



---

---

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

**COMPARACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE METANO  
TEÓRICA Y EXPERIMENTAL EN REACTORES ANAEROBIOS  
DE LECHO DE LODOS DE FLUJO ASCENDENTE (RALLFA)  
TERMOFÍLICOS A PARTIR DE VINAZAS AZUCARERAS**

**TESIS**

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

**PRESENTA  
OSCAR VILLEGAS BOLAÑOS**



**MÉXICO, D.F., 2015**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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:** Profesor: Dra. María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa

**VOCAL:** Profesor: M. en A.I Landy Irene Ramírez Burgos

**SECRETARIO:** Profesor: M. en C. Rolando Salvador García Gómez

**1<sup>ER</sup>. SUPLENTE:** Profesor: Dra. Marisela Bernal González

**2<sup>DO</sup>. SUPLENTE:** Profesor: Dr. José Agustín García Reynoso

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

Laboratorios 301, 302, 303 de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental,  
Departamento de Ingeniería Química de la Facultad de Química, UNAM.

**ASESOR DEL TEMA:**

Dra. María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa \_\_\_\_\_

**SUPERVISOR TÉCNICO:**

Dra. Marisela Bernal González \_\_\_\_\_

**SUSTENTANTE:**

Oscar Villegas Bolaños \_\_\_\_\_

## Índice

	Pág.
<b>RESUMEN</b>	1
<b>CAPÍTULO 1. Problemática</b>	2
1.1. Introducción	2
1.2. Justificación	4
1.3. Objetivo general	5
1.4. Metas	5
<b>CAPÍTULO 2. Marco teórico</b>	6
2.1. Antecedentes	6
2.2. El biogás	7
2.3. El biogás en México	10
2.4. Comparación del biogás con otros combustibles	12
2.5. Generación del biogás a partir de tratamiento biológico	15
2.5.1. Tratamiento aerobio	15
2.5.2. Tratamiento anaerobio	16
2.5.3. Generación del biogás utilizando vinazas	18
2.6. Material, equipo y reactivos a utilizar para la implementación de un medidor de biogás	19
2.6.1. Materiales (Hidalgo-Bonilla <i>et al.</i> , 2010)	20
2.6.2. Diámetro de la tubería	20
2.6.3. Espesor de la tubería	21
2.6.4. Consideraciones para accesorios	22
2.6.5. Señalización	22
2.6.6. Dispositivos de tratamiento de biogás	23
2.6.7. Dispositivos de seguridad	27
2.6.8. Dispositivos para la aplicación del biogás	28
<b>CAPÍTULO 3. Metodología</b>	29
3.1. Descripción de los reactores biológicos	29
3.2. Condiciones de alimentación y seguimiento	30
3.3. Parámetros para evaluar el funcionamiento de un RALLFA	31

	<b>Pág.</b>
3.3.1. Valores de pH (potencial hidrógeno)	31
3.3.2. Demanda química de oxígeno (DQO)	31
3.3.3. Temperatura	32
3.3.4. Fosfatos	32
3.3.5. Sulfatos	33
3.3.6. Nitratos	33
3.3.7. Generación de biogás corregido a condiciones reales de trabajo	33
3.3.8. Volumen teórico de metano a partir del biogás experimental	34
3.3.9. Generación teórica de metano en función de la DQO	34
3.4. Análisis estadísticos de los datos experimentales	35
3.4.1. Valores de pH	36
3.4.2. Valores de DQO	38
3.4.3. Temperatura	39
3.4.4. Fosfatos	40
3.4.5. Sulfatos	41
3.4.6. Nitratos	42
3.4.7. Biogás corregido a condiciones reales de trabajo	43
<b>CAPÍTULO 4. Resultados y discusión</b>	<b>45</b>
4.1. Caracterización de la vinaza cruda	45
4.2. Producción de biogás en los RALLFA	46
4.2.1. Producción experimental de biogás	46
4.2.2. Producción de biogás corregida a condiciones reales de trabajo	46
4.2.3. Producción teórica de CH <sub>4</sub> en función de DQO removida	49
4.2.4. Comparación de CH <sub>4</sub> experimental <i>versus</i> CH <sub>4</sub> corregida <i>versus</i> CH <sub>4</sub> DQO	50
4.3. Parámetros de seguimiento de los RALLFA	52
4.3.1. Valores de pH	52
4.3.2. Valores de DQO	54
4.3.3. Valores de temperatura	55

	<b>Pág.</b>
4.3.4. Valores de fosfatos	56
4.3.5. Valores de sulfatos	57
4.3.6. Valores de nitratos	58
<b>CAPÍTULO 5. Conclusiones y recomendaciones</b>	60
5.1. Conclusiones	60
5.2. Recomendaciones	62
<b>Referencias</b>	63
<b>A N E X O S</b>	74
Anexo 1. Registro de valores de biogás experimental	75
Anexo 2. Registro de valores de biogás experimental corregidos por P y T	77
Anexo 3. Registro de valores de CH <sub>4</sub> teórico	79
Anexo 4. Registro de valores de biogás real convertido a CH <sub>4</sub> usando 62% de metano en el biogás	81
Anexo 5. Registros de valores de pH	83
Anexo 6. Registro de valores % de remoción de DQO	85
Anexo 7. Registro de valores de temperatura	87
Anexo 8. Registro de valores de fosfatos	89
Anexo 9. Registro de valores de sulfatos	91
Anexo 10. Registro de valores de nitratos	93
Anexo 11. Disposición controlada de los residuos producidos en esta investigación	95

## Índice de Tablas

	<b>Título</b>	<b>Pág.</b>
Tabla 1.	Producción de metano en función de la vinaza generada (varias fuentes)	5
Tabla 2.	Volúmenes típicos y composición de biogás producido para diferentes materias primas a 35°C y con los tiempos de retención óptimos en un tanque comercial (Sims, 2002)	8
Tabla 3.	Valores promedios del poder calorífico de diferentes combustibles y su equivalente referido al biogás (DOF, 2010)	13
Tabla 4.	Ventajas y desventajas de materiales de tuberías para el transporte de biogás (ESCAP, 1980)	20
Tabla 5.	Materiales plásticos para sistemas de tuberías para gas presurizado (ASTM, 1986)	22
Tabla 6.	Resumen estadístico para el parámetro de pH	37
Tabla 7.	Análisis de varianza, ANOVA, para pH por reactor	37
Tabla 8.	Resumen estadístico para el parámetro de DQO	38
Tabla 9.	Análisis de varianza, ANOVA, para DQO por reactor	38
Tabla 10.	Resumen estadístico para el parámetro de temperatura	39
Tabla 11.	Análisis de varianza, ANOVA, para temperatura por reactor	39
Tabla 12.	Resumen estadístico para el parámetro de fosfatos	40
Tabla 13.	Análisis de varianza, ANOVA, para fosfatos por reactor	40
Tabla 14.	Resumen estadístico para el parámetro de sulfatos	41
Tabla 15.	Análisis de varianza, ANOVA, para sulfatos por reactor	41
Tabla 16.	Resumen estadístico para el parámetro de nitratos	42
Tabla 17.	Análisis de varianza, ANOVA, para nitratos por reactor	42
Tabla 18.	Resumen estadístico para el parámetro de biogás corregido	43
Tabla 19.	Análisis de varianza, ANOVA, para biogás corregido por reactor	44

		<b>Pág.</b>
Tabla 20.	Caracterización de las vinazas	45
Tabla A1.	Registro de valores de biogás experimental	76
Tabla A2.	Registro de valores de biogás experimental corregidos a por P y T	78
Tabla A3.	Registro de valores de CH <sub>4</sub> teórico	80
Tabla A4.	Registro de valores de biogás real convertido a CH <sub>4</sub> usando 62% de metano en el biogás	82
Tabla A5.	Registro de valores de pH	84
Tabla A6.	Registro de valores % de remoción DQO	86
Tabla A7.	Registro de valores de temperatura	88
Tabla A8.	Registro de valores de fosfatos	90
Tabla A9.	Registro de valores de sulfatos	92
Tabla A10.	Registro de valores de nitratos	94



## Índice de Figuras

	Título	Pág.
Figura 1.	Reacción por medio de tratamiento aerobio para vinazas (Metcalf y Eddy, 1977; Ramírez, 1992; Rigola, 1999)	16
Figura 2.	Reacción por medio de tratamiento anaerobio para vinazas (Ramírez, 1992)	17
Figura 3.	Diámetro de tubería recomendado en pulgadas (ESCAP, 1980)	21
Figura 4.	Señalización (Autodesk Intenter@2010)	23
Figura 5.	Sentido de flujo (Autodesk Intenter@2010)	23
Figura 6.	Filtro para eliminar H <sub>2</sub> S (Autodesk Intenter@2010)	24
Figura 7.	Filtro para eliminar CO <sub>2</sub> (Flores, 1993)	25
Figura 8.	Gasómetro-filtro (Autodesk Intenter@2010)	26
Figura 9.	Purga para la eliminación de condensados de agua contenidos en biogás (Autodesk Intenter@2010)	27
Figura 10.	RALLFA utilizados en la experimentación (Rincón-Acelas, 2006)	29
Figura 11.	RALLFA de 3L sin enchaquetar (Rincón-Acelas, 2006)	29
Figura 12.	Medidor de gas propuesto (Abhay y Pratap, 2008)	30
Figura 13.	Valores de pH <i>versus</i> tipo de reactor (RALLFA)	37
Figura 14.	Porcentaje de remoción de DQO <i>versus</i> tipo de reactor (RALLFA)	38
Figura 15.	Temperatura <i>versus</i> tipo de reactor (RALLFA)	39
Figura 16.	Fosfatos <i>versus</i> tipo de reactor (RALLFA)	41
Figura 17.	Sulfatos <i>versus</i> tipo de reactor (RALLFA)	42
Figura 18.	Nitratos <i>versus</i> tipo de reactor (RALLFA)	43
Figura 19.	Volumen de biogás en litros por día corregido a las condiciones de la Ciudad de México y las temperaturas de cada uno de los RALLFA en estudio	44

	<b>Pág</b>
Figura 20. Diagrama del RALLFA con trampa de CO <sub>2</sub> , filtro de H <sub>2</sub> S y medidor de biogás por desplazamiento de agua (Flores, 1993)	47
Figura 21. Fotografía de RALLFA a 45°C con trampa de CO <sub>2</sub> , filtro de H <sub>2</sub> S y medidor de biogás por desplazamiento de agua	47
Figura 22. Fotografía del sistema de desplazamiento de solución acuosa implementado	48
Figura 23. Generación de biogás experimental corregido <i>versus</i> días de experimentos.	49
Figura 24. Generación de CH <sub>4</sub> Teórico <i>versus</i> días de experimentos	50
Figura 25. Comparación de CH <sub>4</sub> corregido <i>versus</i> CH <sub>4</sub> DQO	52
Figura 26. Valores de pH <i>versus</i> días de experimentos	53
Figura 27. Porcentaje de remoción de materia orgánica medida como DQO <i>versus</i> días de experimentos	54
Figura 28. Temperatura de los RALLFA <i>versus</i> días de experimentos	56
Figura 29. Fosfatos <i>versus</i> días de experimentos	57
Figura 30. Concentración de sulfatos <i>versus</i> días de experimentos	58
Figura 31. Nitratos <i>versus</i> días de experimentos.	59
Figura 32. Diagrama de disposición controlada de los residuos producidos en esta investigación	96

## Glosario

"	Pulgadas
%	Porcentaje
$\lambda$	Longitud de onda
$([\text{NH}_4])_6 \text{Mo}_7 \text{O}_{24} 4\text{H}_2\text{O}$	Molibdato de amonio
$[\text{6H}_4 (\text{OH}) (\text{OOH})]$	Ácido salicílico
<	Menor que
°C	Grados Celsius (medida de la temperatura)
ABS	Acrilonitrilo butadieno estireno
Anaeróbico <i>versus</i> anaerobio	Aunque el diccionario de la lengua española acepta anaeróbico, desde el punto de vista semántico es una aberración ya que vendría del alfa privativa más <i>aeros</i> (aire) y <i>bios</i> (vida), por lo que debería ser anaerobio y no anaeróbico, derivado del anglicismo <i>anaerobic</i> . En esta investigación se usa anaerobio y, por su propio origen semántico, si se requiere, se usa aerobio y no las palabras anaeróbico y aeróbico
ANDEVA	Análisis de varianza
ASTM	American Society for Testing Materials
atm	Atmosferas
BaCl <sub>2</sub>	Cloruro de bario
bl	Barril
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CH <sub>4</sub>	Metano
cm	Centímetro
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CPVC	Policloruro de vinilo clorado
d	Día
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno

Digestión	Proceso en ausencia de oxígeno que descompone materia orgánica, especialmente en el aparato digestivo de mamíferos. Por extensión, en los albores de la química a los procesos en ausencia de oxígeno se les denominó digestiones. Desafortunadamente, por ignorancia, se le agrega el adjetivo anaerobio que es totalmente innecesario ya que la digestión es inherentemente anaerobia aún cuando algunos colegas, especialmente con poca formación química se atreven a usar los términos digestión aerobia por degradación aerobia, un barbarismo, ya que la digestión NO ES AEROBIA
DQO	Demanda química de oxígeno
etc	etcétera
g	Gramo
GW	Gigawatts
h	Hora
H <sub>2</sub>	Hidrógeno molecular
H <sub>2</sub> S	Ácido sulfhídrico
HCl	Ácido clorhídrico
HNO <sub>3</sub>	Ácido nítrico
K	Grados Kelvin
K (t)	Factor de corrección
K <sub>1</sub>	Gramos DQO por 1 mol de CH <sub>4</sub> (64 gramos DQO / mol CH <sub>4</sub> )
kcal	Kilocalorías
kg	Kilogramo
kJ	Kilo Joules
kPa	Kilopascal
L	Litro

LP	Término usado para gas licuado de petróleo, GLP, derivado del inglés <i>gas from liquid propane</i>
m	Masa
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
mg	Miligramo
min	Minuto
MJ	Mega Joules
mL	Mililitro
Mm	Masa molar
MTBE	Metil-terbutil-éter
MW	Megawatts
MWh	Megawatts por hora
N	Normalidad
n	Número de moles
NaOH	Hidróxido de sodio
NH <sub>3</sub>	Amoníaco
NH <sub>4</sub> VO <sub>3</sub>	Molibdato de amonio
nm	Nanómetro
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Nitrato
NOM	Norma Oficial Mexicana
P	Presión
P <sub>2</sub> O <sub>7</sub> <sup>-4</sup>	Pirofosfato
PB	Polibutileno
PE	Polietileno
pH	Potencial de hidrógeno
PO <sub>3</sub> <sup>-3</sup>	Fosfito (metafosfato)
PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>	Fosfato (ortofosfato)
PVC	Policloruro de vinilo
R	Constante de los gases ideales
RALLFA	Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente

s	Segundo
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SENER	Secretaría de Energía
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Sulfato
t	Toneladas métricas
T	Temperatura
TRC	Tiempo de retención celular (biomasa)
TRH	Tiempo de residencia hidráulica
<i>UASB</i>	Siglas en inglés para <i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
V	Volumen
V <sub>CH4</sub>	Volumen de metano
vs.	Siglas en latín para contra: <i>versus</i>
XIX	Siglo 21
XX	Siglo 20
ρ <sub>CH4</sub>	Densidad del metano

## Índice de ecuaciones

		Pág.
<b>Nombre de ecuaciones</b>		
Ecuación 1.	Ecuación para presión de diseño (Manual de flujo de fluidos en válvulas accesorios y tuberías, Crane, 2015)	21
Ecuación 2.	Ecuación de los gases ideales (Fisicoquímica, Castellan, 1998)	34
Ecuación 3.	Ecuación de la densidad (Fisicoquímica, Castellan, 1998)	34
Ecuación 4.	Ecuación de factor de corrección de temperatura (Torres-Lozada y Pérez, 2010)	34
Ecuación 5.	Ecuación empírica para la generación de CH <sub>4</sub> teórico (Torres-Lozada y Pérez, 2010)	35

Nota:

Esta tesis usa el PUNTO DECIMAL (DOF, 2009)

## Resumen

Se realizó un estudio a nivel laboratorio para el tratamiento de vinazas provenientes de la fermentación alcohólica de la melaza de caña, subproducto de un ingenio azucarero cooperante ubicado en el estado de Veracruz, México, mediante reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA). En este proyecto se quiere demostrar el aprovechamiento energético que se puede obtener del biogás, mediante el seguimiento de reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) que ya se encontraban en funcionamiento a tres diferentes temperaturas, de 45, 55, y 65°C, al momento del inicio de esta tesis. También se buscó el objetivo de incentivar a la industria alcoholera hacia el uso y aprovechamiento energético que brinda la gran cantidad de materia biodegradable que se produce en los efluentes de la primera torre de destilación ya que por cada litro de etanol producido a partir de miel final, se obtienen, de manera adicional, entre 10:1 y 15:1 litros de vinazas corriente secundaria. Esta corriente tiene compuestos orgánicos que, medidos como demanda química de oxígeno (DQO), tienen concentraciones entre 60 y 70 g L<sup>-1</sup> y un valor de pH alrededor de 4.0, de la cual se puede obtener gas rico en metano, mediante la implementación de reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente, RALLFA. Se evaluó la producción teórica y experimental del metano producido considerando el consumo de materia orgánica carbonosa medida como DQO con el medido en forma real mediante un sistema por desplazamiento de una disolución acuosa donde el metano es insoluble en los tres reactores anaerobios que operan a 45, 55 y 65°C. Así mismo, se realizó un seguimiento a los sistemas mediante la evaluación de los parámetros señalados antes. Los resultados promedio obtenidos para cada uno de los tres reactores fueron los siguientes: Para los valores de pH: 7.57 ± 0.02<sub>45°C</sub>, 7.73 ± 0.04<sub>55°C</sub>, 7.88 ± 0.06<sub>65°C</sub>. Para la DQO removida: 35.99 ± 2.03<sub>45°C</sub>, 25.15 ± 0.73<sub>55°C</sub> y 8.14 ± 8.56<sub>65°C</sub>, mg DQO L<sup>-1</sup>. Para la temperatura: 44.23 ± 0.45<sub>45°C</sub>, 54.13 ± 0.50<sub>55°C</sub> y 63.00 ± 0.83<sub>65°C</sub>. En el caso de los fosfatos: 1671.78 ± 56.06<sub>45°C</sub>, 1858.99 ± 53.71<sub>55°C</sub> y 2032.12 ± 6.78<sub>65°C</sub> mg PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> L<sup>-1</sup>. Para los sulfatos: 237.50 ± 63.33<sub>45°C</sub>, 452.50 ± 75.00<sub>55°C</sub> y 540.83 ± 39.17<sub>65°C</sub> mg SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> L<sup>-1</sup>. Finalmente, considerando los nitratos: 95.95 ± 0.09<sub>45°C</sub>, 109.48 ± 0.75<sub>55°C</sub> y 115.43 ± 1.00<sub>65°C</sub>. mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup> L<sup>-1</sup>. La comparación entre el volumen de metano obtenido experimentalmente, corregido por P y T en la Ciudad de México, CH<sub>4</sub> corregido, con el de metano teórico con base en la DQO, CH<sub>4</sub> DQO, dio los siguientes datos: de 5.05 ± 0.03<sub>45°C</sub>, 3.67 ± 0.03<sub>55°C</sub> y 1.84 ± 0.24<sub>65°C</sub> L CH<sub>4</sub> corregido d<sup>-1</sup> versus 7.91 ± 0.50<sub>45°C</sub>, 5.70 ± 0.21<sub>55°C</sub> y 1.90 ± 0.95<sub>65°C</sub> L CH<sub>4</sub> DQO d<sup>-1</sup>. Estos resultados en los tres reactores indican que el RALLFA que opera a 45°C fue el más eficiente y adecuado para la remoción de materia orgánica medida como DQO, con el reactor a 65°C como el de menor eficiencia, siendo esta diferencia estadísticamente significativa (p<0.05). Se continuará la experimentación para verificar las comunidades que proliferan en ellos y tratar de mejorar la eficiencia de los reactores a mayor temperatura, 55 y 65°C ya que las vinazas salen de la torres de destilación a temperaturas arriba de 65°C y es importante ahorrar esa energía.

Palabras clave: **Producción de biogás, metano, reactores de lecho de lodos de flujo ascendente, RALLFA, escala de laboratorio**



# Capítulo 1.

## Problemática

### 1.1. Introducción

La actual situación mundial respecto del tema energético muestra un panorama de cambio en cuanto a la utilización de energías tradicionales optando por las energías de carácter renovable. A nivel mundial el uso de las tecnologías renovables en los últimos años ha ido aumentando considerablemente. Debido a esto, se ha observado una apertura respecto a la implementación de este tipo de tecnologías, como lo es en este caso la generación de biogás a través de materia orgánica biodegradable dentro de la cual se encuentran: excretas de cerdo, vacas, gallinas, residuos vegetales; provocando la reducción significativa de la contaminación de suelos, mantos acuíferos, ríos, por vertidos de las mismas, así como la contaminación del aire causado por las emisiones de los gases producto de la descomposición de esta materia orgánica, la proliferación de enfermedades, etc.. Así mismo, se obtienen una serie de beneficios tales como la generación de un combustible rico en metano, el cual posee características óptimas para su utilización, bajos costos de producción e implementación, así como de operación y de inversión inicial (Poblano-Flores, 2015).

En la presente investigación se quiere demostrar el aprovechamiento energético que se puede obtener del biogás, mediante el seguimiento de reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) que ya se encontraban en funcionamiento a, tres diferentes temperaturas, de 45, 55 y 65°C, al momento del inicio de esta investigación. También se busca incentivar a la industria azucarera y alcoholera al uso y aprovechamiento energético que brinda la gran cantidad de materia biodegradable que se produce en la primera torre de destilación donde entran los mostos fermentados (en la corriente líquida conocida como vinazas), ya que por cada litro de etanol producido a partir de miel final se obtienen, de manera adicional, entre 10:1 y 15:1 litros de vinazas como corriente secundaria.

Esta corriente tiene compuestos orgánicos que, medidos como demanda química de oxígeno (DQO), tienen concentraciones entre 60 y 70 g L<sup>-1</sup> y un pH alrededor de 4.0 (Gozá, 1996), de la cual se puede obtener biogás a partir de su biotransformación por medio de la implementación de reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente, RALLFA (Castro-González, 2004). Con esto se busca demostrar que es un proyecto económicamente rentable, cuando se elabora de manera sistemática, con la asesoría adecuada y de los cuales se obtiene un beneficio económico de impacto directo, ya que se evita el uso de combustibles convencionales. Se han probado los sistemas combinados de reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA o *UASB-reactors*) con reactores de biodiscos, donde en los primeros se recupera la materia carbonosa de las vinazas en forma de biogás rico en metano para ser usado como fuente secundaria de energía en los ingenios azucareros-alcoholeros y, en los segundos se emplean para recuperar la fuente nitrogenada de las vinazas como biomasa rica en proteína para dietas de peces (Cabrerero *et al.*, 1990; Campos-González *et al.*, 1995; Castro *et al.*, 1988; Castro-González *et al.*, 2004; Durán *et al.*, 1994a,b; Durán-de-Bazúa *et al.*, 1988, 1990, 1991a,b, 1993a,b, 1994a,b; García-Díaz y Durán-de-Bazúa, 1988; Jiménez-Ambriz *et al.*, 1995; Olvera-Rubio *et al.* 1992; Zámamo-Pérez *et al.*, 1991; Zamudio-Preciado *et al.*, 1993). Su uso posterior a este biotratamiento debe orientarse a su uso final en suelos o humedales artificiales, porque el contenido de materia orgánica de tipo húmico es todavía elevado en las vinazas tratadas anaerobia-aerobiamente (Bautista-Zúñiga *et al.*, 1995, 1998, 2000a,b; Bautista-Zúñiga y Durán-de-Bazúa, 1998; Durán-Domínguez-de-Bazúa, 2011).

Para ello, es importante realizar análisis químicos a la materia prima a utilizar (vinazas) para la generación de biogás, ya que estos son indicadores de la calidad del sustrato con el que se están dosificando los RALLFA y lo que garantizan un funcionamiento exitoso. Esta operación se verá reflejada en una buena producción de biogás, así como la calidad del mismo (contenido de metano). Es necesario realizar un seguimiento continuo y sistemático desde el inicio o puesta en marcha de los RALLFA de las variables que se ven directamente relacionadas con el proceso de

generación del biogás, por medio de tomas de muestras del influente y efluente de los RALLFA, para ser sometidos a análisis de pH, DQO y ácidos grasos volátiles, los cuales son un indicador de que se está degradando la materia orgánica que entra a los reactores. Dentro del funcionamiento de los reactores anaerobios, existen muchas otras variables que influyen en su óptimo funcionamiento como: ubicación, temperatura ambiente, así como factores externos tales como la contaminación por agentes o bacterias extrañas, químicos, etc. (Castro-González *et al.*, 2004).

En el año del 2007 se obtuvo la evaluación de reservas nacionales probadas de hidrocarburos indicándose que son suficientes para satisfacer la producción actual de petróleo y gas por 9.6 y 8.6 años, respectivamente. Por ello el biogás tiene todo el potencial para llegar a ser una pieza fundamental y sustentable en el sistema de energía dado que los procesos que se involucran disminuyen la emisión de gases de efecto invernadero debido a que su combustión tiene menores emisiones de CO<sub>2</sub> y sobre todo una baja cantidad de azufre (Verea, 2009).

Es por ello que el biogás es una extraordinaria fuente de energía renovable además de ser una alternativa económica y técnicamente viable para su generación, ya que se ha encontrado que el hidrógeno como portador de energía puede sustituir a los combustibles fósiles y de esta forma no acabar con los recursos no renovables como lo son el petróleo o el carbón (Turner, 2004).

## **1.2. Justificación**

En el caso de la presente investigación las vinazas serán tratadas mediante reactores anaerobios evaluando la producción de biogás generado, ya que es una de las opciones más económicamente rentables y establecida en varios países como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1. Producción de metano en función de la vinaza generada**

<b>País</b>	<b>Producción vinaza(m<sup>3</sup>año<sup>-1</sup>)</b>	<b>Biogás producido(m<sup>3</sup>d<sup>-1</sup>)</b>	<b>Referencia</b>
<b>Brasil</b>	<b>4,380,000</b>	<b>3550</b>	<b>Siñeriz, 2009</b>
<b>Colombia</b>	<b>730,000</b>	<b>18.08</b>	<b>BIOTEC, 2006</b>
<b>Uruguay</b>	<b>234,000</b>	<b>6.02</b>	<b>López <i>et al.</i>, 2012</b>
<b>Ecuador</b>	<b>238,000</b>	<b>20555.49</b>	<b>Molina y Quiñonez, 2012</b>
<b>Colombia</b>	<b>1.277</b>	<b>0.000278</b>	<b>Cobos y Sierra, 2007</b>

### **1.3. Objetivo general**

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

### **1.4. Metas (objetivos específicos)**

- Realizar la caracterización de las vinazas
- Implementar los parámetros físicos y químicos para medir el influente y efluente de los RALLFA
- Instalar un equipo de desplazamiento de agua para medir el biogás generado
- Obtener valores teóricos de metano en el biogás usando la proporción de 62% de metano en un biogás producido en el laboratorio partiendo de vinazas de un ingenio azucarero cooperante

## Capítulo 2

### Marco teórico

#### 2.1. Antecedentes

Un elemento residual de gran potencialidad dentro de la industria alcoholera lo constituyen las vinazas de destilerías. Históricamente han sido consideradas como un subproducto indeseable de la destilación del etanol y aún lo siguen siendo en la mayoría de los países productores de azúcar. Este subproducto líquido presenta una alta concentración de materia orgánica expresada como DQO y como demanda bioquímica de oxígeno, DBO, iones metálicos como hierro, cobalto, zinc, y un bajo valor de pH. Este subproducto, si es vertido a cuerpos de agua, afectan, las comunidades biológicas de ríos, fuentes de aguas subterráneas y mares, ya que los sólidos contenidos en los residuos dificultan el paso de la luz a través del agua, afectando la fotosíntesis y las acciones auto depuradoras de los sistemas naturales, por lo que muchas especies biológicas desaparecen (McPherson *et al.*, 2002). Sin embargo, si se tratan adecuadamente, pueden ser aprovechados, por lo cual dejarían de ser contaminantes y, por otro lado, se convertirían en una fuente adicional de recursos como se presentan a continuación (Sabadí, 2007):

**a. Como abono químico**, para fertilizar directamente suelos con permeabilidad razonable y una buena capa de materia orgánica, lo cual permitiría elevar el rendimiento de la caña de azúcar en un 11%. Esta solución debe ser cuantificada cuidadosamente, pues eleva el contenido de cenizas y de potasio en el azúcar crudo, el jugo clarificado y las mieles; además, su factibilidad de aplicación se encuentra muy relacionada con la cercanía entre la fábrica y los campos de cultivo.

**b. Mediante el tratamiento anaerobio**, para producir gas metano, y el residuo sólido sería utilizado como fertilizante, por sus contenidos de nitrógeno, potasio y fósforo. El gas metano podría ser empleado como combustible para la producción del vapor necesario para la destilación, la limpieza de fermentadores y otras labores; con lo que se podría ahorrar el 50% del combustible tradicional empleado en destilerías (conocido en México como combustóleo o *fuel oil*).

**c. La recirculación de 20 a 25% del mosto al proceso**, incorporándolo a la fermentación, permitiría aprovechar la levadura que ha permanecido sin reaccionar y se ahorraría parte del agua empleada como diluyente en el proceso. Esta solución debe ser controlada para mantener la velocidad de fermentación y los restantes parámetros del proceso.

**d. Utilizar el mosto como alimento animal**, solo o mezclado con bagazo, cogollo de caña de azúcar u otros aditivos. Esta opción es valorada muy positivamente por muchos autores, como una solución para la alimentación animal en países de economías emergentes, donde es posible incorporar a la dieta de cerdos, rumiantes y aves valores de 20, 30-40 y 15%, respectivamente, del mosto, bien como la solución, tal como sale del proceso de destilación o concentrado por evaporación, si fuera necesario trasladarlo hacia las granjas. Este caso es el valorado en el presente trabajo, considerando que muchas plantas de destilerías pueden estar ubicadas lejanas a granjas pecuarias y avícolas, y que no siempre, desde el punto de vista técnico, pueden construirse biodigestores para obtener gas metano (Sabadí, 2007).

## **2.2. El biogás**

El término biogás se mencionó por primera vez hace ya más de 400 años, cuando fue identificado por algunos científicos como un gas que provenía de la descomposición de la materia orgánica y fue hasta la segunda guerra mundial cuando comenzó la difusión de los biodigestores a nivel rural por todo Europa. El término biogás se le da a la mezcla de gases resultantes que provienen de la descomposición de materia orgánica realizada por la acción de microorganismos presentes en el proceso, especialmente en condiciones anaerobias. Los principales componentes del biogás son el  $\text{CH}_4$  con una concentración en volumen del 54 al 80% y el dióxido de carbono de 20 a 45%, cabe mencionar que el poder calorífico de este biogás es aproximadamente la mitad de un litro de combustible diesel (Ávila, 2009).

Hoy en día los residuos orgánicos tales como la basura, las aguas fecales o los excrementos, están vistos como un problema del que hay que deshacerse. Pero existen métodos a través de los que es posible producir energía a partir de dichos residuos, la producción de biogás es un excelente método para ello, en el cual ciertos microorganismos anaerobios descomponen la materia orgánica. Estos microorganismos consumen el nitrógeno y carbono, siendo el resultado de esto la producción de biogás encontrándose entre este al metano, el cual puede utilizarse para generar energía. El biogás puede ser producido desde casi cualquier tipo de materia prima biológica, destacando principalmente el sector agrícola así como el sector industrial a partir de diversos flujos de residuos orgánicos de la sociedad en general (Weiland, 2009). En la Tabla 2, se muestran algunos valores de biogás producido a partir de diferentes tipos de biomasa, porcentaje de metano y tiempo de retención de la biomasa (Sims, 2002).

**Tabla 2. Volúmenes típicos y composición de biogás producido para diferentes materias primas a 35°C (Sims, 2002)**

Materia prima	Biogás producido (L kg <sup>-1</sup> de sólidos totales)	Metano en biogás (%)	Tiempos adecuados de proceso (d)
Estiércol de oveja	180-220	55-57	20-25
Estiércol de ganado	190-220	56-60	20-25
Estiércol de cerdo	170-450	60-65	20-30
Estiércol de ave	300-450	60-70	15-20
Periódicos	235-245	51-53	28-30
Maleza acuática	370-390	55-57	20-25
Hojas de remolacha	375-385	65-68	20-25
Paja de cereal	350-450	54-58	25-30
Heno	350-460	54-65	20-25
Avena entera	450-480	51-55	20-25
Maíz entero	350-500	50-55	20-25
Pasto	450-530	55-57	20-25
Col	440-560	47-58	20-25
Alfalfa	450-600	56-64	20-25
Carne de deshecho	590-610	58-60	25-30
Raíz de remolacha	610-630	64-66	15-20
Papas	800-890	53-55	25-20
Plátano	930-950	52-55	15-20

La composición de este biogás depende de la biomasa que lo genera, siendo el metano el gas que se encuentra en mayor proporción, el resto de los gases son una mezcla entre ellos, encontrándose principalmente el dióxido de carbono y el ácido sulfhídrico, entre otros (Sims, 2002).

Los sistemas de generación de biogás cumplen funciones energéticas y ambientales, esto al capturar y aprovechar el metano para la energía eléctrica, mecánica o calorífica. El biogás tiene un poder calorífico medio de entre 18.8 y 23.4 MJ m<sup>-3</sup> (CONAFOR, 2006) o entre 20 y 26 MJ m<sup>-3</sup> (Sims, 2002). Con esto el biogás puede usarse en motores de combustión interna, iluminación y calefacción doméstica. Otros usos que se le da, es en la puesta en marcha de (López-Villanueva y Humaran-Curet, 2001):

- Motores
- Turbinas
- Estufas de gas
- Refrigeradores
- Calentadores

De esta forma los beneficios que brinda la tecnología para la producción de biogás son muy buenos, ya que gracias a esta fuente no convencional se producen grandes beneficios para la sociedad y para el ambiente como la producción de energía, calor, luz, electricidad, transformación de desperdicios orgánicos y tratamiento de aguas residuales (López-Villanueva y Humaran-Curet, 2001).

La producción de biogás en la actualidad es cada vez más importante debido a que ofrece grandes beneficios ambientales y de forma directa es una fuente adicional de ingresos para quien lo produce ya que por medio de éste se produce energía renovable (Chynoweth, 2004).

Este biogás tiene un poder calorífico similar al poder calorífico del gas natural debido a su alto contenido de metano. Es por eso que esta investigación tuvo como objetivo el seguimiento de la producción de biogás a través de 3 reactores anaerobios, así como la conversión de compuestos carbonosos medidos como DQO solubles a metano y dióxido de carbono (Bernal-González *et al.*, 2012a).



### **2.3. El biogás en México**

La importancia del biogás, radica en el hecho de que México se proyecta como un país que tiene deficiencias para la producción de gas. Es por ello que una de las alternativas que se tienen para combatir esta deficiencia es invertir en el desarrollo del biogás, que puede producirse tanto en los rellenos sanitarios como en el tratamiento del producto secundario obtenido de las industrias alcohólicas (destilerías) llamado vinazas y que hasta el momento están siendo desaprovechados desde el punto de vista ambiental y económico. La producción de este biogás sirve para diversos usos, tales como la generación de electricidad y de sustituto del gas LP para el consumo de hogares e industrias, fortaleciendo de manera directa la seguridad energética del país.

Dado que se piensa que en México seguirá creciendo la demanda del petróleo y gas, trayendo consigo problemas debido a la disminución de los campos gasíferos, ya que no existe inversión de capital para encontrar otros, se debieran encontrar o desarrollar sustitutos al petróleo y al gas para así garantizar el crecimiento sostenido y sustentable (Ávila, 2009).

La composición de gas metano producido por medio de la materia orgánica, presenta la ventaja de que, a través de éste, se genere energía eléctrica y potencia eléctrica. Este recurso puede ser aprovechando, como es el caso del tren metropolitano regiomontano (metro), ya que es el primer transporte colectivo de su tipo en México que utiliza energía de este tipo. Con esto la empresa Simeprode, (empresa pública de la ciudad de Monterrey encargada de la gestión de residuos urbanos), afirma que se producirá la suficiente energía que requerirá el metro para que funcione en su totalidad al 100 por ciento con todo y las ampliaciones de líneas que se le quieren hacer a este transporte colectivo y todo esto gracias a la bioenergía producida con la basura, no con la energía derivada de combustibles fósiles como el gas, el petróleo y carbón (Simeprode, 2007).

Además de esto, se piensa que sobraría la suficiente energía para el alumbrado público de la zona metropolitana de esa ciudad. Con esto, se espera que el transporte colectivo, metro, de Monterrey se desconecte en su totalidad de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) reduciendo el gasto de energía eléctrica (Simeprode, 2007).

En cuanto a los residuos forestales, agropecuarios, animales e industriales, son una fuente inagotable para la producción de biogás. México es un país que tiene gran potencial para la producción de este recurso energético. La Ciudad de México, Guadalajara y Monterrey utilizan el 49% de los recursos de agua en México y generan un total combinado de  $53 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  de agua residual, del cual solamente un 15% (8.2 metros cúbicos por segundo) son tratados mediante un sistema anaerobio para la generación de biogás que puede ser utilizado como gas doméstico o energía eléctrica (Monroy *et al.*, 1997).

Si todo el caudal pudiera tratarse de esta forma, se tendría un mayor potencial de uso del biogás.

Cabe mencionar que no solamente se puede producir biogás mediante el tratamiento de las aguas residuales. Otro recurso que puede usarse como alternativa son los sólidos que se encuentran en los rellenos sanitarios ya que actualmente solamente se aprovecha el 2.4% del potencial (Castro, 2013).

De una tonelada de materia orgánica pueden producir de 120 a 300 metros cúbicos de metano, según cifras de la Agencia Internacional de Energía, la producción mundial del biogás en el año 2008 fue de 274 mil 170 gigawatts por hora, mientras que la de México asciende a 432 gigawatts por hora, colocándose de esta forma en una de las principales fuentes de energía renovables que tiene grandes ventajas en comparación con otros energéticos hablando de la preservación del ambiente y, sobre todo, es un recurso económicamente factible dado que no pone en riesgo las reservas de hidrocarburos del país (Ávila, 2009).

## **2.4. Comparación del biogás con otros combustibles**

Existen diferentes tipos de combustibles y estos a su vez tienen ciertas características que los hacen diferentes uno de otro al compararlos, los combustibles reaccionan con diferentes comburentes y esto lo hacen de forma exotérmica es decir produciendo una gran cantidad de energía térmica (Muñoz-Hernández, 2001).

Un combustible puede definirse de manera básica como una fuente de calor, el método común para producir calor a partir del combustible es a través de un proceso de combustión el cual es llevado a cabo mediante una reacción química entre el combustible y el oxidante o comburente. Cabe mencionar que, en la gran mayoría de los casos, el aire es el oxidante. Un ejemplo es el diesel, ya que la base de este combustible son los primeros destilados de la parafina. Este combustible está compuesto por un 85% de carbono y un 15% de hidrógeno (Sarkar, 2009). Esta composición no varía mucho con respecto a la composición de la gasolina, pero sí marca una gran diferencia ya que el diesel no se evapora tan fácilmente como lo hace la gasolina. Por tal motivo es más eficaz para formar mezclas de aire y combustible.

La gasolina está hecha de tal forma que sólo se encienda por medio de una chispa en los motores de combustión interna. En cambio, el diesel solamente necesita ciertas condiciones de presión, temperatura arriba de los 250°C y es utilizado en los motores por compresión (Bennett, 2010).

Por otra parte, el gas natural es el más simple de los hidrocarburos, se identifica comúnmente con el metano; además, tiene otros compuestos como alcanos, ácido sulfhídrico y varios compuestos inorgánicos (Berkowitz, 1997).

En las últimas décadas del siglo XX el consumo de gas natural se ha incrementado de forma dramática debido al sector eléctrico. Se tiene estimado que el consumo de este importante combustible crezca a un ritmo del 2.4% a nivel mundial para el año

2030. Una de las mayores ventajas que tiene este combustible es su variedad de usos finales, industrial o doméstico. Otro de los combustibles importantes es el gas LP o gas embotellado como también se le conoce, este se hace con gas natural, gases de refinería y otros compuestos aromáticos, su uso principal es en aplicaciones domésticas, esto se debe a la gran cantidad de poder calorífico almacenado en un espacio relativamente pequeño y la facilidad de usarlo directamente en estufas y quemadores. Para muchos países que no cuentan con la distribución de red de gas natural para uso doméstico, la mejor opción es la de este gas LP (gas licuado de petróleo), también el cual, es usado para algunos vehículos que cuentan con motores de combustión interna (Sarkar, 2009).

En México, el Poder Ejecutivo Federal presenta información al respecto (Tabla 3).

**Tabla 3. Valores promedios del poder calorífico de diferentes combustibles y su equivalente referido al biogás (DOF, 2010)**

Lista de combustibles		
Combustible	Unidades de medida	Poder calorífico
Asfaltos	(MJ/bl)	6,444
Azufre	(MJ/t)	9,269
Bagazo de caña	(MJ/t)	7,055
Carbón siderúrgico de importación	(MJ/t)	29,559
Carbón siderúrgico nacional	(MJ/t)	19,987
Carbón térmico de importación	(MJ/t)	25,284
Carbón térmico nacional	(MJ/t)	19,405
Combustóleo	(MJ/bl)	6,429
Condensados	(MJ/bl)	4,845
Coque de carbón	(MJ/t)	26,521
Coque de petróleo	(MJ/t)	31,424
Diesel	(MJ/bl)	5,952
Equivalente de electricidad en términos secundarios	(MJ/MWh)	3,600
Equivalente primario de energía eléctrica	(MJ/MWh)	10,381
Etano	(MJ/bl)	2,854
Gas licuado	(MJ/bl)	4,251
Gas natural asociado <sup>1</sup>	(kJ/m <sup>3</sup> )	40,053
Gas natural no asociado <sup>2</sup>	(kJ/m <sup>3</sup> )	37,296
Gas seco <sup>3</sup>	(kJ/m <sup>3</sup> )	33,913
Gas seco de exportación	(kJ/m <sup>3</sup> )	35,812
Gas seco de importación	(kJ/m <sup>3</sup> )	34,614
Gasolinas naturales	(MJ/bl)	4,781
Gasolinas y naftas	(MJ/bl)	5,542
Leña	(MJ/t)	14,486
Lubricantes	(MJ/bl)	5,970
Materia prima para negro de humo	(MJ/bl)	6,194
Metil-terbutil-éter (MTBE)	(MJ/bl)	5,149
Petróleo crudo (promedio de la producción)	(MJ/bl)	6,382

**Cont. Tabla 3. Valores promedios del poder calorífico de diferentes combustibles y su equivalente referido al biogás (DOF, 2010)**

Lista de combustibles		
Combustible	Unidades de medida	Poder calorífico
Petróleo crudo istmo	(MJ/bl)	5,826
Petróleo crudo maya	(MJ/bl)	6,040
Petróleo crudo Olmeca	(MJ/bl)	5,727
Querosenos	(MJ/bl)	5,450
<b>Biogás<sup>4</sup></b>	<b>(kcal/m<sup>3</sup>)</b>	<b>4,500</b>
Llantas <sup>5</sup>	(kcal/kg)	6,000
Licor negro <sup>6</sup>	(kcal/kg)	3,600
Gas de coque <sup>6</sup>	(kcal/kg)	31,400

- 1 El gas natural asociado se mide a la salida de las baterías de separación, estandarizado a 20°C y a 100 kPa. El gas natural a la salida del pozo tiene un poder calorífico de 45,225 kJ m<sup>-3</sup>
- 2 El gas natural no asociado es medido en condiciones estándar, el poder calorífico a boca de pozo es de 38,073 kJ m<sup>-3</sup>
- 3 Corresponde a volúmenes medidos a 20°C y a 100 kPa de presión, el poder calorífico del gas residual facturado es de 35,420 kJ m<sup>-3</sup>
- 4 Poder calorífico promedio extraído de “estimación del recurso y prospectiva energética de la basura en México” SENER, depende del contenido de metano, dióxido de carbono, nitrógeno, hidrógeno y otros
- 5 Estimación promedio la industria cementera según permisos de SEMARNAT
- 6 Poder calorífico inferior
- 7 Esta lista de combustibles deberá apegarse a las Normas Oficiales Mexicanas vigentes de uso y utilización de residuos y combustibles emitidas por la SEMARNAT

La gran diferencia entre usar biogás o cualquier otro tipo de combustible es que el biogás, como ya se ha dicho, es una alternativa energética amigable y socio-económica, ya que con esto existiría un ahorro significativo en el consumo mensual de energía eléctrica y gas. Esto conlleva a también disminuir los olores producidos por un manejo y almacenamiento inadecuado de la biomasa de la que proviene. Además, al optar por el uso de biogás, aumenta también la cantidad de amonio producida en los residuos finales, considerando a éste como el principal componente del fertilizante comercial (Félix-Figueroa, 2010).

De esta manera, la comparación entre el biogás y otros combustibles es favorable para el biogás desde el punto de vista socio-económico y ambiental, ya que así habría más años de existencia para los recursos no renovables como el petróleo y al producirlo aquí en México, se dejaría de importar gas, viéndose beneficiada directamente la parte económica y ambiental. Cabe mencionar que el biogás en comparación con algunos otros combustibles, no tiene la suficiente composición de metano para sustituir de forma plena a otros combustibles gaseosos como el gas natural, pero aún así este biogás se puede aprovechar para la generación de energía térmica (López-Villanueva y Humaran-Curet, 2001).

## **2.5. Generación del biogás a partir de tratamiento biológico**

Existen dos tipos de tratamiento biológico para la generación de biogás. Uno es el tratamiento aerobio ( $\text{CO}_2$  y vapor de agua, principalmente) y en el caso contrario el tratamiento anaerobio ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$ , etc.), siendo utilizado este último mayormente en la actualidad ya que es considerado el más idóneo para la generación de energía.

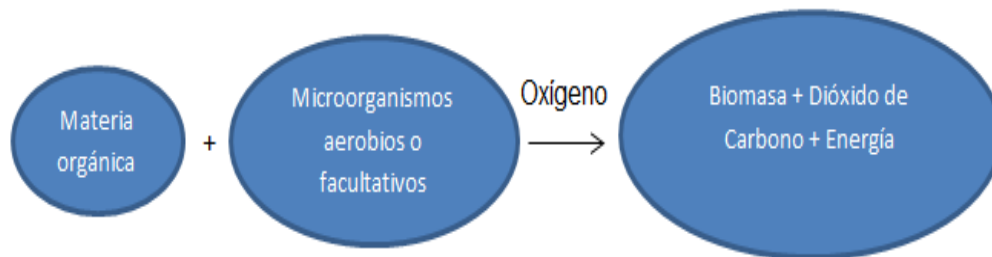
Existen plantas de tratamiento biológico que emplean el proceso aerobio, pero cabe mencionar que tienen algunas problemáticas, siendo la principal su alta demanda energética para solventar la aireación del proceso. En contraste, con el proceso anaerobio se presenta el ahorro energético. Una de las primeras aplicaciones registradas de este tratamiento anaerobio en el sector energético fue a finales del siglo XIX en Inglaterra, obteniendo gracias a una planta de tratamiento de aguas, el alumbrado público en el estado de Exeter, Inglaterra (Carlos-Hernández *et al.*, 2014).

Es importante mencionar que, aunque tiene esta ventaja, tiene la desventaja de que la rapidez de reacción anaerobia es mucho menor que la aerobia y, por ello, es que durante muchos años prevalecieron los sistemas aerobios sobre los anaerobios. Actualmente, se ha logrado reducir los tiempos de residencia hidráulica en los reactores anaerobios manteniendo la biomasa anaerobia “fija” ya sea en medios de soporte sintéticos o permitiendo que la propia biomasa logre su cohesión de manera floculada para alargar el tiempo de retención celular y que sea mayor que el de residencia (Durán-de-Bazúa, 1997).

### **2.5.1. Tratamiento aerobio**

Para la estabilización de materia orgánica por métodos aerobios, como ya se mencionó anteriormente, se necesita la presencia de oxígeno y se lleva a cabo por medio de microorganismos aerobios o facultativos; es decir, se desarrollan en

presencia de oxígeno degradando la materia orgánica en compuestos más estables y biogás rico reacción:



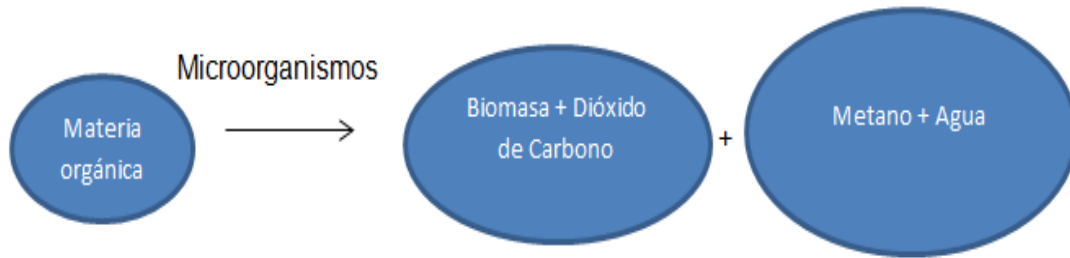
**Fig. 1. Reacción por medio de tratamiento aerobio para vinazas (Campos-González *et al.*, 1995; Castro *et al.*, 1988; Metcalf y Eddy, 1977; Ramírez, 1992; Rigola, 1999)**

En este proceso, el carbono presente en la materia orgánica disuelta en el agua se convierte de forma parcial a dióxido de carbono, con producción de energía para las células de los microorganismos aerobios y otra parte es utilizada para sintetizar el material celular mejor conocido como biomasa. Dentro de los procesos aerobios se selecciona dependiendo del volumen, concentración, las características de las sustancias disueltas, necesidades de oxígeno y costo de energía. La carga másica es el parámetro que controla el funcionamiento de los distintos tipos de proceso aerobio. Aquí la carga másica da los kg de alimento añadidos por hora y por cada kg de microorganismos presentes en el reactor. El tiempo de residencia hidráulica está relacionado de manera inversa con la carga (Metcalf y Eddy, 1977; Ramírez, 1992; Rigola, 1999).

### **2.5.2. Tratamiento anaerobio**

Este proceso lleva a cabo la degradación de materia orgánica e inorgánica por medio de microorganismos anaerobios obligados, conocidos como bacterias hasta hace algunas decenas de años, cuando fueron definidos como arqueas y que solamente proliferan en ausencia de oxígeno (Toscano, 2012). Este proceso tiene la ventaja de degradar con mayor eficiencia el material orgánico produciendo una mezcla de gases también conocida como biogás, compuesta principalmente de metano, dióxido de

carbono, y trazas de ácido sulfúrico, amoníaco e hidrógeno, como ya se mencionó arriba (Ramírez, 1992). Cabe mencionar que este proceso se lleva a cabo de forma natural en pantanos y en el fondo de lagunas y lagos, donde existe ausencia de oxígeno. La siguiente reacción (Fig. 2) ejemplifica de manera clara el proceso anaerobio.



**Fig. 2. Reacción por medio de tratamiento anaerobio para vinazas (Ilangovan y Noyola, 1993; Jiménez-Ambriz *et al.*, 1995; Ramírez, 1992)**

El proceso anaerobio está siendo utilizado en el tratamiento de aguas residuales provenientes principalmente de efluentes industriales y cultivos. La principal función de este proceso es la producción de biogás para generar energía. Dicho proceso involucra la descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Actualmente, una de sus mayores aplicaciones es el tratamiento de agua residual que proviene del sector industrial y municipal (Verea, 2009).

La degradación de la materia orgánica mediante el proceso anaerobio es un proceso conocido desde hace mucho tiempo y, en la actualidad, ha tomado gran importancia como una opción para el tratamiento de desechos orgánicos industriales. Los factores que afectan principalmente al proceso anaerobio son la temperatura, el pH, y el tiempo de residencia hidráulica, TRH, que como se dijo arriba se busca que sea mucho menor que el tiempo de retención celular, TRC.



Dicho lo anterior, esta investigación estuvo enfocada al seguimiento de la producción de biogás rico en metano a partir del tratamiento biológico anaerobio, por lo que se le dará más importancia a este tipo de sistemas biológicos.

### **2.5.3. Generación del biogás utilizando vinazas**

Las vinazas son obtenidas de la corriente secundaria de las industrias alcoholeras, generándose así entre 12 y 14 litros de aguas residuales por litro de alcohol destilado. Estas aguas residuales son mejor conocidas como “vinazas”, ya que a la corriente de mosto fermentado que entra a las torres de destilación se le conoce como “vino”. Tienen sus propias características como un valor de pH muy ácido, entre 3-4, ya que en los procesos sépticos, realizados desde hace muchos siglos, se adicionaba ácido sulfúrico para que a este bajo valor de pH solamente proliferaran las levaduras (*Saccharomyces cerevisiae*) que son las que transforman la glucosa en alcohol etílico. De hecho, Louis Pasteur fue quien estudió esta reacción anaerobia de producción de etanol y la denominó fermentación, otro motivo de errores ya que hasta hace pocos años a cualquier reacción mediada por microorganismos se le llamaba fermentación y al reactor donde se realizaba se le llamaba fermentador y tuvo que cambiarse este concepto erróneo en una reunión internacional en los años setenta del siglo XX donde se acordó llamar biorreacciones a las hasta entonces conocidas como fermentaciones aunque no involucraran a *S. cerevisiae* ni a la glucosa como fuente de carbono y a los equipos donde se realizaban biorreactores y no fermentadores (Durán-de-Bazúa, 1997).

La concentración del etanol empleando la destilación produce vinazas, las cuales contienen materia orgánica disuelta proveniente de los biorreactores donde se llevó a cabo la conversión de la fuente de carbono y las levaduras en condiciones anaerobias. Este excedente de materia orgánica puede medirse de manera simple empleando un parámetro conocido como demanda química de oxígeno, DQO. Este parámetro alcanza valores muy elevados en la mayor parte de las vinazas obtenidas industrialmente, estando en el intervalo de 80 a 120 g L<sup>-1</sup> es decir entre 40 y 600

veces más que la cantidad presente en aguas residuales domésticas (que tienen entre 200 y 2000 mg L<sup>-1</sup>). Además, la temperatura con la que son evacuadas de la primera torre de destilación se encuentra alrededor de 80°C ya que el punto de ebullición del etanol es de 78.4°C. Debido a estas condiciones, el oxígeno disuelto en estos cuerpos receptores disminuye de manera drástica, es por ello que dicha corriente se ha caracterizado por ser una de las corrientes más contaminadoras, debido a sus características físicas (Bernal-González *et al.*, 2012a).

Es altamente adecuado, como se mencionó arriba, el tratamiento biológico, especialmente el proceso anaerobio (en ausencia de oxígeno) para la generación de biogás a partir de vinazas, ya que en los reactores anaerobios se puede llegar a remover hasta un 55 a 65% de la DQO y el biogás generado en este proceso, que tiene una composición rica en metano, puede ser empleado en la planta de producción de etanol en la misma industria alcoholera de donde se extraen estas vinazas, empleándola así como una fuente de energía renovable (Bailey y Ollis, 1986).

Con este hecho, una planta de tratamiento de vinazas representaría una fuente de ahorro energético para la industria (Bernal-González *et al.*, 2002).

## **2.6. Material, equipo y reactivos a utilizar para la implementación de un medidor de biogás**

Dentro del diseño de un experimento a nivel laboratorio en el cual se genera biogás deben considerarse varios aspectos que deben ser prioridad, ya sea para optimizar el uso de la materia prima (materia orgánica) por medio de un previo y buen dimensionamiento que garantice la buena generación de biogás, así como una excelente funcionalidad. Todo esto, debe hacerse sin dejar a un lado las condiciones de seguridad (Castro-González *et al.*, 1997).

### 2.6.1. Materiales (Hidalgo-Bonilla *et al.*, 2010)

A continuación se describen los diferentes tipos de materiales que pueden utilizarse para la elaboración de sistemas de tuberías orientados al transporte de biogás (Tabla 4), concluyendo que las tuberías de cloruro de polivinilo, *PVC* en inglés, se recomiendan para la mayoría de las aplicaciones con biogás.

**Tabla 4. Ventajas y desventajas de materiales de tuberías para el transporte de biogás (Castro-González *et al.*, 1997; ESCAP, 1980)**

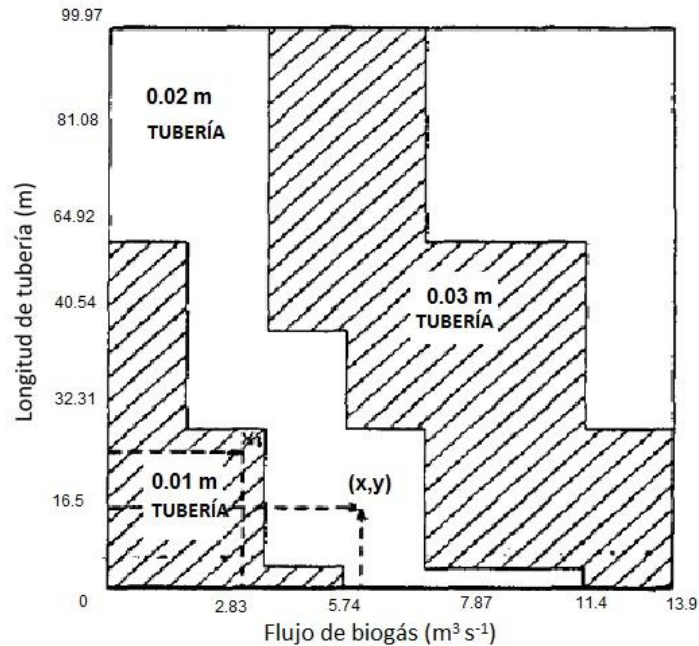
Material	Ventajas	Desventajas
Plástico (PVC, CPVC)	Fácil de trabajar, relativamente barato	Fácil de quebrarse o fracturarse, puede ser modificado por roedores, válvulas más caras que las de galvanizado. Está sujeta a la degradación causada por los rayos ultravioleta
Acero galvanizado	Rígido, menos posibilidades de fracturarse	Se oxida, tubería más cara que la de PVC o plástico
Manguera Plástica	Fácil de conectar a los equipos	Cara Se puede dañar fácilmente

### 2.6.2. Diámetro de la tubería

El diámetro de las tuberías para el transporte del biogás puede ser calculado de forma práctica por medio de la Figura 3, en donde para poder determinar el diámetro adecuado es importante conocer el flujo de biogás en metros cúbicos por segundo ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ), generado por el reactor, así como la longitud estimada del sistema de tuberías en metros. Teniendo ambos datos, en la Figura 3, se ubica en el eje de las abscisas el flujo de biogás en  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ , y en el eje de las ordenadas la longitud de la tubería en metros. Luego el área en donde se intercepten ambas rectas, la cual está asignada a un diámetro de tubería determinado en metros, será el diámetro de tubería adecuado para las condiciones que se tengan (ESCAP, 1980).

### 2.6.3. Espesor de tubería

Para poder determinar las dimensiones del espesor de las tuberías para transportar el biogás, es importante conocer la presión de operación y así poder determinar el espesor adecuado de la tubería.



**Fig. 3. Diámetro de tubería recomendado en metros (Modificada de ESCAP, 1980)**

Es recomendable sobredimensionar o estimar un intervalo en la presión de operación, para lo cual se recomienda que la presión de diseño se calcule con la ecuación (1)

$$\text{Presión de diseño} = 1.5 * \text{Presión máxima de operación} \quad (1)$$

Para la elección del espesor de la tubería se recomienda consultar la norma ASTM D 2513 – 85 a (ASTM, 1986). Dicha norma cumple aspectos como dimensiones y tolerancias, propiedades físicas y mecánicas, resistencia química y otros requerimientos para sistemas de tuberías. Las especificaciones de la norma se cumplen para los siguientes materiales plásticos citados en la Tabla 5.

#### 2.6.4. Consideraciones para accesorios

Respecto de la instalación de accesorios en la red de tuberías, ya sean estos válvulas, codos, bifurcaciones, reducciones, acoplamientos, etc., se recomienda que estos sean del mismo material de las tuberías. Para el caso de tuberías de PVC, todos sus accesorios deberán ser también del mismo material, para evitar el desgaste que podría ocasionar el contacto entre materiales plásticos y aceros. También se recomienda utilizar accesorios del mismo material que las tuberías para obtener una mejor adherencia entre ellos.

**Tabla 5. Materiales plásticos para sistemas de tuberías para gas presurizado (ASTM, 1986)**

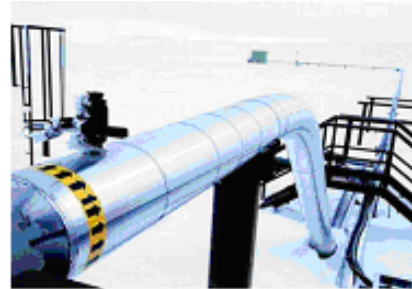
<b>Termoplástico</b>	<b>Tipos y grados</b>
Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)	Clase de célula 5,5,3,3,3 o mayor
Polibutileno (PB)	Tipo II, Grado 1, Clase B con antioxidantes o Clase C (PB 2110)
Polietileno (PE)	Grado P34, Clase B con antioxidante (PE 3406) Grado P34, Clase C, (PE 3406), (PE3408) Grado P23 o grado P24, Clase B (PE 2306 o PE2406) con antioxidante Grado P23 o Grado P24, Clase C (PE2306 o PE2406)
Policloruro de vinilo (PVC)	Tipo 1, Grado 1 (PVC 1120) Tipo 1, Grado 2 (PVC 1220) Tipo 2, Grado 1 (PVC 2110)

#### 2.6.5. Señalización

Dentro de la caracterización de un sistema de tuberías para el transporte de combustibles gaseosos altamente inflamables, la señalización es uno de los aspectos importantes debido a las propiedades de los fluidos que se transportan, ya que se está la mayor parte del tiempo susceptible a accidentes debido a fugas que pueden generar explosiones (Figs. 4 y 5).



**Fig. 4. Señalización**  
(Autodesk Inventor@2010)



**Fig. 5. Sentido del flujo**  
(Autodesk Inventor@2010)

En algunos casos, estos accidentes son causados por la negligencia de personas o por desconocer el peligro al cual están expuestos, para lo cual se recomienda la implementación de señalización como la mostrada en la Fig. 4. También se recomienda la señalización del sentido del flujo de biogás en las tuberías y en los dispositivos de aprovechamiento (Fig. 5).

#### **2.6.6. Dispositivos de tratamiento de biogás**

La calidad del biogás generado para las diversas aplicaciones es un factor muy importante después de que se genera, debido a su composición y contenido de  $H_2S$  y  $CO_2$ . Es importante darle un tratamiento especial antes de su utilización, ya que, en aplicaciones en las cuales se utilice el biogás como medio de accionamiento de motores de combustión interna, fabricados de metales ferrosos, esto puede resultar perjudicial cuando entre en contacto con el  $H_2S$ , ya que éste reacciona con el metal oxidándolo (corrosión). Lo mismo sucede en el caso de dispositivos direccionales como válvulas, quemadores, hornillas, lámparas, todas fabricadas de algún metal que pueda también verse afectado por el fenómeno de la corrosión. Otro aspecto importante en el tratamiento del biogás es la eliminación del condensado, el cual puede también contribuir en cierta medida a la corrosión en componentes ferrosos. Por último, la eliminación del  $CO_2$  se hace para obtener un biogás más limpio y rico en energía (Castro-González *et al.*, 1997, 2001).

### a) Filtro para la eliminación de ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S)

Para el caso de un digestor tipo domiciliario, este filtro se puede elaborar de manera artesanal. Se propone que el material de construcción sea tubería de PVC (Fig. 6) y que el diámetro del filtro de H<sub>2</sub>S sea mayor que el de la tubería en donde se haga la toma. Es decir, si la tubería donde se transporta el biogás es de 0.0127 a 0.0254 m (0.5 a 1 pulgada) se recomienda un diámetro de tubería de 0.0508 m (2 pulgadas) para el filtro, con el objetivo de poder almacenar una buena cantidad de virutas de hierro o limaduras de hierro adentro de la tubería, las cuales reaccionarán con el H<sub>2</sub>S contenido en el biogás acelerando de esta forma el proceso de oxidación en el filtro y no en los dispositivos antes mencionados. Se supone que por cada kg de virutas de hierro, se puede absorber el H<sub>2</sub>S presente en 40 m<sup>3</sup> de biogás, hasta un contenido no mayor del 1% en volumen. Se recomienda que el filtro sea colocado justamente antes del dispositivo de aprovechamiento del biogás, ya sea éste un quemador, un motor, un generador, etc. (Hidalgo-Bonilla *et al.*, 2010).

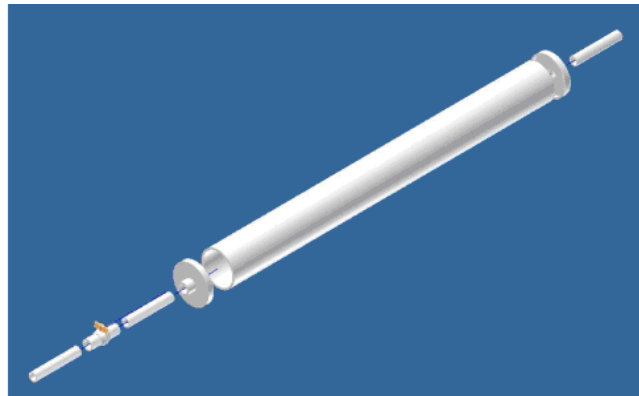
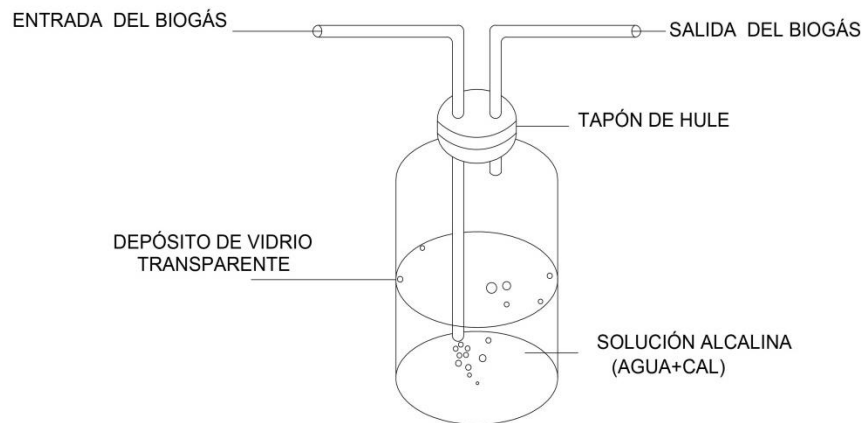


Fig. 6. Filtro para eliminar H<sub>2</sub>S (Autodesk Inventor@2010)

### b) Filtro para la eliminación del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (Hidalgo-Bonilla *et al.*, 2010)

Se pueden plantear dos tipos de posibles configuraciones, las cuales dependen de la presión de operación de la planta, es decir, la presión a la cual se mantiene el biogás dentro del sistema de tuberías. Ambas configuraciones se describen a continuación:

**Presiones de generación menores a 1 cm de columna de agua.** Éste es el caso de digestores de pequeña dimensión, los cuales poseen una presión de generación muy baja. El biogás no puede vencer presiones que excedan el valor de 1 cm de columna de agua, para lo cual es recomendable utilizar filtros de CO<sub>2</sub> elaborados con recipientes, botellas plásticas o de vidrio, dentro de los cuales se colocará una solución alcalina (agua + cal) (Hidalgo-Bonilla *et al.*, 2010, tomado de Flores, 1993). Esta solución se prepara agregando dos gramos de cal por cada litro de agua tal como se muestra en la Fig. 7 y con los cuales se garantiza la remoción de CO<sub>2</sub> del biogás.



**Fig.7. Filtro para eliminar CO<sub>2</sub> (Flores,1993)**

**Presiones de generación relativamente mayores a 1 cm de columna de agua.** Para digestores en los cuales la presión de generación es mayor debido al material del cual están contruidos, ya sean estos de cemento o de plástico, y también por las dimensiones del digestor, ya que a mayor capacidad de materia orgánica a descomponer, mayor será la capacidad de generación, donde pueden obtener presiones que puedan permitir una configuración gasómetro – filtro CO<sub>2</sub>. Esto significa que se puede filtrar el biogás y se puede almacenar al mismo tiempo. Para poder filtrarlo se debe tener una presión de generación como mínimo de 4 cm de columna de agua, para así obligar al biogás a que pase por la solución alcalina (agua + cal) contenida en el depósito fijo del gasómetro, la cual elimina el CO<sub>2</sub> contenido en el biogás para que una vez filtrado sea almacenado dentro del gasómetro (Fig. 8).





**Fig. 8. Gasómetro-filtro (Autodesk Inventor@2010)**

**c) Purga para la eliminación del condensado (Hidalgo-Bonilla *et al.*, 2010)**

La eliminación del condensado también es parte del tratamiento del biogás. Como ya se mencionó, ayuda también a prevenir la corrosión causada por la humedad o partículas de agua que están contenidas en el biogás, las cuales al experimentar variaciones de presión o de temperatura, se condensan y viajan a través de las tuberías afectando los diferentes dispositivos de la planta, ya sean estos accesorios o motores de combustión interna. También se estima que, en algunos casos, la alta generación de condensados de agua al interior de tuberías puede ser una carga para las mismas y si la red no se diseña de forma adecuada, es decir, con una pendiente a lo largo de todo el recorrido, éstas pueden doblarse hasta llegar a fracturarse por la masa del agua. Las purgas se pueden construir utilizando tubería de PVC, válvulas de bola de PVC y en algunos casos reductores de PVC (Fig. 9).

La purga para la eliminación del condensado por lo general se ubica siempre en la parte más baja del sistema de tuberías. Como se mencionó, el sistema debe diseñarse con una pendiente y la purga debe ubicarse al final de la pendiente o en algún cambio de nivel debido a que es ahí donde se acumula el condensado de agua con ayuda de la acción de la gravedad. Para poder evacuar el condensado, esto puede realizarse de forma manual, únicamente abriendo la válvula para eliminar el agua contenida. Preferiblemente debe ubicarse antes del filtro para la eliminación del ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ), ya que la humedad contenida en el biogás puede corroer más rápido la viruta o limadura de hierro contenida en el filtro.

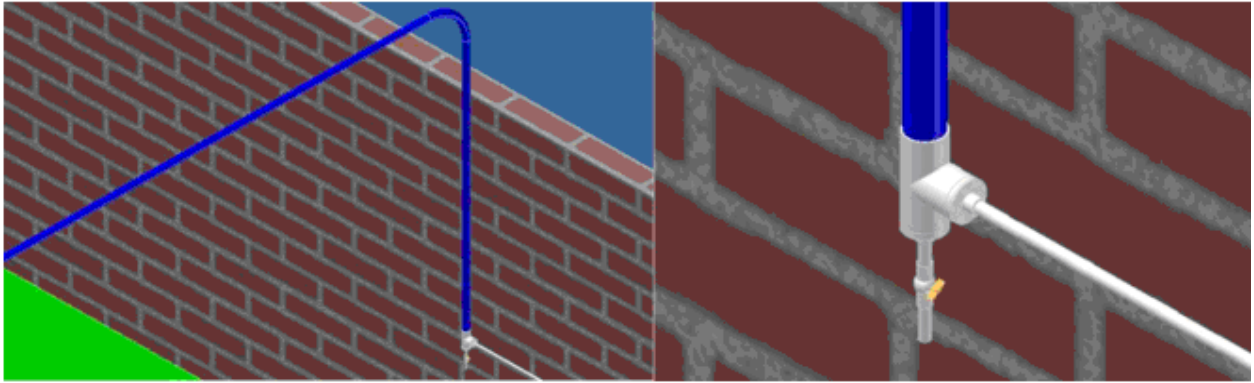


Fig. 9. Purga para la eliminación de condensados de agua contenidos en biogás (Autodesk Inventor@2010)

### 2.6.7. Dispositivos de seguridad (Hidalgo-Bonilla *et al.*, 2010)

La seguridad de la planta y de sus operarios es de suma importancia al momento de implementar este tipo de tecnologías, debido al tipo de combustible con el que se está trabajando, es altamente inflamable y por lo cual deben implementarse dispositivos para evitar accidentes, fugas, así como protecciones contra sobrepresiones que inclusive pueden causar daño al reactor anaerobio. Por esta razón, es importante la implementación de los dispositivos como válvulas de alivio, antorchas y arresta llamas que se mencionan a continuación.

#### a) **Válvula de alivio**

Las sobrepresiones tanto dentro del digester como en el sistema de tuberías, son algo inevitable debido a que existen momentos en los cuales no se está utilizando el biogás producido y es cuando se da un aumento en la presión de operación del digester. Por este motivo es muy importante saber cuál es el intervalo de presión de operación del sistema o, en su defecto, la presión de operación que se tiene en condiciones normales, para así poder implementar una válvula de alivio, la cual debe estar diseñada para evacuar el exceso de biogás producido a una presión mayor a la de operación.

## **b) Antorchas**

En plantas de biogás de grandes dimensiones y en las cuales la presión de generación y operación es elevada, en ocasiones existe la necesidad de liberar grandes cantidades de biogás debido a las sobrepresiones o en momentos en los cuales el biogás no se esté utilizando. Este biogás liberado en grandes cantidades al ambiente causa contaminación en el entorno por mal olor y el cual puede ser peligroso si es inhalado, por lo cual existe la opción de utilizar antorchas para el quemado de ese biogás. La antorcha se ubica a una distancia prudente del digestor, esto por motivos de seguridad, ya que es de alto riesgo generar una llama cerca del digestor.

### **2.6.8. Dispositivos para la aplicación del biogás (Hidalgo-Bonilla *et al.*, 2010)**

El fin de la captación de biogás por medio de digestores es el aprovechamiento energético del mismo, utilizándolo como combustible para accionar motores de combustión interna, quemadores y demás fines calóricos, así como para lámparas de iluminación. Existe actualmente una variedad de dispositivos de aplicación del biogás que van desde simples hornillas hasta micro-turbinas generadoras de electricidad, lo que hace al proyecto altamente deseable para las condiciones que se vivirán en México en el futuro previsible.

## Capítulo 3

### Metodología

#### 3.1. Descripción de los reactores biológicos

En esta investigación se utilizaron tres reactores de un volumen de 3 L de tipo RALLFA (A, B y C), los cuales se mantuvieron a tres temperaturas, de 45, 55 y 65°C, respectivamente. Como se muestra en la Fig. 10, están contruidos de vidrio. 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 un diámetro de 3.7 cm, a través del cual se hace pasar agua caliente a 45, 55 y 65°C, para mantener la temperatura constante de los tres reactores. El volumen total es de 2.7 L y el de operación de 2.4 L. Fueron inoculados con 1 L de inóculo, lo que a su vez representa un 37% de su volumen total (Fig. 11) (Rincón-Acelas, 2006).



Fig. 10. RALLFA utilizados en la experimentación (Rincón-Acelas, 2006)

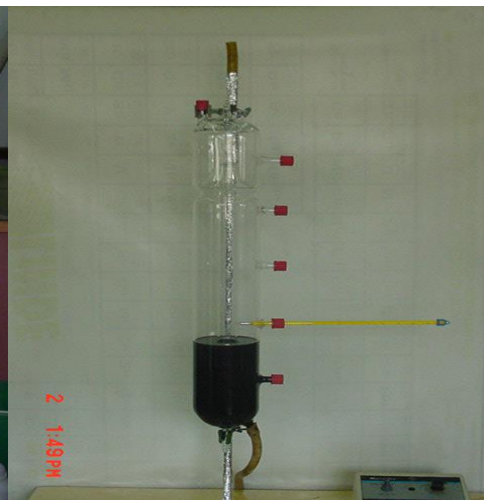


Fig. 11. RALLFA de 3L sin enchaquetar (Rincón-Acelas, 2006)

La adaptación fue muy lenta debido a la elevada concentración de materia orgánica en la vinaza y a sus características químicas (Castro-González *et al.*, 2004). Por ello, se diluyó en un 50% usando agua de la llave.

En el extremo inferior de los reactores se tiene una forma cónica por donde se lleva a cabo la alimentación mediante una bomba peristáltica, con un flujo de  $0.23 \text{ mL min}^{-1}$ , manejando un tiempo de residencia hidráulica (TRH) de 7.2 días.

La producción del biogás fue cuantificada usando un medidor de desplazamiento de gas, según las instrucciones del fabricante (Fig. 12). Se evaluó el rendimiento o productividad de metano ( $\text{CH}_4$ ), como el cociente del volumen de metano producido por unidad de masa de material orgánico degradado medido como DQO.

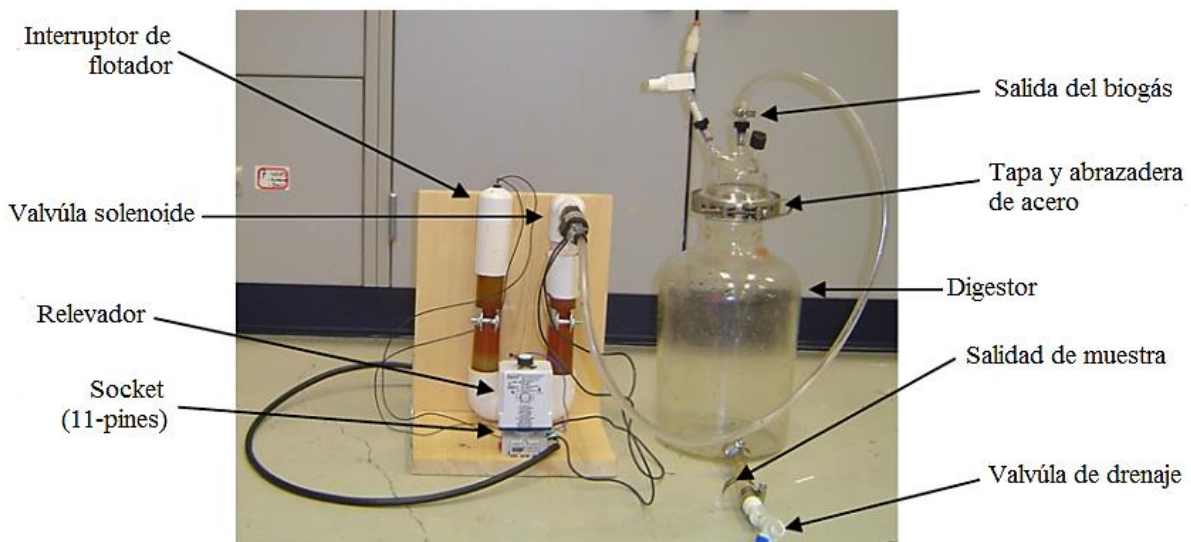


Fig. 12. Medidor de gas propuesto (Abhay y Pratap, 2008)

### 3.2. Condiciones de alimentación y seguimiento

Diariamente se dosificaron los reactores anaerobios con 50% de vinaza (450 mL) y 50% agua de la llave (450 mL) y adicionando 100 mL de una solución de sulfato ferroso  $0.01 \text{ mol L}^{-1}$  como sustrato para mantener la vida de los microorganismos dentro de los reactores, dando un volumen total de 1 L. Para el buen funcionamiento de un RALLFA en general es muy importante el seguimiento en forma periódica de ciertos parámetros que están estrechamente vinculados con la generación del biogás. Dichos parámetros son: temperatura, pH, DQO y ácidos grasos volátiles, los cuales son indicadores y dan una idea del desarrollo del proceso de generación de

biogás dentro de un reactor anaerobio, para lo cual cada propiedad tiene un intervalo de valores establecidos y se deben mantener estables para garantizar la buena y constante producción de biogás. También es importante la determinación de parámetros como la cantidad de metano y de dióxido de carbono contenidos en el biogás así como la temperatura de la llama generada por el mismo al quemarlo.

### **3.3. Parámetros para evaluar el funcionamiento de un RALLFA**

#### **3.3.1. Valores de pH (potencial hidrógeno)**

El pH es un parámetro de operación obligatorio, el cual indica si el reactor está operando en un medio ácido o básico. En general, un reactor debe estar operando en un medio neutro para asegurar que las condiciones sean las adecuadas para mantener a las arqueas (organismos metanogénicos) en un ambiente idóneo para su supervivencia y reproducción. Para asegurar un proceso exitoso, el valor de pH debe oscilar entre 6.5 y 7.5. Para ello, es necesario realizar la medición de pH la cual se realizó en esta investigación utilizando un potenciómetro marca Orion modelo 720A, el cual está conformado por un electrodo que mide la diferencia de potencial dentro de la muestra y, con base en esa diferencia, se mide la concentración de iones hidrógeno en la muestra.

#### **3.3.2. Demanda química de oxígeno (DQO)**

La demanda química de oxígeno, DQO, mide la porción de materia orgánica sea biodegradable o no, en una muestra que es susceptible a oxidación por un fuerte oxidante químico. Para ello, se realizaron las mediciones empleando el método colorimétrico de flujo cerrado (Oaxaca-Grande, 1997). Generalmente, esta prueba se realiza para establecer una comparación entre el influente y el efluente y así determinar la carga orgánica que queda dentro del RALLFA y la diferencia posiblemente se esté convirtiendo en biogás y en biomasa anaerobia.

### 3.3.3. Temperatura

La temperatura dentro de los RALLFA es un parámetro de los más importantes para la óptima producción de biogás en cualquier reactor anaerobio. Existen diferentes intervalos de temperatura de funcionamiento, entre los que se tienen los mesofílicos (25-35°C) y los termofílicos (>35°C), que son los más comúnmente utilizados. La temperatura deberá mantenerse lo más constante posible, ya que las fluctuaciones perjudican en gran medida la acción bacteriana que se desarrolla dentro del reactor y que es la responsable de la biodegradación. La forma más sencilla para lograr que la temperatura dentro de un biodigestor a nivel de laboratorio se mantenga constante día y noche es recubriéndolo con un material aislante. Las mediciones de temperatura deberán ser periódicas, llevando así en una libreta de bitácora los registros verificando que no existan cambios bruscos que afecten la productividad de las bacterias y que lleguen incluso a morir.

### 3.3.4. Fosfatos

En la evaluación de este parámetro, debido a la elevada solubilidad de los abonos inorgánicos que están constituidos por diversas clases de fosfatos solubles, entre los más comunes, los aniones meta- ( $\text{PO}_3^{3-}$ ), piro- ( $\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$ ) y ortofosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), son arrastrados fácilmente por las aguas superficiales hacia ríos, acuíferos, etc. (Harris, 2001) y, por tanto, la parte importante de fosfatos deriva de que las vinazas provienen de las mieles incristalizables que se originaron del jugo de la caña de azúcar y que contienen el fósforo adicionado durante el desarrollo de la caña en el campo (Rincón-Acelas, 2006). Para esta determinación, de la dilución base se tomaron 0.5 mL de cada muestra y se les adicionaron 10 mL de agua destilada. Posteriormente, se adicionaron 0.6 mL de los siguientes reactivos en el orden en que se presentan: ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), metavanadato de amonio ( $\text{NH}_4\text{VO}_3$ ) y molibdato de amonio ( $[\text{NH}_4]_6 \text{Mo}_7 \text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  5%), se agitó en el *vórtex* por 2 minutos aproximadamente y se tomó la lectura en un espectrofotómetro de la marca Spectronic modelo 21D a  $\lambda$  de 470 nm.

### **3.3.5. Sulfatos**

El método empleado para esta determinación fue el método turbidimétrico obtenido de los métodos estandarizados de APHA-AWWA-WPCF (1985) y que corresponde a la referencia 4500-SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> E. Para ello, la muestra fue tratada con 0.25 g de cloruro de bario (BaCl<sub>2</sub>), formándose un precipitado de BaCl<sub>2</sub>. A 1 mL de la muestra de los efluentes de cada uno de los RALLFA, se le agregaron 0.5 mL de ácido clorhídrico (HCl 6N) y se llevaron a un aforo de 25 mL. Posteriormente, se adicionó la cantidad mencionada de BaCl<sub>2</sub> y se agitó durante 2 minutos aproximadamente en un “vórtex”, finalmente, para leer las muestras se usó un espectrofotómetro marca Spectronic modelo 21D a una  $\lambda$  de 420 nm.

### **3.3.6. Nitratos**

El nitrato es una de las formas de nitrógeno de mayor interés en las aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Se presenta generalmente a nivel de trazas en el agua superficial, pero puede alcanzar niveles elevados en las subterráneas (DOF, 2001). Para el análisis de este parámetro se emplearon 0.5 mL de una dilución de la muestra de efluentes previamente realizada de 1:100 más 1 mL de ácido salicílico [6H<sub>4</sub> (OH) (OOH)] más 10 mL de hidróxido de sodio (NaOH) y la lectura de absorbancia a una  $\lambda$  de 410 nm, la cual fue medida en el mismo espectrofotómetro de la marca Spectronic modelo 21D.

### **3.3.7. Generación de biogás corregido a condiciones reales de trabajo**

Para calcular la generación de biogás corregida a condiciones reales de trabajo mediante el sistema implementado por desplazamiento de agua, se usó la ecuación (2) de los gases ideales y la ecuación (3) de la densidad del gas, ya que las condiciones reales de trabajo a las que se llevaron a cabo los experimentos fueron las de la Ciudad de México, a una presión de 0.76 atm y la temperatura de los reactores, que fue diferente para cada RALLFA:



$$PV = nRT \quad (2)$$

y

$$\rho_{CH_4} = \frac{m}{V} \quad (3)$$

donde:

$$\rho_{CH_4} = 0.68 \text{ kg m}^{-3}$$

$$m = 16.043 \text{ g mol}^{-1} \text{ de CH}_4$$

P, T = presión atmosférica (atm) y temperatura (°C), n= número de moles

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

### 3.3.8. Volumen teórico de metano a partir del biogás experimental

La producción del volumen teórico de metano a partir del biogás experimental corregido se calculó tomando en cuenta una composición para el metano de 62% en el biogás, dando como resultado que el 38% restante de su composición correspondiera a un 25% de CO<sub>2</sub>, 10% de H<sub>2</sub>S y un 3% de H<sub>2</sub> (Bernal-González *et al.*, 2012a,b).

Esta parte fue corroborada en otra investigación paralela en la que se montó la metodología de cuantificación de metano en el biogás por métodos cromatográficos (Poblano-Flores, 2015).

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

Para determinar la producción de metano a partir de la remoción de DQO en el proceso se ha desarrollado una ecuación empírica (5) para metano (Torres-Lozada y Pérez, 2010). El factor de corrección para la temperatura y presión puede calcularse por medio de la ecuación 4:

$$K(t) = \frac{K1.P}{R.(273.15+T)} \quad (4)$$

donde:

$K(t)$  = factor de corrección (g DQO/L)

$P$  = presión atmosférica (atm)

$T$  = temperatura operacional (°C)

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

$K_1$  = gramos DQO por 1 mol de  $CH_4$  (64 gramos DQO / mol  $CH_4$ )

El volumen teórico del metano puede calcularse con la siguiente expresión (Torres-Lozada y Pérez, 2010):

$$V_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K(t)} \quad (5)$$

donde:

$V_{CH_4}$  = volumen teórico de  $CH_4$  liberado (en litros)

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

### **3.4. Análisis estadístico de los datos experimentales (mediciones de las variables estudiadas)**

Con los resultados que se obtuvieron mediante los días de experimentación se realizó un análisis estadístico para cada una de las determinaciones que se muestran a continuación, con la finalidad de facilitar el tratamiento de los datos y con esto determinar la existencia de alguna diferencia entre los parámetros medidos en la experimentación, con un 5% ( $p < 0.05$ ), utilizando el software Statgraphics Centurion XVI versión 16.2.04 (32 bits).

En este capítulo sobre la Metodología se presentan a continuación los datos provenientes del análisis estadístico de las mediciones de las variables estudiadas en esta investigación para hacer el seguimiento del desempeño de los reactores con objeto de presentar en el siguiente capítulo, de Resultados y discusión, solamente lo más relevante al objetivo de esta investigación.

Las tablas de análisis de varianza, ANDEVA (ANOVA, en inglés) divide la variabilidad que existe en las mediciones experimentales entre los RALLFA.

1. Un componente “intra grupos”, que mide la variabilidad de las mediciones experimentales en un mismo reactor.
2. Un componente “entre grupos”, que mide la variabilidad de las mediciones experimentales entre los tres reactores.

De particular importancia es la razón de F, que prueba la hipótesis nula

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_q$$

*versus* la hipótesis alterna

$H_A$ : no todas las  $\mu_j$  son iguales

Si F es lo suficientemente grande, se rechaza la hipótesis nula.

La significancia estadística de la razón de F es mucho más fácil de juzgar por su valor de P. Si el valor de P es menor que 0.05, la hipótesis nula de medias iguales se rechaza al nivel de significancia del 5% y se determina que existe diferencia estadísticamente significativa.

### **3.4.1. Valores de pH**

En el análisis estadístico que se realizó para el parámetro de pH se encontraron los resultados listados en las Tablas 6, 7 y en la Fig. 13, donde se dan los datos y se aprecia que si existe diferencia significativa ( $p < 0.05$ ).

**Tabla 6. Resumen estadístico para el parámetro de pH**

RALLFA	Recuento	Promedio	Mediana	Desviación estándar	Coefficiente de variación
45°C	30	7.571	7.590	0.0595664	0.786494%
55°C	30	7.726	7.735	0.0364534	0.471848%
65°C	30	7.875	7.885	0.0292138	0.370969%

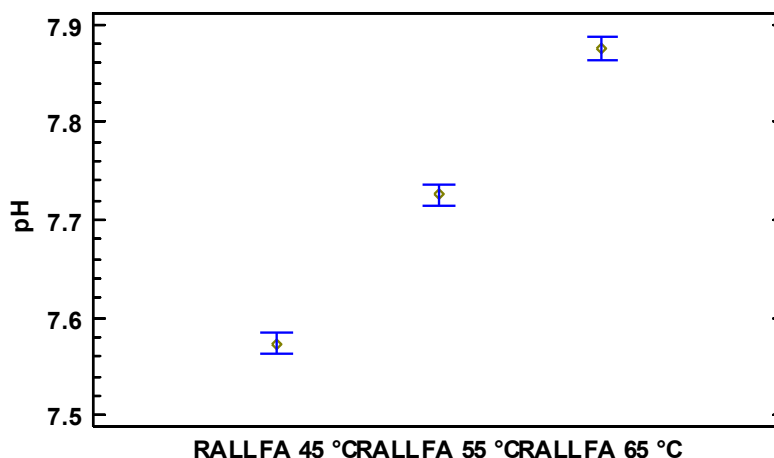
**Tabla 7. Análisis de varianza, ANOVA, para pH por reactor**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	1.36206	2	0.681031	<b>356.53</b>	<b>*0.0000</b>
Intra grupos	0.166183	87	0.001910		

\*indica que existe una diferencia significativa

G

**Medias y 95.0% de Fisher LSD**



**Fig. 13. Valores de pH versus tipo de reactor (RALLFA)**

La Tabla 7 descompone la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso fue igual a 356.532, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F fue menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 3 variables con un nivel del 95.0% de confianza.

### 3.4.2. Valores de DQO

En el análisis estadístico que se realizó para el parámetro de DQO se encontraron los resultados presentados en las Tablas 8, 9 y en la Fig. 14.

**Tabla 8. Resumen estadístico para el parámetro de DQO**

RALLFA	Recuento	Promedio	Mediana	Desviación estándar	Coefficiente de variación
45°C	30	35.9854	36.0004	0.896276	2.49067%
55°C	30	25.1494	25.1634	0.791773	3.14828%
65°C	30	8.14555	7.54901	2.10933	25.8954%

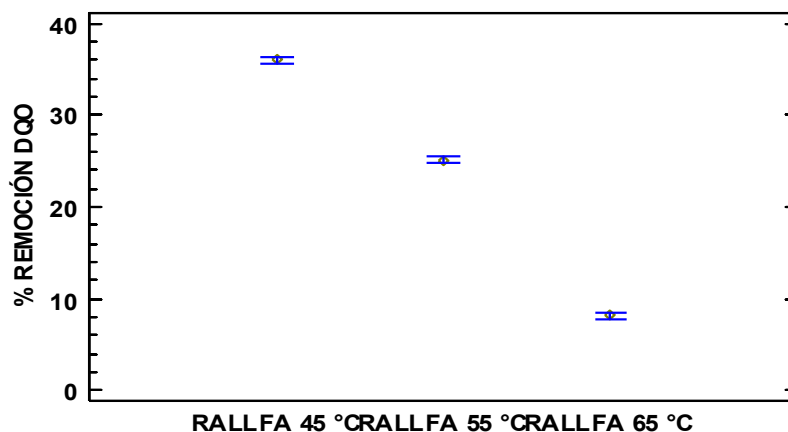
**Tabla 9. Análisis de varianza, ANOVA, para DQO por reactor**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	11816.1	2	5908.04	<b>3014.57</b>	<b>*0.0000</b>
Intra grupos	170.505	87	1.95983		

\*indica que existe una diferencia significativa  
Gl grados de libertad

Para el parámetro de DQO, el análisis de los datos se muestra en la Tabla 9. En ella se aprecia que descompone la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso fue igual a 3014.57, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F fue menor que 0.05, se aprecia que si existe una diferencia estadísticamente significativa entre las

**Medias y 95.0% de Fisher LSD**



**Fig. 14. Porcentaje de remoción de DQO versus tipo de reactor (RALLFA)**

### 3.4.3. Temperatura

En el análisis estadístico que se realizó para el parámetro de temperatura (medidas diariamente) se encontraron los resultados de las Tablas 10, 11 y la Fig. 15.

**Tabla 10. Resumen estadístico para el parámetro de temperatura**

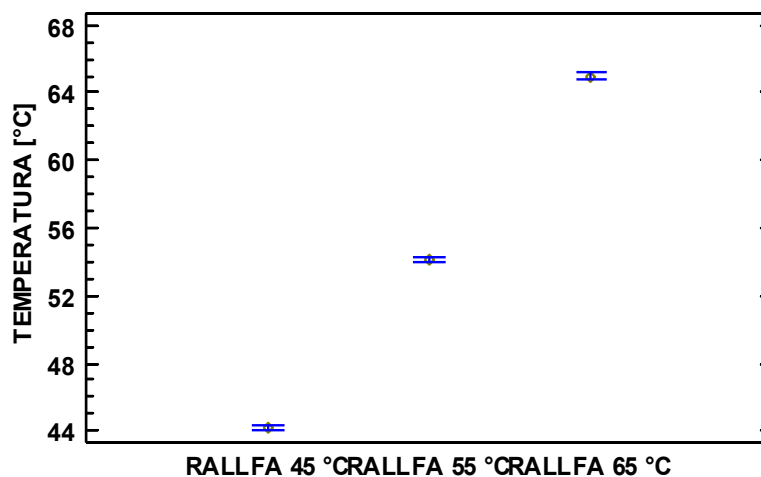
RALLFA	Recuento	Promedio	Mediana	Desviación estándar	Coefficiente de variación
45°C	30	44.2333	44.0	0.773854	1.74948%
55°C	30	54.1333	54.0	0.730297	1.34907%
65°C	30	63.00	63.0	1.33907	2.1255%

**Tabla 11. Análisis de varianza, ANOVA, para temperatura por reactor**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	5288.16	2	2644.08	<b>2711.61</b>	<b>*0.0000</b>
Intra grupos	84.8333	87	0.975096		

\*indica que existe una diferencia significativa  
Gl grados de libertad

**Medias y 95.0% de Fisher LSD**



**Fig. 15. Temperatura versus tipo de reactor (RALLFA)**

El resumen estadístico mostrado en la Tabla 10 presenta una desviación estándar y un coeficiente de variación de cada uno de los reactores y la Tabla 11 descompone la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso fue igual a 2711.61, es

el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F fue menor que 0.05, si existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 3 variables con un nivel del 5% de significación.

#### 3.4.4. Fosfatos

El análisis estadístico que se realizó para el parámetro de fosfatos, los resultados están listados en las Tablas 12, 13 y en la Fig. 16.

**Tabla 12. Resumen estadístico para el parámetro de fosfatos**

RALLFA	Recuento	Promedio	Mediana	Desviación estándar	Coefficiente de variación
45°C	30	1671.78	1670.21	21.4874	1.2853%
55°C	30	1858.99	1857.95	19.6759	1.05842%
65°C	30	2032.12	2030.04	13.4605	0.662387%

**Tabla 13. Análisis de varianza, ANOVA, para fosfatos por reactor**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	1.94873E6	2	974365.	<b>2837.86</b>	<b>*0.0000</b>
Intra grupos	29871.0	87	343.345		

\*indica que existe una diferencia significativa

Gl grados de libertad

En las Tablas 12 y 13 se observa un resumen del análisis estadístico de los datos de este parámetro. En este análisis de datos se evalúan las desviaciones estándar dentro de cada uno de los 3 reactores. Así mismo, se observa que en la Tabla 13, se descompone la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos.

La razón-F, que en este caso fue igual a 2837.86, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F fue menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 3 variables con un nivel del 95.0% de confianza.

Medias y 95.0% de Fisher LSD

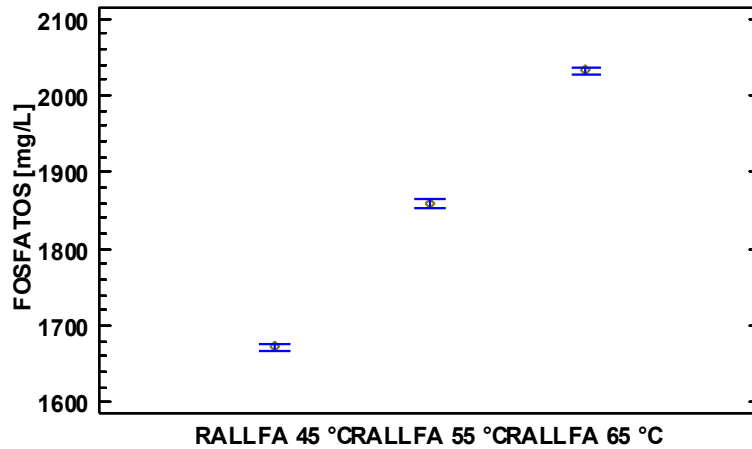


Fig. 16. Fosfatos versus tipo de reactor (RALLFA)

3.4.5. Sulfatos

En el análisis estadístico que se realizó para el parámetro de sulfatos se encontraron los resultados presentados en las Tablas 14, 15 y en la Fig. 17.

Tabla 14. Resumen estadístico para el parámetro de sulfatos

RALLFA	Recuento	Promedio	Mediana	Desviación estándar	Coefficiente de variación
45°C	30	237.5	237.5	21.7747	9.1683%
55°C	30	452.5	462.5	24.2117	5.35065%
65°C	30	540.833	537.5	19.402	3.58742%

Tabla 15. Análisis de varianza, ANOVA, para sulfatos por reactor

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	1.46039E6	2	730194.	<b>1524.65</b>	<b>*0.0000</b>
Intra grupos	41666.7	87	478.927		

\*indica que existe una diferencia significativa; Gl: grados de libertad

El registro de los datos de sulfatos analizados con el software Statgraphics muestra la tabla de andeva (ANOVA) que descompone la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso fue igual a 1524.65, puesto que el valor-P de la prueba-F fue menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 3 variables con un nivel del 95.0% de confianza.



Medias y 95.0% de Fisher LSD

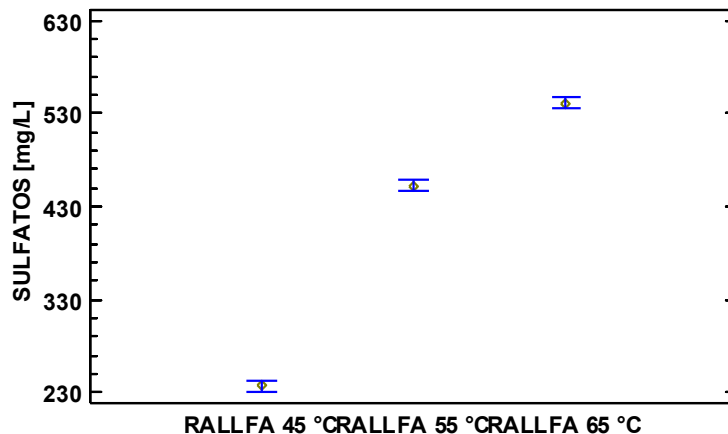


Fig. 17. Sulfatos versus tipo de reactor (RALLFA)

### 3.4.6. Nitratos

En el análisis estadístico que se realizó para el parámetro de nitratos los resultados encontrados se listan en las Tablas 16, 17 y en la Fig. 18.

Tabla 16. Resumen estadístico para el parámetro de nitratos

RALLFA	Recuento	Promedio	Mediana	Desviación estándar	Coefficiente de variación
45°C	30	95.9537	96.41	0.863555	0.899971%
55°C	30	109.475	109.31	0.797097	0.728109%
65°C	30	115.43	115.36	0.794273	0.688099%

Tabla 17. Análisis de varianza, ANOVA, para nitratos por reactor

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	5976.16	2	2988.08	<b>4455.48</b>	<b>*0.0000</b>
Intra grupos	58.3468	87	0.670653		

\*indica que existe una diferencia significativa; Gl grados de libertad

Los estadísticos mostrados en las Tablas 16 y 17 evalúan la hipótesis nula de que las desviaciones estándar dentro de cada una de las 3 columnas son iguales. De particular interés es el valor-P, puesto que el valor-P de la prueba-F fue menor que 0.05, si existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 3 variables con un nivel del 95.0% de confianza.

### Medias y 95.0% de Fisher LSD

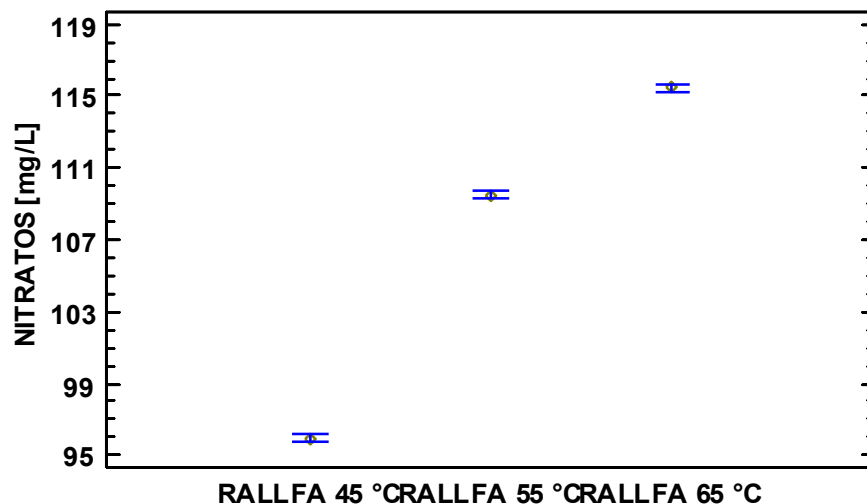


Fig. 18. Nitratos *versus* tipo de reactor (RALLFA)

#### 3.4.7. Biogás corregido a condiciones reales de trabajo

Los datos obtenidos experimentalmente del sistema construido para medir la cantidad de biogás producido por cada uno de los tres reactores son los que se analizan estadísticamente en este inciso.

Debe mencionarse que el sistema construido no es exactamente igual al que se mostró en la Fig. 12, pero su principio de operación sí es el mismo.

Tabla 18. Resumen estadístico para el parámetro de biogás corregido a las condiciones de la Ciudad de México y de cada reactor

RALLFA	Recuento	Promedio	Mediana	Desviación estándar	Coefficiente de variación
45°C	30	8.16	8.16	0.183585	2.24982%
55°C	30	5.926	5.91	0.198644	3.35207%
65°C	30	2.97367	2.95	0.153679	5.16798%

**Tabla 19. Análisis de varianza, ANOVA, para biogás corregido por reactor**

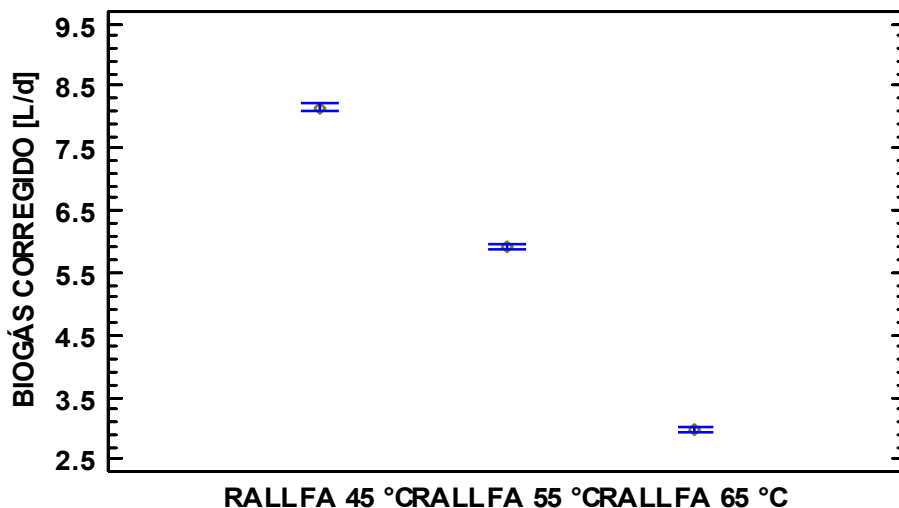
Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	406.051	2	203.025	<b>6293.42</b>	<b>*0.0000</b>
Intra grupos	2.80662	87	0.03226		

\*indica que existe una diferencia significativa  
Gl grados de libertad

En el caso de la experimentación y análisis de datos para la producción de biogás obtenido durante el proceso de digestión o degradación anaerobia se observa el análisis estadístico mostrado en las Tablas 18 y 19 muestra la razón-F, que en este caso fue igual a 6293.42, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos.

Dado el valor-P de la prueba-F fue menor que 0.05, si existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 3 variables con un nivel de significancia del 5%. Su representación gráfica es la Fig. 19.

**Medias y 95.0% de Fisher LSD**



**Fig. 19. Volumen de biogás en litros por día corregido a las condiciones de la Ciudad de México y las temperaturas de cada uno de los RALLFA en estudio**

## Capítulo 4

### Resultados y discusión

#### 4.1. Caracterización de la vinaza cruda

La muestra de agua residual provino de un ingenio azucarero cooperante. Las vinazas se almacenaron en un cuarto frío a 4°C para mantener sus características lo más constantes posible. Se realizó una caracterización de las vinazas empleadas de acuerdo con las metodologías ya descritas en el capítulo anterior. En la Tabla 20 se muestra esta caracterización.

**Tabla 20. Caracterización de las vinazas**

Parámetro	Resultados*
pH	4.7 ± 0.285
Nitratos [g L <sup>-1</sup> ]	0.218 ± 0.001
Fosfatos [g L <sup>-1</sup> ]	4.330 ± 0.102
DQO [g L <sup>-1</sup> ]	72.540 ± 0.500
Sulfatos [g L <sup>-1</sup> ]	1.569 ± 0.034

\*son el promedio de 3 determinaciones

Como se puede observar de los valores presentados en la Tabla 20, la DQO (72.5 g DQO L<sup>-1</sup>) muestra una concentración alta de materia orgánica (como se dijo en el segundo capítulo, de 80 a 120 g DQO L<sup>-1</sup>). Como la norma NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1996), que se refiere a la disposición de aguas residuales, estableciendo los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, no cuenta ya este parámetro, sino solamente el de la demanda bioquímica de oxígeno, se revisó la caracterización hecha por Rincón-Acelas en 2006, en la que se obtuvo una DBO de 98.25 g DBO L<sup>-1</sup>, con una DQO de 116.25 g DQO L<sup>-1</sup>, para el lote de vinazas proveído por el ingenio cooperante, queda claro que la DBO debe exceder considerablemente a dicha norma, ya que indica en su Tabla 2 (DOF, 1996), que debe ser menor a 200 mg L<sup>-1</sup>, por lo que cualquier sistema existente para tratar vinazas, deberá remover el 99.8% de materia orgánica soluble, para cumplir con esa legislación.

A continuación se listan los resultados de los parámetros de seguimiento de los RALLFA en estudio.

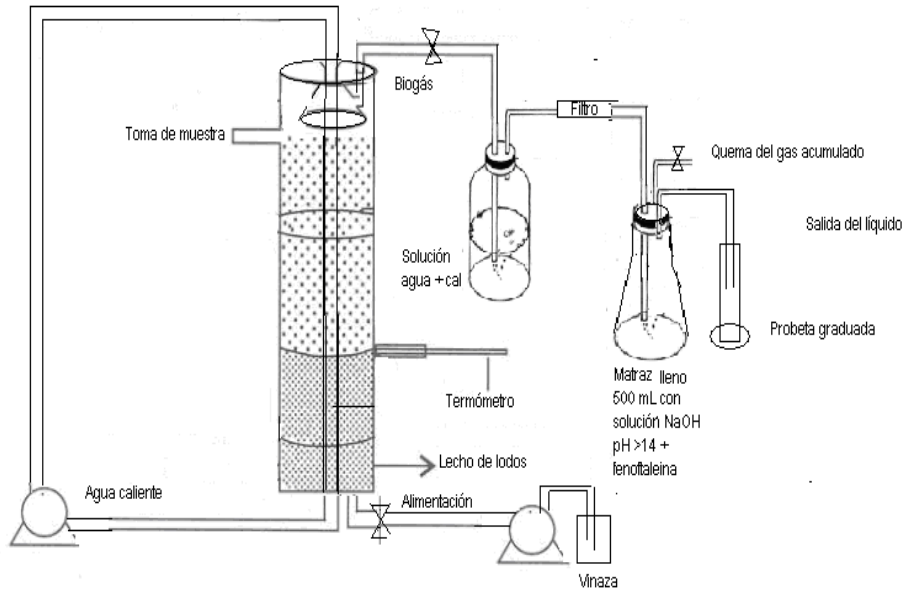
## **4.2. Producción de biogás en los RALLFA**

### **4.2.1. Producción experimental de biogás**

Los volúmenes obtenidos directamente del sistema por desplazamiento de agua implementado (Figuras 20 a 22) fueron de  $11.88 \pm 0.08_{45^{\circ}\text{C}}$ ,  $8.90 \pm 0.09_{55^{\circ}\text{C}}$  y  $4.60 \pm 0.61_{65^{\circ}\text{C}}$  L biogás experimental  $\text{d}^{-1}$ . Los volúmenes obtenidos a lo largo de los experimentos se muestran en la Tabla A1 del Anexo 1. Aquí el reactor más eficiente para la producción de biogás por desplazamiento de agua nuevamente fue el reactor que opera a  $45^{\circ}\text{C}$  ya que se obtuvieron poco más de 11.5 L biogás experimental  $\text{d}^{-1}$ . Esto pudiera deberse a que las arqueas metanogénicas que son las encargadas de la degradación anaerobia para dar como producto gaseoso  $\text{CH}_4$  se encontraron aparentemente con una mayor estabilidad y para su reproducción a  $45^{\circ}\text{C}$  ya que un descenso o ascenso en la temperatura puede provocar periodos de reproducción mayor para las arqueas metanogénicas y de esta manera puede verse afectada directamente la producción de biogás.

### **4.2.2. Producción de biogás corregida a condiciones reales de trabajo**

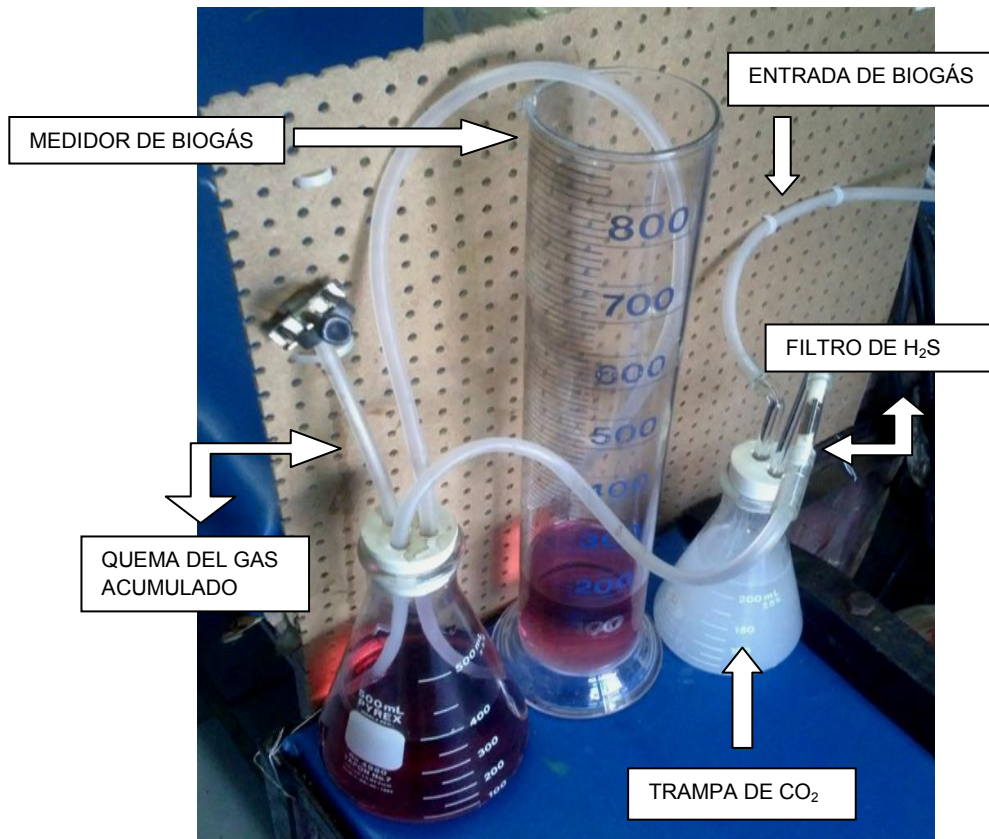
La producción de biogás corregido a condiciones reales de trabajo mediante el sistema de desplazamiento de agua fue de  $8.16 \pm 0.05_{45^{\circ}\text{C}}$ ,  $5.93 \pm 0.06_{55^{\circ}\text{C}}$  y  $2.97 \pm 0.40_{65^{\circ}\text{C}}$  L biogás experimental corregido  $\text{d}^{-1}$ . Cabe mencionar que ese volumen del biogás corregida bajo condiciones reales de trabajo no equivale al 100% de metano. En esta investigación se consideró que 62% de la composición de este gas era  $\text{CH}_4$ , como se mencionó en el inciso 3.3.8 del capítulo anterior. Los valores de biogás corregidos se obtuvieron a partir de la producción de biogás experimental descrito en el capítulo anterior con las ecuaciones (2) y (3).



**Fig. 20. Diagrama del RALLFA con trampa de CO<sub>2</sub>, filtro de H<sub>2</sub>S y medidor de biogás por desplazamiento de agua (Flores, 1993)**



**Fig. 21. Fotografía de RALLFA a 45°C con trampa de CO<sub>2</sub>, filtro de H<sub>2</sub>S y medidor de biogás por desplazamiento de agua**



**Fig. 22. Fotografía del sistema de desplazamiento de solución acuosa implementado**

Estos resultados para la producción de biogás corregido se muestran en la Tabla A2 en el Anexo 2. Su representación gráfica es la Figura 23. Cabe mencionar que la composición del biogás depende del tipo de desecho utilizado. Respecto del análisis estadístico para la producción de biogás, corregido entre los RALLFA, muestra diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) por lo que se determina que son distintos en la forma de operar estadísticamente hablando, ya que la Figura 23 muestra una clara y mejor producción de biogás en el reactor que opera a  $45^{\circ}\text{C}$  respecto de los otros dos reactores que operan a las otras condiciones de temperatura en estudio. Esto puede deberse a que a temperaturas mayores o iguales a  $55^{\circ}\text{C}$  la formación del biogás en los reactores se ve disminuida ya que los consorcios microbianos que degradan la materia orgánica produciendo dicho biogás, en sistemas termofílicos a  $65^{\circ}\text{C}$  se comportan de manera inestable reduciendo las posibilidades de una mayor cantidad del producto de interés en esta investigación, que es el biogás.

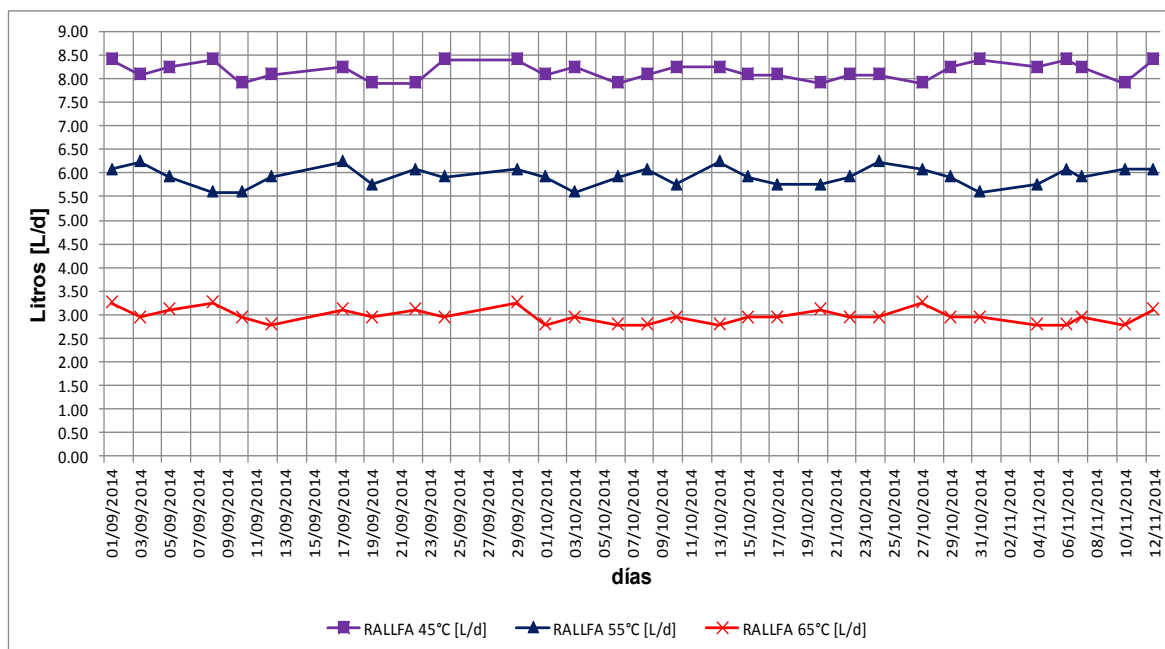


Fig. 23. Generación de biogás experimental corregido versus días de experimentos

#### 4.2.3. Producción teórica de CH<sub>4</sub> en función de la DQO removida

La producción teórica de metano en los tres reactores durante el tiempo de pruebas resultaron ser de  $7.91 \pm 0.50_{45^{\circ}\text{C}}$ ,  $5.70 \pm 0.21_{55^{\circ}\text{C}}$  y  $1.90 \pm 0.93_{65^{\circ}\text{C}}$  L CH<sub>4</sub> d<sup>-1</sup> manteniendo prácticamente constante la producción teórica de metano en los tres RALLFA, tal y como lo muestra la Figura 24. Para esta determinación se encontraron pequeñas variaciones para cada reactor, no mayores a 0.5 L. Dicha producción teórica de metano se obtuvo directamente de la conversión de compuestos carbonosos medidos como demanda química de oxígeno soluble a metano y CO<sub>2</sub>. Nuevamente se observó que la producción de metano teórica fue mayor para el RALLFA a 45°C teniendo una menor producción de CH<sub>4</sub> para el RALLFA que opera a 65°C. Dado que el propósito en esta investigación fue el potenciar la producción de metano, de acuerdo con estos resultados experimentales es mejor no exceder la temperatura de proceso de 55°C. Esto probablemente pudiera deberse a que la interacción entre las arqueas metanogénicas y los organismos sulfatorreductores dentro de los tres reactores se encuentran en competencia por la fuente de carbono, haciendo que se formen por un lado metano y por el otro ácido sulfhídrico como productos finales de la degradación anaerobia (Bernal-González *et al.*, 2012a,b;



Castro-González, 2004). Por ello, en esta investigación los resultados parecieron indicar que la mejor temperatura de operación fue la de 45°C. Los valores para esta determinación se presentan en la Tabla A3 del Anexo 3.

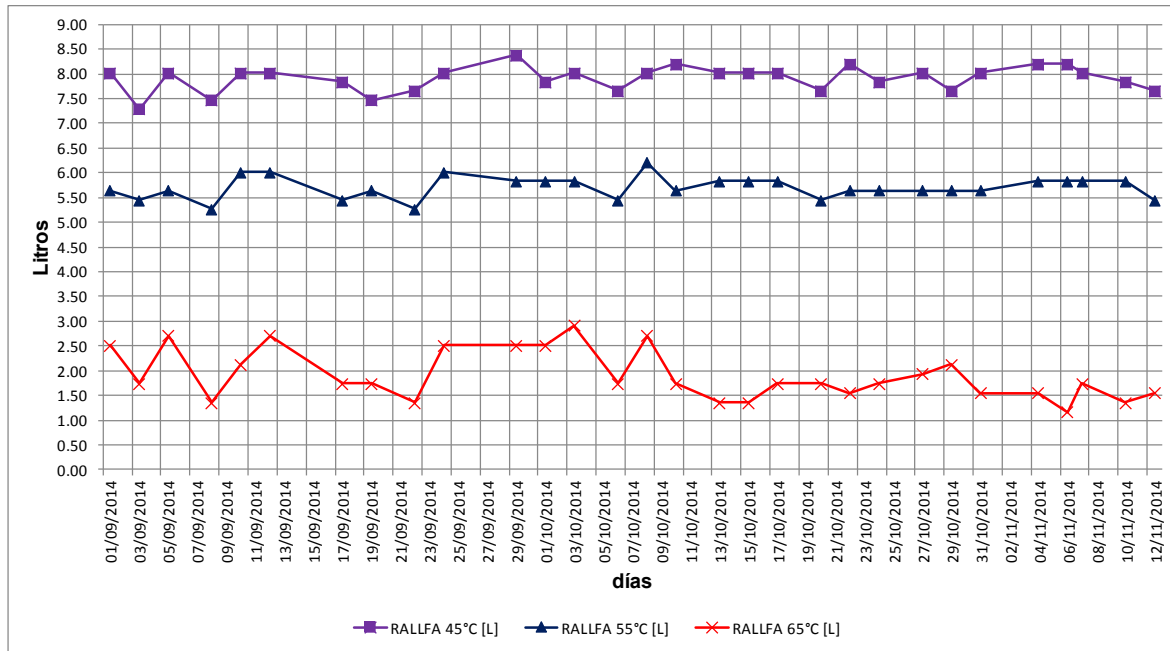


Fig. 24. Generación de CH<sub>4</sub> teórico versus días de experimentos

#### 4.2.4. Comparación de CH<sub>4</sub> experimental versus CH<sub>4</sub> corregida versus CH<sub>4</sub>DQO

Los datos de metano experimental se obtuvieron considerando que del biogás medido en el dispositivo construido en esta investigación y corregido por las condiciones de presión y temperatura de cada reactor, el 62% en promedio era metano (Bernal-González et al., 2012a,b; Poblano-Flores, 2015).

Los resultados registrados para CH<sub>4</sub> experimental Vs CH<sub>4</sub> corregida versus CH<sub>4</sub> DQO muestran diferencia entre ellos ya que el metano que se obtuvo mediante las mediciones experimentales del biogás por desplazamiento de agua fueron los resultados más altos, obteniendo de esta forma un volumen de  $7.36 \pm 0.04_{45^{\circ}\text{C}}$ ,  $5.52 \pm 0.05_{55^{\circ}\text{C}}$  y  $2.85 \pm 0.37_{65^{\circ}\text{C}}$  L CH<sub>4</sub> experimental d<sup>-1</sup>. A estos resultados se les realizó un ajuste mediante la ecuación (2) de los gases ideales ya que las condiciones de

presión y temperatura a las que se trabajaron fueron distintas (laboratorio ubicado en la Ciudad de México a 2300 m de altitud) y con esto el volumen de biogás experimental se vio corregido mediante dicha ecuación obteniendo así un volumen inferior para cada RALLFA, obteniendo  $5.05 \pm 0.03_{45^{\circ}\text{C}}$ ,  $3.67 \pm 0.03_{55^{\circ}\text{C}}$  y  $1.84 \pm 0.24_{65^{\circ}\text{C}}$  L  $\text{CH}_4$  corregido  $\text{d}^{-1}$  versus  $7.91 \pm 0.50_{45^{\circ}\text{C}}$ ,  $5.70 \pm 0.21_{55^{\circ}\text{C}}$  y  $1.90 \pm 0.95_{65^{\circ}\text{C}}$  L  $\text{CH}_4_{\text{DQO}}$   $\text{d}^{-1}$ .

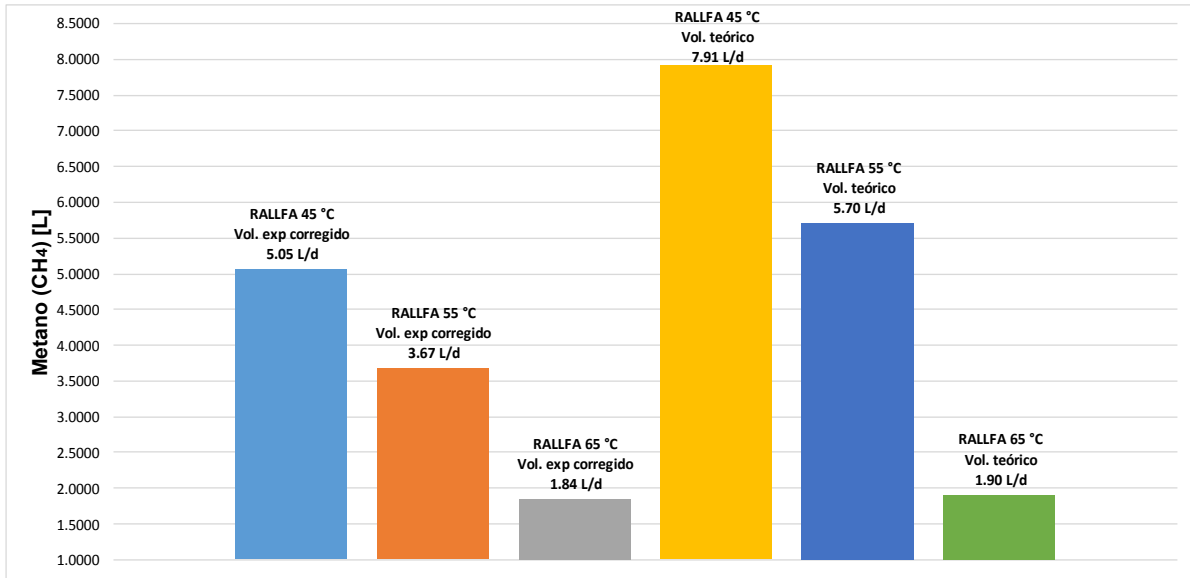
Como ya se mencionó, la variación que hubo entre el  $\text{CH}_4$  experimental versus  $\text{CH}_4$  corregido se debe a la modificación por medio de las ecuaciones (2) y (3), usando la presión de la Ciudad de México que es de 0.76 atm y usando la temperatura de proceso de cada uno de los RALLFA.

Al comparar los volúmenes de  $\text{CH}_4$  corregida vs  $\text{CH}_4_{\text{DQO}}$  también existió variación, ya que una parte de la materia orgánica medida como DQO no fue biodegradable, como pudo verse de la comparación entre la DBO y la DQO para las vinazas medida por Rincón-Acelas (2008).

Por esta razón, a esta cantidad de metano calculada a partir de la cantidad de materia oxidable de las vinazas medida como DQO se le denominó teórica.

Estos últimos valores se calcularon con las ecuaciones (4) y (5). Su representación gráfica se aprecia en la Figura 25, que compara los valores de  $\text{CH}_4$  corregido versus  $\text{CH}_4_{\text{DQO}}$ . La Tabla A4 del Anexo 4 muestra los resultados a partir del volumen de biogás obtenido experimentalmente y corregido, y del  $\text{CH}_4$  corregido.

A partir de los porcentajes de remoción en cada uno de los sistemas de tratamiento, fue evaluado el volumen teórico de metano y se comparó con el volumen de metano generado experimentalmente en cada uno de los tres sistemas que operaban bajo las diferentes temperaturas en estudio (considerando que representaba el 62% en mol de metano).



**Fig. 25. Comparación de CH<sub>4</sub> corregido versus CH<sub>4</sub> DQO**

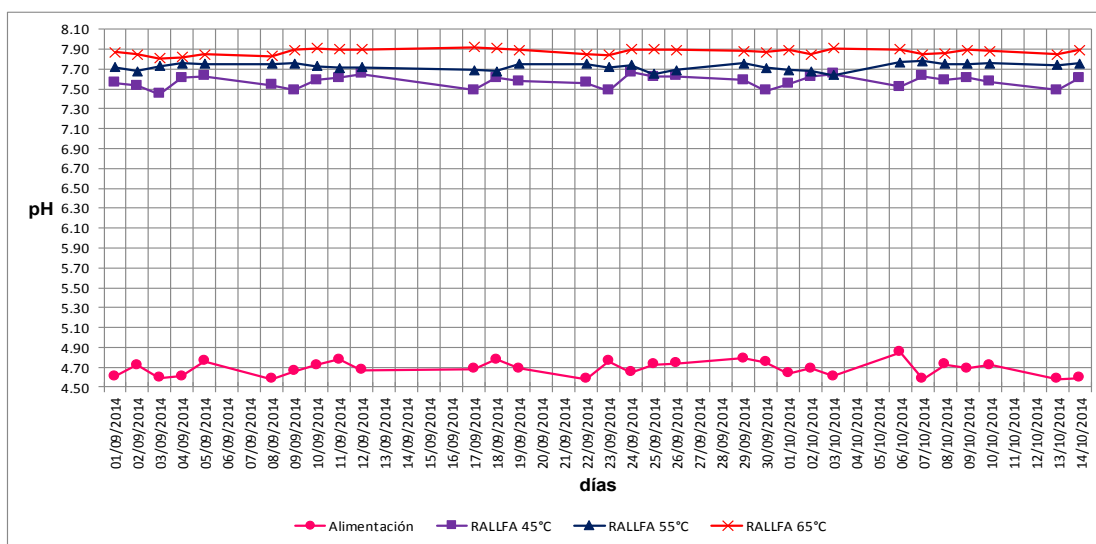
La desviación estándar promedio entre el valor experimental de CH<sub>4</sub> corregido y el CH<sub>4</sub> DQO teórico para cada sistema fue de 1.42<sub>45°C</sub>, 1.01<sub>55°C</sub> y 0.03<sub>65°C</sub>. Esto podría deberse por un lado a que una parte de la materia orgánica oxidable medida como DQO no fue biodegradable y no podría ser convertida a metano o a otros compuestos producto de la biodegradación microbiana. También podría deberse a que el sistema de medición experimental podría no encontrarse en condiciones estables, por lo que se pretende que esta investigación se continúe para implementar un sistema automático complementado con mediciones reales “en línea” de metano en el biogás producido. A continuación se listan los resultados de los otros parámetros de seguimiento de los RALLFA en estudio que sirvieron para evaluar su estabilidad.

### 4.3. Parámetros de seguimiento de los RALLFA

#### 4.3.1. Valores de pH

Los valores promedio de pH que se registraron para cada uno de los RALLFA fueron 7.57 ± 0.02<sub>45°C</sub>, 7.73 ± 0.04<sub>55°C</sub>, 7.88 ± 0.06<sub>65°C</sub>. Estos son valores muy recomendables para que la variedad de microorganismos que coexisten en el reactor se desarrollen

y establezcan un equilibrio dinámico entre todas las etapas del proceso que culmina con la producción de biogás rico en metano (Castro-González, 2004; Poblano-Flores, 2015). Estos resultados reflejaron que el sistema se encontraba estable. En la Tabla A5 del Anexo 5 se listaron los registros de todos los valores medidos de pH durante la experimentación. Los resultados mostrados en la Tabla A5 fueron tratados mediante el programa estadístico ya mencionado en la Metodología, corroborándose de esta forma que sí existió una diferencia estadísticamente significativa al comparar el desempeño de los reactores ya que, en este caso, se tuvo un valor-P menor que 0.05 entre los RALLFA. Esto indicaría que son significativamente diferentes con un nivel de confianza del 95%, siendo por tanto afectada esta variable de respuesta de manera significativa. En la Figura 26 se observa la representación gráfica del comportamiento prácticamente constante para cada uno de ellos.

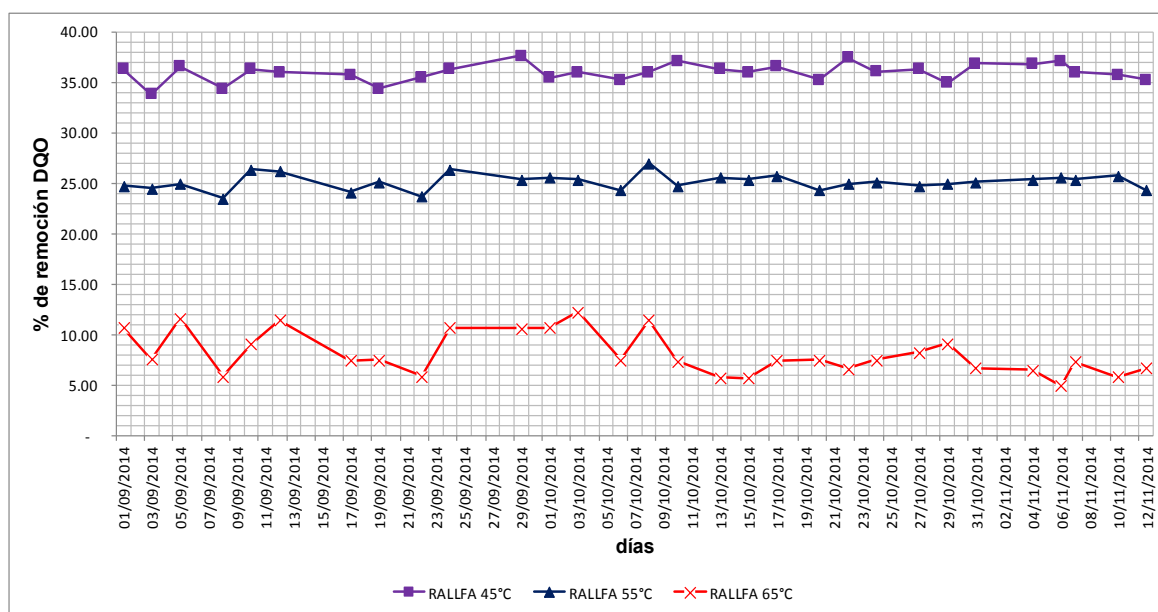


**Fig. 26. Valores de pH versus días de experimentos**

Otro detalle interesante fue la capacidad autorreguladora del sistema, probablemente debida a la producción de CO<sub>2</sub>, ya que se lograba subir el valor de pH inicial hasta valores circumneutros. Cabe recordar que la vinaza de alimentación se diluía al 50% con agua y se le agregaban 100 mL de sulfato ferroso para potenciar el desarrollo de los microorganismos.

### 4.3.2. Valores de DQO

En la presente investigación se observó un porcentaje de remoción de materia orgánica químicamente oxidable medida como demanda química de oxígeno (DQO) que iba desde  $35.99 \pm 2.03_{45^{\circ}\text{C}}$ ,  $25.15 \pm 0.73_{55^{\circ}\text{C}}$  hasta  $8.14 \pm 8.56_{65^{\circ}\text{C}}$  % removido, por lo cual se considera que este porcentaje de DQO removida está siendo convertido por los diferentes consorcios microbianos para obtener, entre otros, los compuestos de interés que forman el biogás. En la Figura 27 se observa claramente cómo los RALLFA durante el periodo de pruebas se encontraron estables no presentando grandes variaciones y alcanzando valores de DQO removida durante el proceso anaerobio de casi 15,000 mg DQO L<sup>-1</sup> para el RALLFA que operaba a 45°C.



**Fig. 27. Porcentaje de remoción de materia orgánica medida como DQO versus días de experimentos**

Dichos resultados se encuentran en la Tabla A6 del Anexo 6. Así mismo, se llevó a cabo el análisis de datos para poder determinar de esta manera cuál de los tres RALLFA era el que operaba de la manera más eficiente bajo las condiciones establecidas de temperatura. Los resultados mostraron que el RALLFA a 45°C fue significativamente diferente a los que operan a 55°C y 65°C RALLFA con respecto a este parámetro, mostrando de esta forma que el RALLFA a 65°C fue el que menos

remoción de materia orgánica tuvo. Esto indica que los RALLFA que operaron a 45 y 55°C fueron las mejores opciones para la remoción de materia orgánica, existiendo una mayor remoción de contaminantes en el RALLFA a 45°C. Estadísticamente fueron diferentes ( $p < 0.05$ ). Una explicación es la señalada en la literatura (Bernal-González et al., 2012b), donde un estudio microbiológico indica que hay diferencias en los organismos que proliferan a las tres temperaturas en estudio.

#### 4.3.3. Valores de temperatura

Durante los días de prueba, los valores registrados de temperatura para los RALLFA no variaron mucho. Por tal motivo los tres reactores presentaron un comportamiento estable, sin alterar a los consorcios microbianos contenidos dentro de cada uno de los reactores. Cabe mencionar que la literatura muestra que los sistemas termofílicos (a 65°C) generalmente presentan problemas de inestabilidad, dado que los microorganismos que pueden proliferar a esa temperatura son altamente sensibles a cambios en las condiciones de operación (Bernal-González *et al.*, 2012a,b). Tal es el caso del estudio comparativo entre los reactores en estudio. El reactor a 45°C tuvo una mejor eficiencia en la remoción de contaminantes en comparación con el de 55 y 65°C. En la Tabla A7 del Anexo 7 se observan más variaciones de temperatura para el RALLFA a 55°C. Esto se debe probablemente a un sesgo provocado por el hecho de que se usaba diariamente la bomba de dicho RALLFA para la alimentación de las vinazas de los 3 reactores desconectando el agua de calentamiento. Esto fue debido a que la bomba con la que se alimentaban los sistemas estuvo en reparación en el lapso de esta investigación. La representación gráfica para estos resultados se aprecian en la Figura 28. Los resultados fueron  $44.23 \pm 0.45_{45^{\circ}\text{C}}$ ,  $54.13 \pm 0.50_{55^{\circ}\text{C}}$  y  $63.00 \pm 0.83_{65^{\circ}\text{C}}$  °C Cabe mencionar que para este último la temperatura también tuvo algunas variaciones ya que el termómetro de este reactor se rompió y solamente se mantuvo la plancha de calentamiento como estaba antes de la ruptura para considerar que se tenía una temperatura cercana a 65°C. Asimismo, se medía la temperatura de la muestra de vinazas tratadas antes de realizar los análisis químicos con un termómetro de otro equipo y ésta estaba entre 61 y 64°C. El análisis

estadístico para este parámetro mostrado en el capítulo anterior indicó que sí hubieron diferencias significativas entre los RALLFA ( $p < 0.05$ ) y esto era de esperarse ya que cada reactor operaba a diferente temperatura y con valores muy cercanos a los de referencia.

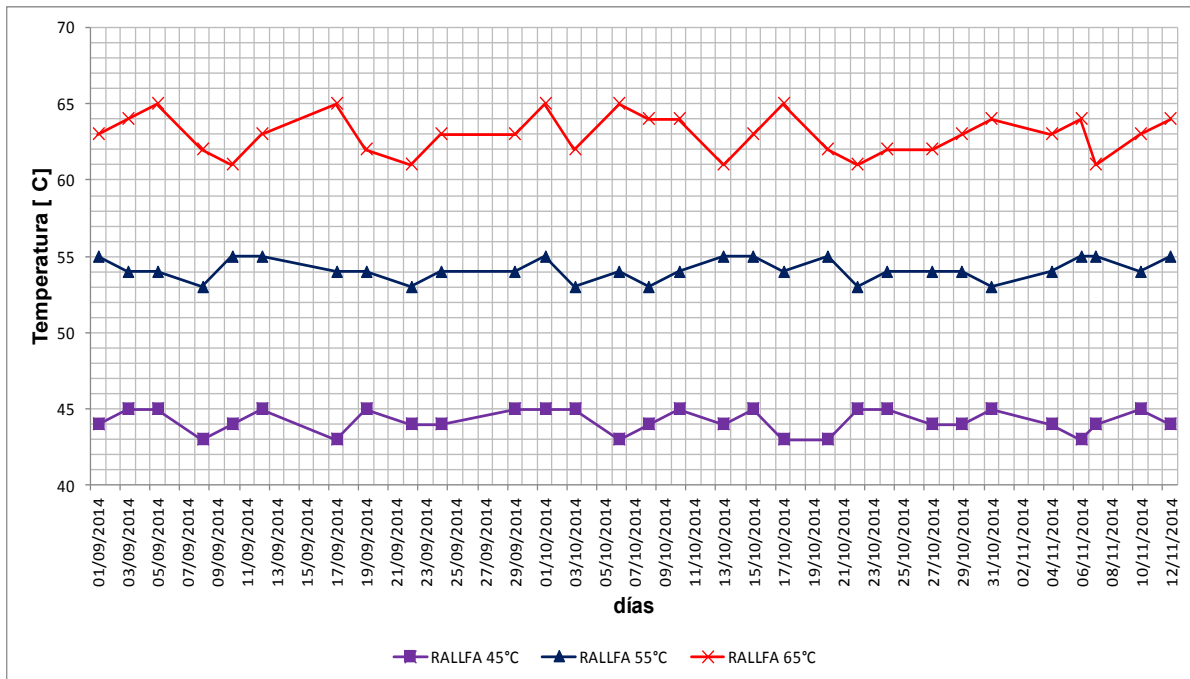


Fig. 28. Temperatura de los RALLFA versus días de experimentos

#### 4.3.4. Valores de fosfatos

La presencia de fosfatos en el proceso puede ser favorable para el desarrollo de los sistemas microbianos en los reactores ya que el fósforo constituye uno de los elementos fundamentales en los procesos metabólicos esenciales como el crecimiento, la división celular, la síntesis de energía y de componentes de la membrana (Ilangovan y Noyola, 1993). En la Figura 29 se muestra que el comportamiento de los RALLFA para esta variable fue similar al de los anteriores parámetros teniendo un comportamiento casi constante, siendo el reactor que operaba a 45°C el que resultó ser más eficiente para la remoción de iones fosfato, teniendo de esta manera los resultados siguientes  $1671.78 \pm 56.06_{45^{\circ}\text{C}}$ ,  $1858.99 \pm 53.71_{55^{\circ}\text{C}}$  y  $2032.12 \pm 6.78_{65^{\circ}\text{C}} \cdot \text{mg PO}_4^{-3} \text{ L}^{-1}$ . Estos resultados muestran que el RALLFA

con menor variación en su comportamiento fue el que opera a 65°C pero, desde el punto de vista de conversión de materia orgánica oxidable fue el más ineficiente. Según el análisis estadístico hubo diferencia significativa entre los RALLFA de 45, 55 y 65°C, obteniendo un valor-P menor a 0.05 por lo que se puede trabajar bajo cualquier de estas temperaturas, pero cabe mencionar que el reactor que opero a 45°C fue más eficiente para la remoción de este contaminante (ver Tabla A8 en el Anexo 8).

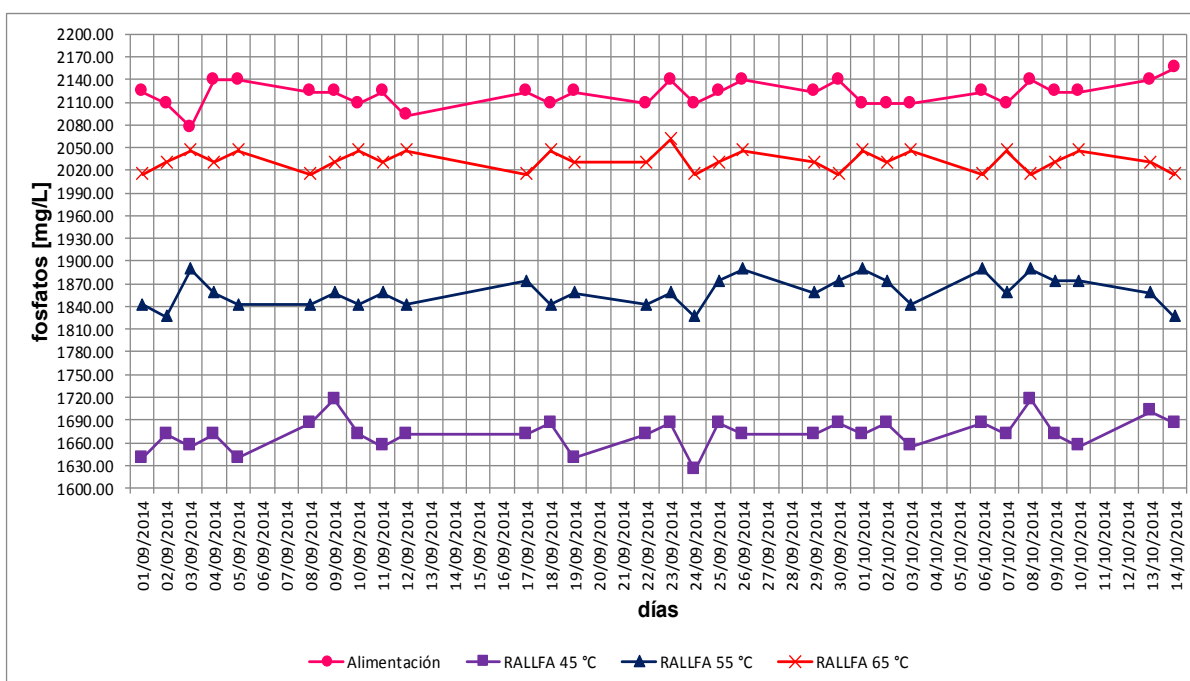


Fig. 29. Fosfatos versus días de experimentos

#### 4.3.5. Valores de sulfatos

Los resultados que se registraron para los sulfatos en la alimentación como en cada uno de los efluentes mostraron que la proliferación de bacterias sulfatohidrogenotróficas se encontraban en función de este sustrato por lo cual, el sistema se ve inhibido en cuanto a la producción de metano por parte de las arqueas metanogénicas como ya ha sido corroborado por Castro-González (2004). Los siguientes resultados fueron los obtenidos durante el periodo de experimentos  $237.50 \pm 63.33_{45^{\circ}\text{C}}$ ,  $452.50 \pm 75.00_{55^{\circ}\text{C}}$  y  $540.83 \pm 39.17_{65^{\circ}\text{C}}$ . mg  $\text{SO}_4^{-2} \text{L}^{-1}$ . La Tabla



A9 del Anexo 9 muestra los resultados durante el periodo de pruebas y su representación gráfica es la Figura 30. Los resultados del análisis estadístico muestran que si existe diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) entre la comparación de los RALLFA por lo que se puede realizar el tratamiento anaerobio de las vinazas a cualquier temperatura de proceso, cabe resaltar que la gráfica muestra al RALLFA a 45°C como el reactor que remueve más iones sulfatos. Cabe mencionar que tomando este parámetro resulta mejor trabajar bajo la condición de 45°C ya que se ven removidos más contaminantes de la vinaza.

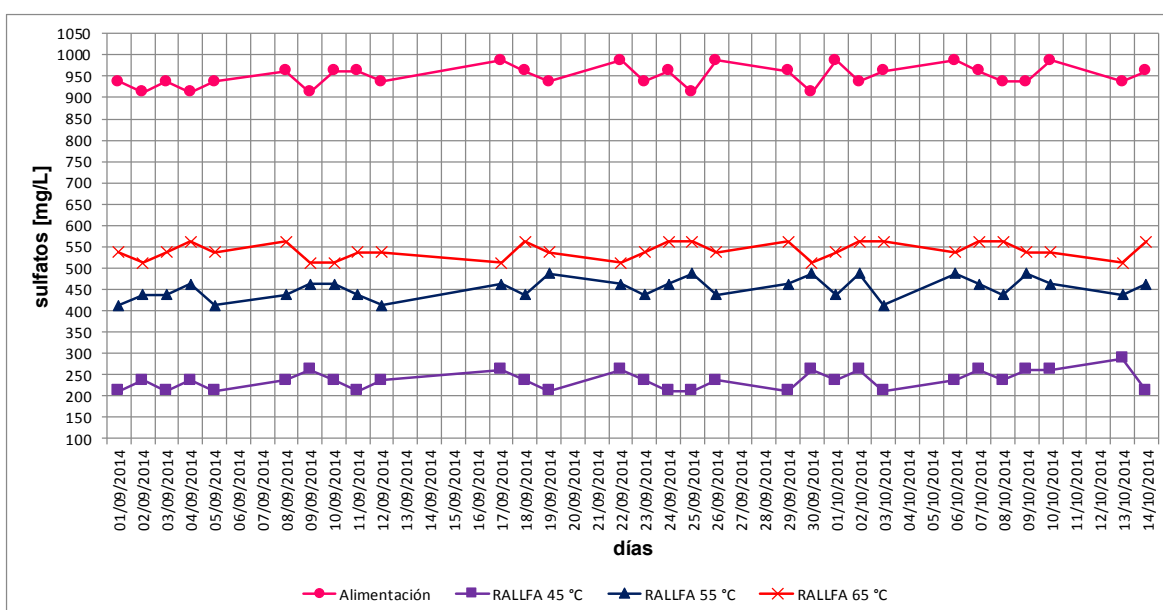
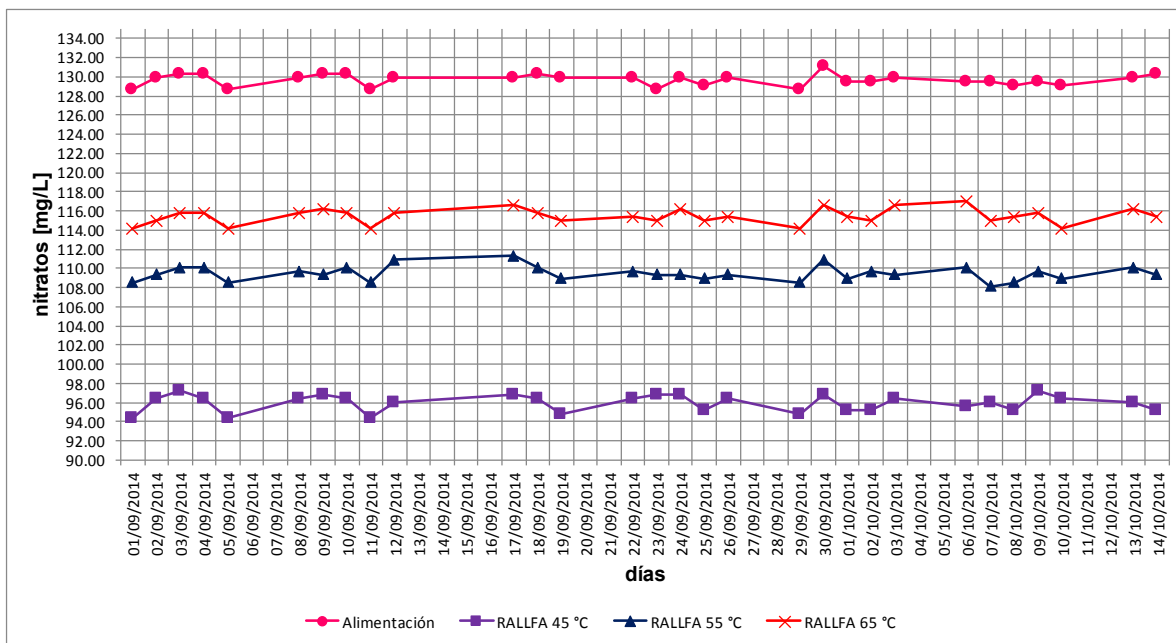


Fig. 30. Concentración de sulfatos versus días de experimentos

#### 4.3.6. Valores de nitratos

Los resultados registrados para este parámetro se observan en la Tabla A10 mostrando un claro comportamiento prácticamente constante habiendo días de prueba en los que la variación de los resultados para los RALLFA era casi nula presentándose de esta forma en términos prácticos una línea recta con pendiente de cero para cada uno de los RALLFA tal y como se observa en la Figura 31. Los siguientes valores promedio fueron obtenidos durante los días de experimentación:  $95.95 \pm 0.09_{45^{\circ}\text{C}}$ ,  $109.48 \pm 0.75_{55^{\circ}\text{C}}$  y  $115.43 \pm 1.00_{65^{\circ}\text{C}}$ .  $\text{mg NO}_3^- \text{L}^{-1}$ . En el análisis de

datos para los iones nitratos el factor de la temperatura en los reactores se vio claramente el cómo influye en la remoción de este contaminante en la vinaza con la que se trabajó en esta investigación, encontrando diferencias significativas entre la comparación de los RALLFA deduciendo de esta manera que se puede trabajar a cualquiera de las temperaturas de remoción, observándose en la Figura 25 como el RALLFA que opera a 45°C resulto ser el más eficiente de los tres reactores, ya que fue el que removió más nitratos.



**Fig. 31. Nitratos versus días de experimentos**

## Capítulo 5

### Conclusiones y recomendaciones

#### 5.1. Conclusiones

De acuerdo con el objetivo de esta investigación que fue el de realizar el seguimiento de la producción de biogás en tres reactores anaerobios que operan a 45, 55 y 65°C, considerando la conversión de compuestos carbonosos medidos como demanda química de oxígeno soluble, DQO, metano y CO<sub>2</sub>, a continuación se presentan las conclusiones derivadas de esta experimentación:

- Con base en los resultados puede verse que la mayor transformación de materia orgánica medida como DQO fue presentada por el reactor a una temperatura de 45°C
- En general, los reactores anaerobios se encuentran operando de manera favorables con valores de pH entre 7.5 a 7.9
- El porcentaje de remoción de material carbonoso medido como DQO es del 8 al 36%. Esto posiblemente se debe a que en el efluente se arrastran algunos microorganismos, por lo cual fue necesario centrifugar la muestra para que los resultados obtenidos se mantuvieran en el mismo orden de remoción
- El empleo de reactores tipo RALLFA (*UASB-reactors*) para el tratamiento de estos residuos se justifica por los grandes volúmenes de aguas residuales producidas en México con elevadas concentraciones de compuestos carbonosos, superiores a los 1000 mg DQO L<sup>-1</sup> y la necesidad de obtener un valor agregado de estos compuestos carbonosos al transformarlos a metano

- La producción de metano „controlada“ tiene también ventajas sustanciales para las destilerías, entre ellas: Genera altas cantidades de biogás, que hoy en día presenta un mayor valor en el mercado, por el incremento del precio del petróleo, ya que la economía mundial está buscando fuentes renovables de energía y los ingenios tienen la posibilidad de ser actores importantes en este suministro.

Así mismo puede concluirse de esta investigación que la principal utilidad del empleo de un RALLFA para el tratamiento de las aguas contaminadas con altas cargas orgánicas es que se logra la remoción de, al menos, el 36% del contenido de contaminantes en este caso disueltos transformándose en biogás rico en metano lo cual, en la presente investigación, se logró a una temperatura de operación de 45°C:

- El tratamiento anaerobio termofílico a 45, 55 y 65°C, de cualquier agua residual independientemente de la competencia de los microorganismos sulfatorreductores y los metanogénicos, permite la degradación de materia orgánica más eficientemente
- Es de suma importancia estudiar la interacción entre los microorganismos sulfatorreductores y los metanogénicos dentro de los tres reactores tipo RALLFA ya que éstos se encuentran en constante competencia y de esto depende la formación de metano o de ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) como producto final de la degradación anaerobia (Castro-González, 2004). Una primera aproximación es esta investigación que proporciona información de que la temperatura mejor de operación es de 45°C.

## 5.2. Recomendaciones

De acuerdo con lo avanzado en esta investigación se plantean nuevas líneas de experimentación, dentro de las cuales destacan las siguientes:

- Medir el metano real obtenido durante el tratamiento anaerobio de las vinazas siguiendo la metodología de Poblano-Flores (2015)
- Continuar la experimentación para verificar las comunidades que proliferan en ellos y tratar de mejorar la eficiencia de los reactores a mayor temperatura, 55 y 65°C ya que las vinazas salen de la torres de destilación a temperaturas arriba de 65°C y es importante ahorrar esa energía
- Estimular a la industria alcoholera hacia el uso y aprovechamiento energético que se obtiene de la gran cantidad de materia orgánica biodegradable que poseen las vinazas
- Promover el desarrollo de proyectos para el aprovechamiento del biogás
- Aprovechar las experiencias que se tienen en otros países en estas tecnologías para consolidar a la tecnología del biogás como un importante sector para la sociedad.

## Referencias

- Abhay, K., Pratap, P. 2008. Single-stage, 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.
- ASTM. 1986. Plastic pipe and building products. *Annual book of ASTM Standards*. ASTM Publishing. D 2513 – 85a. 08(04). 305 págs. Washington, D.C. EEUU.
- Autodesk Inventor@2010. Dirección electrónica:  
<https://www.google.com.mx/search?q=Autodesk+Inventor@2010&tbn=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ei=xjBLUsKyGlzwrAGQ8oHwDQ&ved=0CD0QsAQ&biw=1024&bih=540&dpr=1>
- Ávila, E. 2009. Biogás: Opción real de seguridad energética para México. Tesis de Maestría. IPN, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. México, D.F., México.
- Bautista-Zúñiga, F., Durán-de-Bazúa, C., Reyna-Trujillo, T., Villers-Ruiz, L. 2000a. Residuos orgánicos agroindustriales: Opciones de manejo en los ingenios azucareros. *Sugar y Azúcar* (Inglaterra). 95(10):23-37.
- Bautista-Zúñiga, F., Durán-de-Bazúa, C., Reyna-Trujillo, T., Villers-Ruiz, L. 2000b. Agroindustrial organic residues: Handling options in cane sugar processing plants. *Sugar y Azúcar* (England), 95(9):32-45.
- Bautista-Zúñiga, F., Durán-de-Bazúa, M.C. 1998. Análisis del beneficio y riesgo potenciales de la aplicación al suelo de vinazas crudas y tratadas biológicamente. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 14(1):13-19.
- Bautista-Zúñiga, F., Luna-Pabello, V.M., Durán-de-Bazúa, C. 1995. El suelo, un reactor químico muy interesante. *Educación Química*. 6(4):226-230.
- Bautista-Zúñiga, F., Rivas, H., Durán-de-Bazúa, C., Palacio, G. 1998. Caracterización y clasificación de suelos con fines productivos en Córdoba, Veracruz, México. *Investigaciones Geográficas Boletín*. 36:21-33.

- Bailey, J.E., Ollis, D.F. 1986. Biochemical Engineering Fundamentals. McGraw-Hill Intl. Eds. Pp. 831-838, 847-853. Singapur.
- Bennett, S. 2010. Diesel engines. Ed. Delmar, Cenegage Learning. Pág. 46. Nueva York, EEUU.
- Berkowitz, N. 1997. Fossil Hydrocarbons. Chemistry and Technology. Ed. Academic Press. Pp. 121-124. California, EEUU. Dirección electrónica: <https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=88y4sAzRcBAC&oi=fnd&pg=PP2&dq=berkowitz+Fossil+Hydrocarbons.+Chemistry+and+Technology&ots=hnX3TRlrLE&sig=QHKCJHCrPDGbYg2JmCc7LbTWMk#v=onepage&q=berkowitz%20Fossil%20Hydrocarbons.%20Chemistry%20and%20Technology&f=false>
- Bernal-González, M., Poblano-Flores, A., Toscano-Pérez, D., Durán-de-Bazúa, C. 2012a. Ahorro de energía: Uso de reactores anaerobios termofílicos para la obtención de metano a partir de vinazas de ingenios azucareros-alcoholeros. Efecto de la temperatura en el desempeño de las biocomunidades anaerobias. **Tecnología, Ciencia, Educación (IMIQ, México)**. 27(2):80-88.
- Bernal-González, Vergara-Salgado, S., Durán-Domínguez-de-Bazúa, C. 2012b. Identification of methanogenic and sulfato-reducing bacteria from three upflow anaerobic sludge blanket reactors operating at 45, 55, and 65°C with sugarcane-based vinasses diluted with tap water (50:50). **J. Microb. Biochem. Technol.** 4:111-120. doi:10.4172/1948-5948.1000080
- Bernal-González, M., Bribiesca-Rangel, C., Hernández-Martínez, L.Y., Castro-González, A., Durán-de-Bazúa, M.C. 2002. Efecto de la temperatura en tres reactores de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) sobre la remoción de materia orgánica y la producción de metano utilizando agua residual (vinaza). **En XII Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales**. FEMISCA. Guanajuato, Gto., México. Abril 17-20. Dirección electrónica: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico13/134.pdf>
- BIOTEC, 2006. Dirección electrónica: [http://www.tecnicana.org/pdf/2006/tec\\_v10\\_no17\\_2006\\_p25-28.pdf](http://www.tecnicana.org/pdf/2006/tec_v10_no17_2006_p25-28.pdf)

- Cabrero, A., Durán, C., Montesinos, M.A., Pedroza, R., Saval, S., Zedillo, L.E., Barrios, C., Bekris, J., Calderón, H., Castro, J.M., Escárcega, C., Lucero, H., Luna-Pabello, V.M., Navarrete, R., Osorio, I., Pompa, R., Pulido, R., Vázquez, L., Villegas, R., Zámamo, H.A. 1990. Reactores de biodiscos, una innovación tecnológica para el tratamiento de aguas residuales de la industria de proceso. In **XI Seminario Científico del Centro Nacional de Investigaciones Científicas**. Octubre 31. La Habana, Cuba.
- Campos-González, T., Ríos-Enríquez, M.A., Luna-Pabello, V.M., Durán-de-Bazúa, C. 1995. La caña de azúcar, su entorno ambiental. Parte I. Tratamiento de vinazas en una planta piloto en México en un reactor de biodiscos. **Informe Técnico de Proyecto VIN-01-95**. Pub. Prog. Ing. Quím. Amb. y de Quím. Amb. 207 págs. Facultad de Química, UNAM. México D.F. México. 50 ejemplares (1995)
- Carlos-Hernández, S., Sánchez, E.N., Béteau, J.-F., Díaz-Jiménez, L. 2014. Análisis de un proceso de tratamiento de efluentes para producción de metano. **Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial**. 11:236-246.
- Castellan, G.W. 1998 Fisicoquímica. Editorial Adisson Wesley Longman de Mexico S.A. de C.V. Naucalpan de Juárez, Estado de México. México.
- Castro, A. 2013. Se aprovecha en México solo el 2.4 por ciento del biogás potencial de rellenos sanitarios. Boletín UNAM-DGCS-005 Ciudad Universitaria, México.
- Castro, J.M., Villegas, R., Cabrero, M.A., Durán-de-Bazúa, C. 1988. Tratamiento aerobio de vinazas en un reactor biológico rotatorio (reactor de biodiscos) de 3000 litros. **INFORME TÉCNICO DE TRABAJO VIN-02-88**. UNAM-AZÚCAR-IMPA. Pub. Facultad de Química, UNAM. 69 págs. México D.F. México.
- Castro-González, A. 2004. Efecto de la temperatura en la actividad metanogénica y sulfatorreductora de consorcios microbianos en condiciones anaerobias / *Temperature effect on methanogenic and sulfatoreducing activity in anaerobic conditions microbiol consortia*. Tesis Doctoral en Ingeniería Química. UNAM, Facultad de Química. 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 / Anaerobic microbiol consortia for alcohol distilling plants vinasses treatment. *Rev. Bebidas Mexicanas*. 13(3):12-14, 16-20, 22-25.
- Castro-González, A., Pliego-Bravo, Y., Durán-de-Bazúa, C. 1997. Tratamiento anaerobio de lodos de purga de una planta de lodos activados. *Series Química Ambiental del Agua*. Vol. 4. Pub. PIQA y QA. ISBN 968-36-59918. UNAM. México D.F. México.
- Castro-González, A., Enríquez-Poy, M., Durán-de-Bazúa, C. 2001. Design, construction, and starting-up of an anaerobic reactor for the stabilisation, handling, and disposal of excess biological sludge generated in a wastewater treatment plant. *Anaerobe (Biotechnology)*. 7(3):143-149.
- Chynoweth, D.P. 2004. Biomethane from energy crops and organic wastes. In: *Proceedings 10th World Congress, Anaerobic Digestion 2004. Anaerobic bioconversion answer for sustainability*. Vol. 1, International Water Association (Eds.). Dirección electrónica: [www.ad2004montreal.org](http://www.ad2004montreal.org), pp. 525-530. Montreal, Canadá.
- Cobos, B.Y., Sierra, O.R. 2007. Evaluación del potencial de la producción de biogás a partir de vinazas en un biodigestor “anaerobio”. Trabajo Presentado como requisito para optar por el Título de Ingeniero Químico. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Bucaramanga, Colombia.
- CONAFOR. 2006. La bioenergía en México, un catalizador del desarrollo sustentable. Publicación de la Comisión Nacional Forestal. Poder Ejecutivo Federal. México, D.F. México.
- Crane, 2015. *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*. McGraw-Hill. México D.F. México. Dirección electrónica: <http://www.craneco.com/category/200/Purchase-Flow-of-Fluids.html>
- DOF, 1996. NORMA Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos. Dirección electrónica:

- <http://www.economia-noms.gob.mx/normas/noms/1997/001-ecol.pdf>. Esta norma fue renombrada NOM-001-SEMARNAT-1996, por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, a través de la Comisión Nacional del Agua en 2012. Dirección electrónica:  
<http://www.agua.org.mx/index.php/biblioteca-tematica/marco-juridico-del-agua/1186-normas-oficiales-mexicanas/27369-normas-oficiales-mexicanas-nom-001-semarnat-1996-nom-002-semarnat-1996-nom-003-semarnat-1997>
- DOF, 2001. Análisis de aguas-Determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - Método de Prueba. NMX-AA-079-SCFI-2001. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF, 2009. Norma Oficial Mexicana. Modificación del inciso 0, el encabezado de la Tabla 13, el último párrafo del Anexo B y el apartado Signo decimal de la Tabla 21 de la Norma Oficial Mexicana NOM-008-SCFI-2002, Sistema general de unidades de medida. Jueves 24 de septiembre de 2009. Diario Oficial (Primera Sección). Tabla 21 - Reglas para la escritura de los números y su signo decimal. Signo decimal. El signo decimal debe ser una coma sobre la línea (,) o un punto sobre la línea (.). Si la magnitud de un número es menor que la unidad, el signo decimal debe ser precedido por un cero. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. México D.F. México.
- DOF, 2010. Lista de combustibles que se consideran para identificar a los usuarios con un patrón de alto consumo. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos. SEGOB. Dirección electrónica: [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5128000&fecha=14/01/2010](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5128000&fecha=14/01/2010))
- Durán, C., Noyola, A., Poggi, H., Zedillo, L.E. 1994a. Water and energy use in sugar mills and ethyl alcohol plants. In ***Efficient Water Use***. Eds. H. Garduño-Velasco, F. Arreguín-Cortés. Pub. UNESCO-ROSTLAC. ISBN 92-9089-340-0. Pp. 361-370. Montevideo, Uruguay.
- Durán, C., Noyola, A., Poggi, H., Zedillo, L.E. 1994b. Uso del agua y la energía en ingenios azucareros/alcoholeros. In ***Uso eficiente del agua***. Eds. H. Garduño-Velasco, F. Arreguín-Cortés. Pub. UNESCO-ROSTLAC. ISBN 92-9089-045-2. Pp. 361-370. Montevideo, Uruguay.

- Durán-de-Bazúa, C. 1997. Tratamiento biológico de aguas residuales de la industria de proceso. UNAM, Facultad de Química. México, D.F. México.
- Durán-de-Bazúa, C., Cordovés, M., Zedillo, L.E. 1994a. Demonstration of cleaner production techniques for the sugar cane agroindustry. **Final Draft, Consultancy Report 1994**. United Nations Industrial Development Office. Project US/INT/91/217/15-01-2. 134 pags. Pub. UNIDO/UNDP. 50 ejemplares. Mexico City, Mexico.
- Durán-de-Bazúa, C., González, S., Medellín, P., Noyola, A., Poggi-Varaldo, H., Zedillo, E. 1990. Retos a la industria azucarera para la próxima década: Reaprovechamiento de sus aguas residuales a través de su degradación biológica para obtener biogás y biomasa microbiana. En Memorias del **XVI Congreso de la Academia Nacional de Ingeniería, AC**. Pp. 34-39. Querétaro, Qro., México.
- Durán-de-Bazúa, C., Luna-Pabello, V.M., Noyola-Robles, A., Zedillo-Ponce-de-León, L.E. 1991a. Tratamiento biológico de vinazas. **Exposición Internacional Ecológica '91. Presentación de los Proyectos de Investigación del Grupo de Países de Latinoamérica y el Caribe Exportadores de Azúcar (Geplacea) 1991**. Centro Internacional de Exposiciones. Agosto 8-10. México D.F. México.
- Durán-de-Bazúa, C., Medellín, P., Noyola, A., Poggi-Varaldo, H., Zedillo, L.E. 1988. Caracterización de vinazas y su degradación en un sistema combinado de tres reactores anaerobios y un reactor aerobio de biodiscos. **Tecnol. Ciencia Ed. (IMIQ)**. 3(2):33-43.
- Durán-de-Bazúa, C., Noyola, A., Poggi, H.M., Zedillo, L.E. 1993a. Paquete tecnológico para tratar vinazas de ingenios azucareros-alcoholeros. En **Simposio Nacional. La Capacitación y Desarrollo Tecnológico en el Campo Cañero. Mesa de Trabajo 2: Ecología cañera**. Grupo de Países Latinoamericanos y del Caribe Exportadores de Azúcar, Geplacea y Asociación de Técnicos Azucareros de México, A.C., ATAM. Agosto 5-7. Xalapa, Ver., México.

- Durán-de-Bazúa, C., Noyola, A., Poggi-Varaldo, H.M., Zedillo, L. E. 1991b. Biodegradation of process industry wastewater. Case problem: Sugarcane industry. In ***Biological Degradation of Wastes***. Ed. A. M. Martin. Cap. 17. Pp. 363-388. Elsevier Science Pub. Ltd. ISBN 1-85166-635-4. Londres, Inglaterra.
- Durán-de-Bazúa, C., Noyola-Robles, A., Poggi-Varaldo, H., Zedillo-Ponce-de-León, L.E. 1994b. Paquete tecnológico para tratar vinazas de ingenios azucareros alcoholeros: sistema anaerobio/aerobio. ***Rev. IMIQ***. **35**(8):42-47.
- Durán-de-Bazúa, C., Noyola-Robles, A., Poggi-Varaldo, H., Zedillo-Ponce-de-León, L.E. 1993b. Paquete tecnológico para tratar vinazas de ingenios azucareros alcoholeros: sistema anaerobio/aerobio. In Memorias del ***Simposio Nacional "La Capacitación y Desarrollo Tecnológico en el Campo Cañero Mexicano"***. Tomo I. Pp. 349-357. Xalapa, Ver., México.
- Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.C. 2011. Artificial Wetlands: Pre-Columbian Inheritance for the Depuration of Polluted Water. Applications to the Sugarcane and Ethyl Alcohol Industry / Humedales artificiales: Herencia prehispánica para la depuración de aguas contaminadas. Aplicaciones a la industria azucarera-alcoholera. ***Sugar Journal***. 74(7):10-21.
- ESCAP, 1980. Guidebook on Biogas Development. Economic and Social Commission for Asia and the Pacific. Bangkok, Tailandia. Energy Resources Development Series No. 21. United Nations. 127 págs. Nueva York, EEUU.
- Félix-Figueroa, V.H. 2010. El biogás, una alternativa energética. Tesis de Licenciatura. División de Ingeniería. 60 págs. Universidad de Sonora. Hermosillo, Sonora, México.
- Flores, N.R. 1993. Producción de biogás y bioabono de la biomasa vegetal y animal. *Aplicaciones de las fuentes renovables de energía*. Depto. de Investigación de Energía Biomásica. Comisión Ejecutiva del Río Lempa - Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", UCA. San Salvador, El Salvador.
- García-Díaz, G., Durán-de-Bazúa, C. 1988. Tratamiento aerobio de vinazas en un reactor biológico rotatorio (reactor de biodiscos) de 50 litros. ***Informe Técnico de Trabajo VIN-01-88***. UNAM-AZÚCAR-IMPA. 69 págs. Pub. Facultad de Química, UNAM. México D.F. México.

- Gozá, O. 1996. Estrategia de análisis para lograr un uso más eficiente de la energía en los centrales azucareros. Tesis de doctorado, Facultad de Ingeniería Química, Cujae, 98 págs. Ciudad de La Habana, Cuba.
- Harris, D.C. 2001. Análisis químico cuantitativo. Ed. Reverté. Caps. 14 al 18. Barcelona, España.
- Hidalgo-Bonilla, J.A., Maravilla-Carranza, V.A., Ramírez-Castro, W.O. 2010. Aprovechamiento energético del biogás en El Salvador. Trabajo de graduación para optar al grado de Ingeniero Mecánico. Preparado para la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”. Pp. 18-27. Octubre. Antiguo Cuscatlán, El Salvador, C.A. Dirección electrónica:  
[http://cef.uca.edu.sv/descargables/tesis\\_descargables/aprovechamiento\\_energetico\\_del\\_biogas\\_en\\_El\\_Salvador.pdf](http://cef.uca.edu.sv/descargables/tesis_descargables/aprovechamiento_energetico_del_biogas_en_El_Salvador.pdf).
- Tomado de Flores, N. R. 1993. Producción de biogás y bioabono de la biomasa vegetal y animal, *Aplicaciones de las fuentes renovables de energía*. Depto. de Investigación de Energía Biomásica. Comisión Ejecutiva del Río Lempa - Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”, UCA. San Salvador, El Salvador.
- Ilangoan, K., Noyola, A. 1993. Availability of micronutrients during anaerobic digestion of molasses stillage using an upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor. *Environ. Technol.* 14:795-799.
- 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. Quím. Amb. y de Quím. Amb. 83 págs. Facultad de Química, UNAM. México D.F. México.
- López, I., Passeggi, M., Odriozola, M., Borges, L., Borzacconi, L. 2012. Tratamiento anaerobio de vinaza de destilería de caña de azúcar. Memoria del V Encuentro Regional XXVI Congreso Interamericano de Ingeniería Química. Pp. 1-10. Montevideo, Uruguay. Dirección electrónica:  
<http://aiquruguay.org/congreso/download/TL44.pdf>.

- López-Villanueva, B., Humaran-Curet, I. 2001. Proyecto para la construcción de una planta generadora de biogás a partir de desechos orgánicos generados en la Central de Abastos del D.F. Tesis Mancomunada de Licenciatura. UNAM, Facultad de Química. México, D.F., México.
- McPherson, S. D., Reyes, M. K., Socarrás, F. Y. 2002. Evaluación de alternativas para el aprovechamiento del mosto alcohólico de destilerías y la reducción de la contaminación ambiental. *Revista Tecnología Química*. 12(1):1-9.
- Metcalf-Eddy, 1997. Tratamiento y depuración de aguas residuales. Editorial Labor. Primera edición. Pp. 24-99, 120-147. Barcelona, España.
- Molina, B.C., Quiñonez, B.W. 2012. Biodegradación “anaeróbica” de vinaza generada en la destilería Soderal y aprovechamiento energético del biogás como medio para bajar el impacto de gases de efecto invernadero. Tesis de grado de Magister en Sistemas Integrados de Gestión de la Calidad, Ambiente y Seguridad. Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil. Guayaquil, Ecuador.
- Monroy, O., Cervantes F., Viniegra G., Castilla P., Meraz M. 1997. Biotecnologías para el tratamiento de las aguas residuales de la Ciudad de México. Dirección electrónica:  
<http://unicesar.ambientalex.info/infoCT/Biotraaguresciumx.pdf>
- Muñoz-Hernández, G. 2001. Análisis comparativo de motores de combustión interna con diferentes combustibles para su uso en la ciudad de México. Tesis de Licenciatura. UNAM, Facultad de Ingeniería. México D.F. México.
- Oaxaca-Grande, A.M. 1997. Estudio comparativo para la determinación de la demanda química de oxígeno entre el método estándar de reflujo abierto y el método rápido colorimétrico de reflujo cerrado. Título de Ingeniero Químico. Instituto Tecnológico de Orizaba. Mayo 16. Orizaba, Veracruz, México.
- Olvera-Rubio, A.P., Brindis-Olvera, F.N., Gil, B.E., Durán-de-Bazúa, C. 1992. Generación de biomasa microbiana en un reactor de biodiscos de un tren anaerobio-aerobio de tratamiento de vinazas de caña de azúcar. **Informe Técnico de Trabajo VIN-01-92**. UNAM-AZÚCAR-IMPA-UASLP-IPN. Pub.

- Prog. Ing. Quím. Amb. y de Quím. Amb. 93 págs. Facultad de Química, UNAM. México D.F. México.
- Poblano-Flores, A. 2015. Contenido de metano en biogás producido a nivel laboratorio en tres reactores de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) operando a 45, 55 y 65°C. Título de Ingeniero Químico. UNAM, Facultad de Química. Mayo 22. México, D.F., México.
- Ramírez, C. 1992. Tratamiento de aguas residuales industriales. UAM Unidad Azcapotzalco. Edit. Reverté. Pp. 124-131. Barcelona, España.
- Rigola, M. 1999. Tratamiento de aguas industriales. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V. Pp. 468-497. México, D.F., México.
- 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.
- Sabadí, R. 2007. Análisis de procesos en la industria azucarera: fermentación y destilación. Taller Combustibles, Energía, Medio Ambiente y Programas para Análisis de Procesos. Red Temática IVH: "Empleo de la biomasa azucarera como fuente de alimento, energía, derivados y su relación con la preservación del medio ambiente (BAZDREAM)". Universidad Nacional de Ingeniería, 258 págs. Managua, Nicaragua.
- Sarkar, S. 2009. Fuels and combustion. Ed. Universities Press. Pp. 5-9, 177, 337-339. Hyderabad, India.
- Simeprode, 2007. Una planta de biogás producirá toda la energía del metro de Monterrey en México. Publicado por el Sistema integral para el manejo ecológico y procesamiento de desechos. Monterrey, Nuevo León, México. Dirección electrónica:  
<http://vidaverde.about.com/od/Energias-renovables/a/Metro-De-Monterrey-Un-Ejemplo-De-Energia-Sustentable.htm>
- Sims, R. 2002. The brilliance of bioenergy. Ed. James & James Science Publishers Ltd. Pp. 1-5. Londres, Inglaterra.

- Siñeriz, F. 2009. Tratamiento “anaeróbico” de vinaza. Memoria del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. 37 págs. Tucumán Argentina.
- Torres-Lozada, P., Pérez, A. 2010. Actividad metanogénica específica: Una herramienta de control y optimización de sistemas de tratamiento anaerobio de aguas residuales. **Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente**. 9:5-14. Cali, Colombia.
- Toscano, D. 2012. Estudio de la diversidad filogenética de bacterias metanogénicas en tres reactores tipo RALLFA operando a 45, 55 y 65°C para el tratamiento de vinazas. Título de Químico de Alimentos. Facultad de Química, UNAM. Diciembre 4. México, D.F., México.
- Turner, J. 2004. Sustainable hydrogen production. Science. 305:972-974.
- Verea, L. 2009. Generación de biogás mediante digestión “anaerobia” de residuos orgánicos en un sistema de reactores acoplados. Tesis de Maestría. UNAM, Centro de Investigación en Energía. Temixco, Mor., México.
- Weiland, P. 2009. Biogas production: current state and perspectives. Johann Heinrich von Thünen-Institute. 38116 Braunschweig, Alemania.
- Zámano-Pérez, H.A., Zedillo-Ponce-de-León, L.E., Durán-de-Bazúa, C. 1991. Tratamiento biológico de aguas residuales de la industria alcoholera a partir de melazas de caña de azúcar. **Informe Técnico de Trabajo VIN-01-90**. UNAM-AZÚCAR-IMPA. Pub. Prog. Ing. Quím. Amb. y de Quím. Amb. 100 págs. Facultad de Química, UNAM. 100 ejemplares. México D.F. México.
- Zamudio-Preciado, A., Luna-Pabello, V.M., Durán-de-Bazúa, C. 1993. Estudio de prefactibilidad de un sistema aerobio (biodiscos) de tratamiento de vinazas de alcohol de caña. **INFORME TÉCNICO DE TRABAJO VIN-01-93**. UNAM-AZÚCAR-GEPLACEA. Pub. Prog. Ing. Quím. Amb. y de Quím. Amb. 94 págs. Facultad de Química, UNAM. México D.F. México.



# ANEXOS

# Anexo 1

## Registro de valores de biogás experimental

**Tabla A1. Registro de valores de biogás experimental**

<b>Fecha</b>	<b>RALLFA 45°C [L d<sup>-1</sup>]</b>	<b>RALLFA 55°C [L d<sup>-1</sup>]</b>	<b>RALLFA 65°C [L d<sup>-1</sup>]</b>
01/09/2014	12.24	9.12	5.04
03/09/2014	11.76	9.36	4.56
05/09/2014	12.00	8.88	4.80
08/09/2014	12.24	8.40	5.04
10/09/2014	11.52	8.40	4.56
12/09/2014	11.76	8.88	4.32
17/09/2014	12.00	9.36	4.80
19/09/2014	11.52	8.64	4.56
22/09/2014	11.52	9.12	4.80
24/09/2014	12.24	8.88	4.56
29/09/2014	12.24	9.12	5.04
01/10/2014	11.76	8.88	4.32
03/10/2014	12.00	8.40	4.56
06/10/2014	11.52	8.88	4.32
08/10/2014	11.76	9.12	4.32
10/10/2014	12.00	8.64	4.56
13/10/2014	12.00	9.36	4.32
15/10/2014	11.76	8.88	4.56
17/10/2014	11.76	8.64	4.56
20/10/2014	11.52	8.64	4.80
22/10/2014	11.76	8.88	4.56
24/10/2014	11.76	9.36	4.56
27/10/2014	11.52	9.12	5.04
29/10/2014	12.00	8.88	4.56
31/10/2014	12.24	8.40	4.56
04/11/2014	12.00	8.64	4.32
06/11/2014	12.24	9.12	4.32
07/11/2014	12.00	8.88	4.56
10/11/2014	11.52	9.12	4.32
12/11/2014	12.24	9.12	4.80

Anexo 2

Registro de valores  
de biogás  
experimental  
corregidos por P y T

**Tabla A2. Registro de valores de biogás experimental corregidos por P y T**

<b>Fecha</b>	<b>RALLFA 45°C [L d<sup>-1</sup>]</b>	<b>RALLFA 55°C [L d<sup>-1</sup>]</b>	<b>RALLFA 65°C [L d<sup>-1</sup>]</b>
01/09/2014	8.41	6.07	3.26
03/09/2014	8.08	6.23	2.95
05/09/2014	8.24	5.91	3.10
08/09/2014	8.41	5.59	3.26
10/09/2014	7.91	5.59	2.95
12/09/2014	8.08	5.91	2.79
17/09/2014	8.24	6.23	3.10
19/09/2014	7.91	5.75	2.95
22/09/2014	7.91	6.07	3.10
24/09/2014	8.41	5.91	2.95
29/09/2014	8.41	6.07	3.26
01/10/2014	8.08	5.91	2.79
03/10/2014	8.24	5.59	2.95
06/10/2014	7.91	5.91	2.79
08/10/2014	8.08	6.07	2.79
10/10/2014	8.24	5.75	2.95
13/10/2014	8.24	6.23	2.79
15/10/2014	8.08	5.91	2.95
17/10/2014	8.08	5.75	2.95
20/10/2014	7.91	5.75	3.10
22/10/2014	8.08	5.91	2.95
24/10/2014	8.08	6.23	2.95
27/10/2014	7.91	6.07	3.26
29/10/2014	8.24	5.91	2.95
31/10/2014	8.41	5.59	2.95
04/11/2014	8.24	5.75	2.79
06/11/2014	8.41	6.07	2.79
07/11/2014	8.24	5.91	2.95
10/11/2014	7.91	6.07	2.79
12/11/2014	8.41	6.07	3.10

# Anexo 3

## Registro de valores de CH<sub>4</sub> teórico

**Tabla A3. Registro de valores de CH<sub>4</sub> teórico**

<b>Fecha</b>	<b>RALLFA 45°C [L d<sup>-1</sup>]</b>	<b>RALLFA 55°C [L d<sup>-1</sup>]</b>	<b>RALLFA 65°C [L d<sup>-1</sup>]</b>
01/09/2014	8.02	5.64	2.52
03/09/2014	7.29	5.45	1.74
05/09/2014	8.02	5.64	2.71
08/09/2014	7.47	5.26	1.36
10/09/2014	8.02	6.02	2.13
12/09/2014	8.02	6.02	2.71
17/09/2014	7.84	5.45	1.74
19/09/2014	7.47	5.64	1.74
22/09/2014	7.65	5.26	1.36
24/09/2014	8.02	6.02	2.52
29/09/2014	8.38	5.83	2.52
01/10/2014	7.84	5.83	2.52
03/10/2014	8.02	5.83	2.91
06/10/2014	7.65	5.45	1.74
08/10/2014	8.02	6.20	2.71
10/10/2014	8.20	5.64	1.74
13/10/2014	8.02	5.83	1.36
15/10/2014	8.02	5.83	1.36
17/10/2014	8.02	5.83	1.74
20/10/2014	7.65	5.45	1.74
22/10/2014	8.20	5.64	1.55
24/10/2014	7.84	5.64	1.74
27/10/2014	8.02	5.64	1.94
29/10/2014	7.65	5.64	2.13
31/10/2014	8.02	5.64	1.55
04/11/2014	8.20	5.83	1.55
06/11/2014	8.20	5.83	1.16
07/11/2014	8.02	5.83	1.74
10/11/2014	7.84	5.83	1.36
12/11/2014	7.65	5.45	1.55

Anexo 4

Registro de valores  
de biogás real  
convertido a CH<sub>4</sub>  
usando 62% de  
metano en el biogás



**Tabla A4. Registro de valores de biogás real convertido a CH<sub>4</sub> usando 62% de metano en el biogás**

<b>Fecha</b>	<b>RALLFA 45°C Exp. real a metano [L d<sup>-1</sup>]</b>	<b>RALLFA 55°C Exp. real a metano [L d<sup>-1</sup>]</b>	<b>RALLFA 65°C Exp. real a metano [L d<sup>-1</sup>]</b>
01/09/2014	5.212	3.765	2.019
03/09/2014	5.008	3.864	1.827
05/09/2014	5.110	3.666	1.923
08/09/2014	5.212	3.468	2.019
10/09/2014	4.905	3.468	1.827
12/09/2014	5.008	3.666	1.731
17/09/2014	5.110	3.864	1.923
19/09/2014	4.905	3.567	1.827
22/09/2014	4.905	3.765	1.923
24/09/2014	5.212	3.666	1.827
29/09/2014	5.212	3.765	2.019
01/10/2014	5.008	3.666	1.731
03/10/2014	5.110	3.468	1.827
06/10/2014	4.905	3.666	1.731
08/10/2014	5.008	3.765	1.731
10/10/2014	5.110	3.567	1.827
13/10/2014	5.110	3.864	1.731
15/10/2014	5.008	3.666	1.827
17/10/2014	5.008	3.567	1.827
20/10/2014	4.905	3.567	1.923
22/10/2014	5.008	3.666	1.827
24/10/2014	5.008	3.864	1.827
27/10/2014	4.905	3.765	2.019
29/10/2014	5.110	3.666	1.827
31/10/2014	5.212	3.468	1.827
04/11/2014	5.110	3.567	1.731
06/11/2014	5.212	3.765	1.731
07/11/2014	5.110	3.666	1.827
10/11/2014	4.905	3.765	1.731
12/11/2014	5.212	3.765	1.923

# Anexo 5

## Registro de valores de pH

**Tabla A5. Registro de valores de pH**

Fecha	Alimentación pH	pH		
		45°C	55°C	65°C
01/09/2014	4.61	7.56	7.72	7.87
02/09/2014	4.72	7.53	7.68	7.85
03/09/2014	4.59	7.45	7.73	7.81
04/09/2014	4.61	7.61	7.76	7.82
05/09/2014	4.76	7.63	7.75	7.85
08/09/2014	4.58	7.54	7.75	7.83
09/09/2014	4.66	7.49	7.76	7.89
10/09/2014	4.72	7.59	7.73	7.91
11/09/2014	4.78	7.61	7.71	7.90
12/09/2014	4.67	7.65	7.72	7.90
17/09/2014	4.68	7.49	7.69	7.92
18/09/2014	4.78	7.61	7.68	7.91
19/09/2014	4.69	7.58	7.75	7.89
22/09/2014	4.58	7.56	7.75	7.85
23/09/2014	4.76	7.48	7.72	7.84
24/09/2014	4.65	7.67	7.74	7.90
25/09/2014	4.73	7.62	7.65	7.90
26/09/2014	4.74	7.63	7.69	7.89
29/09/2014	4.79	7.59	7.76	7.88
30/09/2014	4.75	7.48	7.71	7.87
01/10/2014	4.64	7.55	7.69	7.89
02/10/2014	4.69	7.62	7.68	7.85
03/10/2014	4.61	7.65	7.64	7.91
06/10/2014	4.85	7.52	7.77	7.90
07/10/2014	4.58	7.63	7.78	7.85
08/10/2014	4.73	7.59	7.75	7.86
09/10/2014	4.69	7.61	7.75	7.89
10/10/2014	4.72	7.57	7.76	7.88
13/10/2014	4.58	7.49	7.74	7.85
14/10/2014	4.59	7.61	7.76	7.89

# Anexo 6

## Registro de valores % de remoción de DQO

**Tabla A6. Registros de valores % de remoción de DQO**

Fecha	% de remoción DQO		
	RALLFA	RALLFA	RALLFA
	45°C	55°C	65°C
01/09/2014	36.30	24.75	10.72
03/09/2014	33.83	24.53	7.61
05/09/2014	36.60	24.95	11.65
08/09/2014	34.39	23.49	5.87
10/09/2014	36.30	26.40	9.07
12/09/2014	36.00	26.18	11.45
17/09/2014	35.77	24.12	7.49
19/09/2014	34.39	25.16	7.55
22/09/2014	35.53	23.68	5.92
24/09/2014	36.30	26.40	10.72
29/09/2014	37.64	25.36	10.64
01/10/2014	35.47	25.57	10.72
03/10/2014	36.00	25.36	12.27
06/10/2014	35.23	24.32	7.55
08/10/2014	36.00	27.00	11.45
10/10/2014	37.12	24.75	7.42
13/10/2014	36.30	25.57	5.77
15/10/2014	36.00	25.36	5.73
17/10/2014	36.60	25.79	7.49
20/10/2014	35.23	24.32	7.55
22/10/2014	37.43	24.95	6.65
24/10/2014	36.07	25.16	7.55
27/10/2014	36.30	24.75	8.25
29/10/2014	34.94	24.95	9.15
31/10/2014	36.91	25.16	6.71
04/11/2014	36.82	25.36	6.55
06/11/2014	37.12	25.57	4.95
07/11/2014	36.00	25.36	7.36
10/11/2014	35.77	25.79	5.82
12/11/2014	35.23	24.32	6.71

# Anexo 7

## Registro de valores de temperatura

**Tabla A7. Registros de valores de temperatura**

Fecha	Temperatura		
	RALLFA 45° C	RALLFA 55° C	RALLFA 65° C
01/09/2014	44	55	63
03/09/2014	45	54	64
05/09/2014	45	54	65
08/09/2014	43	53	62
10/09/2014	44	55	61
12/09/2014	45	55	63
17/09/2014	43	54	65
19/09/2014	45	54	62
22/09/2014	44	53	61
24/09/2014	44	54	63
29/09/2014	45	54	63
01/10/2014	45	55	65
03/10/2014	45	53	62
06/10/2014	43	54	65
08/10/2014	44	53	64
10/10/2014	45	54	64
13/10/2014	44	55	61
15/10/2014	45	55	63
17/10/2014	43	54	65
20/10/2014	43	55	62
22/10/2014	45	53	61
24/10/2014	45	54	62
27/10/2014	44	54	62
29/10/2014	44	54	63
31/10/2014	45	53	64
04/11/2014	44	54	63
06/11/2014	43	55	64
07/11/2014	44	55	61
10/11/2014	45	54	63
12/11/2014	44	55	64

# Anexo 8

## Registro de valores de fosfatos



**Tabla A8. Registro de valores de fosfatos**

<b>Fecha</b>	<b>Alimentación [mg L<sup>-1</sup>]</b>	<b>RALLFA 45°C [mg L<sup>-1</sup>]</b>	<b>RALLFA 55°C [mg L<sup>-1</sup>]</b>	<b>RALLFA 65°C [mg L<sup>-1</sup>]</b>
01/09/2014	2123.90	1638.92	1842.30	2014.39
02/09/2014	2108.26	1670.21	1826.66	2030.04
03/09/2014	2076.97	1654.57	1889.24	2045.68
04/09/2014	2139.55	1670.21	1857.95	2030.04
05/09/2014	2139.55	1638.92	1842.30	2045.68
08/09/2014	2123.90	1685.86	1842.30	2014.39
09/09/2014	2123.90	1717.15	1857.95	2030.04
10/09/2014	2108.26	1670.21	1842.30	2045.68
11/09/2014	2123.90	1654.57	1857.95	2030.04
12/09/2014	2092.62	1670.21	1842.30	2045.68
17/09/2014	2123.90	1670.21	1873.59	2014.39
18/09/2014	2108.26	1685.86	1842.30	2045.68
19/09/2014	2123.90	1638.92	1857.95	2030.04
22/09/2014	2108.26	1670.21	1842.30	2030.04
23/09/2014	2139.55	1685.86	1857.95	2061.33
24/09/2014	2108.26	1623.28	1826.66	2014.39
25/09/2014	2123.90	1685.86	1873.59	2030.04
26/09/2014	2139.55	1670.21	1889.24	2045.68
29/09/2014	2123.90	1670.21	1857.95	2030.04
30/09/2014	2139.55	1685.86	1873.59	2014.39
01/10/2014	2108.26	1670.21	1889.24	2045.68
02/10/2014	2108.26	1685.86	1873.59	2030.04
03/10/2014	2108.26	1654.57	1842.30	2045.68
06/10/2014	2123.90	1685.86	1889.24	2014.39
07/10/2014	2108.26	1670.21	1857.95	2045.68
08/10/2014	2139.55	1717.15	1889.24	2014.39
09/10/2014	2123.90	1670.21	1873.59	2030.04
10/10/2014	2123.90	1654.57	1873.59	2045.68
13/10/2014	2139.55	1701.50	1857.95	2030.04
14/10/2014	2155.19	1685.86	1826.66	2014.39

# Anexo 9

## Registro de valores de sulfatos

**Tabla A9. Registro de valores de sulfatos**

<b>Fecha</b>	<b>Alimentación [mg L<sup>-1</sup>]</b>	<b>RALLFA 45°C [mg L<sup>-1</sup>]</b>	<b>RALLFA 55°C [mg L<sup>-1</sup>]</b>	<b>RALLFA 65°C [mg L<sup>-1</sup>]</b>
01/09/2014	937.5	212.5	412.5	537.5
02/09/2014	912.5	237.5	437.5	512.5
03/09/2014	937.5	212.5	437.5	537.5
04/09/2014	912.5	237.5	462.5	562.5
05/09/2014	937.5	212.5	412.5	537.5
08/09/2014	962.5	237.5	437.5	562.5
09/09/2014	912.5	262.5	462.5	512.5
10/09/2014	962.5	237.5	462.5	512.5
11/09/2014	962.5	212.5	437.5	537.5
12/09/2014	937.5	237.5	412.5	537.5
17/09/2014	987.5	262.5	462.5	512.5
18/09/2014	962.5	237.5	437.5	562.5
19/09/2014	937.5	212.5	487.5	537.5
22/09/2014	987.5	262.5	462.5	512.5
23/09/2014	937.5	237.5	437.5	537.5
24/09/2014	962.5	212.5	462.5	562.5
25/09/2014	912.5	212.5	487.5	562.5
26/09/2014	987.5	237.5	437.5	537.5
29/09/2014	962.5	212.5	462.5	562.5
30/09/2014	912.5	262.5	487.5	512.5
01/10/2014	987.5	237.5	437.5	537.5
02/10/2014	937.5	262.5	487.5	562.5
03/10/2014	962.5	212.5	412.5	562.5
06/10/2014	987.5	237.5	487.5	537.5
07/10/2014	962.5	262.5	462.5	562.5
08/10/2014	937.5	237.5	437.5	562.5
09/10/2014	937.5	262.5	487.5	537.5
10/10/2014	987.5	262.5	462.5	537.5
13/10/2014	937.5	287.5	437.5	512.5
14/10/2014	962.5	212.5	462.5	562.5

# Anexo 10

## Registro de valores de nitratos

**Tabla A10. Registro de valores de nitratos**

<b>Fecha</b>	<b>Alimentación [mg L<sup>-1</sup>]</b>	<b>RALLFA 45°C [mg L<sup>-1</sup>]</b>	<b>RALLFA 55°C [mg L<sup>-1</sup>]</b>	<b>RALLFA 65°C [mg L<sup>-1</sup>]</b>
01/09/2014	128.67	94.40	108.51	114.15
02/09/2014	129.88	96.41	109.31	114.96
03/09/2014	130.28	97.22	110.12	115.77
04/09/2014	130.28	96.41	110.12	115.77
05/09/2014	128.67	94.40	108.51	114.15
08/09/2014	129.88	96.41	109.72	115.77
09/09/2014	130.28	96.81	109.31	116.17
10/09/2014	130.28	96.41	110.12	115.77
11/09/2014	128.67	94.40	108.51	114.15
12/09/2014	129.88	96.01	110.93	115.77
17/09/2014	129.88	96.81	111.33	116.57
18/09/2014	130.28	96.41	110.12	115.77
19/09/2014	129.88	94.80	108.91	114.96
22/09/2014	129.88	96.41	109.72	115.36
23/09/2014	128.67	96.81	109.31	114.96
24/09/2014	129.88	96.81	109.31	116.17
25/09/2014	129.07	95.20	108.91	114.96
26/09/2014	129.88	96.41	109.31	115.36
29/09/2014	128.67	94.80	108.51	114.15
30/09/2014	131.09	96.81	110.93	116.57
01/10/2014	129.48	95.20	108.91	115.36
02/10/2014	129.48	95.20	109.72	114.96
03/10/2014	129.88	96.41	109.31	116.57
06/10/2014	129.48	95.60	110.12	116.98
07/10/2014	129.48	96.01	108.10	114.96
08/10/2014	129.07	95.20	108.51	115.36
09/10/2014	129.48	97.22	109.72	115.77
10/10/2014	129.07	96.41	108.91	114.15
13/10/2014	129.88	96.01	110.12	116.17
14/10/2014	130.28	95.20	109.31	115.36

**Anexo 11**

**Disposición**

**controlada de los**

**residuos producidos**

**en esta investigación**

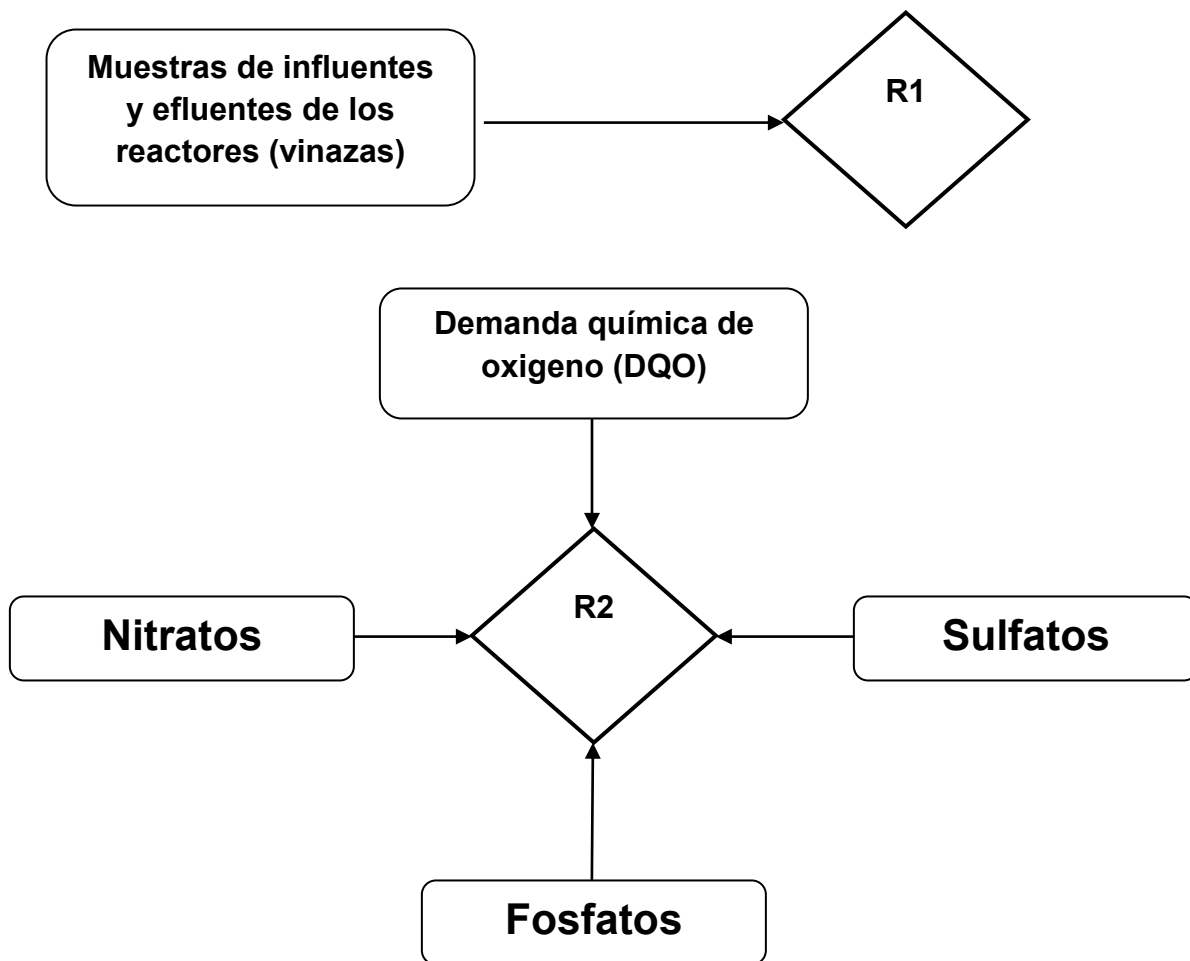


Fig. 32. Diagrama de disposición controlada de los residuos producidos en esta investigación

Residuo	Corresponde a	Tratamiento
<b>R1</b>	Medidas tomadas a los influentes y efluentes de los RALLFA como pH, y temperatura	Puesto que es sólo vinaza se lleva a pH neutro y se vierte en la tarja del laboratorio, con el fin de que lleguen diluidas lo más posible a la planta de tratamiento de aguas residuales de la Ciudad Universitaria
<b>R2</b>	Son los residuos de la digestión con dicromato de potasio, sulfatos de mercurio y plata para (DQO), residuos de la determinación de nitratos, fosfatos y sulfatos	Se recolectan en su respectivo contenedor y se envían a la Unidad de Gestión Ambiental, UGA, de la Facultad de Química para su disposición controlada