de carbono y nitrógeno sino que también deben estar presentes un cierto equilibrio sales minerales.

En esta investigación la carga orgánica se encuentra presente en el residuo industrial conocido como “vinaza”, proveniente de la destilación alcohólica que posee características propias. Esta contiene materia orgánica abundante, incluyendo fenoles y sus polímeros, los cuales son difíciles de degradar biológicamente y a que, poseen propiedades antimicrobianas y fitotóxicas que impiden el tratamiento eficiente por degradación aerobia (Rincón- Acelas, 2006).

En la Tabla 2.2, se presentan las características fisicoquímicas de las vinazas, en donde se observa que la demanda química de oxígeno (DQO), es de 80,000 a 120,000 mg L<sup>-1</sup>.

**Tabla 2.2. Caracterización de la vinaza (Nimbalkar, 2005)**

Características	Promedios
Temperatura, °C	78.0 – 82.0
Valor de pH	3.7 – 4.5
Sólidos totales, %p/p	9 – 12
DQO, mg/L	80 000 – 120 000
DBO, mg/L	45 000 – 50 000
Cloruros, mg/L	5 000 – 6 000
Sulfatos, mg/L	4 000 – 8 000
Sodio, mg/L	400 – 600
Potasio, mg/L	8 000 – 12 000
Nitrógeno total, mg/L	1 000 – 1 200
Fósforo, mg/L	200 – 300
Calcio, mg/L	2 000 – 3 500

<sup>5</sup> En la reunión de la *Water Pollution Control Federation, JWPC*, en Europa en 1980 se decidió adoptar el término **tiempo de residencia hidráulica, TRH**, para los líquidos entrando y saliendo de un reactor y **tiempo de retención celular, TRC**, para el tiempo que permanecen los sólidos, generalmente células u organismos o enzimas en el interior de reactores de tipo bioquímico (nota de la asesora)

Esto representa cargas orgánicas muy elevadas que al ser introducidas a un sistema anaerobio provocaría una sobrecarga orgánica causada por la concentración o en el caudal que puede favorecer la acidogénesis predominando sobre la metanogénesis, resultando en la acidificación del sistema (Rodríguez *et al.*, 2009)

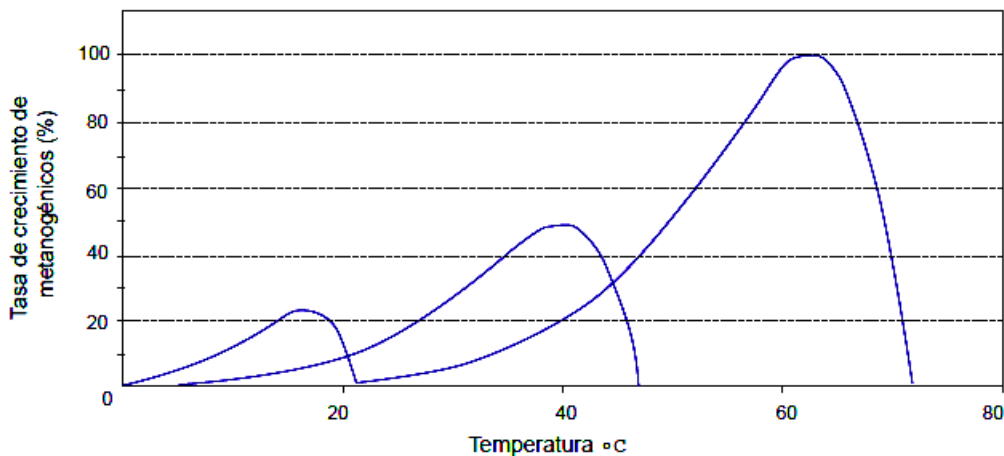
Por esta razón, es necesario que se inicie con cargas orgánicas bajas, las cuales se van incrementando cuando el buen funcionamiento del sistema lo permite, lo que se refiere principalmente a contenidos de ácidos grasos volátiles (AGV), como los ácidos acético, propiónico y butírico, así como la remoción de materia orgánica.

### 2.2.2. Temperatura

La degradación anaerobia depende fuertemente de la temperatura, y a que se puede decir que el desarrollo de las bacterias ocurre en intervalos limitados en los que pueden trabajar los microorganismos anaerobios, el psicrófilos por debajo de 25°C, el mesófilos en un intervalo de 25 a 45°C y el termófilos de 45 a 65°C (Fig. 2.3). Por lo cual cada consorcio de microorganismos presentará una velocidad máxima específica de crecimiento ( $\mu_{max}$ ), que incrementa conforme aumenta el intervalo de temperatura, presentando una condición óptima de temperatura (Tabla 2.3).

**Tabla 2.3. Intervalo de temperatura y tiempo de degradación (Lagrange, 1979)**

Degradación	Temperatura mínima (°C)	Temperatura óptimo (°C)	Temperatura máximo(°C)	Tiempo de degradación (días)
Psycrophilica	4-10	15-18	20-25	>100
Mesophilica	15-20	25-35	35-45	30-60
Thermophilica	25-45	50-60	75-80	10-15



**Fig. 2.3. Velocidad o rapidez máxima específica de crecimiento ( $\mu_{max}$ ) a diferentes intervalos de temperatura (psicrófilos, mesófilos y termófilos) (Speece, 1996)**

### 2.2.3. Velocidad volumétrica de flujo

La velocidad de carga orgánica máxima está limitada por el tiempo de residencia en el reactor y por la actividad de los microorganismos implicados en la degradación de la materia orgánica.

Se ha comprobado que a una velocidad de flujo rápida se puede causar ruptura en la biocapa (Fischer, 1988), debido a que no habrá suficiente contacto entre las bacterias y la materia orgánica provocando zonas muertas, lo cual ocasionaría que se pierda parte de la capacidad del reactor (GIRO, 2005).

### 2.2.4. Tiempo de residencia hidráulica (TRH)

El tiempo de residencia hidráulica (TRH) en un sistema es uno de los factores más importantes para el control de la degradación anaerobia, la disminución en la cantidad de materia orgánica o porcentaje de remoción y la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV) puede deberse a tiempos de contacto entre la biomasa y el sustrato relativamente cortos. Generalmente, el incremento en la concentración de AGV se debe a TRH cortos lo que provoca la acidificación del sistema (Cadena, 2009; Caldera *et al.*, 2003).

### 2.2.5. Nutrientes

Los nutrientes necesarios para el desarrollo de las bacterias al interior del reactor dependen de la concentración de DQO del agua residual. Aunque los requerimientos nutricionales de las bacterias durante el proceso de degradación anaerobia son bajos, algunos tipos de efluentes industriales como los producidos en la fabricación de papel, almidón y alcohol pueden tener deficiencia de ellos.

Nutrientes como el nitrógeno y, en menor proporción, fósforo, azufre, potasio, calcio, hierro, magnesio y, como suplemento nutricional, cantidades mínimas de zinc y molibdeno, son requeridos. Sin embargo, es necesario controlar la concentración de amonio en el efluente del reactor, ya que un exceso de este compuesto puede causar toxicidad e inhibición de la población metanogénica (Cadena, 2009; Rodríguez *et al.*, 2009).

### 2.2.6. Producción de lodos<sup>6</sup>

La formación de un lodo denso con buenas propiedades de sedimentabilidad se refleja en un alto grado de biodegradabilidad. En el proceso se generan del 10 al 30% de lodos mucho más estables que los procesos aerobios. Cada seis o doce meses es aconsejable descargarse totalmente el reactor anaerobio, para un adecuado mantenimiento y, el lodo debido a su composición, pueden utilizarse como mejoradores de suelos y como alimento animal si no contiene organismos patógenos (Bermúdez *et al.*, 2000; Cadena, 2009; Castro-González, 2004).

---

<sup>6</sup> En la jerga usada en la ingeniería ambiental, se conoce a la biomasa microbiana como “lodos”, ya que presentan un aspecto físico similar al lodo (suelo con agua de color pardo negro)

### 2.2.7. Alcalinidad y valor de pH

El valor de pH es el término que expresa las condiciones de alcalinidad o acidez de una solución (concentración de iones hidronio). El valor de pH controla muchas reacciones químicas y la actividad biológica normalmente se restringe a una escala entre 6 y 8.

El proceso anaerobio es afectado adversamente con pequeños cambios en los niveles de pH. Debido a que los microorganismos metanogénicos son más susceptibles a las variaciones de dicho parámetro que los otros microorganismos y a que deben encontrarse en un sistema entre 7.8 y 8.2. Sin embargo, el pH óptimo para los organismos acidogénicos se encuentra entre 5.5 y 6.5. El pH óptimo para cultivos mixtos se encuentra entre 6.8 y 7.4, siendo el pH neutro el ideal. Por ello, para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente, el pH no debe bajar de 6.0 ni subir de 8.0. El valor del pH en la degradación no sólo determina la producción de biogás sino también su composición (Fig. 2.4).

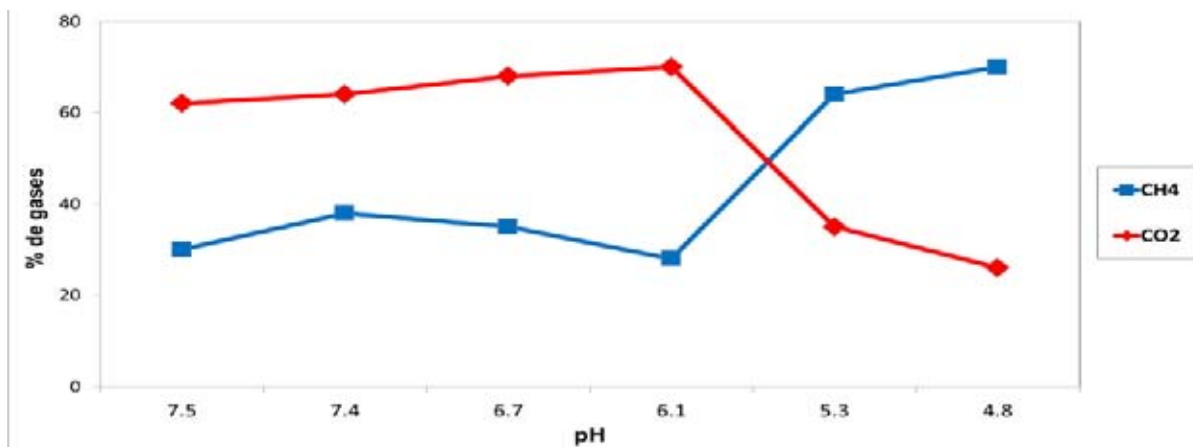


Fig. 2.4. Composición del biogás en función del pH (Varnero, 2011)

Una de las consecuencias de que se produzca un descenso del pH a valores inferiores a 6 es que el biogás generado es muy pobre en metano y, por tanto, tiene menores cualidades energéticas. Por otro lado, la alcalinidad es una medida de la capacidad amortiguadora del medio y evita la acidificación. Es recomendable una alcalinidad superior a  $1.5 \text{ g L}^{-1} \text{ CaCO}_3$ . En el intervalo de pH de 6 a 8, el principal compuesto que controla la alcalinidad o equilibrio químico es el  $\text{CO}_2$  que se transforma en carbonatos ( $\text{CO}_3^{-1}$ ) (IDEA, 2007).

### 2.2.8. Cuantificación de sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV)

La concentración de sólidos totales es una medida de la concentración total de compuestos inorgánicos y orgánicos que se encuentran en cierta muestra de cualquier líquido. En el caso del agua constituye una importante limitación en su uso.

En particular en las vinazas, esta medida dará información acerca de su composición y los beneficios que aporta al consorcio microbiano que se encuentra en el reactor. Los sólidos totales generalmente se dividen en disueltos y en suspensión. Ambos tipos de

sólidos pueden ser volátiles o fijos. Estas definiciones se obtienen del método usado en el laboratorio para cuantificarlos.

Por ejemplo, para medir la cantidad de sólidos totales, la muestra de líquido de un volumen y una masa conocidos (con sólidos en suspensión y disueltos) homogénea se introduce a una estufa y se deja evaporar a sequedad. La masa resultante conforma los sólidos totales. Si este recipiente que los contiene se introduce a una mufla a 550°C los sólidos que se descomponen (generalmente orgánicos) se volatilizan y quedan solamente los inorgánicos que conforman las llamadas cenizas o sólidos fijos. Por diferencia entre la masa de los sólidos totales y la de los sólidos fijos se obtiene la masa de los sólidos volátiles. Estos últimos son importantes y a que, generalmente, son los compuestos que pueden ser biodegradados por los microorganismos o incluso son los propios microorganismos.

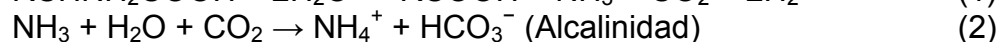
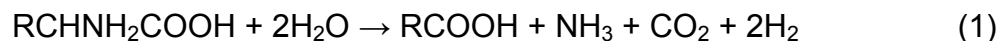
### 2.2.9. Determinación de la demanda química de oxígeno (DQO)

Como es difícil muchas veces saber el tipo de compuestos químicos que conforman los sólidos disueltos o en suspensión que contaminan un agua, convirtiéndola en agua residual, se desarrolló un método químico que oxida a todos ellos y que se conoce como **demanda química de oxígeno**. Por tanto, es una medida experimental de toda la materia presente en disolución y/o suspendida que puede ser químicamente oxidada en un medio ácido por un oxidante fuerte como el permanganato o el dicromato de potasio o de sodio (nunca potásico o sódico, ya que en la química no hay potasoso o sodoso). Se define como la cantidad de "**oxígeno equivalente**" necesario para oxidar la materia orgánica a CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, etc., y agua.

### 2.2.10. Análisis de la relación de alcalinidad

La alcalinidad es la capacidad neutralizante de un ácido que posee una disolución o mezcla. Generalmente, la alcalinidad está dada por la presencia de iones hidroxilo, carbonato o bicarbonato, pero también influyen en el resultado la presencia de boratos, fosfatos, silicatos, nitratos, amoniacos disueltos, sulfuros y algunas otras bases conjugadas.

La destrucción de la materia orgánica, principalmente las proteínas, liberan amoníaco. Cada mol de nitrógeno orgánico teóricamente genera un equivalente de alcalinidad, el amoníaco reacciona con el dióxido de carbono generando bicarbonato de amonio, el cual contribuye a la alcalinidad del sistema, tal como muestran la reacción 1 y 2.



Sólo los residuos que presentan altos contenidos de nitrógeno orgánico (proteínas) pueden contribuir adecuadamente a la alcalinidad.

Muchos residuos ricos en carbohidratos (melaza, papa, almidón) no contribuyen a la alcalinidad por que carecen de nitrógeno orgánico. Por lo tanto, la degradación anaerobia de aquellos residuos orgánicos requiere una adición de (CO<sub>3</sub><sup>-1</sup>) (Varnero, 2011).

### 2.2.11. Ácidos grasos volátiles (AGV)

La concentración de ácidos grasos volátiles (AGV), son productos intermedios mayoritarios del proceso anaerobio, es uno de los parámetros que más eficazmente pueden indicar la evolución del proceso. Este parámetro es uno de los más utilizados en los sistemas de control debido a su rápida respuesta ante variaciones del sistema. El término “volátil” indica que pueden ser recuperados por destilación a presión atmosférica. Durante la degradación anaeróbica, la materia orgánica compleja es hidrolizada y fermentada en compuestos de baja masa molecular, incluyendo ácidos grasos de cadena corta (C<sub>2</sub>-C<sub>6</sub>), principalmente ácidos acético, propiónico y butírico, así como ácidos isobutírico, valérico, isovalérico y caproico en menores cantidades.

En un sistema anaerobio óptimo, la concentración de AGV en el efluente es relativamente baja y se encuentra usualmente en un intervalo de 50 a 250 mg HAcO/L. Cuando la relación simbiótica entre acidogénicos y metanogénicos se rompe, los AGV se acumulan provocando la inhibición de las arqueas metanogénicas debido a la toxicidad de sulfuro, amoníaco, metales pesados, compuestos orgánicos sintéticos, etc., y a cambios en las condiciones ambientales tales como pH, temperatura, potencial redox o limitación de nutrientes pueden generar una acumulación de acetato e hidrógeno. También una presión parcial de hidrógeno excesiva, inhibe severamente a las bacterias que degradan ácido propiónico (Varnero, 2011)

### 2.2.12. Generación teórica de metano en función de la DQO

Para determinar la producción de metano a partir de la remoción de la demanda química de oxígeno, DQO, en el proceso se han desarrollado relaciones empíricas (Castro-González, 2004):

$$V_{CH_4} = DQO_{CH_4} / k(T) \quad K(T) = K.P / R(273+T) \quad (3)$$

donde:  $V_{CH_4}$  = volumen de CH<sub>4</sub> liberado (en litros)

$DQO_{CH_4}$  = DQO convertida en metano (gramos DQO removido)

K = gramos DQO por 1 mol de CH<sub>4</sub> (64 gramos DQO / mol CH<sub>4</sub>)

R = constante general de los gases (0.08206 atm L /mol K)

P, T = presión atmosférica (atm) y temperatura (°C)

Finalmente, considerando que el gas producido se compone de: 75-80% CH<sub>4</sub> y 20-25% CO<sub>2</sub>, puede estimarse la producción total de gas en el proceso (Castro-González, 2004).

## 2.3 Subproductos generados en la degradación anaerobia: biogás

Con el término biogás se designa a la mezcla de gases resultantes de la descomposición de la materia orgánica realizada por la acción bacteriana en condiciones anaerobias. La composición de biogás depende del tipo de desecho utilizado. Sus principales componentes son el metano (CH<sub>4</sub>) con una concentración en volumen del 54 a 80%, el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) entre 20 a 45%, el hidrógeno (H<sub>2</sub>)

entre 1 a 10% , el nitrógeno (N<sub>2</sub>) entre 0.5 a 3% y el ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) en un 0.1% (Werner *et al.*, 1989). Debido a su alto contenido en metano, tiene un poder calorífico mayor que la mitad del poder calorífico del gas natural. Un biogás con un contenido de metano del 60% tiene un poder calorífico de unas 5500 kcal m<sup>-3</sup> (6.4 kWh/m<sup>3</sup>). Las equivalencias se presentan en la Fig. 2.5 (CIEMAT, 1989).

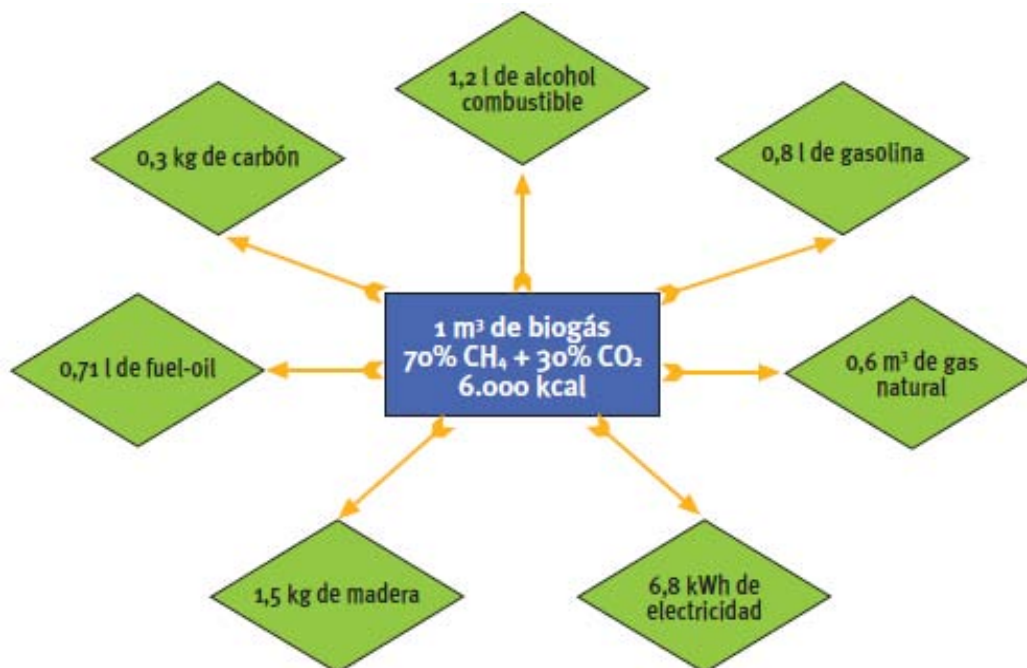


Fig. 2.5. Equivalencias de biogás con otras fuentes de energía (CIEMAT, 1989)

### 2.3.1. Metano

En la India, a inicios de la década de los 60 del Siglo XX, se inició la construcción de reactores anaerobios con el propósito de ser una fuente de aprovechamiento energético, mientras que en países industrializados la historia de la tecnología de estos reactores ha respondido más a motivaciones ambientales que a energéticas, constituyendo un método clásico de estabilización de lodos activos de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas. Durante la década de los ochenta, volvió a adquirir cierta importancia como forma de recuperación energética en explotaciones agropecuarias y agroindustriales. Sin embargo, con la disminución de los precios del petróleo, a finales de los años ochenta, el interés por dicha tecnología volvió a decaer, aunque en algunos países industrializados se han desarrollado plantas anaerobias a escala industrial y doméstica, debido a que el biogás se utiliza en todo el mundo como una fuente de combustible tanto a nivel industrial como doméstico (Coto *et al.*, 2007; FAO, 1986; Insam *et al.*, 2009).

El metano es un gas que en la atmósfera terrestre contribuye al efecto invernadero. Con el fin de poder comparar el efecto de los diferentes gases de efecto invernadero, a cada uno se le asigna un factor que representa una medida de su efecto invernadero o potencial de calentamiento global, en comparación con el CO<sub>2</sub> que se utiliza como "gas de referencia" (Tabla 2.4). El CO<sub>2</sub> equivalente de gases de efecto invernadero se puede calcular multiplicando el potencial de efecto invernadero en relación con la masa del gas

respectivo. Indica la cantidad de CO<sub>2</sub> que produciría el mismo efecto invernadero en 100 años, es decir, el CH<sub>4</sub> es un gas de efecto invernadero más potente que el CO<sub>2</sub> en un factor de 21 (CNE, 2006).

**Tabla 2.4. Potencial de calentamiento de los gases de efecto invernadero (CNE, 2006)**

Gas	Potencial de calentamiento
CO <sub>2</sub>	1
CH <sub>4</sub>	21
N <sub>2</sub> O	310
SF <sub>4</sub>	23 900
PFC (Perfluorcarbonos)	9 200
HFC (Haloalcanos)	11 700

### 2.3.2. Cuantificación del metano en el biogás

En las diferentes investigaciones sobre degradación anaerobia, una de las variables a medir es la concentración porcentual de los gases producidos, mencionados en el apartado anterior; para determinar tal concentración, se emplea, en la mayoría de los casos, un cromatógrafo de gases, que en cuestión de escasos minutos establece, con alta confiabilidad los porcentajes de estos y otros gases. Sin embargo, en muchos de los casos, algunas investigaciones no pueden desarrollarse por la ausencia de un cromatógrafo o, en su defecto, por la falta de disponibilidad en el laboratorio donde se llevó a cabo.

En estos casos para medir una composición previa del metano generado en el tratamiento de aguas residuales, o el generado en las minas, se han desarrollado al menos dos métodos desde comienzos del siglo XX: el método volumétrico y el método por indicador de combustión de gas (Rossum *et al.*, 1950).

El método volumétrico fue desarrollado, tanto por la compañía Macmillan en Nueva York, como por la compañía Charles Giffin en Londres; este método consiste en registrar la medida del volumen de biogás en primer lugar, el que se hace pasar por una solución de hidróxido (NaOH, KOH) para remover el CO<sub>2</sub> y luego por otras soluciones para remover el oxígeno y el hidrógeno para medir en forma volumétrica el metano restante.

El método por indicador de combustión de gas, fue desarrollado por la agencia American Water Works Association (AWWA) (Yant y Berger, 1936). Este método se basa en el equilibrio que se presenta entre el metano en la solución y la presión parcial del metano en su fase gaseosa dentro de la misma solución; donde la presión parcial del metano se determina con un indicador de combustión de gas.

En esta investigación se desarrolló la cuantificación por medio del método volumétrico. La metodología correspondiente a esta investigación es presentada a continuación.



### 3. Metodología

En la presente investigación se utilizaron tres reactores de laboratorio de aproximadamente 3 L de volumen, de tipo RALLFA (reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente o *UASB reactor*, en inglés, *upflow anaerobic sludge blanket reactor*). En la Fig. 3.1 se indican con unos letreros con las tres temperaturas a las que se mantuvieron, 45, 55 y 65°C, respectivamente.



**Figura 3.1. Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) a 45, 55 y 65°C**

Están contruidos de vidrio (Rincón-Acelas, 2006). Tienen dos tubos concéntricos: Uno con una altura de 65 cm y diámetro de 7.27 cm y el otro de la misma altura con diámetro de 3.7 cm. Entre ambos se hace pasar agua caliente a 45, 55 y 65°C para mantener la temperatura constante en el interior de los tres reactores. El volumen total de cada uno es de 2.7 L y el de operación es de 2.4 L. Se inocularon con 1L de inóculo adaptado en otro reactor tipo RALLFA que operaba a 35°C, de 15 litros de volumen total. Este volumen representa un 37% de su volumen total. En el extremo inferior de los reactores se tiene una forma cónica por donde se lleva a cabo la alimentación mediante una bomba peristáltica, a un flujo de 0.29 mL/min, manejando un tiempo de residencia hidráulica (TRH) de 7 días. En la parte superior se coloca un embudo invertido que permite la separación sólido-líquido-gas.

En el Diagrama 3.1 se presentan las actividades de seguimiento para el proyecto. El gas se midió a través del desplazamiento de una solución de NaCl, en la cual se lava el gas y ésta se satura con CO<sub>2</sub> utilizando rojo de metilo como indicador de saturación. Se utilizó un recipiente de 300 mL para contener la solución y, por diferencia del volumen

de agua desplazado, medir el biogás producido, de acuerdo con la bibliografía (Fig. 3.2).

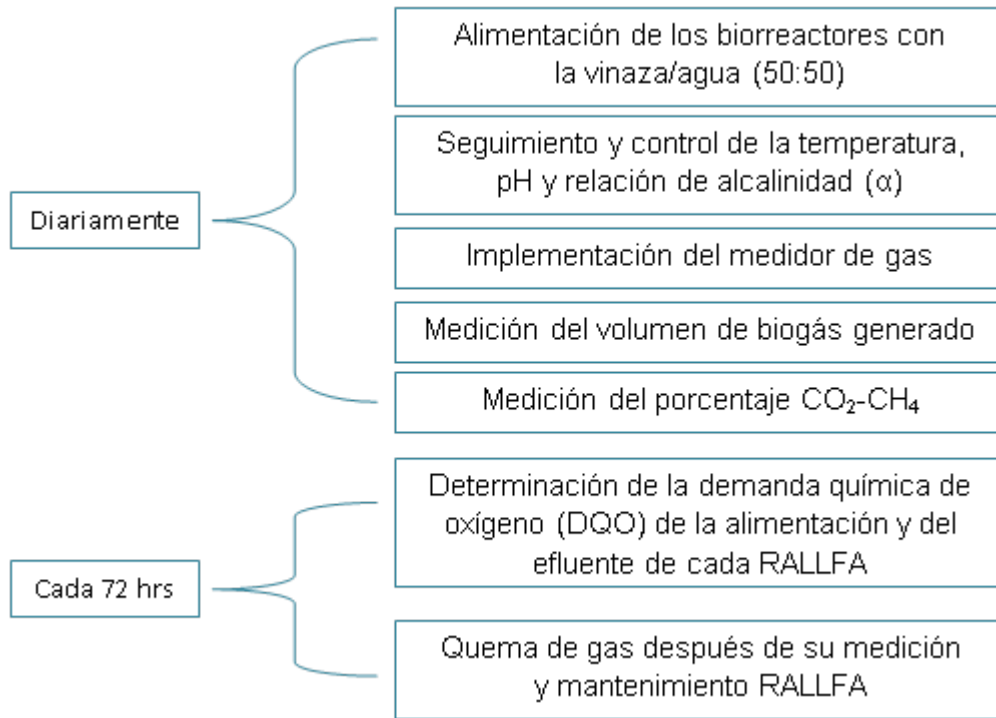


Diagrama 3.1. Actividades de seguimiento

### 3.1. Metodologías de los parámetros de seguimiento

En la Tabla 3.1 se presentan los parámetros usados para evaluar el sistema y las metodologías con las que se cuantificaron.

#### 3.1.1. Producción de biogás (desplazamiento de líquidos)

La medición de la producción de biogás generado en cada uno de los sistemas se basa en el sistema por desplazamiento de líquido o “Principio de Arquímedes”. Consta de dos recipientes (A y B), donde A contiene una solución acuosa saturada de NaCl a la cual se le adicionó Rojo de Metilo como indicador del  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  producidos en el reactor que se van disolviendo en el agua.

Este recipiente es llenado hasta el borde y cerrado mediante un tapón de rosca, del cual sale una tubería de plástico que es conectada a otro sistema (A) de la misma capacidad. El gas generado en el RALLFA es burbujeado al sistema A y el agua desplazada de este sistema es conducida al recipiente (B).

En la Fig. 3.3 se ven las dos botellas de vidrio usadas como recipientes. Cada 24 horas se cuantifica el volumen desplazado, para cada uno de los reactores que operan a 45, 55 y 65°C.

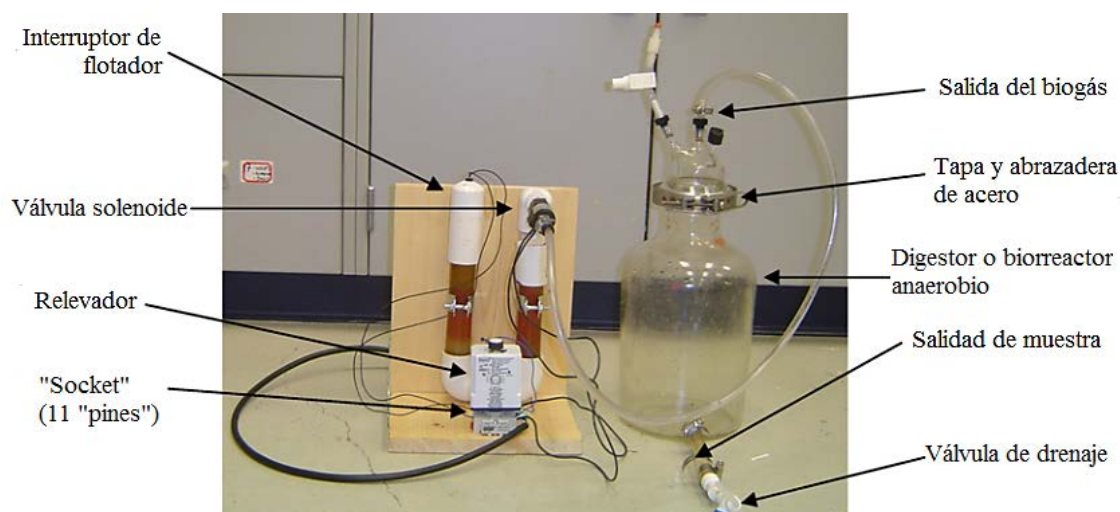


Figura 3.2. Medidor de gas propuesto (Abhay y Pratap, 2008)<sup>7</sup>

Tabla 3.1. Parámetros y metodologías

Parametro	NMX (DOF)	Método
pH	NMX-AA-005-SCFI-2000 (DOF, 2000)	Potenciométrico
Sólidos	NMX-AA-034-SCFI-2001 (DOF, 2001)	Gravimétrico
Alcalinidad	NMX-AA-036-SCFI-1980 (DOF, 1980)	Titulación
DQO	NMX-AA-030-SCFI-1981 (DOF, 1981)	Reflujo cerrado
AGV	Método 5560 C (APHA, 1985)	Titulación
CH <sub>4</sub>	Método 6211 C (APHA, 1985)	Volumétrico
%CO <sub>2</sub> -%CH <sub>4</sub>	Método 6211 C (APHA, 1985)	Volumétrico

### 3.1.2. Porcentaje de metano (desplazamiento de líquidos)

La medición del porcentaje de metano en el biogás generado en cada uno de los sistemas se basa en un sistema modificado<sup>8</sup> por desplazamiento de líquido o “Principio de Arquímedes”. Consta de un tubo ( $A_t$ ) y dos jeringas ( $B_j$  y  $C_j$ ), donde  $A_t$  contiene una solución acuosa diluida de NaOH (Fig. 3.4). El  $A_t$  es llenado hasta el borde y cerrado mediante un tapón de rosca la cual cuenta con un septo (del latín *septum*, part. pas. de *saepio*, cercar, cerrar).

<sup>7</sup> La palabra socket viene del inglés y significa literalmente: **An opening or a cavity into which an inserted part is designed to fit**. En el diccionario de la lengua española señalan que la palabra soquete, que viene del francés *socquette*, significando en Chile y Guatemala portalámpara. Por ello, en este trabajo se le entrecomilla y se le denomina “socket” y no es para una lámpara sino para conectar un cable electrónico que detecta el nivel a través de once patas o “pines”, también del inglés **short, straight, stiff piece of wire**

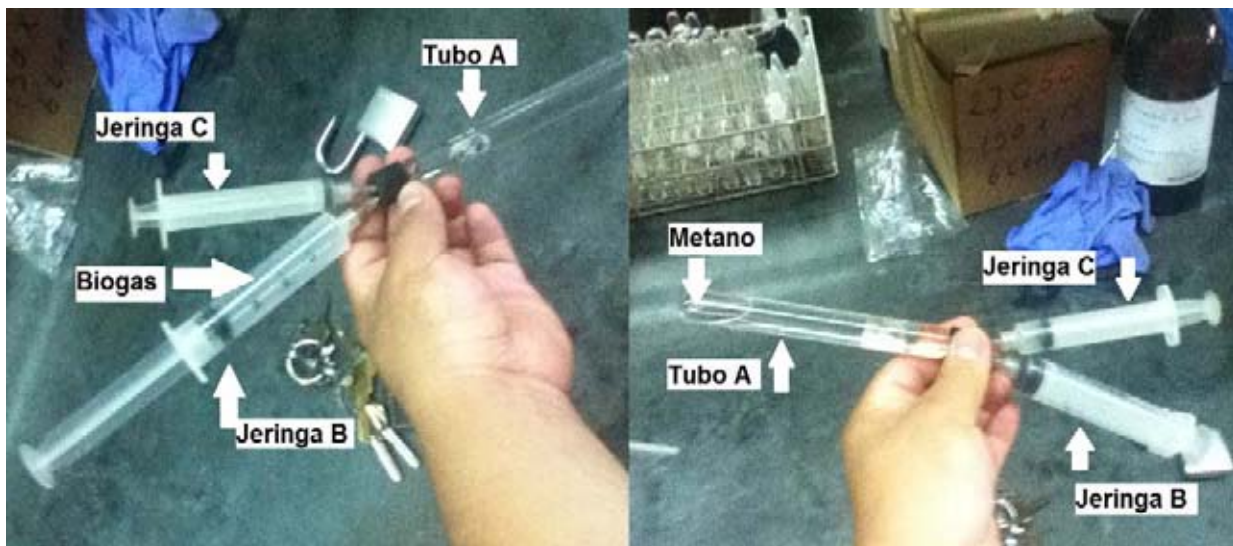
<sup>8</sup> Modificación del sistema “Carbon Dioxide Content of Biogás by Syringe Protocol” (Harris, 2010)



**Figura 3.3. Medidor de biogás por desplazamiento**

Por otro lado la  $B_j$  succiona 20 mL de biogás producido en el RALLFA. Una vez realizado este paso, ambas jeringas (la llena  $B_j$  y la vacía  $C_j$ ), se introducen simultáneamente al  $A_i$ ; el biogás contenido en la  $B_j$ , desplaza el volumen de NaOH, llenando la  $C_j$  y durante 2 minutos se disuelve ( $CO_2$ ), en la solución de NaOH.

Posteriormente es empujando el embolo de  $C_j$  para desplaza la cantidad de solución hacia  $A_i$  que, a su vez, desplaza la cantidad de gas no disuelto ( $CH_4$ ) en  $B_j$  y con la cantidad de biogás inicial se obtiene el porcentaje de metano y  $CO_2$ .



**Fig. 3.4. Método para determinar el % $CH_4$ - $CO_2$  por desplazamiento**

### 3.1.3. Análisis estadístico de los datos experimentales

En esta investigación el análisis estadístico de los datos fue propiamente matemático, ya que se efectuó el estudio de los fenómenos estadísticos utilizando métodos

matemáticos, con técnicas numéricas y gráficas, que proporcionaron una clara comprensión acerca de los datos analizados.

Se requirió para el desarrollo de este apartado la construcción de una base de datos de la cual se concentraron los datos de los parámetros medidos, acordes con el tiempo de seguimiento que se consideró necesario para cada sistema.

Estos valores posteriormente fueron analizados y fueron dispuestos para cada parámetro de manera semanal. Finalmente se obtuvo el análisis estadístico de cada parámetro en cada RALLFA.

El objetivo es buscar la relación de los parámetros como indicadores de l comportamiento del sistema en la generación de biogás (temperatura como variable principal).

En el siguiente capítulo se presentan los resultados y su análisis estadístico, por medio de tablas y gráficas en donde se relacionaron dos variables; siendo el tiempo la variable independiente en cada una de las muestras.

En el Anexo 1 se muestran los datos estadísticos de todos los parámetros por medio de tablas en cada RALLFA.

En el Anexo 2 se muestran el análisis estadístico de las medidas de dispersión y de tendencia central por medio de tablas y las gráficas de distribución para los parámetros principales en cada RALLFA. Las medidas de dispersión utilizadas fueron las que se presentan en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2. Medidas de dispersión a usar**

Medida	Nombre	Función
$X_{Prom}$	Media aritmética	Promedio de todos los datos
$X_{Mediana}$	Mediana	Valor que delimita el 50%
<b>DM</b>	Desviación media absoluta	Promedio de las diferencias absolutas de los datos a su media aritmética
$\sigma$	Desviación estándar	Mide la variación de los datos en términos absolutos
$\sigma^2$	Varianza	Mide la variación de la muestra en términos absolutos
<b>CV</b>	Coeficiente de variación	Expresa a la variación de los datos como porcentaje de su promedio
<b>S, S<sub>2R</sub><sup>9</sup></b>	Desviación estándar muestral	Mide la variación de las distribuciones en términos absolutos

<sup>9</sup> **S<sub>2R</sub>**: El subíndice 2R indica que fue utilizado en la comparación de solamente dos distribuciones, es decir, en este caso para comparar dos RALLFA. **S**: Se indica que fue utilizado en la comparación de los tres RALLFA



## 4. Resultados y discusión

El seguimiento de los parámetros de operación se dio bajo el esquema que se presenta en la Tabla 4.1. Cada medida se reportó diariamente en una libreta de bitácora<sup>10</sup>, exclusiva del sistema, generando los resultados presentados en la Tabla 4.2 para los parámetros de control (pH, relación de alcalinidad, sólidos totales, sólidos volátiles, DQO y AGV) y en la Tabla 4.3, se presentan la producción de metano teórico y experimental, así como su relación con el parámetro de estabilidad que se consideró como la relación de alcalinidad.

**Tabla 4.1. Seguimiento de los parámetros**

Día	Actividad	Parámetro*	Mantenimiento	
Lunes	Alimentación	pH, $\alpha$ , ST, CH <sub>4</sub> , %CO <sub>2</sub>	Bomba 65 °C	Medidores CH <sub>4</sub>
Martes	Alimentación	pH, $\alpha$ , SV, CH <sub>4</sub> , %CO <sub>2</sub>	Medidores CH <sub>4</sub>	Reactor 65 °C
Miércoles	Alimentación	pH, $\alpha$ , DQO, %CO <sub>2</sub>	Bomba 55 °C	Reactor 55 °C
Jueves	Alimentación	pH, $\alpha$ , CH <sub>4</sub>	Medidores CH <sub>4</sub>	Medidores CH <sub>4</sub>
Viernes	Alimentación	pH, $\alpha$ , AGV	Bomba 45 °C	Reactor 45 °C

- pH: potencial de hidrógeno; ST: sólidos totales;  $\alpha$ : relación de alcalinidad; CH<sub>4</sub>: Producción de biogás; DQO: Demanda química de oxígeno; AGV: ácidos grasos volátiles; %CO<sub>2</sub>: Porcentaje CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>

**Tabla 4.2. Parámetros de cada RALLFA a 45, 55 y 65°C**

Sistema	Parámetro	Febrero – Mayo (2012)		
Alimentación [Promedio]	pH	5.346		
	DQO (mg/L O <sub>2</sub> )	119 025		
	ST (mg/L)	56 726		
	SV (mg/L)	35 196		
RALLFA <sub>45°C</sub>	pH [mín–máx]	6.88	7.84	Fig. 10
RALLFA <sub>55°C</sub>		6.76	7.81	Fig. 11
RALLFA <sub>65°C</sub>		6.76	7.78	Fig. 12
RALLFA <sub>45°C</sub>	$\alpha$ : Relación de alcalinidad [mín–máx]	0.22	0.41	Fig. 13
RALLFA <sub>55°C</sub>		0.26	0.49	Fig. 14
RALLFA <sub>65°C</sub>		0.41	0.60	Fig. 15
RALLFA <sub>45°C</sub>	Ácidos grasos volátiles (meq/L)	21.8		Fig. 16
RALLFA <sub>55°C</sub>		25.0		Fig. 17
RALLFA <sub>65°C</sub>		24.7		Fig. 18

<sup>10</sup> El cuaderno o libreta de bitácora, del francés *bitacle*, por *habitable*, para los marineros es una especie de armario, fijo a la cubierta e inmediato al timón, en que se pone la aguja de marear y el cuaderno donde se van señalando todas las instrucciones, sucesos de la travesía, etc. (como la actual “caja negra” de los aviones). El cuaderno de bitácora es un libro pequeño o conjunto de papel en que se lleva la cuenta y razón, o en que se escriben algunas noticias, ordenanzas o instrucciones

Tabla 4.2. Parámetros de cada RALLFA a 45, 55 y 65°C (Continuación)

Sistema	Parámetro	Febrero – Mayo (2012)		
RALLFA <sub>45°C</sub>	Acidez total (meq/L)	100.3	Fig. 19	
RALLFA <sub>55°C</sub>		94.3	Fig. 20	
RALLFA <sub>65°C</sub>		86.1	Fig. 21	
RALLFA <sub>45°C</sub>	Temperatura (°C) [mín-máx]	42.8	47.0	Fig. 22
RALLFA <sub>55°C</sub>		45.0	55.0	Fig. 23
RALLFA <sub>65°C</sub>		58.5	65.5	Fig. 24
RALLFA <sub>45°C</sub>	DQO <sub>REMOVIDA</sub> (g/L O <sub>2</sub> )	10.32	Fig. 25	
RALLFA <sub>55°C</sub>		16.48	Fig. 26	
RALLFA <sub>65°C</sub>		18.69	Fig. 27	
RALLFA <sub>45°C</sub>	ST <sub>REMOVIDOS</sub> (g/L)	28.4	Fig. 28	
RALLFA <sub>55°C</sub>		27.4	Fig. 29	
RALLFA <sub>65°C</sub>		26.4	Fig. 30	
RALLFA <sub>45°C</sub>	SV <sub>REMOVIDOS</sub> (g/L)	27.2	Fig. 31	
RALLFA <sub>55°C</sub>		28.1	Fig. 32	
RALLFA <sub>65°C</sub>		27.1	Fig. 33	
RALLFA <sub>45°C</sub>	Relación pH - $\alpha$	Fig. 34		
RALLFA <sub>55°C</sub>		Fig. 35		
RALLFA <sub>65°C</sub>		Fig. 36		
RALLFA <sub>45°C</sub>	% DQO <sub>REMOVIDA</sub>	Fig. 37		
RALLFA <sub>55°C</sub>	% ST <sub>REMOVIDOS</sub>	Fig. 38		
RALLFA <sub>65°C</sub>	% SV <sub>REMOVIDOS</sub>	Fig. 39		

Tabla 4.3. Medición de CH<sub>4</sub> de cada RALLFA a 45, 55 y 65°C

Sistema	Parámetro	Febrero – Mayo (2012)	
RALLFA <sub>45°C</sub>	Biogás Medido (L)	7.01	Fig. 40
RALLFA <sub>55°C</sub>		9.24	
RALLFA <sub>65°C</sub>		8.50	
RALLFA <sub>45°C</sub>	CH <sub>4</sub> Teórico (L)	5.46	Fig. 41
	CH <sub>4</sub> Teórico (L)	4.30	
	$\sigma$ : Desviación estándar	0.70	
RALLFA <sub>55°C</sub>	CH <sub>4</sub> Teórico (L)	8.93	Fig. 42
	CH <sub>4</sub> Teórico (L)	7.23	
	$\sigma$ : Desviación estándar	1.64	
RALLFA <sub>65°C</sub>	CH <sub>4</sub> Teórico (L)	10.45	Fig. 43
	CH <sub>4</sub> Teórico (L)	7.03	
	$\sigma$ : Desviación estándar	2.07	
RALLFA <sub>45°C</sub>	Relación $\alpha - V_{CH_4}$ Experimental	Fig. 44	
RALLFA <sub>55°C</sub>		Fig. 45	
RALLFA <sub>65°C</sub>		Fig. 46	
RALLFA <sub>45°C</sub>	% CH <sub>4</sub> en el biogás obtenido experimentalmente	61.81	Fig. 47
RALLFA <sub>55°C</sub>		78.72	
RALLFA <sub>65°C</sub>		83.08	

## 4.1. Parámetros de seguimiento

Todos los datos experimentales están tabulados en el Anexo 1.

### 4.1.1. Valor de pH y de alcalinidad

En las Figuras 4.1 a 4.3 se presentan los datos de pH de cada reactor en forma gráfica. Las líneas verdes y rosa indican los valores deseables.

Se observa que el comportamiento del pH en los reactores durante la primera mitad de la experimentación fue inestable. Esto se debió a la realización de mantenimiento, renovación de equipos y conexiones necesarios en el sistema. Cabe mencionar que el reactor más inestable fue el de 55°C debido a una fuga presentada en la semana 13.

En las Figuras 4.4 a 4.6 están los datos de  $\alpha$  y puede observarse que el comportamiento fue similar al del pH. La alcalinidad fue el principal parámetro que fue utilizado para conocer si el sistema se encontraba en condiciones estables. El intervalo ideal es de 0.3 a 0.5; las gráficas indican que a 55°C se aproximó a este intervalo.

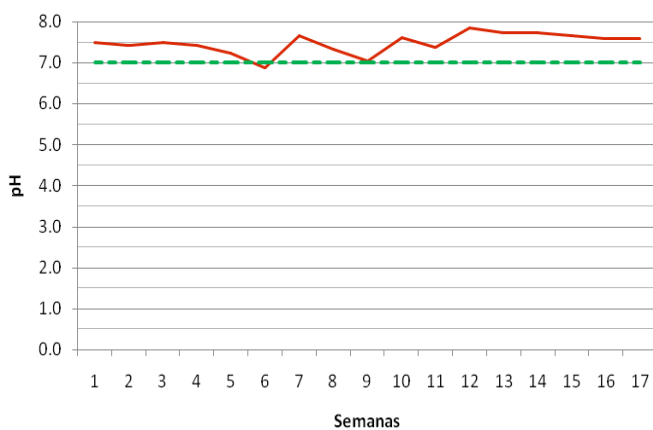


Fig. 4.1. Valores de pH en RALLFA<sub>45°C</sub>

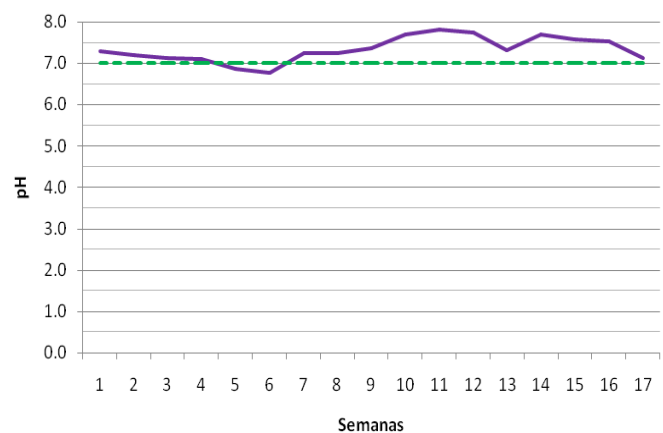


Fig. 4.2. Valores de pH en RALLFA<sub>55°C</sub>

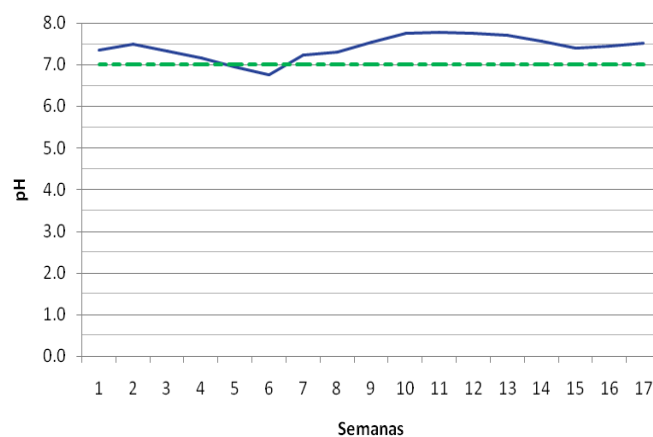


Fig. 4.3. Valores de pH en RALLFA<sub>65°C</sub>

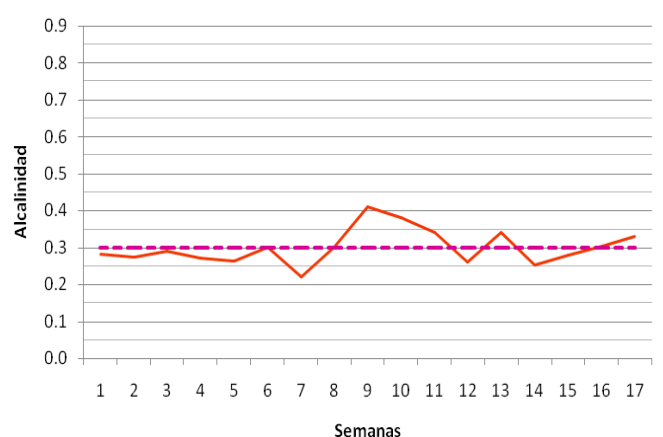
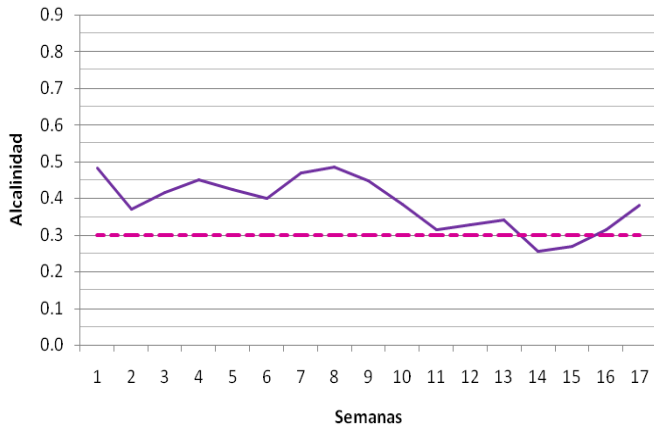
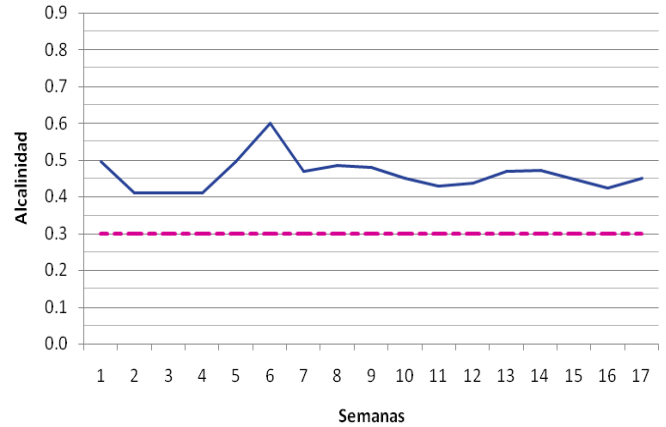


Fig. 4.4. Valores de  $\alpha$  en RALLFA<sub>45°C</sub>





**Fig. 4.5. Valores de  $\alpha$  en RALLFA<sub>55°C</sub>**



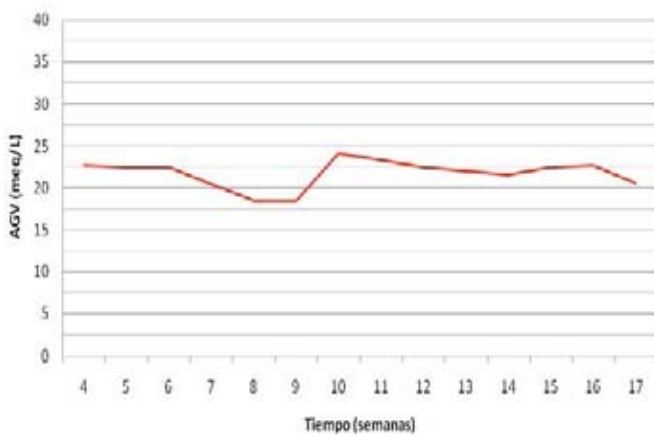
**Fig. 4.6. Valores de  $\alpha$  en RALLFA<sub>65°C</sub>**

#### 4.1.2. Ácidos grasos volátiles, AGV – Acidez total

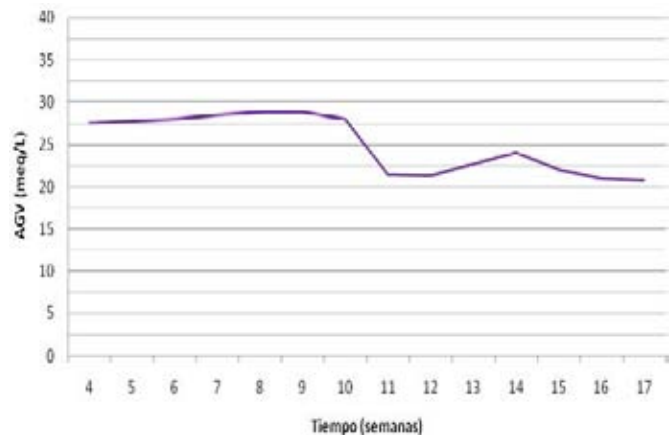
En las Figuras 4.7 a 4.9 se presentan los datos de los ácidos grasos volátiles, AGV, y en las Figuras 4.10 a 4.12 los datos de acidez total de cada reactor en forma gráfica.

Los AGV indican la cantidad de inhibidores en el sistema, por lo tanto, al comparar el comportamiento en los reactores puede decirse que los sistemas a 55°C y 65°C son los de menor toxicidad ya que contienen 11.1 % más AGV que el sistema a 45°C.

Finalmente, el parámetro de acidez total actúa como criterio de estabilidad y toxicidad, por lo que al comparar los sistemas, el de menor toxicidad es a 65 °C ya que presentó la menor cantidad de acidez.



**Fig. 4.7. Valores de AGV en RALLFA<sub>45°C</sub>**



**Fig. 4.8. Valores de AGV en RALLFA<sub>55°C</sub>**

#### 4.1.3. Temperatura

En las Figuras 4.13 a 4.15 se presentan los datos de temperatura. El comportamiento de la temperatura indica que el reactor a 45°C es el que presentó una variación mínima  $\pm 2.1^\circ\text{C}$ , debido a que no se presentaron fugas el sistema de recirculación de agua, por lo que no sufrió choques térmicos.

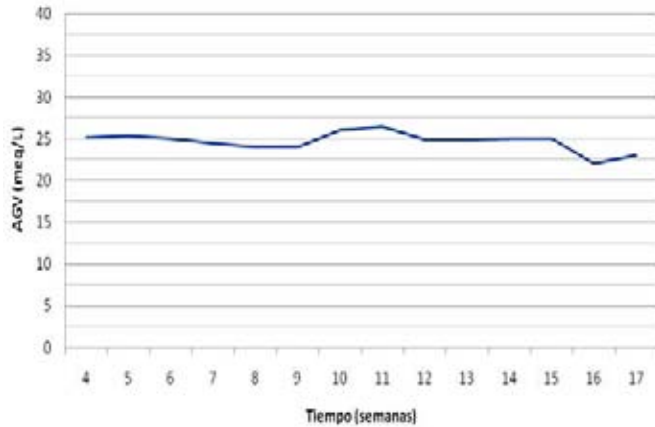


Fig. 4.9. Valores de AGV en RALLFA<sub>65°C</sub>

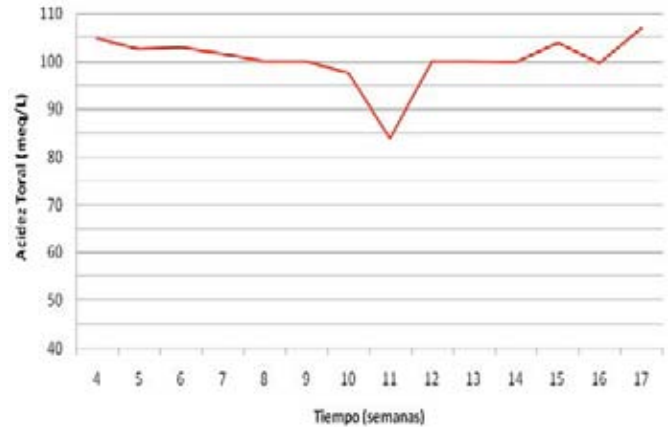


Fig. 4.10. Valores de acidez total en RALLFA<sub>45°C</sub>

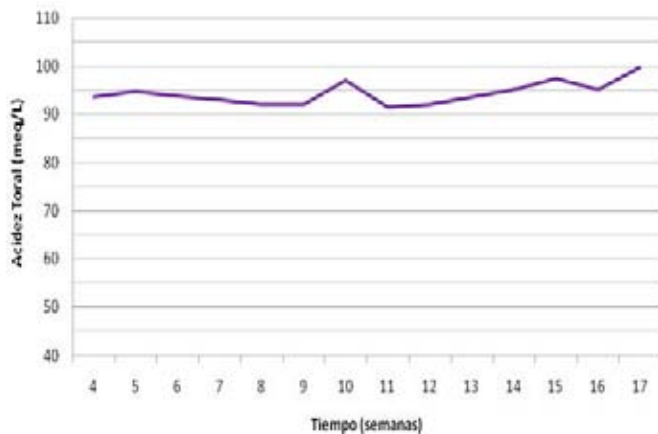


Fig. 4.11. Valores de acidez total en RALLFA<sub>55°C</sub>

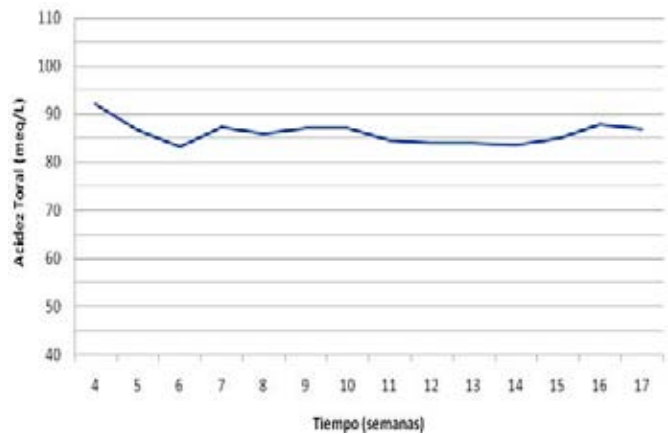


Fig. 4.12. Valores de acidez total en RALLFA<sub>65°C</sub>

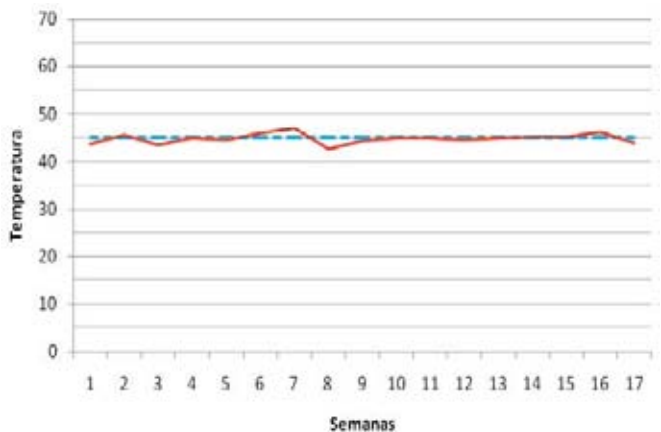


Fig. 4.13. Valores de temperatura en RALLFA<sub>45°C</sub>

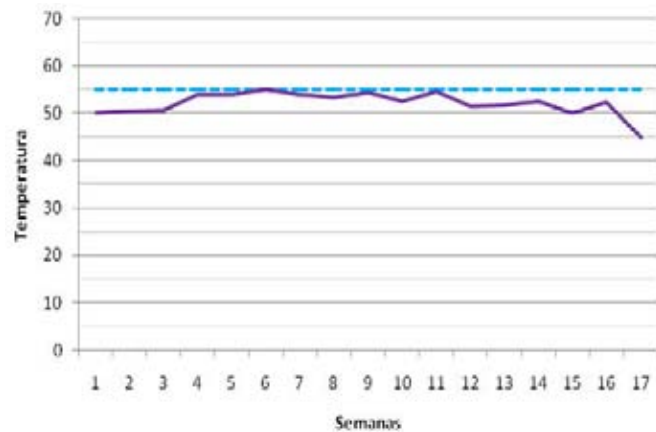


Fig. 4.14. Valores de temperatura en RALLFA<sub>55°C</sub>

En cuanto al reactor de 55°C, el sistema de recirculación sufrió de fugas y un paro, por lo que la temperatura disminuyó drásticamente, influyendo esto en el comportamiento y la producción de biogás. Finalmente, el sistema de 65°C, requirió de un constante

mantenimiento para lograr la temperatura de trabajo presentando variaciones de  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ; sin embargo, finalmente se pudo alcanzar la meta deseada.

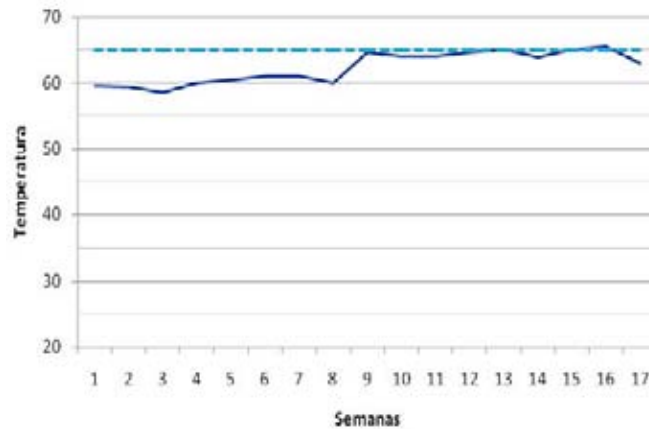


Fig. 4.15. Valores de temperatura en RALLFA<sub>65°C</sub>

#### 4.1.4. Remoción de DQO

En las Figuras 4.16 a 4.18 se presentan los datos de DQO removida de cada reactor en forma gráfica. En estas gráficas se observa un comportamiento similar a algunos parámetros (alcalinidad y pH), se puede observar que estos parámetros afectan a la remoción de DQO y, por tanto, afectarán la producción del metano en los RALLFA. Los porcentajes de remoción son los siguientes: 8.5%<sub>45°C</sub>, 13.6%<sub>55°C</sub> y 15.4%<sub>65°C</sub>. El sistema a 45°C fue el que presentó el mejor comportamiento y el sistema a 55°C fue el que mayor porcentaje de remoción presentó.

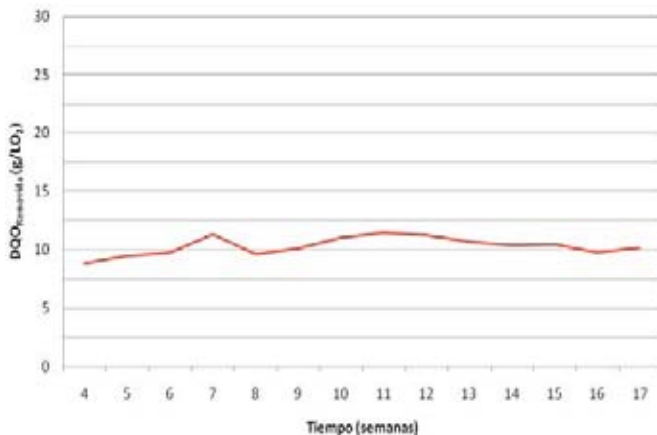


Fig. 4.16. DQO<sub>REMOVIDA</sub> en RALLFA<sub>45°C</sub>

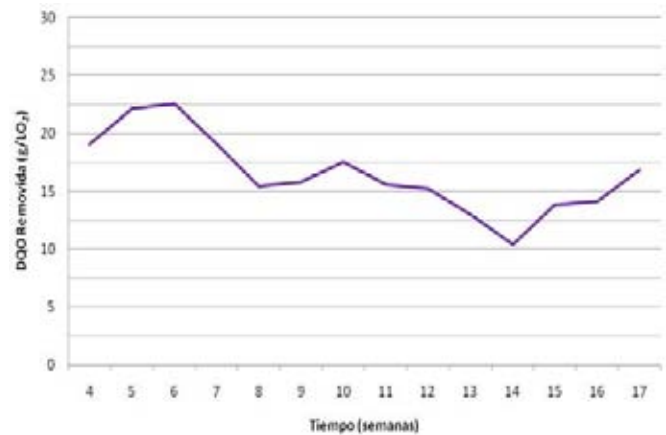


Fig. 4.17. DQO<sub>REMOVIDA</sub> en RALLFA<sub>55°C</sub>

#### 4.1.5. Sólidos totales y sólidos volátiles removidos

En las Figuras 4.19 a 4.21 se presentan los datos de los sólidos totales (ST) removidos y en las Figuras 4.22 a 4.24 los datos de los sólidos volátiles (SV) removidos de cada reactor, en forma gráfica. El comportamiento de los RALLFA en cuanto a los porcentajes de remoción de ST fueron los siguientes: 52.8%<sub>45°C</sub>, 51.5%<sub>55°C</sub> y 49.0%<sub>65°C</sub>.

El comportamiento de los RALLFA en cuanto a los porcentajes de remoción de SV fueron los siguientes: 76.0%<sub>45°C</sub>, 79.3%<sub>55°C</sub> y 76.7%<sub>65°C</sub>. Esto vuelve a confirmar que en el sistema a 55°C es el que presenta la mayor eficiencia de remoción.

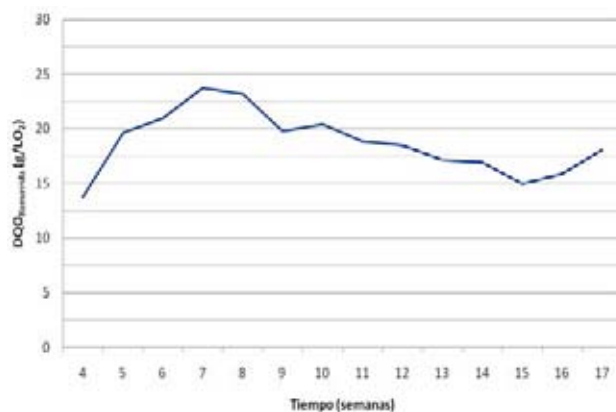


Fig. 4.18. DQO<sub>REMOVIDA</sub> en RALLFA<sub>65°C</sub>

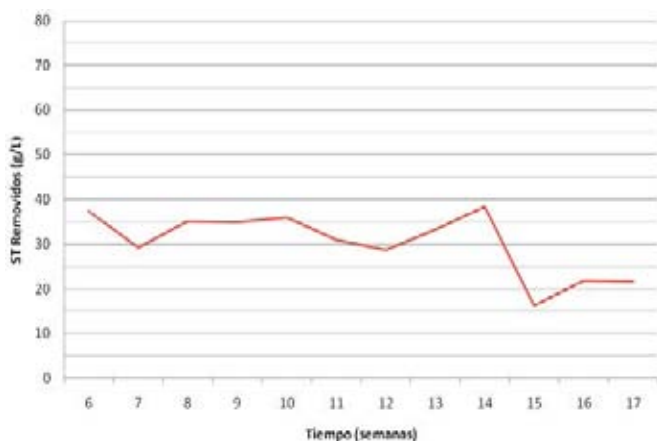


Fig. 4.19. ST<sub>REMOVIDOS</sub> en RALLFA<sub>45°C</sub>

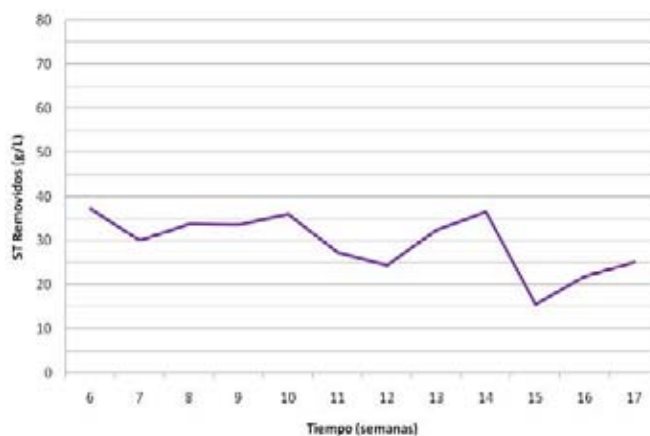


Fig. 4.20. ST<sub>REMOVIDOS</sub> en RALLFA<sub>55°C</sub>

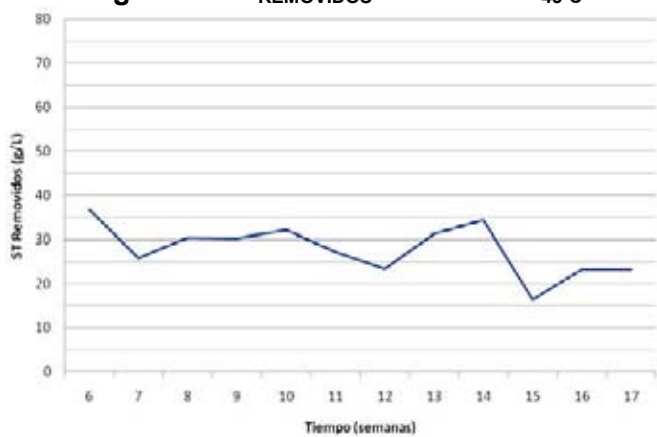


Fig. 4.21. ST<sub>REMOVIDOS</sub> en RALLFA<sub>65°C</sub>

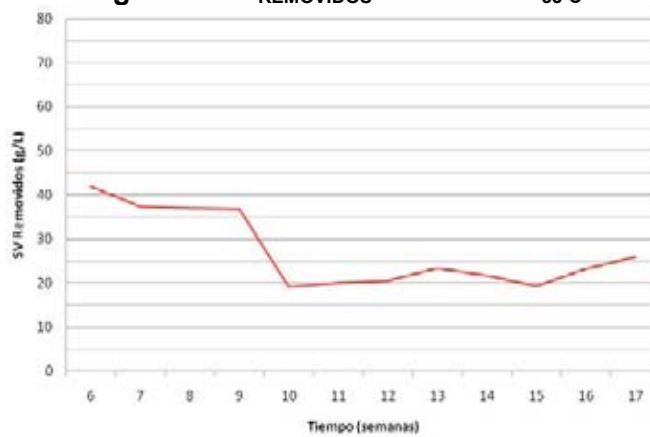


Fig. 4.22. SV<sub>REMOVIDOS</sub> en RALLFA<sub>45°C</sub>

#### 4.1.6. Comparación pH y $\alpha$ versus tiempo

En las Figuras 4.25 a 4.27 se presentan los datos de la comparación entre el pH y  $\alpha$ . Los valores de pH obtenidos en los sistemas a las diferentes temperaturas influyen en

la relación de alcalinidad de cada uno de ellos. Todos los sistemas mantienen un pH entre 6.5 y 8.0.

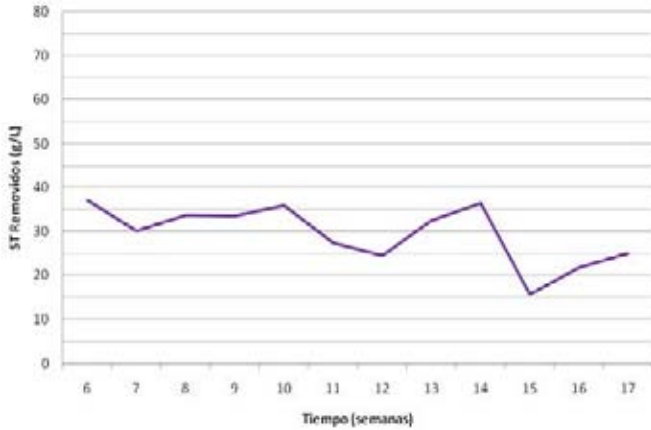


Fig. 4.23. SV<sub>REMOVIDOS</sub> en RALLFA<sub>55°C</sub>

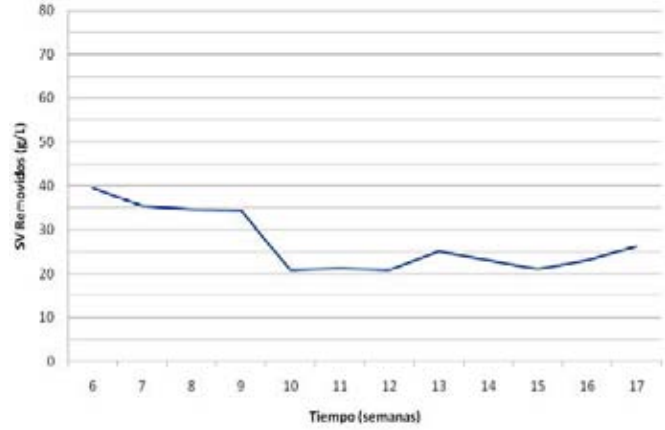


Fig. 4.24. SV<sub>REMOVIDOS</sub> en RALLFA<sub>65°C</sub>

Se puede observar que el comportamiento de la temperatura afectó directamente a todos los sistemas y, por tanto, el comportamiento de los parámetros a medir. Siendo la alcalinidad el principal criterio de estabilidad, en promedio, los sistemas mostraron una estabilidad adecuada; aunque gráficamente se observa que los cambios abruptos al variar solamente algunos grados la temperatura y que se afectan ambos parámetros. Es importante controlar lo mejor posible esta variable a nivel real.

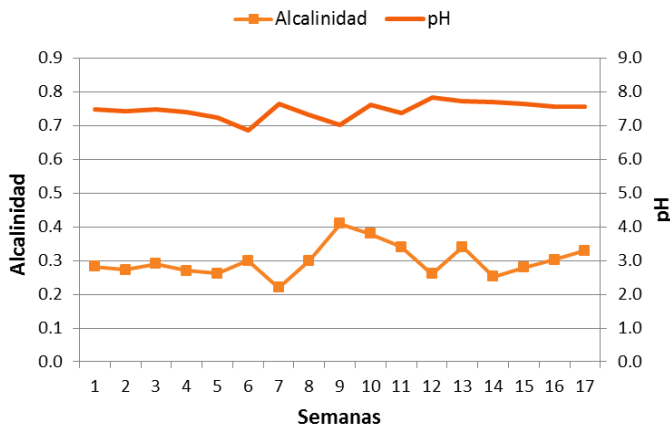


Fig. 4.25. Comparación de pH y α en RALLFA<sub>45°C</sub>

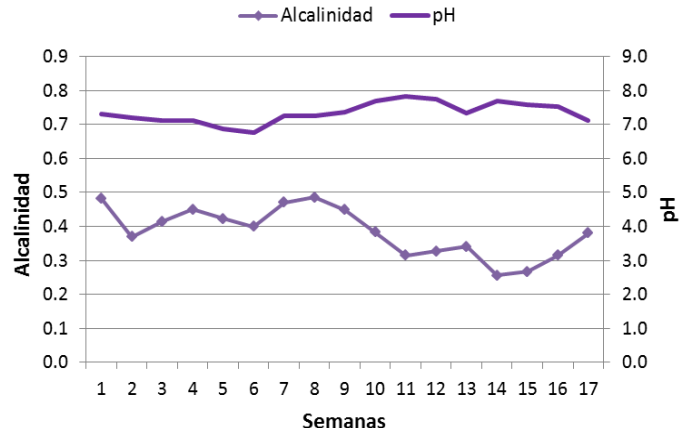


Fig. 4.26. Comparación de pH y α en RALLFA<sub>55°C</sub>

#### 4.1.7. Comparación de porcentajes de remoción de ST, SV y DQO

En las Figuras 4.28 a 4.30 se muestran los datos la comparación entre los porcentajes de remoción de ST, SV y DQO de cada reactor en forma gráfica. Los porcentajes de remoción dan una amplia información de lo que sucede en los sistemas, de igual manera que al compararlo con el parámetro de alcalinidad se observa la tendencia a seguir de los valores de remoción.

Puede verse que todos los sistemas tienen porcentajes de remoción similares. La tendencia a observar es que en los sistemas a 55°C y 65°C se obtienen los mayores porcentajes de remoción en los 3 parámetros y, por tanto, esto se verá reflejado en la producción de metano de los sistemas.

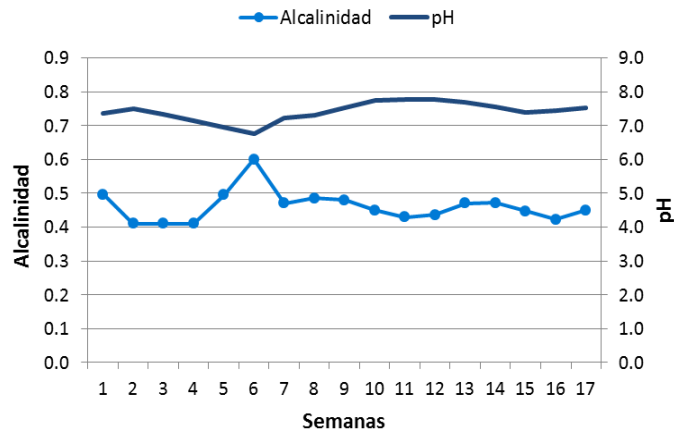


Fig. 4.27. Comparación de pH y  $\alpha$  en RALLFA<sub>65°C</sub>

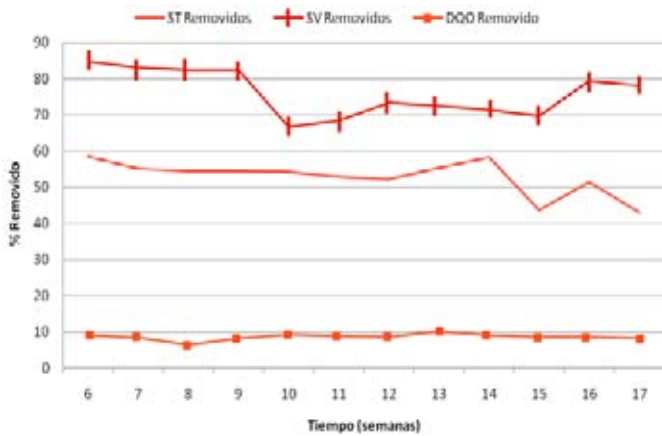


Fig. 4.28. Porcentajes de remoción de ST, SV y DQO en RALLFA<sub>45°C</sub>

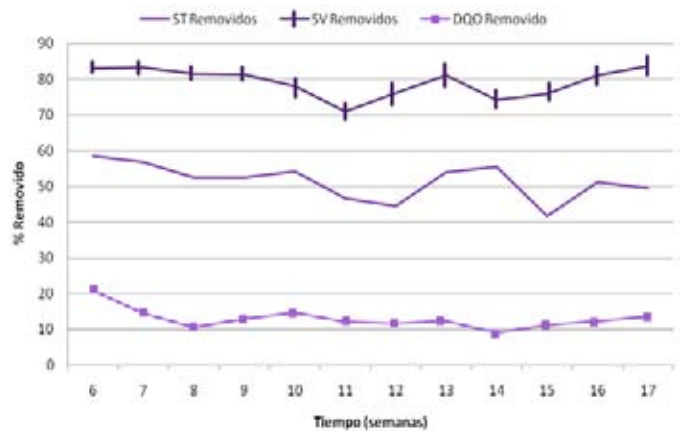


Fig. 4.29. Porcentajes de remoción de ST, SV y DQO en RALLFA<sub>55°C</sub>

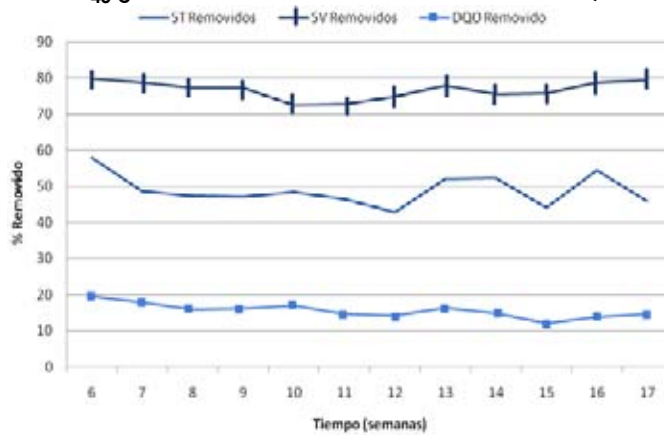


Fig. 4.30. Porcentajes de remoción de ST, SV y DQO en RALLFA<sub>65°C</sub>

## 4.2. Producción de metano

Las Figuras 4.31 a 4.38 presentan la comparación de los datos del volumen de biogás y del metano en ese biogás, tanto medido como calculado teóricamente (Tabla 4.3).

### 4.2.1. Volumen de CH<sub>4</sub> calculado teóricamente y medido experimentalmente

El volumen teórico promedio calculado para cada sistema está en función de la cantidad de DQO removida, que se graficaron previamente. Con la ecuación (3) se obtuvieron los siguientes volúmenes teóricos: 5.46 L<sub>45°C</sub>, 8.93 L<sub>55°C</sub> y 10.45 L<sub>65°C</sub> semanalmente.

El volumen promedio generado en los reactores medible durante 14 semanas usando el sistema propuesto, fueron los siguientes: 4.30<sub>45°C</sub>, 7.23<sub>55°C</sub> y 7.03<sub>65°C</sub>.

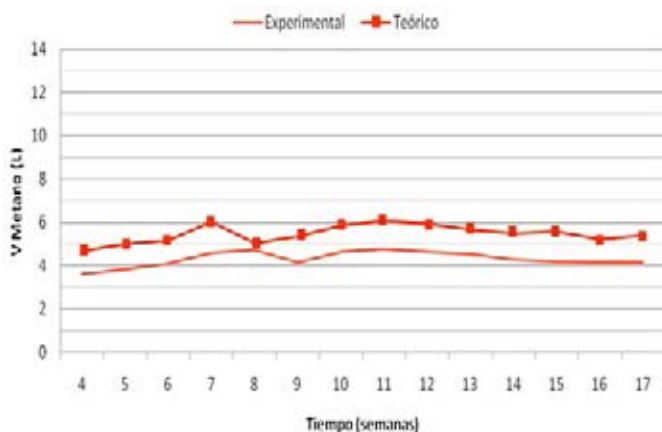


Fig. 4.31. CH<sub>4</sub> Teor.-Exp. en RALLFA<sub>45°C</sub>

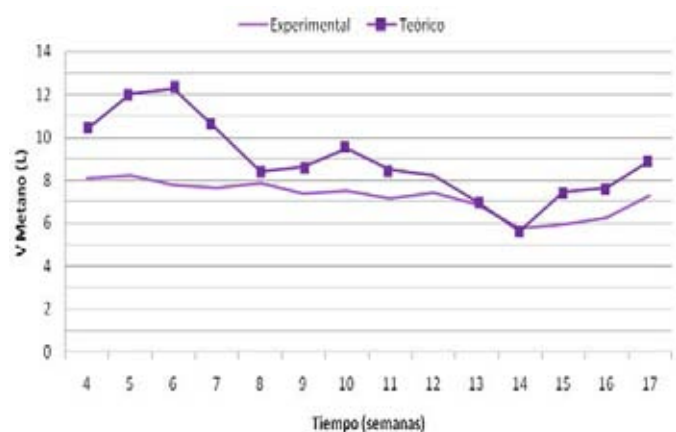


Fig. 4.32. CH<sub>4</sub> Teor.-Exp. en RALLFA<sub>55°C</sub>

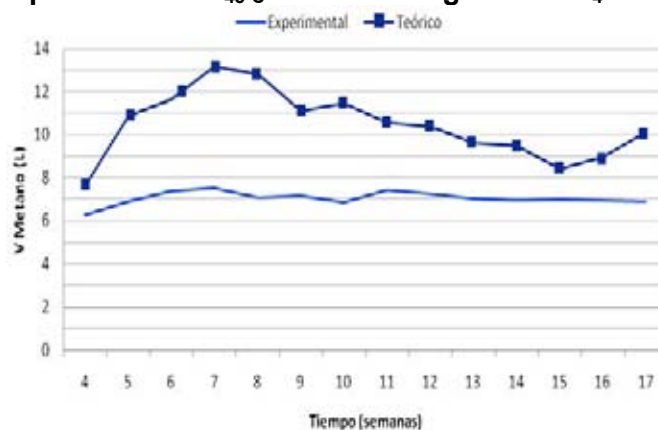


Fig. 4.33. CH<sub>4</sub> Teor.-Exp. en RALLFA<sub>65°C</sub>

### 4.2.2. Comparación de la producción del metano teórico y experimental

La desviación es estándar promedio entre el valor teórico y experimental para cada sistema fue: 0.70<sub>45°C</sub>, 1.64<sub>55°C</sub> y 2.07<sub>65°C</sub>. Estos valores se debieron a que los sistemas de medición experimental aún no se encuentran en condiciones óptimas; es importante mencionar que el sistema a 55°C fue el que presentó una desviación menor. Esto



refleja lo ya mostrado en los datos anteriores en que este sistema a pesar de no ser el más eficiente fue el que permaneció estable.

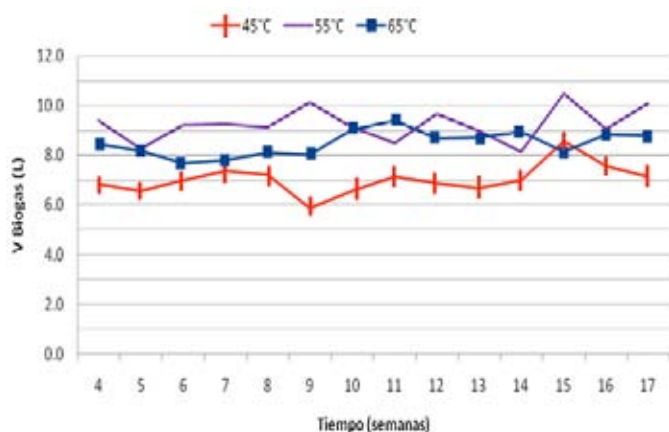


Fig. 4.34. Volumen biogás Exp. en los RALLFA

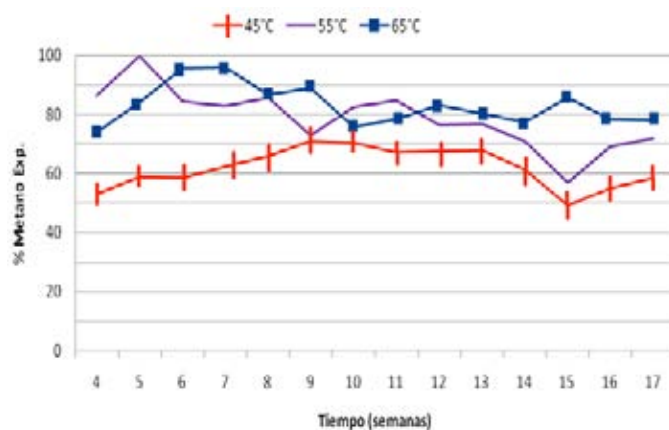


Fig. 4.35. Porcentaje de CH<sub>4</sub> Exp. en biogás

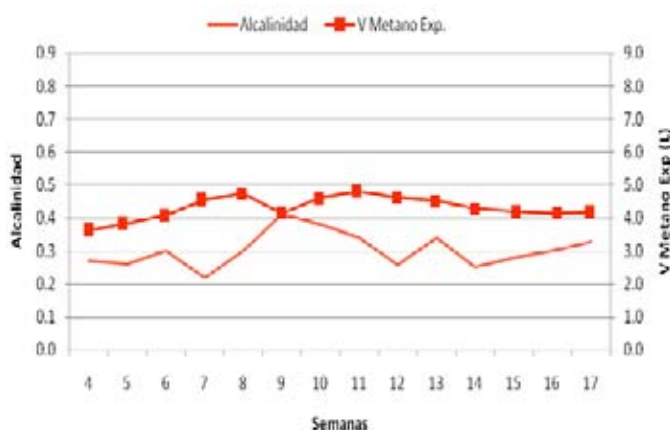


Fig. 4.36. Comparación V CH<sub>4</sub> EXP y  $\alpha$  en RALLFA<sub>45°C</sub>

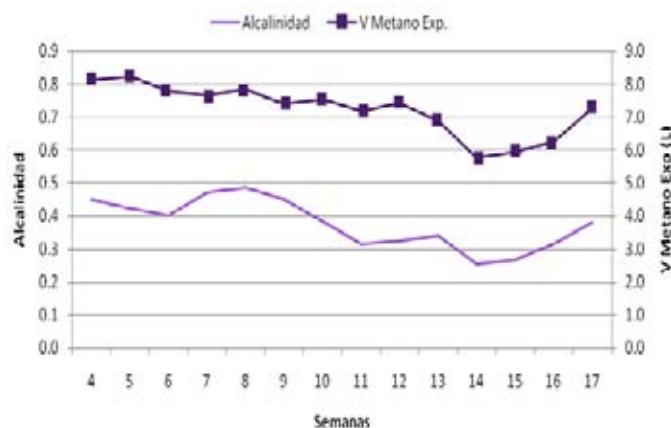


Fig. 4.37. Comparación V CH<sub>4</sub> EXP y  $\alpha$  en RALLFA<sub>55°C</sub>

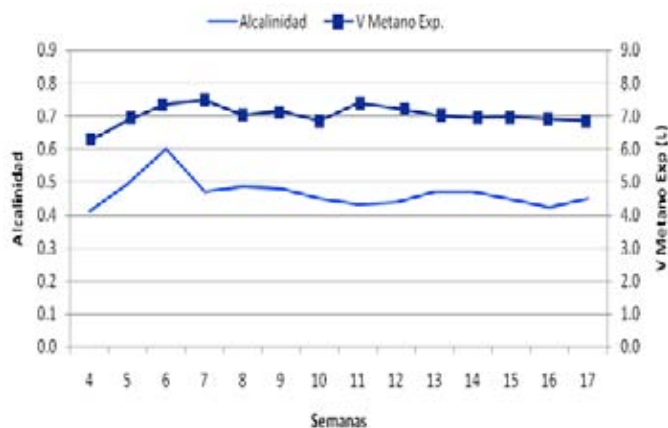


Fig. 4.38. Comparación V CH<sub>4</sub> EXP y  $\alpha$  en RALLFA<sub>65°C</sub>

Con este análisis se pretende en una investigación paralela (Poblano-Flores, 2012 - 2013) lograr la implementación de un sistema automático de medición y así evitar que



se presenten fugas y/o derrames. Al comparar los tres sistemas se puede observar que el de mayor producción fue a 55°C. Esto contrasta con los datos teóricos en los que se concluye que a 65°C se debía obtener una mayor cantidad de metano, por lo que puede concluirse que estos sistemas son sensibles a la temperatura y que al comparar con los valores de remoción se cumple que el sistema a 55°C es el que produce la mayor cantidad de metano.

De este análisis puede concluirse que el sistema a 55°C es el que mantiene las condiciones más adecuadas para el crecimiento microbiano y, por tanto, las que permiten una mayor remoción de la materia aprovechable en las vinazas, confirmando los experimentos anteriores realizados por Castro-González (2004) a 35, 45 y 55°C.

#### **4.2.3. Comparación de la calidad del biogás (%CH<sub>4</sub>) y su comportamiento**

Al aplicar la metodología descrita en el punto correspondiente, se consigue evaluar el % de metano real en el biogás que indica su calidad. Los datos experimentales fueron: 61.8%<sub>45°C</sub>, 78.72%<sub>55°C</sub> y 83.1%<sub>65°C</sub>.

Al comparar los porcentajes de metano se puede observar que los valores teóricos son acordes con los reales. Aunque el sistema a 55°C fue en el que se produjo la mayor cantidad de biogás, en el sistema a 65°C fue el que contuvo mayor rendimiento en la producción de metano.

Se puede percibir que estos valores serán reflejo de la temperatura y, por tanto, de la alcalinidad del sistema.

El resultado de la análisis de la cantidad de metano y la alcalinidad es que su comportamiento es totalmente similar y se reafirma el efecto de la temperatura en estos sistemas.

Finalmente, se concluyó que, el sistema a 55°C, es en el que mayor producción de metano se obtuvo, pero el de mejor calidad y rendimiento fue el sistema a 65°C.

Con este análisis se persuade a que en las investigaciones posteriores se considere una temperatura intermedia, es decir, un sistema que se mantenga alrededor de 60°C.

### **4.3. Mantenimiento del sistema**

A lo largo de la investigación se realizaron algunos cambios para mejorar la operación del sistema. A continuación se señalan algunos de ellos:

1. Cambios de los medidores de biogás (Fig. 4.39) e instalación del medidor por desplazamiento de líquido propuesto (Fig. 4.40)
2. Implementación de un sistema de válvulas de escape en la salida a la atmósfera o atmósfera del biogás (Fig. 4.41) proveniente de cada RALLFA, para la determinación del %CO<sub>2</sub> (Fig. 4.42)

3. Mantenimiento de bombas y cambio de recipientes de recirculación del sistema de calentamiento, también se cambiaron las mangueras que presentaban desgastes y posibilidad de fugas del sistema.



Antes

Figura 4.39. Medidor antiguo



Ahora

Figura 4.40. Medidor instalado



Antes

Figura 4.41. Venteo a la atmósfera (se quitó el conector de recolección de biogás)



Ahora

Figura 4.42. Válvulas de descarga de biogás

#### 4.4. Estabilización del sistema

Los reactores, como pudo verse en las Figuras 4.1 a 4.9 y 4.19 a 4.21, se encuentran en un régimen pseudo-permanente. Esto se logró con las modificaciones y reparaciones a las que fueron sometidos los sistemas.

El reactor a 45°C a pesar de ser el sistema que más fácilmente alcanzó este régimen no fue el más estable. Puede decirse que a este intervalo de temperatura no se favorece la actividad metanogénica, comparado con los otros dos.

## 5. Conclusiones y recomendaciones

### 5.1. Conclusiones

El objetivo planteado para esta investigación era el de realizar el seguimiento de la producción de metano en los tres reactores operando a 45, 55 y 65°C, así como la conversión de compuestos carbonosos medidos como demanda química de oxígeno soluble a metano y CO<sub>2</sub>. Terminada la investigación se puede concluir y recomendar lo siguiente:

- Para que el reactor se mantenga estable es necesario evaluar los parámetros de temperatura, pH, relación de alcalinidad y DQO removida del sistema en forma periódica con objeto de garantizar la estabilidad del sistema. En el caso de que alguna de estas variables cambie deben tomarse las previsiones necesarias para evitar la desestabilización de los reactores
- La principal utilidad del empleo de un RALLFA para el tratamiento de las aguas de proceso o efluente con altas cargas orgánicas es que se logra la remoción de, al menos, los 60% de su contenido de contaminantes en este caso disueltos transformándose en biogás rico en metano (Fig. 5.1). Para las vinazas, esto se cumple cabalmente (Cruz-Juárez, 2010)
- En todos los sistemas se llevó a cabo la producción de metano, ya que el intervalo de temperaturas en el que se operaron corresponden al intervalo en el que las bacterias termófilas tienen un crecimiento óptimo. En este intervalo, las mejores condiciones de estabilidad se presentaron en el reactor a 65°C
- Comparando cada sistema con los diferentes parámetros se concluye que el sistema a 55°C fue del que se reportó la mayor cantidad de biogás y la mejor calidad en función de su cantidad de metano, debido a la estabilidad que posee el sistema. Cabe mencionar que este sistema presenta 2.5% más AGV que los del sistema de 65°C, por lo cual es más susceptible a inhibidores. Al ser más sensible esto indica que el sistema puede perder su régimen pseudo-permanente
- El parámetro que mejor se ajustó como criterio de estabilidad fue la relación de alcalinidad, siendo el sistema de 55°C el más estable
- En cuanto a la remoción de la DQO, los sistemas que presentaron una mayor remoción son los que tienen una temperatura de trabajo de 55 y 65°C. Es to comprueba que los consorcios microbianos de degradación de la materia orgánica se adaptaron con mayor afinidad a dichas temperaturas provocando una generación de metano mayor en dichos sistemas en comparación con el de 45°C
- Cada sistema presentó variaciones similares debido a factores externos como las fugas, la interacción con el ambiente e inclusive la calidad de alimentación, es

recomendable que sean necesarios algunos cambios en el sistema como puede ser utilizar llaves de paso o como pueden ser el cambio del aislante

## 5.2. Recomendaciones

- Es necesario realizar una evaluación continua de la cantidad y la calidad del biogás producido, por lo que es recomendable la instalación de un dispositivo automático.
- En esta investigación no fue posible realizar dicha modificación. La información generada en esta investigación da la base para el seguimiento de esta mejora (Fig. 5.2).



Fig. 5.1. Combustión del metano del biogás (Cruz-Juárez, 2010)

biogás por parte del prestador

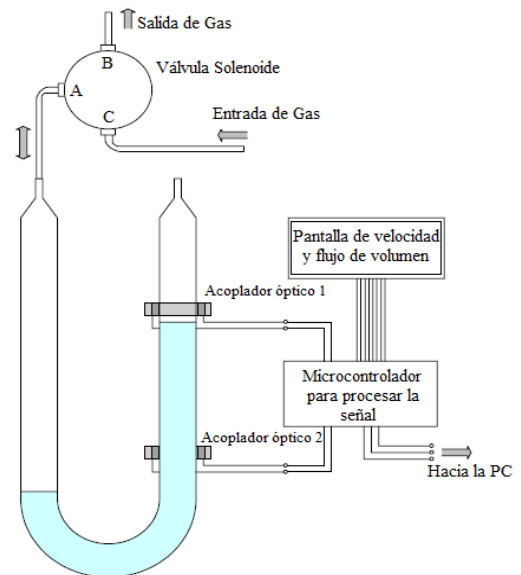


Figura 5.2. Medidor propuesto a futuro (Mattiasson *et al.*, 2003)

## Anexo 1. Resultados experimentales obtenidos

Tabla A-1. Resultados experimentales de los parámetros de medición RALLFA a 45°C

RALLFA 45 °C						
Semana	pH	Alcalinidad	Temperatura (°C)	AGV (meq/L)	Acidez total (meq/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (meq/L)
1	7.49	0.282	43.8			
2	7.42	0.273	45.6			
3	7.50	0.290	43.5			
4	7.42	0.270	45.0	22.7	104.9	82.2
5	7.24	0.263	44.5	22.5	102.6	80.1
6	6.88	0.300	46.0	22.5	103.0	80.5
7	7.65	0.220	47.0	20.5	101.5	81.0
8	7.33	0.300	42.8	18.5	100.0	81.5
9	7.04	0.410	44.3	18.5	100.0	81.5
10	7.61	0.380	45.0	24.1	97.5	73.4
11	7.38	0.340	45.0	23.3	84.0	60.7
12	7.84	0.260	44.7	22.5	100.0	77.5
13	7.72	0.340	45.0	22.0	100.0	77.9
14	7.72	0.252	45.2	21.6	99.9	78.3
15	7.66	0.280	45.2	22.5	104.0	81.5
16	7.58	0.303	46.2	22.7	99.6	76.9
17	7.58	0.330	44.0	20.6	107.0	86.4
<i>Prom.</i>	<i>7.48</i>	<i>0.300</i>	<i>44.9</i>	<i>21.6</i>	<i>99.7</i>	<i>78.1</i>
Semana	S. totales (g/L)	S. volátiles (g/L)	ST <sub>Removidos</sub> (g/L)	SV <sub>Removidos</sub> (g/L)	ST <sub>Removidos</sub> (%)	SV <sub>Removidos</sub> (%)
6	26.40	7.47	37.22	41.93	58.5	84.9
7	23.75	7.62	29.27	37.20	55.2	83.0
8	29.15	7.85	34.99	36.88	54.6	82.5
9	29.15	7.85	34.82	36.70	54.4	82.4
10	30.30	9.59	35.93	19.21	54.3	66.7
11	27.52	9.21	30.85	20.03	52.9	68.5
12	26.22	7.45	28.65	20.47	52.2	73.3
13	26.84	8.80	33.22	23.37	55.3	72.6
14	27.48	8.70	38.32	21.78	58.2	71.5
15	21.02	8.42	16.27	19.32	43.6	69.6
16	20.74	6.04	21.91	23.28	51.4	79.4
17	28.90	7.28	21.77	25.91	43.0	78.1
<i>Prom.</i>	<i>26.13</i>	<i>8.02</i>	<i>28.37</i>	<i>27.17</i>	<i>52.8</i>	<i>76.0</i>

RALLFA 45 °C						
Semana	DQO <sub>Removida</sub> (g)	DQO <sub>Remov.</sub> (%)	V Biogás (L)	CH <sub>4</sub> Exp. (%)	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> Teor. (L)	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> Exp. (L)
4	8.85	8.1	9.65	37.4	4.68	3.61
5	9.48	7.3	9.26	41.4	5.01	3.83
6	9.78	9.1	9.88	41.3	5.19	4.08
7	11.33	8.5	10.40	43.9	6.03	4.57
8	9.60	6.6	10.21	46.4	5.04	4.74
9	10.13	8.3	8.28	50.0	5.35	4.14
10	11.02	9.2	9.29	49.7	5.83	4.62
11	11.48	8.9	10.12	47.3	6.08	4.79
12	11.23	8.6	9.71	47.5	5.94	4.61
13	10.67	10.2	9.46	47.8	5.64	4.52
14	10.40	9.2	9.88	43.3	5.51	4.28
15	10.52	8.6	12.12	34.6	5.57	4.19
16	9.78	8.5	10.67	38.7	5.20	4.13
17	10.20	8.3	10.09	41.2	5.38	4.16
<i>Prom.</i>	<i>10.32</i>	<i>8.53</i>	<i>9.93</i>	<i>43.61</i>	<i>5.46</i>	<i>4.30</i>

Tabla A-2. Resultados experimentales de los parámetros de medición RALLFA a 55°C

RALLFA 55 °C						
Semana	pH	Alcalinidad	Temperatura (°C)	AGV (meq/L)	Acidez total (meq/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (meq/L)
1	7.29	0.482	50.0			
2	7.19	0.370	50.3			
3	7.13	0.415	50.5			
4	7.11	0.450	54.0	27.5	93.5	66.0
5	6.86	0.423	54.0	27.8	94.7	66.9
6	6.76	0.400	55.0	28.0	93.8	65.8
7	7.24	0.470	54.0	28.4	92.9	64.5
8	7.24	0.485	53.3	28.8	92.0	63.2
9	7.36	0.449	54.3	28.8	92.0	63.2
10	7.69	0.383	52.5	28.0	97.0	69.0
11	7.81	0.315	54.5	21.4	91.4	70.0
12	7.74	0.327	51.3	21.3	92.0	70.7
13	7.32	0.340	51.7	22.7	93.6	70.9
14	7.69	0.256	52.4	24.0	95.1	71.1
15	7.58	0.268	50.0	22.0	97.4	75.4
16	7.54	0.315	52.3	21.0	95.2	74.2
17	7.13	0.380	45.0	20.8	99.7	78.9
<i>Prom.</i>	<i>7.33</i>	<i>0.384</i>	<i>52.1</i>	<i>24.6</i>	<i>94.3</i>	<i>69.7</i>

RALLFA 55 °C						
Semana	S. totales (g/L)	S. volátiles (g/L)	ST <sub>Removidos</sub> (g/L)	SV <sub>Removidos</sub> (g/L)	ST <sub>Removidos</sub> (%)	SV <sub>Removidos</sub> (%)
6	26.42	8.35	37.20	41.05	58.5	83.1
7	22.93	7.48	30.09	37.34	56.8	83.3
8	30.41	8.27	33.73	36.46	52.6	81.5
9	30.41	8.27	33.56	36.28	52.5	81.4
10	30.26	6.28	35.97	22.52	54.3	78.2
11	31.06	8.46	27.31	20.78	46.8	71.1
12	30.46	6.64	24.41	21.28	44.5	76.2
13	27.62	6.06	32.44	26.12	54.0	81.2
14	29.30	7.82	36.50	22.66	55.5	74.3
15	21.70	6.68	15.59	21.06	41.8	75.9
16	20.82	5.50	21.83	23.82	51.2	81.2
17	25.62	5.38	25.05	27.82	49.4	83.8
<i>Prom.</i>	27.11	7.10	27.39	28.10	51.5	79.3
Semana	DQO <sub>Removida</sub> (g)	DQO <sub>Remov.</sub> (%)	V Biogás (L)	CH <sub>4</sub> Exp. (%)	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> Teor. (L)	V <sub>CH<sub>4</sub></sub> Exp. (L)
4	19.10	17.6	13.32	60.9	10.39	8.11
5	22.15	17.1	11.69	70.5	12.05	8.24
6	22.54	21.0	13.02	59.7	12.30	7.77
7	19.09	14.4	13.08	58.5	10.39	7.65
8	15.47	10.6	12.96	60.6	8.40	7.85
9	15.83	13.0	14.35	51.5	8.62	7.39
10	17.52	14.7	12.92	58.3	9.49	7.53
11	15.59	12.1	11.99	59.8	8.49	7.17
12	15.27	11.7	13.73	54.0	8.24	7.41
13	13.00	12.4	12.72	54.1	7.02	6.88
14	10.40	9.2	11.51	50.0	5.63	5.75
15	13.85	11.3	14.86	40.1	7.44	5.96
16	14.12	12.3	12.84	48.7	7.64	6.25
17	16.87	13.7	14.33	50.8	8.92	7.28
<i>Prom.</i>	16.48	13.64	13.09	55.54	8.93	7.23

**Tabla A-3. Resultados experimentales de los parámetros de medición RALLFA a 65°C**

<b>RALLFA 65 °C</b>						
<b>Semana</b>	<b>pH</b>	<b>Alcalinidad</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>AGV (meq/L)</b>	<b>Acidez total (meq/L)</b>	<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (meq/L)</b>
1	7.36	0.496	59.6			
2	7.50	0.410	59.3			
3	7.33	0.410	58.5			
4	7.15	0.410	60.0	25.1	92.1	67.0
5	6.95	0.495	60.5	25.3	86.7	61.4
6	6.76	0.600	61.0	25.0	83.1	58.1
7	7.23	0.470	61.0	24.5	87.3	62.8
8	7.30	0.485	60.0	24.0	85.9	61.9
9	7.53	0.480	64.7	24.0	87.1	63.1
10	7.75	0.450	64.0	26.0	87.0	61.0
11	7.78	0.430	64.0	26.4	84.5	58.1
12	7.76	0.437	64.7	24.9	83.9	59.0
13	7.70	0.470	65.0	25.0	83.9	59.0
14	7.56	0.472	63.8	25.0	83.5	58.5
15	7.39	0.448	65.0	25.0	85.0	60.0
16	7.44	0.423	65.5	22.0	87.9	65.9
17	7.52	0.450	63.0	23.0	86.8	63.8
<i>Prom.</i>	<i>7.41</i>	<i>0.461</i>	<i>62.3</i>	<i>24.6</i>	<i>85.5</i>	<i>60.9</i>
<b>Semana</b>	<b>S. totales (g/L)</b>	<b>S. volátiles (g/L)</b>	<b>ST<sub>Removidos</sub> (g/L)</b>	<b>SV<sub>Removidos</sub> (g/L)</b>	<b>ST<sub>Removidos</sub> (%)</b>	<b>SV<sub>Removidos</sub> (%)</b>
6	26.85	9.91	36.78	39.49	57.8	79.9
7	27.18	9.48	25.84	35.34	48.7	78.8
8	33.76	10.17	30.39	34.55	47.4	77.3
9	33.76	10.17	30.22	34.38	47.2	77.2
10	34.10	7.90	32.13	20.90	48.5	72.6
11	31.24	7.98	27.13	21.26	46.5	72.7
12	31.38	7.02	23.49	20.90	42.8	74.9
13	28.78	7.10	31.28	25.08	52.1	77.9
14	31.40	7.44	34.40	23.04	52.3	75.6
15	20.80	6.70	16.49	21.04	44.2	75.8
16	19.38	6.22	23.27	23.10	54.6	78.8
17	27.40	6.82	23.27	26.37	45.9	79.5
<i>Prom.</i>	<i>28.06</i>	<i>8.08</i>	<i>26.43</i>	<i>27.12</i>	<i>49.0</i>	<i>76.7</i>



<b>RALLFA 65 °C</b>						
<b>Semana</b>	<b>DQO<sub>Removida</sub> (g)</b>	<b>DQO<sub>Remov.</sub> (%)</b>	<b>V Biogás (L)</b>	<b>CH<sub>4</sub> Exp. (%)</b>	<b>V<sub>CH<sub>4</sub></sub> Teor. (L)</b>	<b>V<sub>CH<sub>4</sub></sub> Exp. (L)</b>
4	13.74	12.6	12.01	52.1	7.61	6.26
5	19.62	15.2	11.61	59.3	10.89	6.88
6	20.99	19.5	10.90	67.6	11.66	7.37
7	23.71	17.8	11.06	67.7	13.18	7.49
8	23.17	15.9	11.51	61.2	12.84	7.04
9	19.78	16.2	11.40	62.8	11.11	7.16
10	20.44	17.1	12.82	53.5	11.46	6.86
11	18.82	14.6	13.36	55.4	10.56	7.40
12	18.50	14.1	12.33	58.8	10.39	7.25
13	17.15	16.3	12.39	56.7	9.65	7.03
14	16.91	14.9	12.72	54.6	9.48	6.94
15	14.95	12.2	11.54	60.5	8.41	6.98
16	15.88	13.9	12.51	55.3	8.95	6.92
17	18.06	14.7	12.47	55.0	10.10	6.86
<i>Prom.</i>	<i>18.69</i>	<i>15.37</i>	<i>12.05</i>	<i>58.61</i>	<i>10.45</i>	<i>7.03</i>

Los datos mostrados anteriormente fueron los utilizados como muestra estadística para el análisis estadístico en la siguiente sección.

En el caso de los parámetros de temperatura, alcalinidad y volumen de biogás, los datos mostrados son el promedio semanal de las mediciones realizadas diariamente.

En algunos parámetros se comenzó con su medición y/o se calculó en semanas posteriores al inicio de esta investigación y solamente se muestran los valores de las semanas en las que se realizaron.

## Anexo 2. Resultados del análisis estadístico de los datos

Con los resultados obtenidos (Figuras 4.31 a 4.38), se realizó el siguiente análisis estadístico de los parámetros evaluados y que fueron factor determinante en esta investigación: Temperatura, pH, alcalinidad, DQO removida, así como volumen de biogás, de metano teórico y de metano obtenido experimentalmente.

- **Temperatura**

Tabla A-4. Análisis estadístico de la temperatura en cada RALLFA a 45, 55 y 65°C

Temperatura					
Variable	45	55	65	Variable	45-55
$X_{Prom}$	45.00	52.45	63.01	$S_{2R}$	2.82
$X_{Mediana}$	45.00	52.88	63.90		<b>55-65</b>
DM	0.68	1.72	1.79	$S_{2R}$	1.23
$\sigma$	1.02	2.56	2.05		<b>45-65</b>
$\sigma^2$	1.04	6.58	4.21	$S_{2R}$	4.83
CV	0.023	0.049	0.033		
S	2.27				

En el caso de la temperatura, se puede reafirmar que el sistema a 45°C fue el más estable ya que fue el que presentó la menor variación entre los datos disponibles. De igual manera, este sistema se acercó al control deseado, pero el que mantuvo la menor diferencia entre los valores fue el sistema a 65°C.

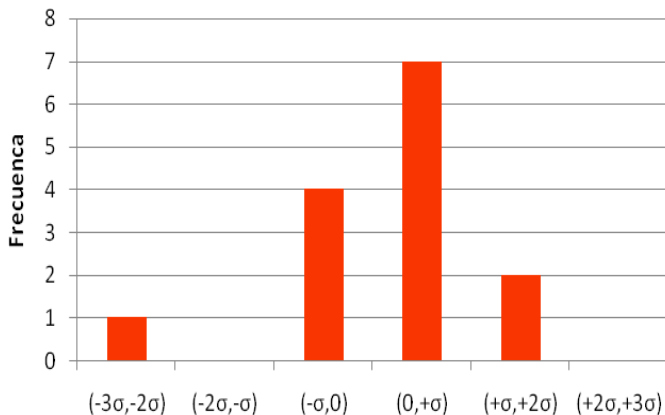


Fig. A-1. Distribución de datos.  
Temperatura del RALLFA<sub>45°C</sub>

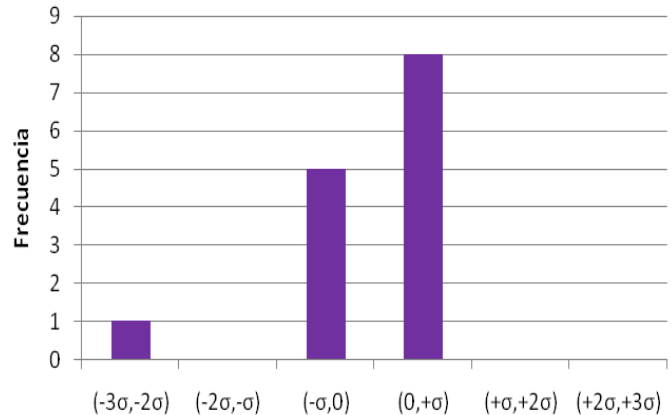
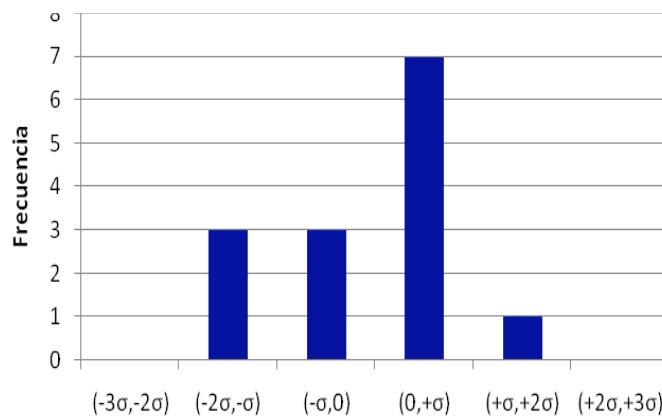


Fig. A-2. Distribución de datos.  
Temperatura del RALLFA<sub>55°C</sub>



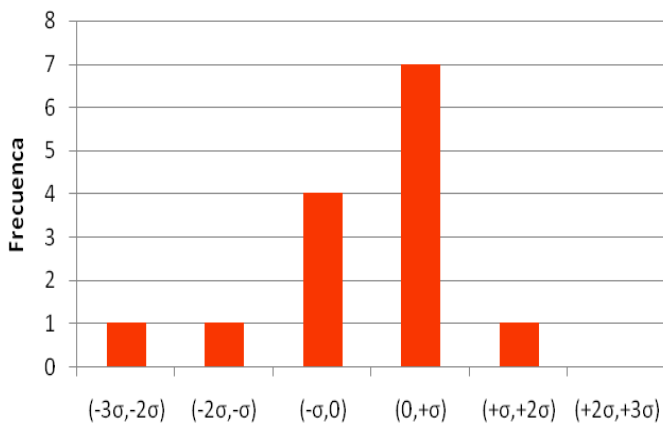
**Fig. A-3. Distribución de datos.  
Temperatura del RALLFA<sub>65°C</sub>**

- pH

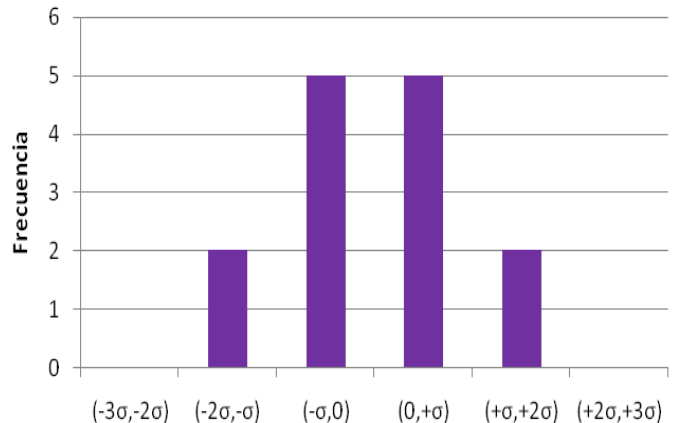
**Tabla A-5. Análisis estadístico del pH en cada RALLFA a 45, 55 y 65°C**

pH					
Variable	45	55	65	Variable	45-55
$X_{Prom}$	7.48	7.36	7.41	$S_{2R}$	0.30
$X_{Mediana}$	7.58	7.34	7.48		<b>55-65</b>
DM	0.22	0.27	0.24	$S_{2R}$	0.31
$\sigma$	0.28	0.33	0.31		<b>45-65</b>
$\sigma^2$	0.08	0.11	0.10	$S_{2R}$	0.29
CV	0.037	0.045	0.042		
S		0.30			

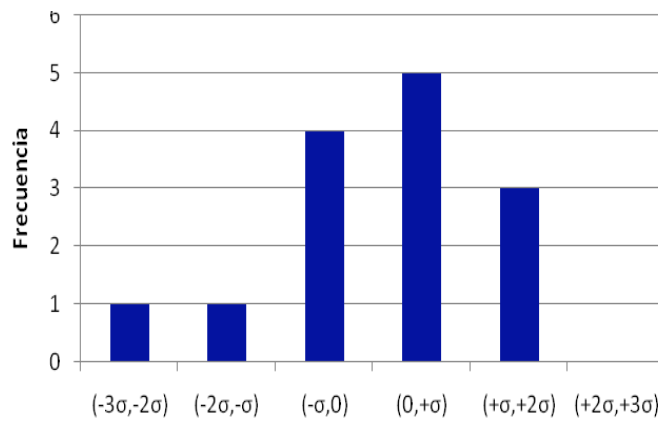
En el caso del pH, no hubo mayor variación entre los reactores, pero se hace notar que los sistemas tuvieron en un rango de pH estable y adecuado para el consorcio microbiano.



**Fig. A-4. Distribución de datos.  
pH del RALLFA<sub>45°C</sub>**



**Fig. A-5. Distribución de datos.  
pH del RALLFA<sub>55°C</sub>**



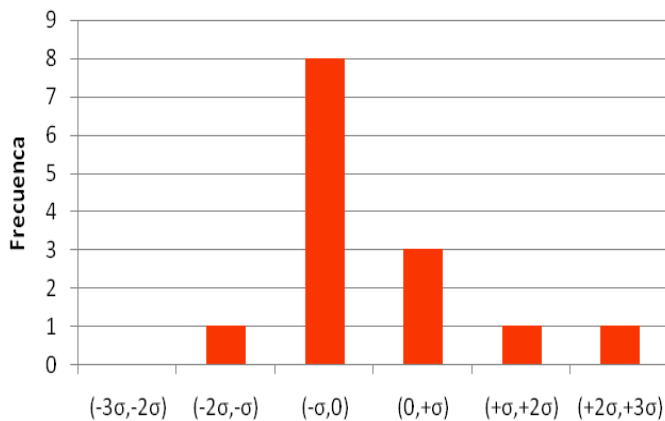
**Fig. A-6. Distribución de datos de pH del RALLFA<sub>65°C</sub>**

- **Alcalinidad**

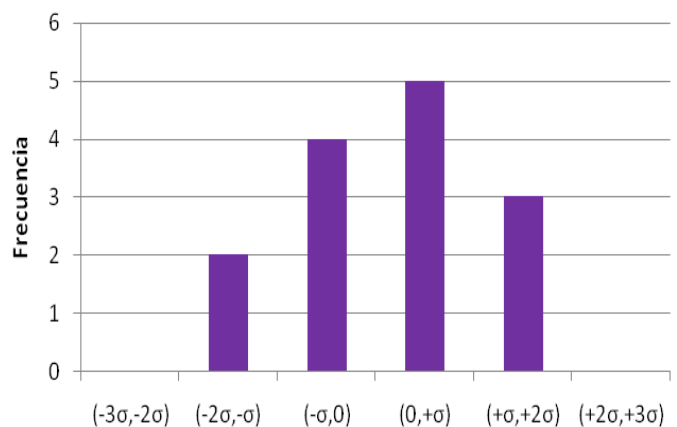
**Tabla A-6. Análisis estadístico de la alcalinidad en cada RALLFA a 45, 55 y 65°C**

Alcalinidad					
Variable	45	55	65	Variable	45-55
$X_{Prom}$	0.303	0.376	0.466	$S_{2R}$	0.07
$X_{Mediana}$	0.300	0.381	0.460		<b>55-65</b>
<b>DM</b>	0.04	0.06	0.03	$S_{2R}$	0.08
$\sigma$	0.05	0.07	0.05		<b>45-65</b>
$\sigma^2$	0.00	0.01	0.00	$S_{2R}$	0.10
<b>CV</b>	0.17	0.20	0.10		
<b>S</b>		0.09			

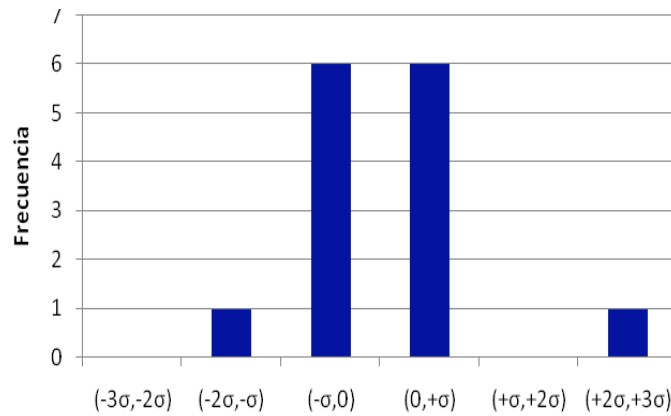
En este caso, al igual en el pH, las variaciones fueron mínimas pero influyen en la producción de metano. El sistema a 45 °C fue el que cumplió con el criterio de estabilidad, reflejo de las variaciones mínimas en su temperatura.



**Fig. A-7. Distribución de datos. Alcalinidad del RALLFA<sub>45°C</sub>**



**Fig. A-8. Distribución de datos. Alcalinidad del RALLFA<sub>55°C</sub>**



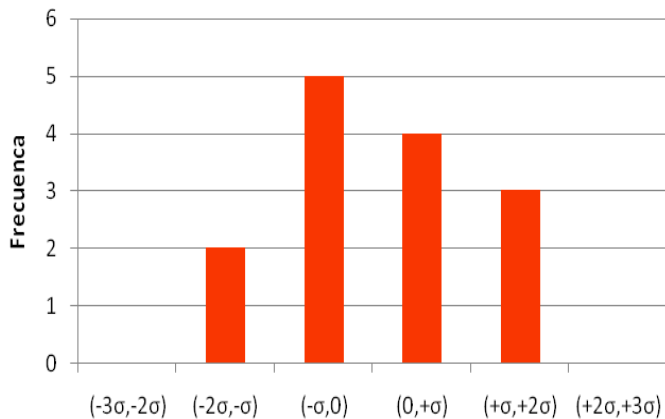
**Fig. A-9. Distribución de datos de Alcalinidad del RALLFA<sub>65°C</sub>**

- DQO removida

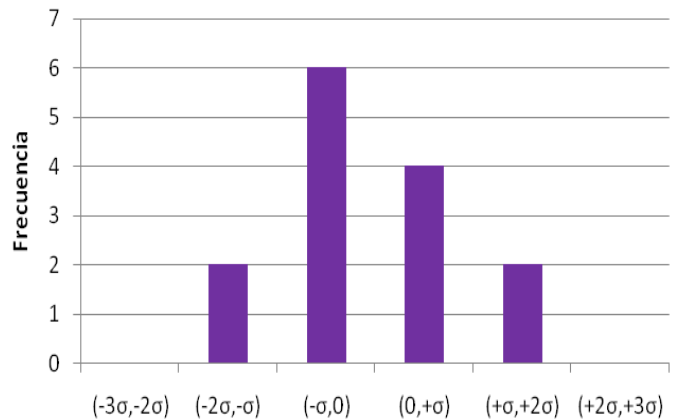
**Tabla A-7. Análisis estadístico de DQO removida en cada RALLFA a 45, 55 y 65°C**

DQO removida					
Variable	45	55	65	Variable	45-55
$X_{Prom}$	10.32	16.48	18.69	$S_{2R}$	3.96
$X_{Mediana}$	10.30	15.71	18.66		<b>55-65</b>
DM	0.63	2.62	2.24	$S_{2R}$	3.28
$\sigma$	0.78	3.39	2.88		<b>45-65</b>
$\sigma^2$	0.61	11.46	8.31	$S_{2R}$	4.74
CV	0.08	0.21	0.15		
S		4.40			

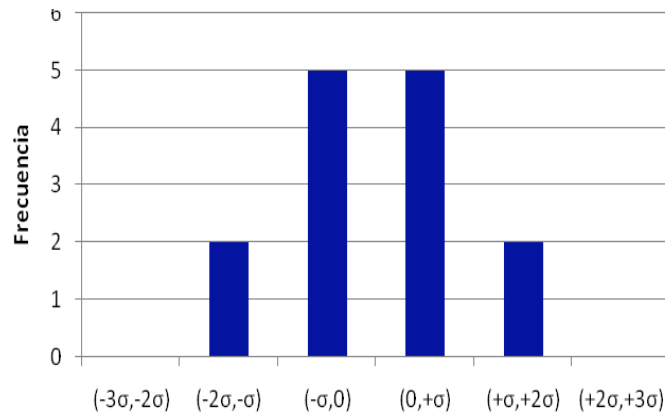
En este caso, la variación fue más notable en los sistemas a 55°C y 65°C como se pudo observar en el caso de la alcalinidad, así mismo fueron los sistemas con mayor remoción. En todos los sistemas la distribución de los datos fue análoga.



**Fig. A-10. Distribución de datos. DQO<sub>Removida</sub> del RALLFA<sub>45°C</sub>**



**Fig. A-11. Distribución de datos. DQO<sub>Removida</sub> del RALLFA<sub>55°C</sub>**



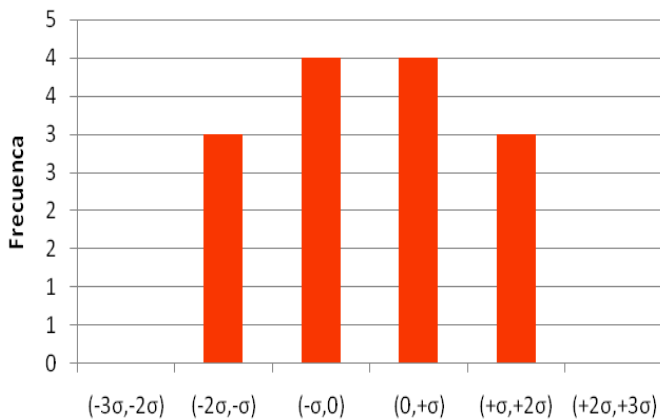
**Fig. A-12. Distribución de datos de DQO<sub>Removida</sub> del RALLFA<sub>65°C</sub>**

- Volumen de metano teórico**

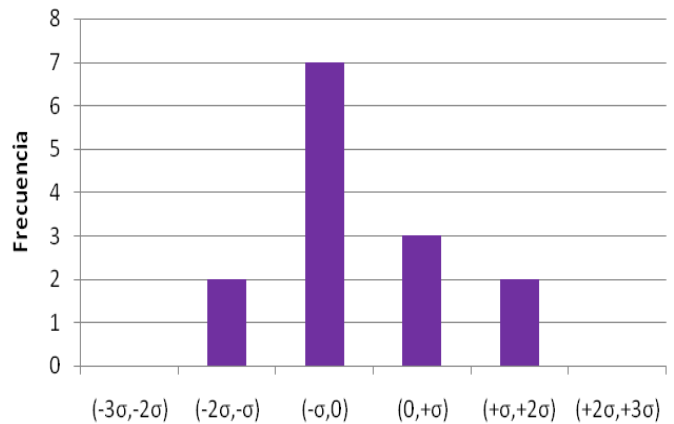
**Tabla A-8. Análisis estadístico del volumen de metano teórico en cada RALLFA a 45, 55 y 65°C**

V Metano teórico					
Variable	45	55	65	Variable	45-55
$X_{Prom}$	5.46	8.93	10.45	$S_{2R}$	2.21
$X_{Mediana}$	5.44	8.56	10.48		<b>55-65</b>
<b>DM</b>	0.34	1.42	1.22	$S_{2R}$	1.86
$\sigma$	0.42	1.86	1.58		<b>45-65</b>
$\sigma^2$	0.17	3.47	2.50	$S_{2R}$	2.78
<b>CV</b>	0.08	0.21	0.15		
<b>S</b>		2.53			

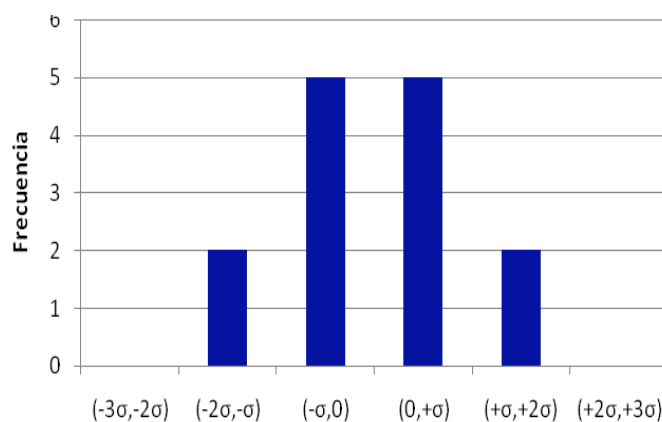
Al ser calculado con base en la remoción de DQO se observa la misma distribución y variación de los datos en comparación al volumen teórico de metano de los sistemas a 55°C y 65°C se esperaba la mayor producción de metano.



**Fig. A-13. Distribución de datos. V<sub>CH4</sub> teórico del RALLFA<sub>45°C</sub>**



**Fig. A-14. Distribución de datos. V<sub>CH4</sub> teórico del RALLFA<sub>55°C</sub>**



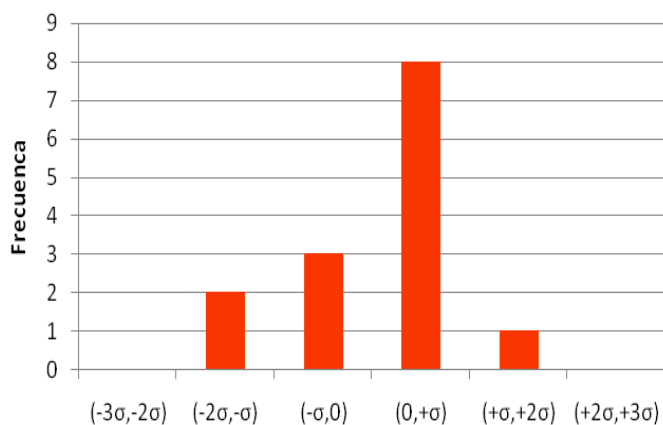
**Fig. A-15. Distribución de datos de  $V_{CH_4}$  teórico del RALLFA<sub>65°C</sub>**

- **Ácidos grasos volátiles**

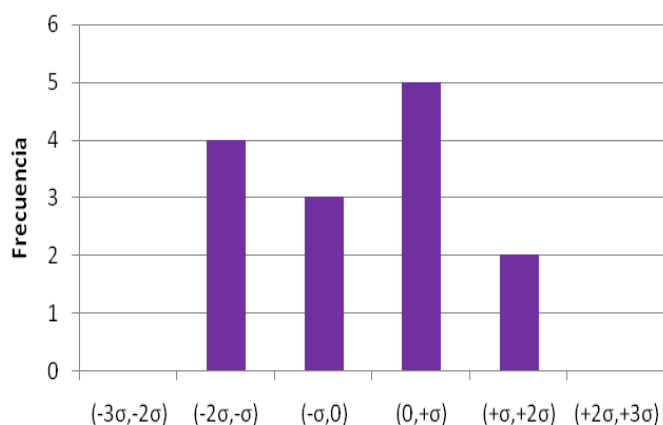
**Tabla A-9. Análisis estadístico de los AGV's en cada RALLFA a 45, 55 y 65°C**

AGV's					
Variable	45	55	65	Variable	45-55
$X_{Prom}$	21.75	25.03	24.65	$S_{2R}$	3.10
$X_{Mediana}$	22.50	25.75	24.98		<b>55-65</b>
DM	1.30	3.15	0.82	$S_{2R}$	2.48
$\sigma$	1.67	3.38	1.13		<b>45-65</b>
$\sigma^2$	2.78	11.41	1.28	$S_{2R}$	2.03
CV	0.077	0.135	0.046		
S		2.66			

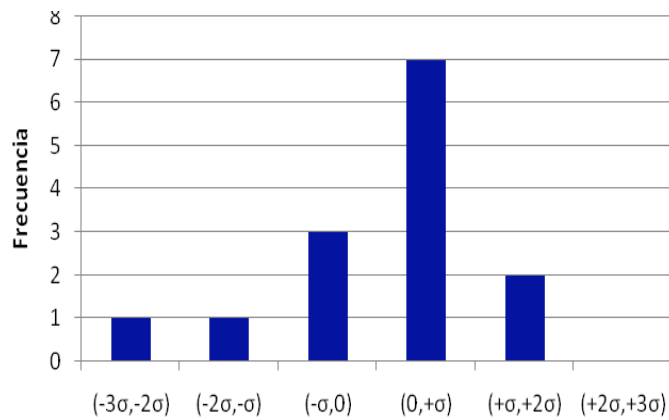
En los sistemas a 55°C y 65°C se tuvieron las condiciones adecuadas sin toxicidad para el consorcio microbiano, por lo tanto, se prevé que el sistema a 55°C sea donde se obtenga la mayor cantidad de metano.



**Fig. A-16. Distribución de datos. AGV del RALLFA<sub>45°C</sub>**



**Fig. A-17. Distribución de datos. AGV del RALLFA<sub>55°C</sub>**



<sup>20</sup>Fig. A-18. Distribución de datos de AGV del RALLFA<sub>65°C</sub>

- Volumen de metano obtenido experimentalmente

Tabla A-10. Análisis estadístico del volumen de metano experimental en cada RALLFA a 45, 55 y 65°C

V Metano obtenido experimentalmente					
Variable	45	55	65	Variable	45-55
$x_{Prom}$	4.30	7.23	7.03	$S_{2R}$	1.60
$x_{Mediana}$	4.24	7.40	7.00		<b>55-65</b>
DM	0.29	0.59	0.22	$S_{2R}$	0.58
$\sigma$	0.35	0.77	0.31		<b>45-65</b>
$\sigma^2$	0.12	0.59	0.09	$S_{2R}$	1.43
CV	0.08	0.11	0.04		
S		1.44			

Ya en la experimentación los valores de volumen de metano contrastan con los teóricos, en el caso del sistema a 55°C, pero puede comprobarse que se esperaba este comportamiento debido al análisis de los AGV.

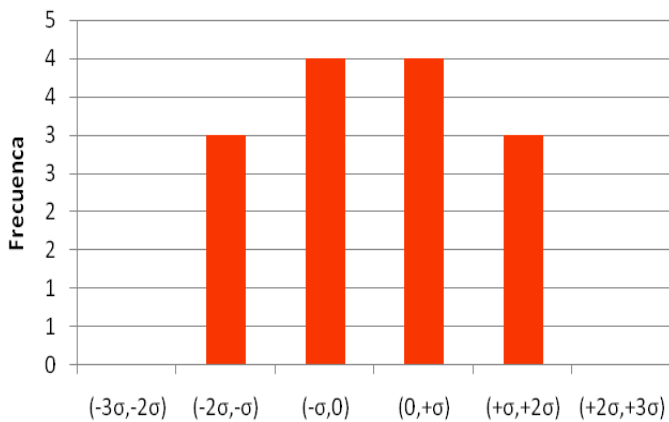


Fig. A-19. Distribución de datos.  $V_{CH_4}$  exper. del RALLFA<sub>45°C</sub>

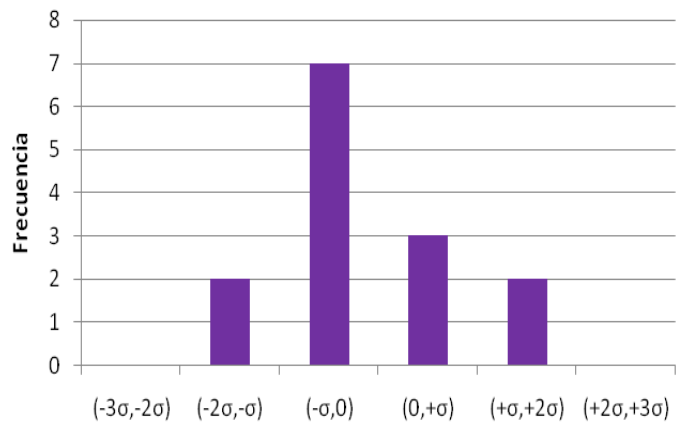
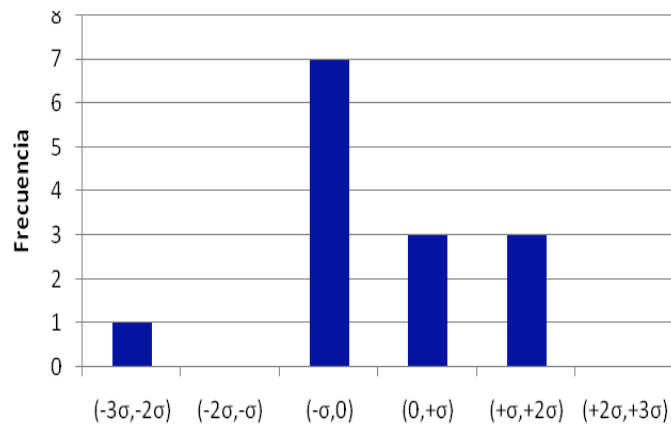


Fig. A-20. Distribución de datos.  $V_{CH_4}$  exper. del RALLFA<sub>55°C</sub>





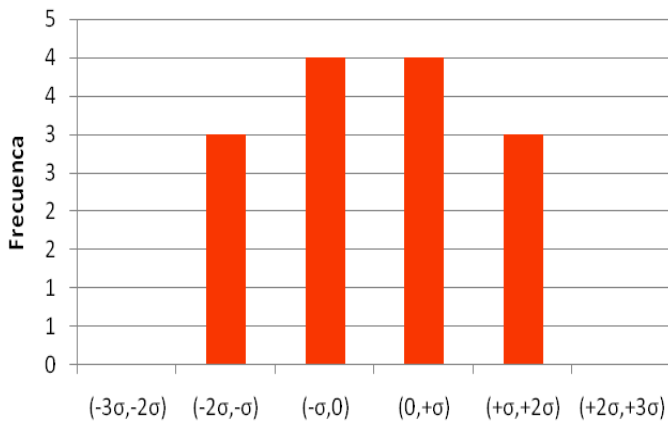
**Fig. A-21. Distribución de datos de  $V_{CH_4}$  exper. del RALLFA<sub>65°C</sub>**

- Volumen de biogás obtenido experimentalmente**

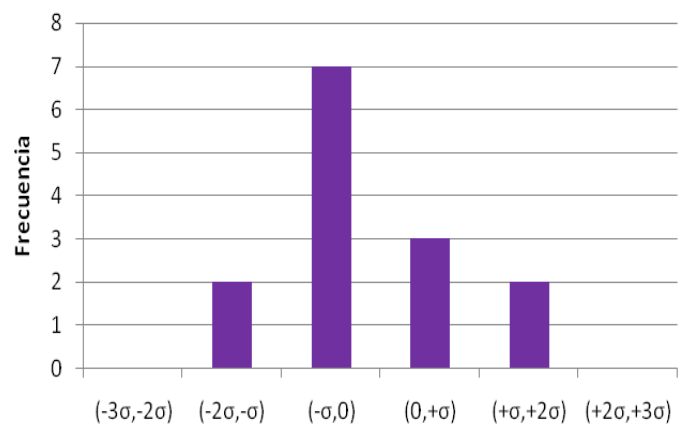
**Tabla A-11. Análisis estadístico del volumen de biogás experimental en cada RALLFA a 45, 55 y 65°C**

V Biogás obtenido experimentalmente					
Variable	45	55	65	Variable	45-55
$X_{Prom}$	9.93	13.09	12.05	$S_{2R}$	1.85
$X_{Mediana}$	9.88	12.99	12.17		<b>55-65</b>
<b>DM</b>	0.58	0.73	0.61	$S_{2R}$	1.00
$\sigma$	0.86	0.99	0.72		<b>45-65</b>
$\sigma^2$	0.74	0.97	0.53	$S_{2R}$	1.33
<b>CV</b>	0.09	0.08	0.06		
<b>S</b>		1.58			

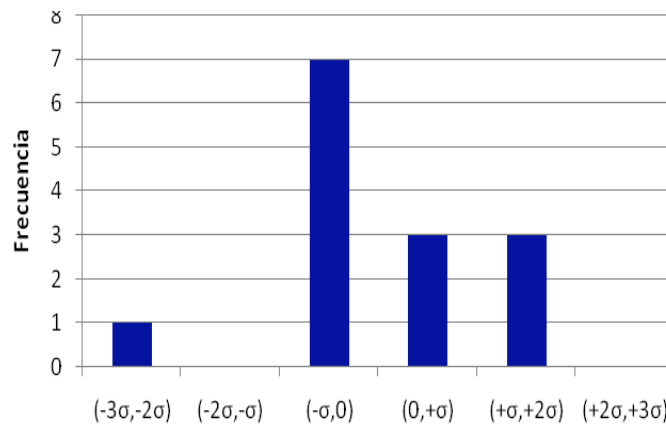
De igual manera, se produjo la mayor cantidad de biogás en el sistema a 55°C lo que va de acuerdo con lo esperado considerando el análisis de los AGV. En el caso de la distribución, los sistemas presentaron variaciones similares en su comportamiento.



**Fig. A-22. Distribución de datos.  $V_{BIOGÁS}$  exper. del RALLFA<sub>45°C</sub>**



**Fig. A-23. Distribución de datos.  $V_{BIOGÁS}$  exper. del RALLFA<sub>55°C</sub>**



**Fig. A-24. Distribución de datos de  $V_{\text{BIOGÁS}}$  exper. del RALLFA<sub>65°C</sub>**

- **Porcentaje de metano en biogás obtenido experimentalmente**

**Tabla A-12. Análisis estadístico del porcentaje de metano experimental en cada RALLFA a 45, 55 y 65°C**

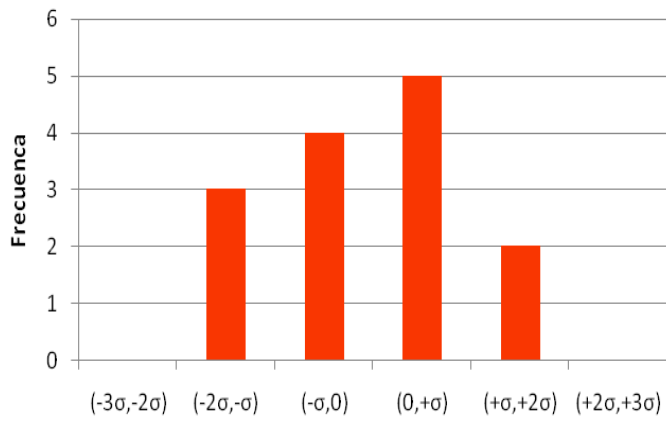
<b>% Metano obtenido experimentalmente</b>					
<b>Variable</b>	<b>45</b>	<b>55</b>	<b>65</b>	<b>Variable</b>	<b>45-55</b>
$X_{\text{Prom}}$	61.81	78.72	83.08	$S_{2R}$	12.13
$X_{\text{Mediana}}$	61.80	79.66	81.86		<b>55-65</b>
<b>DM</b>	5.54	8.01	5.60	$S_{2R}$	8.92
$\sigma$	6.72	10.32	6.97		<b>45-65</b>
$\sigma^2$	45.14	106.50	48.58	$S_{2R}$	12.74
<b>CV</b>	0.109	0.131	0.084		
<b>S</b>		12.23			

Para finalizar este análisis, se observa que el sistema a 65°C es el de mayor porcentaje de metano en el biogás.

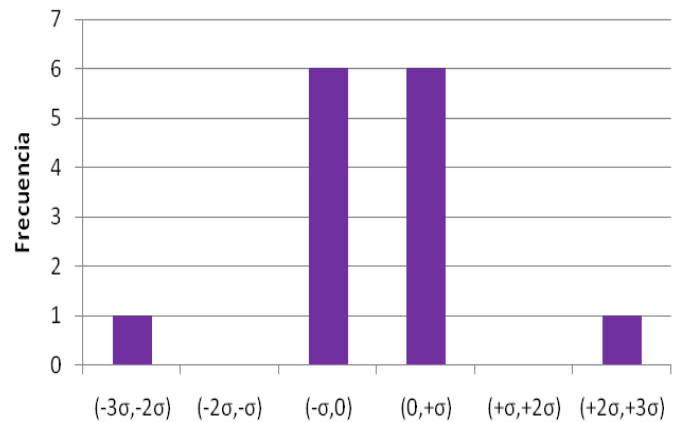
Esto demuestra que ese sistema fue el que tuvo las mejores condiciones en la calidad del biogás (con referencia al metano) y esto indica que los microorganismos productores de metano se favorecen a esta temperatura.

A pesar de lo mencionado anteriormente, el sistema a 55°C presentó una mayor proporción de metano al producirse una mayor cantidad de biogás, que aunque sea de menor calidad (en comparación a 65°C) significando ser el sistema más adecuado a la producción de este gas.

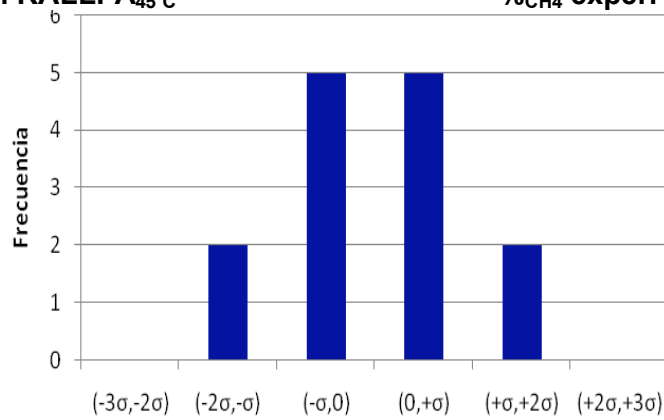
Se hace mención de nuevo a la necesidad de considerar como recomendación final que se tenga un control de un sistema a 60°C para así definir la temperatura más adecuada para este tratamiento, indicando que se puede prescindir del sistema a 45°C.



**Fig. A-25. Distribución de datos.**  
 $\%_{CH_4}$  exper. del RALLFA<sub>45°C</sub>



**Fig.A-26. Distribución de datos.**  
 $\%_{CH_4}$  exper. del RALLFA<sub>55°C</sub>



**Fig. A-27. Distribución de datos de**  
 $\%_{CH_4}$  exper. del RALLFA<sub>65°C</sub>

### Anexo 3. Disposición de residuos generados en esta investigación

Durante la investigación realizada se trataron los residuos generados por el reactor tipo RALLFA, así como por las metodologías analíticas llevadas a cabo. En el caso del efluente, éste fue tratado como se muestra a continuación:

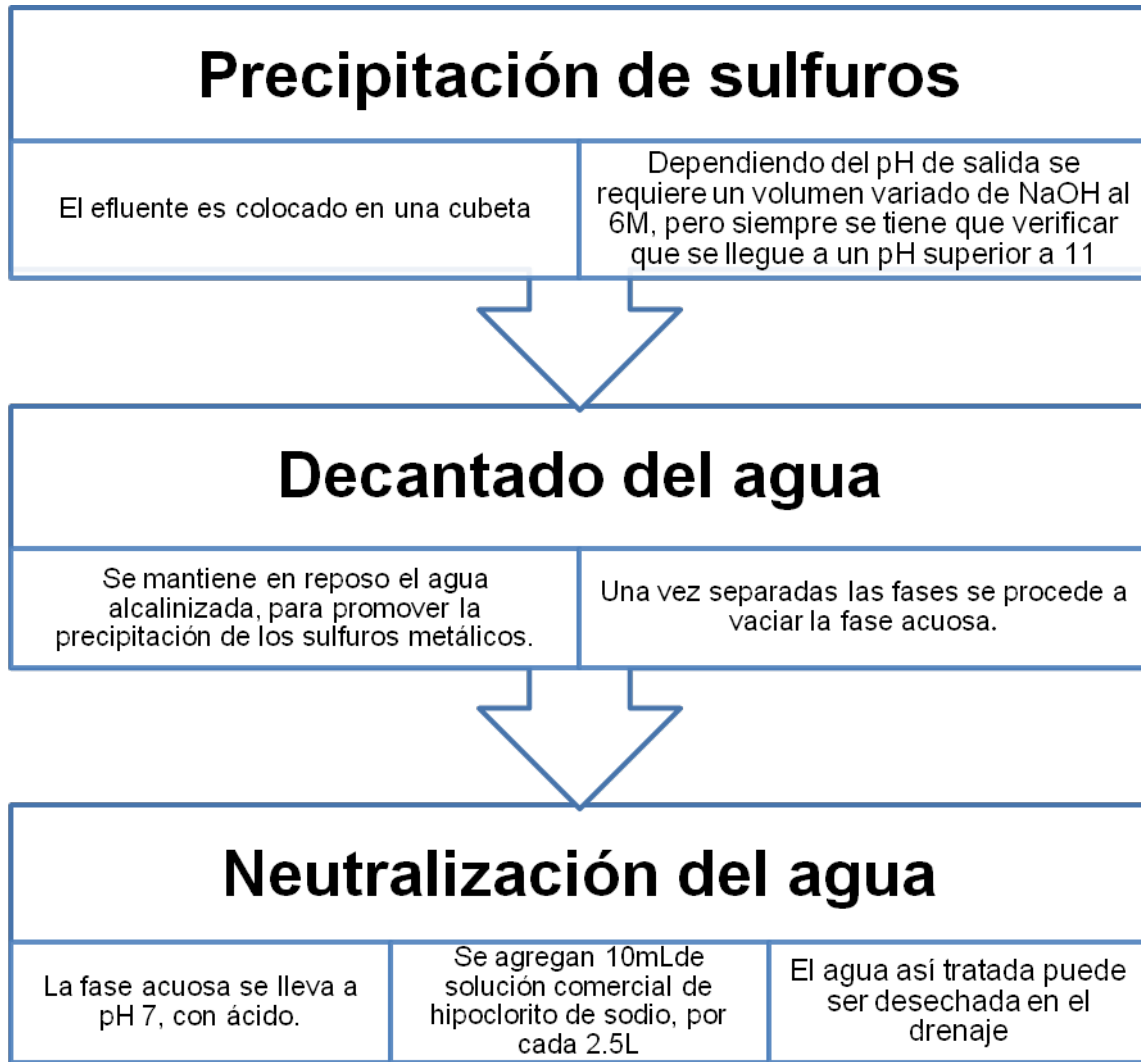


Fig. A-28. Diagrama del tratamiento del efluente obtenido, para su disposición

Los residuos de DQO, fósforo total y nitrógeno total son almacenados y etiquetados hasta su colección por la Unidad de Gestión Ambiental, UGA, de la Facultad de Química, para su tratamiento y disposición controlada.

Los residuos de sulfatos se dejan sedimentar y la porción acuosa, se mezcla y trata con el resto del efluente.

Los lodos obtenidos del tratamiento del efluente son secados, almacenados y enviados a la UGA, de la Facultad de Química, para ser tratados y dispuestos adecuadamente.

## Bibliografía

- Abhay, K., Pratap, P.** 2008. Single-stage, batch, leach-bed, thermophilic anaerobic digestion of spent sugar beet pulp. *Bioresource Technology*. 99:2831-2839.
- APHA-AWWA-WPCF.** 1985. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 16a. edición. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. Washington, D.C. EEUU.
- Bailey, J.E., Ollis, D.F.** 1986. *Biochemical Engineering Fundamentals*. McGraw-Hill Intl. Eds. Pp. 831-838, 847-853. Singapur.
- Bermúdez, R., Hoyos, J., Rodríguez, S.** 2000. Evaluación de la disminución de la carga contaminante de la vinaza de destilería por tratamiento anaerobio. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 16(3):103-107.
- Cadena, S.** 2009. Uso de los microorganismos eficaces EM y la vinaza como potencializadores de microorganismos biotransformadores de residuos de cosecha y fijadores de nitrógeno en el cultivo de la caña de azúcar. *Desarrollos agroindustriales*. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
- Caldera, Y., Madueño, P., Griborio, A., Gutiérrez, E., Fernández, N.** 2003. Efecto del tiempo de “retención” hidráulica en el reactor UASB tratando efluentes cárnicos. Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Zulia, Venezuela.
- Castro-González, A.** 2004. Efecto de la temperatura en la actividad metanogénica y sulfatorreductora de consorcios microbianos en condiciones anaerobias. Tesis de Doctorado en Ciencias. Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Químicas (Ingeniería Química). UNAM. Enero 28. México D.F. México
- Castro-González, A., Bernal-González, M., Durán de Bazúa, C.** 2004. Tratamiento de vinazas de plantas destiladoras de alcohol usando consorcios microbianos anaerobios. *Bebidas Mexicanas*, 13(3):12-14, 16-20, 22-25
- CNE.** 2006. Guía del Mecanismo de Desarrollo Limpio para Proyectos del Sector Energía en Chile. Comisión Nacional de Energía. Agencia Alemana de Cooperación Técnica (GTZ), Cooperación Intergubernamental Chile-Alemania (Eds). 69 pags., Santiago, Chile.
- Coto, J.E., Maldonado, J.J., Botero, R., Murillo, J.V.** 2007. Implementación de un sistema para generar electricidad a partir de biogás en la finca pecuaria integrada de EARTH. Universidad Escuela de la Agricultura de la Región Tropical Húmeda. Guácimo, Limón. Costa Rica.
- CIEMAT.** 1989. La biomasa como fuente de energía y productos para la agricultura y la industria, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, CIEMAT. Madrid, España.
- Cruz-Juárez, J.A.** 2010. Programa de Ingeniería Química y de Química Ambiental: Aprovechamiento integral de las vinazas de torre de destilación: producción de biogás rico en metano. Informe de Servicio Social. Clave 2009/12-16-1642. Octubre 2009-Abril 2010. UNAM, Facultad de Química. México D.F. México.
- Díaz, B., M., Espitia, S., Molina, F. (2002).** Digestión “anaerobia”, una aproximación a la tecnología. Instituto de Biotecnología, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

- DOF.** 2001. Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. México D.F. México.
- DOF.** 2000. Norma Mexicana NMX-AA-005-SCFI-2000. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. México D.F. México.
- DOF.** 1981. Norma Mexicana NMX-AA-030-SCFI-1981. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. México D.F. México.
- DOF.** 1980. Norma Mexicana NMX-AA-036-SCFI-1980. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. México D.F. México.
- FAO.** 1986. Reciclaje de Materias Orgánicas y Biogás. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Una experiencia en China. Curso de capacitación. Chengdu, China (Septiembre – Octubre, 1984). 400pp.
- Fischer, G.** 1988. Biosensors and Environmental Biotechnology. Eds. C.P. Hollenberg y H. Sahm. Biotec. Vol. 2. Pp. 89-111. Nueva York, N.Y. EEUU.
- GIRO.** 2005. Optimización de la producción de biogás de subproductos cárnicos. Pub. Gestión Integral de Residuos Orgánicos. Proyecto BIO-ESUCA. Ministerio de Educación y Ciencia. Barcelona, España.
- Harris, P.** 2010. The Syringe Protocol. Retrieved: October 19, 2010, The University of Adelaide. Faculty of Sciences Waite Campus PMB 1, Glen Osmond, South Australia. Disponible en [http://www.adelaide.edu.au/biogás/anaerobic\\_digestion/Syringe\\_Protocol.pdf](http://www.adelaide.edu.au/biogás/anaerobic_digestion/Syringe_Protocol.pdf)
- IDEA.** 2007. Biomasa: “Digestores” anaerobios. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. BESEL, S.A. (Departamento de Energía). C/ Madera, 8 E-28004-Madrid, España.
- Insam, H., Franke-Wittle, I., Goberna, M.** 2009. Microbes in aerobic and anaerobic waste treatment. En: Microbes at work. From wastes to resources. In sam H., Franke-Wittle I. y Goberna M. (Eds). Pp. 1-34. Springer. Heidelberg, Dordrecht, London, New York.
- Jiménez-Ambríz, R .M., Martínez-Garza, M .A., Espinosa-Fuentes, A., Noyola-Robles, A., Durán de Bazúa, C.** 1995. La caña de azúcar, su entorno ambiental. Parte II. Tratamiento de vinazas en una planta piloto en México en un reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente. INFORME TÉCNICO DE PROYECTO VIN-02-95. Pub. Prog. Ing. Quim. Amb. y de Quím. Amb. 83 pags. UNAM, Facultad de Química. México D.F. México.
- Lagrange, B.** 1979. Biomethane. Principles, Techniques, Utilisation. Vol.2 . Edisual / Energies Alternatives. 249pp.
- Mattiasson, B., Olsson, G., Liu, J.** 2003. A volumetric meter for monitoring of low gas flow rate from laboratory-scale biogás reactors. Department of Biotechnology. Center for Chemistry and Chemical Engineering, Lund University. Suecia.
- Nimbalkar, D .** 2005 Distillery effluent treatment. Vasantdada Sugar Institute, Pune, India. En <http://vsiisugar.com/>
- Pavlostathis, S . G., Giraldo, E . (1 991).** Kinetics of anaerobic treatment. Wat. Sci. Technol., 24:35-59.
- Poblano-Flores, A .** 2012-2013. Programa de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental: Reaprovechamiento de vinazas para la producción de biogás rico en metano. Informe de Servicio Social. Clave 2012-13/16-1583. Enero 30-Julio 30 , 2012 . UNAM, Facultad de Química. México D .F. México. “Implementación de un medidor de biogás rico en metano a nivel laboratorio en tres reactores de lecho de lodo de flujo ascendente (RALLFA) operando 45,55 y

- 65°C". A signatura terminal: Estancia Académica. UNAM, Facultad de Química, UNAM. México D.F. Semestre 2013-02.
- Rincón-Acelas, I.R.** 2006. Cinética de la degradación anaerobia termofílica de vinazas de caña. Tesis de Maestría en Ingeniería (Campo del conocimiento: Ingeniería Ambiental, Campo disciplinario: Agua). Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. UNAM. Junio 30. México D.F. México
- Rodríguez-Rivera, J.** 1993. Tratamiento de vinazas empleando reactores anaerobios avanzados (UASB y FA) con eliminación de H<sub>2</sub>S. Tesis profesional, Facultad de Química, UNAM. México, D.F.
- Rodríguez, A., Letón, P., Rosal, R., Dorado, M., Villar, S., Sanz, J.** 2009. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. Caps. 1 y 2. Informe de Vigilancia Tecnológica. Vol. Vt2. Pub. Mi+d. Pp. 6-41. Universidad de Alcalá, España.
- Rossum, J.R., Villarruz, P.A., Wade, J.A.** 1950. A new method for determining methane in water. American Water Works Association.
- Sanz, J.L.** 2012. Metanogénesis. Tratamiento biológico aguas residuales. Departamento de Biología Molecular (CBM- Universidad Autónoma de Madrid). Página electrónica consultada el 15 de marzo de 2012:  
<http://www.uam.es/departamentos/ciencias/biomol/webmencion/GUIA%20DEL%20DEPARTAMENTO%20FOTOS.pdf>
- Speece, R.E.** 1996. Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatments. Archae Press, Nashville, TN, USA.
- Varnero, M.T.** 2011. Manual de biogás. Proyecto CHI/00/G32 "Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables". Ministerio de Energía. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Global Environment Facility. Chile.
- Werner, U., Stoehr, U., Hees, N.** 1989. Biogás plants in animal husbandry. German Appropriate Technology Exchange (GATE) and German Agency for Technical Cooperation (GTZ) GmbH. Bonn, República Federal de Alemania.
- Yant, W.F., Berger, L.B.** 1936. Sampling of Mine Gasses and the use of the Bureau of Mines Portable Orsat Apparatus in Their Analysis Miner's. Cire No. 34. U.S. Bur Mines. Washington D.C. EEUU.