



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

---

---

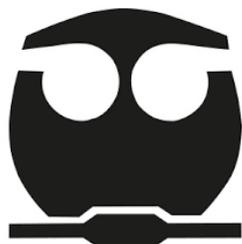
**COMPORTAMIENTO DE UN REACTOR  
TERMOFÍLICO ANAEROBIO DE LECHO DE LODOS  
DE FLUJO ASCENDENTE PARA CONVERTIR LOS  
COMPUESTOS CARBONOSOS DE VINAZAS  
MEDIDOS COMO DEMANDA QUÍMICA DE  
OXÍGENO EN BIOGÁS**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**INGENIERA QUÍMICA**

PRESENTA:

**NAVA CASTRO KIARA MARY JOAN**



CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX .

2023



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

## **JURADO ASIGNADO**

<b>Presidente</b>	Dra. María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa
<b>Vocal</b>	M. en A. I. Landy Irene Ramírez Burgos
<b>Secretario</b>	M en C. Rolando Salvador García Gómez
<b>1er. Suplente</b>	Dr. José Agustín García Reynoso
<b>2do. Suplente</b>	Dra. Marisela Bernal González

### **SITIO EN DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

Laboratorios 301, 302 y 303 de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental (LIQAyQA) del Conjunto E de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México.

### **ASESOR DEL TEMA**

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

\_\_\_\_\_

### **SUPERVISORA TÉCNICA**

**Dra. Marisela Bernal González**

\_\_\_\_\_

### **SUSTENTANTE**

**Kiara Mary Joan Nava Casto**

\_\_\_\_\_

## DECLARATORIA

“Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o con referencia a, las obras de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante recursos editoriales convencionales”



---

**Kiara Mary Joan Nava Castro**

## RECONOCIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, en especial a los Laboratorios 301, 302 y 303 de Ingeniería Ambiental y de Química Ambiental (LIQAyQA) del Conjunto E de la Facultad de Química por el apoyo brindado para la obtención de reactivos y materiales y para el uso de equipos empleados en la presente investigación. Así como al personal académico, administrativo y operativo por su valioso apoyo

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la UNAM: Los equipos de cómputo que albergan a las paqueterías fueron adquiridos con el apoyo financiero parcial del Programa de Apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza (PAPIME) para el proyecto actual “Innovación en docencia para la asignatura de estancia académica de Ingeniería Química ante la problemática del COVID-19: Creación de ejemplos para solucionar problemas reales mediante el empleo de paquetes de cómputo” Clave PE-101822. Se agradece también el apoyo de la Facultad de Química de la UNAM, su Centro de Informática y la Secretaría de Planeación e Informática y especialmente a los Ingenieros Edgar López y Cedric Reyes Cadena por su valioso apoyo para instalar los paquetes de cómputo empleados. Y al Programa de Apoyo a la Investigación y el Posgrado, PAIP, por el apoyo parcial a través de la asesora del proyecto (Clave 50009067) para los reactivos y consumibles utilizados en esta investigación

A la Dra. María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa por sus valiosas observaciones y aportaciones durante el desarrollo de este proyecto

A la Dra. Marisela Bernal González por la asesoría técnica que me brindó durante la elaboración de esta tesis y por su constante apoyo y motivación

A los honorables miembros del jurado revisor por sus valiosas aportaciones a este trabajo

Al Ing. Manuel Enríquez Poy de los Ingenios Central Motzorongo y El Refugio por el aprovisionamiento de vinazas como una labor altruista para realizar esta investigación

## AGRADECIMIENTOS

A mi familia por enseñarme lo que es el amor incondicional y los frutos que dan la perseverancia. A mi madre, Elda Castro, por su paciencia. Aún en los días más tormentosos de la vida permaneces estoica; me apoyas en cada etapa de mi vida, me motivas a estudiar y me guías para ser una persona honesta, honrada y fiel a mis ideales. A mi padre, Miguel Nava, mi Mike. q.e.p.d. Fuiste una persona nefelibata, un alma afín y alegre. Me enseñaste la ambición de aprender dejando la pena y miedo de lado para que no sean un impedimento en realizar las metas que me proponga. Quisiera creer que habrá otra vida para que puedas volar tan alto como el águila vuela bajo el sol. Te extraño todos los días.

A mi hermano, Kevin Nava, por tu asiduo temple ante las calamidades que tuviste que pasar para que pudiéramos estudiar y seguir a delante. Gracias por ser una persona bondadosa y trabajadora que sabe escuchar y que siempre ha estado para mí; soportando mi iracundo carácter y mi rebeldía. Eres paz, consciencia y luz en el camino que siempre busco cuando me siento perdida. A mi cuñada, Wendy Pérez, por poder contar con su amistad y consejos que siempre me brinda cuando lo necesito. A mi hermano, Luis Castro, aunque estes tan lejos me apoyas y me cuidas.

A mis amigos, Licette Reyna, Ulises Velázquez y Ángel Parada, sin ustedes la vida no sería lo mismo. Gracias por todos estos años de amistad, la distancia y el tiempo no han sido impedimento para poder seguir construyendo recuerdos juntos. A mis amigos de la facultad, mi equipo dinamita, Eduardo Solís, Antonia Reyes, Fernanda Beltrán y Julio Chávez, gracias por su amistad, confianza, apoyo y asesoría en las clases, tareas y proyectos que lleve con ustedes. Por cada día que compartieron conmigo. En especial a Julio, por el cariño y soporte que me brindaste. Les deseo éxito en todos sus proyectos futuros y que sigan siendo excelentes profesionistas.

A mis compañeros y amigos del laboratorio, Diego Cruz, Gabriela Quiahua, Fortino Rojas, Edgar Bautista, Jorge Romero, Ana García, Danya López, Brenda Dorantes e Iván Martínez. Por darme la oportunidad de conocerlos, son un gran pedacito de alegría, gracias por su amistad, compañerismo y apoyo. A Diego Cruz, por tu complicidad y tu guía en todo el proceso de nuestras investigaciones en el laboratorio; sé que no fue fácil trabajar junto a mí, pero agradezco tu apoyo en momentos difíciles, por motivarme a seguir a delante, por escuchar mis propuestas y enseñarme lo que desconocía. A Benjamín, por brindarme su amable ayuda y consejos en el laboratorio.

# ÍNDICE GENERAL

	Página
<b>JURADO ASIGNADO</b>	I
<b>DECLARATORIA</b>	II
<b>RECONOCIMIENTOS</b>	III
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	IV
<b>GLOSARIO</b>	XI
<b>RESUMEN</b>	XVIII
<b>CAPÍTULO 1. PROBLEMÁTICA</b>	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Justificación y propuesta de solución a la problemática planteada	4
1.3. Objetivos	5
1.3.1. Objetivo general	5
1.3.2. Objetivos particulares	5
1.4. Metas y alcances	6
<b>CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO</b>	7
2.1. Importancia de los ingenios azucareros y alcohólicos en México	7
2.1.1. Producción de azúcar	8
2.1.2. Producción de etanol	10
2.1.3. Vinazas	13
2.2. Degradación anaerobia	15
2.2.1. Inhibidores en la degradación anaerobia	20
2.3. Reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente	23
2.4. Reaprovechamiento del biogás rico en metano	25
<b>CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA</b>	30
3.1. Reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) a escala de laboratorio	30
3.2. Parámetros de operación y seguimiento	30
3.3. Diagrama general de la metodología desarrollada	33
3.4. Composición del biogás: Contenido de metano	34
3.4.1. Determinación del porcentaje de metano	35
<b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	36
4.1. Caracterización de la vinaza	36
4.2.1. Datos del pH	37

	<b>Página</b>	
4.2.2.	Datos de la conductividad eléctrica	37
4.2.3.	Datos de la temperatura	38
4.2.4.	Datos de alcalinidad y factores de alcalinidad	39
4.2.5.	Datos de sulfatos	40
4.2.6.	Datos de sulfuros	41
4.2.7.	Datos de sólidos en todas sus formas	42
4.2.8.	Datos de la demanda química de oxígeno (DQO)	43
4.3.1.	Producción de metano	45
4.3.2.	Producción de biogás	46
4.4.	Análisis estadísticos	48
4.4.1.	Primera etapa de evaluación de volumen de CH <sub>4</sub> semana 5 a 14	48
4.4.2.	Segunda etapa de evaluación de volumen de CH <sub>4</sub> semana 15 a 24	50
4.5.	Discusión final	53
 <b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>		 57
5.1.	Conclusiones	57
5.2.	Recomendaciones	58
 <b>ANEXOS</b>		 60
<b>Anexo A.</b>	<b>Metodologías analíticas específicas</b>	60
A1.	Determinación de pH	60
A2.	Conductividad eléctrica	60
A3.	Temperatura	61
A4.	Alcalinidad y factores de alcalinidad	62
A5.	Sólidos en todas sus formas	63
A6.	Determinación del contenido de compuestos carbonosos medidos como DQO total	64
A7.	Determinación del contenido de sulfatos presentes	66
A8.	Determinación del contenido de sulfuros presentes	68
A9.	Determinación del contenido de metano en el biogás generado en el RALLFA 65°C	69
A10.	Determinación del contenido de metano en el biogás por CG	70
<b>Anexo B.</b>	<b>Acervo fotográfico</b>	73
<b>Anexo C.</b>	<b>Tablas de datos con evaluaciones estadísticas</b>	75
<b>Anexo D.</b>	<b>Disposición controlada de residuos en esta investigación</b>	82
 <b>REFERENCIAS</b>		 83

**I. ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 2.1.	Compendio de la caracterización de la vinaza (modificado de Contreras-Contreras, 2019)	14
Tabla 2.2.	Etapas globales metabólicas y procesos en la degradación anaerobia	16
Tabla 2.3.	Clasificación y propiedades de las arqueas metanogénicas en condiciones termofílicas (Citada por Castro-González, 2004)	19
Tabla 2.4.	Producción de metano y potencial energético de vinazas a partir de diferentes materias primas (Fuess y García, 2015)	27
Tabla 3.1.	Parámetros de seguimiento evaluados en el reactor tipo RALLFA	32
Tabla 3.2.	Técnicas analíticas	32
Tabla 4.1.	Caracterización de la vinaza cruda (VC) y vinaza diluida (VD)	36
Tabla 4.2.	Datos promedio de sólidos en el RALLFA a 65°C	42
Tabla 4.3.	Comparación de los volúmenes de $V_{CH_4-DQO}$ vs. $V_{CH_4-Biogás}$ vs. $V_{CH_4-CG}$ .	47
Tabla 4.4.	Resumen estadístico para los datos de la semana 5 a 14 comparando los volúmenes de metano	48
Tabla 4.5.	Tabla de ANDEVA para volumen de metano por parámetro	49
Tabla 4.6.	Pruebas de rangos múltiples para volumen de metano por parámetro. Método 95% <i>LSD</i> semana 5 a 14	50
Tabla 4.7.	Resumen estadístico para volumen de metano semana 15 a 24	51
Tabla 4.8.	Tabla de ANDEVA para volumen de metano por parámetro semana 15 a 24	52
Tabla 4.9.	Pruebas de rangos múltiples para volumen de metano por parámetro. Método 95.0% <i>LSD</i> semana 15 a 24	52
Tabla A1.	Ecuaciones para sólidos disueltos y sólidos fijos	64
Tabla A2.	Registro de datos para la curva de calibración de DQO	65
Tabla A3.	Datos para la curva de calibración de sulfatos	67
Tabla A4.	Datos para la curva de calibración de sulfuros	69
Tabla A5.	Curva de calibración para % $CH_4$	71
Tabla C1.	Promedios de pH	75
Tabla C2.	Promedio de C.E.	76
Tabla C3.	Promedio de temperatura	77
Tabla C4.	Promedio de factores de alcalinidad	78
Tabla C5.	Promedio de DQO	79
Tabla C6.	Promedio de sulfatos	80
Tabla C7.	Promedio de sulfuros	81

Tabla D1.	Residuos	82
-----------	----------	----

## II. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.	Diagrama del proceso de producción de azúcar y alcohol (Modificado de Bautista-Zúñiga, 2000; Rincón-Acelas, 2008; Vergara-Salgado, 2010)	9
Figura 2.2	Diagrama modificado de la degradación anaerobia (Castro-González, 2004; Gujer y Zehnder, 1983; Koster y Cramer, 1987)	18
Figura 3.1.	Reactor tipo RALLFA (Cruz-Rodríguez, 2019)	31
Figura 3.2.	Inoculación del RALLFA (Cruz-Rodríguez, 2019)	31
Figura 3.3.	Alimentación del RALLFA	31
Figura 3.4.	Diagrama de flujo de la metodología empleada	33
Figura 3.5.	Sistema de recolección de biogás (elaboración propia)	34
Figura 3.6.	Viales para cromatografía	35
Figura 3.7.	Equipo de cromatografía Perkin Elmer Modelo CG- SRI310c	35
Figura 4.1.	Gráfico de Caja y Bigotes: Parámetro ( $V_{CH4-Biogás}$ y $V_{CH4-DQO}$ ) vs. Volumen de metano en la semana 5 a 14	49
Figura 4.2.	Volumen de metano vs. Parámetro ( $V_{CH4-Biogás}$ - $V_{CH4-DQO}$ )	50
Figura 4.3.	Gráfico de Caja y Bigotes: Parámetro ( $V_{CH4-Biogás}$ vs. $V_{CH4-CG}$ vs. $V_{CH4-DQO}$ ) vs. Volumen de metano semana 15 a 24	51
Figura 4.4	Volumen de metano vs. parámetros ( $V_{CH4-Biogás}$ vs. $V_{CH4-CG}$ vs. $V_{CH4-DQO}$ ) semana 15 a 24	52
Figura A1.	Determinación del pH	60
Figura A2.	Determinación de la conductividad eléctrica	61
Figura A3.	Determinación de la temperatura	61
Figura A4.	Determinación de alcalinidad y factores de alcalinidad (IB, $\alpha$ , AI/AP)	62
Figura A5.	Determinación de sólidos en todas sus formas	63
Figura A6.	Determinación de DQO	65
Figura A7.	Determinación de sulfatos	66
Figura A8.	Determinación de sulfuros	68
Figura A9.	Determinación del biogás generado en el RALLFA a 65°C	70
Figura A10.	Cuantificación del % de metano por CG-DIF	72
Figura B1.	Determinación de sólidos totales (crisoles y cápsulas)	73
Figura B2.	Determinación de sólidos, etapa de filtración (crisoles)	73
Figura B3.	Curva de calibración para la determinación de DQO	73
Figura B4.	Muestras: blanco, VC, influente y efluente (izq. a der.)	73
Figura B5.	Curva de calibración para la determinación de sulfatos	73
Figura B6.	Determinación $SO_4^{2-}$ : blanco, VC, influente y efluente (izq. a der.)	73
Figura B7.	Curva de calibración para la determinación de sulfuros	74

		<b>Página</b>
Figura B8.	Muestras VC, influente y efluente, blanco (izq. a der.)	74
Figura B9	Sistema de trabajo	74
Figura D1.	Residuos dispuestos	82
<b>III. ÍNDICE DE GRÁFICAS</b>		
Gráfica 4.1.	Datos de pH del efluente líquido del RALLFA operado a 65°C (E65), del influente vinaza diluida (VD) y la vinaza cruda (VC)	37
Gráfica 4.2.	Datos de la C.E. del efluente del RALLFA operado a 65°C (E65), del influente vinaza diluida (VD) y la vinaza cruda (VC)	38
Gráfica 4.3.	Datos de la temperatura del efluente líquido del RALLFA operado a 65°C (E65), del influente vinaza diluida (VD) y la vinaza cruda (VC)	38
Gráfica 4.4.	Datos de la alcalinidad, factor amortiguador o <i>buffer</i> (IB) y factor alfa ( $\alpha$ ) del efluente proveniente del RALLFA operado a 65°C	40
Gráfica 4.5.	Datos de iones sulfatos de la vinaza cruda (VC), vinaza diluida (VD) y el efluente líquido del RALLFA operado a 65°C (E65)	40
Gráfica 4.6.	Remoción de sulfatos del efluente líquido del RALLFA operado a 65°C	41
Gráfica 4.7.	Datos de iones sulfuros de la vinaza cruda (VC), vinaza diluida (VD) y el efluente líquido del RALLFA operado a 65°C (E65)	41
Gráfica 4.8.	Generación de sulfuros del efluente líquido del RALLFA operado a 65°C	42
Gráfica 4.9.	Sólidos en todas sus formas de la vinaza cruda (VC), vinaza diluida (VD) y el efluente líquido del RALLFA operado a 65°C (E65)	43
Gráfica 4.10.	Remoción de sólidos del RALLFA operado a 65°C	43
Gráfica 4.11.	Datos de DQO de la vinaza cruda (VC), vinaza diluida (VD) y el efluente líquido del RALLFA operado a 65°C (E65)	44
Gráfica 4.12.	Remoción de DQO del efluente líquido del RALLFA operado a 65°C	44
Gráfica 4.13.	Producción de metano presente en el biogás generado en el RALLFA operado a 65°C vs. metano teórico a partir de la DQO	46
Gráfica 4.14.	Producción de metano presente en el biogás del RALLFA operado a 65°C vs. la producción de metano real medido por CG DIF vs. metano teórico a partir de la DQO	47
Gráfica A1.	Curva de calibración de la DQO	66

		<b>Página</b>
Gráfica A2.	Curva de calibración de sulfatos	67
Gráfica A3.	Curva de calibración de sulfuros	69
Gráfica A4.	Curva de calibración para la determinación del CH <sub>4</sub> en el biogás	71

**Nota:** Esta tesis usa el punto decimal (DOF, 2009) y no lleva espacio entre el guarismo o la letra antes de °C o %. Las locuciones latinas *et altere* y *etcetera* se abrevian en esta tesis sin cursivas ya que se usan muy frecuentemente (et al., etc.)

## GLOSARIO

<b>Término</b>	<b>Definición</b>
%	Signo de porcentaje
$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$	Fosfato ácido de amonio
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	Sulfato de amonio
$(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$	Fosfato de amonio
°C	grados Celsius
Abs	Lectura de la absorbancia, cantidad de luz absorbida por una solución, obtenida del espectrofotómetro UV-Vis
$\text{Ag}_2\text{SO}_4$	Sulfato de plata (argentoso)
AGV	Ácidos grasos volátiles
Al/AP	Factor de la relación entre la alcalinidad debida a los AGV y la alcalinidad bicarbonática (Ecuación A4.4)
Alcalinidad	Medida de la capacidad de una muestra de agua para neutralizar ácidos (Ecuación A4.1)
AM	Arqueas metanogénicas
anaerobiosis	Es un fenómeno donde los microorganismos requieren de condiciones sin la presencia de oxígeno molecular (an=alfa privativa del griego, aeros=aire, bios=vida). Por ello, es un absurdo en español, una lengua romance o derivada del latín y éste del griego, decir 'anaeróbico' (un barbarismo derivado del inglés <i>anaerobic</i> ) en vez de anaerobio [nota de la asesora]
ANDEVA	Análisis de varianza, ANOVA, por sus siglas en inglés <i>Analysis of variance</i> (Anexo C)
atm	Unidad de presión equivalente a la presión de la atmosfera o atmósfera (única esdrújula) terrestre sobre el nivel del mar
Azeotropía	Característica de algunas mezclas líquidas que consiste en presentar un punto de ebullición mayor o menor que el correspondiente a las sustancias puras que intervienen en la mezcla. En el primer caso se trata de azeotropismo positivo y, en el segundo, negativo. El etanol exhibe azeotropía con el agua y por lo tanto el etanol solamente puede ser purificado hasta aproximadamente 95% en volumen usando el punto de ebullición como parámetro de separación ya que no pueden separarse por destilación pues su composición molar en ambas fases líquida y gaseosa es igual: 89.4% mol de etanol a 78.2°C a 1 atm. Esta temperatura es la mínima a la cual la solución etanol-agua puede entrar en ebullición [Nota de la asesora]
b	Ordenada al origen en la ecuación de la regresión lineal para obtener la concentración en la determinación de los parámetros por espectrofotometría y cromatografía
$\text{BaCl}_2$	Cloruro de bario
Bagazo	Residuo fibroso resultante de la trituración, presión o maceración de frutos, semillas, tallos, etc., para extraerles su

<b>Término</b>	<b>Definición</b>
	jugo, especialmente el de la vid o la caña de azúcar ( <a href="https://dle.rae.es/bagazo?m=form">https://dle.rae.es/bagazo?m=form</a> )
Batey	Palabra de origen caribe ( <a href="https://dle.rae.es/batey?m=form">https://dle.rae.es/batey?m=form</a> ). En los ingenios azucareros mexicanos es el nombre de los patios donde se recibe la caña de azúcar cortada en los cañaverales [Nota de la asesora]
<i>Buffer</i>	Palabra en inglés muy comúnmente usada para designar a una sustancia que se usa para amortiguar el valor del pH de una solución
C	Concentración de la ecuación de la regresión lineal para la determinación de los parámetros por espectrofotometría y cromatografía
C <sub>1</sub>	Concentración conocida (mg/L) para la determinación de las curvas de calibración en la determinación de los parámetros (Anexo A. Ecuación A)
C <sub>2</sub>	Concentración desconocida (mg/L) para la determinación de las curvas de calibración en la determinación de los parámetros (Anexo A. Ecuación A)
C. E.	Conductividad eléctrica
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de calcio
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de calcio
Carga orgánica	Cantidad másica de influente que ingresa a un biorreactor (en inglés se conoce como <i>organic load rate</i> , <i>OLR</i> , tasa másica orgánica)
CG	Cromatógrafo de gases
CG-DIF	Cromatografía de gases con detector de ionización de flama por sus siglas en inglés <i>GC-FID</i> ( <i>Gas Chromatography-Flame ionization detector</i> )
CH <sub>3</sub> COOH	Ácido acético
CH <sub>3</sub> COONa	Acetato de sodio
CH <sub>4</sub>	Metano
Cl <sup>-</sup>	Ion cloruro
cm	Centímetro
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
D.E.	Desviación estándar
d.i.	Diámetro interno
DA	Degradación anaerobia (no digestión 'anaerobia', un pleonasma)
DBO <sub>5</sub>	Demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días
DIF	Detector de ionización de flama
Digestión	Acción del verbo digerir. Del latín <i>digerere</i> 'distribuir, repartir'. Se conjuga como <i>sentir</i> . 1. Convertir en el aparato digestivo los

<b>Término</b>	<b>Definición</b>
	alimentos en sustancias asimilables por el organismo (obviamente en condiciones anaerobias porque en el estómago no hay oxígeno libre) [Nota de la tutora]. 4. Química Degradar materia orgánica mediante calor, reactivos químicos o microorganismos (obviamente también sin presencia de oxígeno libre) ( <a href="https://dle.rae.es/digerir?m=form">https://dle.rae.es/digerir?m=form</a> )
DND	Dato no disponible
DOF	Diario Oficial de la Federación (México)
DQO	Demanda química de oxígeno
DQO <sub>Rem</sub>	Porcentaje de remoción de la demanda química de oxígeno
E65	Efluente del RALLFA a 65°C
Elutriación	Proceso de separación de materiales granulares de diversos tamaños mediante un fluido en movimiento. Se busca que la biomasa granular no salga del biorreactor y por ello se espera que estos gránulos de biomasa sean más densos que el agua
ENCC	La Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC), publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de marzo del 2013, es el instrumento rector de la política nacional en el mediano y largo plazos para enfrentar los efectos del cambio climático y transitar hacia una economía competitiva, sustentable y de bajas emisiones de carbono
eq <sub>ac</sub>	Equivalente gramo del ácido sulfúrico
EtOH	Etanol, también llamado alcohol etílico o alcohol coloquialmente
F	Factor de conversión en la determinación de sólidos
Fe <sup>3+</sup>	Ion férrico o ion hierro (III)
FeCl <sub>3</sub> .6H <sub>2</sub> O	Cloruro férrico, cloruro de hierro (III) hexahidratado
FeS	Sulfuro ferroso o sulfuro de hierro (II)
FeSO <sub>4</sub>	Sulfato ferroso
g	Gramos
GEI	Gases de efecto invernadero
GI	Grados de libertad
GLP	Gas licuado de petróleo en español, por gas proveniente de propano líquido en inglés ( <i>liquid propane gas, LPG</i> )
GNC	Gas Natural Comprimido, combustible para uso vehicular
Guarapo	Voz quechua. Jugo de la caña dulce exprimida que, por vaporización (del agua que contiene), produce el azúcar ( <a href="https://dle.rae.es/guarapo?m=form">https://dle.rae.es/guarapo?m=form</a> )
GWh	Giga Watt hora
H <sub>2</sub>	Hidrógeno molecular
H <sub>2</sub> O	Agua
H <sub>2</sub> S	Sulfuro de hidrógeno
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ácido sulfúrico
HCl	Ácido clorhídrico

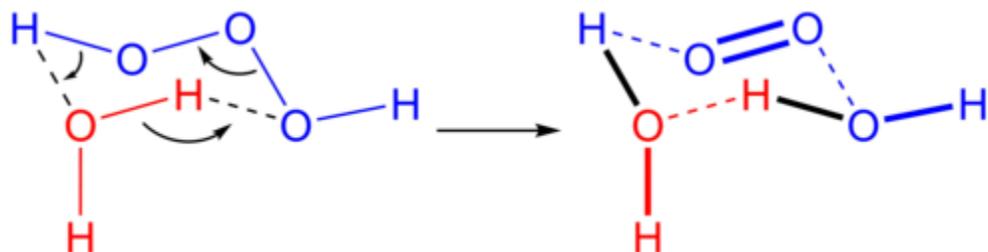
## Término

$\text{HCO}_3^-$  soluble  
 $\text{HO}_3^\bullet$

## Definición

Bicarbonato

Radical trióxido, la Wikipedia señala que es un derivado del trióxido dihidrogenado o trióxido de hidrógeno (<https://en.wikipedia.org/wiki/Trioxidane>). Es un compuesto inorgánico con la siguiente fórmula química:  $[\text{H}(\mu\text{-O}_3)\text{H}]$  or  $[\text{H}_2\text{O}_3]$ . Este radical se deriva de uno de los polióxidos de hidrógeno. En disolución acuosa forma agua y oxígeno singlete:



$\text{HOOC}_6\text{H}_4\text{COOK}$

Biftalato de potasio, hidrogenoftalato de potasio (*KHP*, *potassium hydrogen phthalate*). Reactivo patrón para la determinación de la curva de demanda química de oxígeno, DQO (Anexo A6)

IB

Factor de amortiguamiento (*buffer*, en inglés), es la relación entre la alcalinidad debida a los AGV y la alcalinidad total (Ecuación A4.2)

IPCC

Siglas en inglés para Panel Internacional sobre el Cambio Climático

K

Unidad para la temperatura absoluta, Kelvin

k1

gramos DQO por 1 mol de  $\text{CH}_4$  (64gDQO/mol  $\text{CH}_4$ )

$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$

Dicromato de potasio

kg

Kilogramo

$\text{KNO}_3$

Nitrato de potasio

kW

Kilowatt, es la cantidad de potencia eléctrica o demanda

L

Litro

LSD

Siglas en inglés para *Least Significant Difference* (la prueba de rangos múltiples de Fisher o diferencia mínima significativa)

m

Valor de la pendiente en la ecuación de la regresión lineal para obtener la concentración en la determinación de los parámetros por espectrofotometría y cromatografía

$\text{m}^3$

Metro cúbico

Mcr

Enzima complejo metil-coenzima M reductasa

mg

Miligramo

$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Cloruro de magnesio hexahidratado

MJ

Megajoules

mL

Mililitro

$\text{Mm}^3$

Millones de metros cúbicos

MP

Muestra problema

<b>Término</b>	<b>Definición</b>
mS	MiliSiemens
MSR	Microorganismos sulfatoreductores
N	Elemento químico nitrógeno
n	Número de moles
n. d.	No disponible
N <sub>2</sub>	Nitrógeno molecular o dinitrógeno
NaCl	Cloruro de sodio
NaHCO <sub>3</sub>	Bicarbonato de sodio
NaNO <sub>3</sub>	Nitrato de sodio
NaOH	Hidróxido de sodio
Na <sub>2</sub> S.9H <sub>2</sub> O	Sulfuro de sodio nonahidratado
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Sulfato de sodio
NH <sub>3</sub>	Amoníaco
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Ion amonio
$N_{H_2SO_4}$	Normalidad del ácido sulfúrico (0.1N)
nm	Nanómetros
O <sub>2</sub>	Oxígeno
OH•	Radical hidroxilo
OLR	Cantidad másica de influente que ingresa a un biorreactor (en inglés se conoce como <i>organic load rate</i> , OLR, tasa másica orgánica)
P	Presión atmosférica (atm)
pH	Potencial de hidrógeno. Término que indica la concentración de iones hidrógeno es una disolución
PIB	Producto Interno Bruto
R	Constante general de los gases (0.08206 atm L / mol K)
RALLFA	Reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente o <i>UASB reactor</i> , <i>upflow anaerobic sludge blanket reactor</i> , por sus siglas en inglés
Rem	Subíndice para cantidad removida
S <sup>-2</sup>	Ion sulfuro
S <sup>-2</sup> Gen	iones sulfuros generados en la determinación del contenido de sulfuros presentes
SDF	Sólidos disueltos fijos o cenizas (Anexo A5, Ecuación A5.3)
SDT	Sólidos disueltos totales (Anexo A5, Ecuación A5.1)
SDV	Sólidos disueltos volátiles (Anexo A5, Ecuación A5.2)
Sig.	Significancia en el análisis estadístico para la prueba de rangos múltiples para el volumen de metano por parámetro
SO <sub>2</sub>	Óxido de azufre
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Ion sulfato
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> Rem	iones sulfato removidos en la determinación del contenido de sulfatos presentes
SSF	Sólidos suspendidos fijos (Anexo A5, Ecuación A5.4)

<b>Término</b>	<b>Definición</b>
SSF <sub>Rem</sub>	Sólidos suspendidos fijos removidos
SST	Sólidos suspendidos totales (Anexo A5)
SST <sub>Rem</sub>	Sólidos suspendidos totales removidos
SSV	Sólidos suspendidos volátiles (Anexo A5)
SSV <sub>Rem</sub>	Sólidos suspendidos volátiles removidos
ST	Sólidos totales (Anexo A5)
ST <sub>Rem</sub>	Sólidos totales removidos
STF	Sólidos totales fijos (Anexo A5, Ecuación A5.5)
STF <sub>Rem</sub>	Sólidos totales fijos removidos
STV	Sólidos totales volátiles (Anexo A5)
STV	Sólidos totales volátiles removidos
T	Temperatura de operación del RALLFA (°C)
TRC	Tiempo de retención celular
TRH	Tiempo de residencia hidráulico
TWh	Tera Watt hora
UASB	Siglas en inglés por <i>upflow anaerobic sludge blanket reactor</i> (reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente o RALLFA)
v/v	volumen/volumen
VC	Vinaza cruda (sin dilución alguna como vienen de la planta cooperante)
V <sub>CH4</sub>	Volumen de metano
V <sub>CH4-Biogás</sub>	Volumen de metano experimental de 20 semanas obtenido a partir de la DA
V <sub>CH4-Biogás-1</sub>	Volumen de metano experimental obtenido a partir de la DA de la 1° etapa de evaluación estadística
V <sub>CH4-Biogás-2</sub>	Volumen de metano experimental obtenido a partir de la DA de la 2° etapa
V <sub>CH4-CG</sub>	Volumen de metano real de 10 semanas obtenido por cromatografía de gases
V <sub>CH4-DQO</sub>	Volumen de metano teórico de 20 semanas obtenido a partir de la demanda química de oxígeno
V <sub>CH4-DQO-1</sub>	Volumen de metano teórico obtenido a partir de la demanda química de oxígeno de la 1° etapa de evaluación estadística
V <sub>CH4-DQO-2</sub>	Volumen de metano teórico obtenido a partir de la demanda química de oxígeno de la 2° etapa de evaluación estadística
V <sub>AT</sub>	Volumen total para el cálculo de la alcalinidad total de una muestra acuosa ( $V_{AT}=V_{4.3} + V_{5.75}$ )
VD	Vinazas diluidas con agua de la llave (para su alimentación al RALLFA)
V <sub>m</sub>	Volumen de la muestra problema (50 mL)
V <sub>1</sub>	Volumen conocido en litros para la determinación de las curvas de calibración en la determinación de los parámetros (Anexo A. Ecuación A.1)

**Término****Definición**

$V_2$	Volumen desconocido en litros para la determinación de las curvas de calibración en la determinación de los parámetros (Anexo A. Ecuación A.1)
$V_{4.3}$	Volumen titulado para llevar la muestra problema a pH=4.3
$V_{5.75}$	Volumen titulado para llevar la muestra problema a pH= 5.75
Zafra	Se refiere a la cosecha de la caña de azúcar, proceso de quema-corte-recolección que posteriormente es llevada a los ingenios azucareros para ser procesada. Proviene del árabe y significa viaje, por el viaje que hacían los trabajadores a los sitios donde crecía la caña para cortarla y llevarla a su sitio de procesamiento ( <a href="http://etimologias.dechile.net/?zafra">http://etimologias.dechile.net/?zafra</a> )

**Letras griegas**

$\alpha$	Letra griega alfa. Factor de alcalinidad que indica la relación entre la alcalinidad bicarbonática y la alcalinidad total (Ecuación A4.3)
$\lambda$	Letra griega lambda, indica longitud de onda en los espectrofómetros UV-Vis
$\mu\text{L}$	Microlitros

## RESUMEN

En los procesos para la elaboración del azúcar y alcohol de caña se tienen grandes problemas de contaminación en el aire, el agua y los suelos debido a las descargas constantes de aguas residuales que son vertidas por esta industria en caso de no contar con alguna planta de tratamiento y/o recuperación de sus residuos. Para la producción del alcohol etílico se utilizan las melazas provenientes de la caña de azúcar. Este proceso produce en proporción de 12 a 15 litros de una corriente secundaria del fondo de la columna de destilación agotadora por cada litro de alcohol destilado. Esta corriente, conocida como vinaza, es evacuada de la primera torre de destilación a una temperatura de aproximadamente 80°C y se caracteriza por tener un pH ácido obtenido *ex profeso* para impedir la proliferación de microorganismos que puedan competir con la levadura *Saccharomyces cerevisiae* por la glucosa. Posee un elevado contenido de materia orgánica e inorgánica disuelta, coloidal y en suspensión que dificulta su recuperación. Una buena alternativa para el tratamiento del agua residual es la biodegradación anaerobia, con la cual se produce biogás rico en metano que posteriormente es utilizado como fuente de energía. En esta investigación, se realizó la evaluación del comportamiento de un reactor termofílico tipo RALLFA (siglas para reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente) para convertir los compuestos carbonosos de la vinaza medidos como demanda química de oxígeno en biogás rico en metano. Para ello, se operó uno de los reactores a escala de laboratorio de 2. L de volumen de trabajo, que se encuentran en los Laboratorios de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental de la UNAM el cual está a una temperatura de 65°C. El tiempo de operación fue de 24 semanas con una alimentación de 250 mL diaria de vinaza diluida al 25%, dando un tiempo de residencia hidráulica de 7 días. El contenido de materia orgánica medido como demanda química de oxígeno (DQO) estuvo en un promedio de  $79,639 \pm 2,309$  mg L<sup>-1</sup>. Para evaluar la estabilidad del proceso se midieron continuamente parámetros de seguimiento para el efluente como  $\text{pH}_{E65} = 7.2 \pm 0.41$ , alcalinidad  $6,596 \pm 1,120$  mgCaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>, determinación de sulfatos  $\text{SO}_4^{2-}{}_{E65} = 2,256 \pm 811$ , determinación de sulfuros,  $\text{S}^{2-}{}_{E65} = 18.0 \pm 3.0$ , determinación de DQO de  $\text{DQO}_{E65} =$

21,933±6,025 mgO<sub>2</sub> L<sup>-1</sup>, producción de biogás de 20 semanas  $V_{\text{CH}_4\text{-Biogás}} = 0.6 \pm 0.44$  L/semana. Como resultado se observó que, a pesar de estar en un pH neutro, el RALLFA aún se encuentra en etapa de estabilización al tener todavía una baja remoción, de 2.34 gO<sub>2Rem</sub> L<sup>-1</sup>, equivalente a 28±0.09%. Para la producción de biogás, se evaluó el contenido de metano real en el biogás,  $V_{\text{CH}_4\text{-CG}} = 0.32 \pm 0.20$  L/semana, con un rendimiento del CH<sub>4</sub> producido de 34 ± 13% m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>-CG /g DQO<sub>Rem</sub>. Se calculó el metano teórico de 20 semanas a partir de la DQO  $V_{\text{CH}_4\text{-DQO}} = 1.32 \pm 0.56$  L/semana. A partir de un análisis de varianza se encontró que no hubieron diferencias significativas entre el volumen experimental del biogás producido y el volumen de metano real contenido en el biogás. Por lo tanto, hubo un alto contenido de metano en el biogás. También se determinó que sí existe una diferencia significativa con respecto del volumen de metano teórico. En conclusión, en temperaturas termofílicas se necesitan largos tiempos de adaptación de las comunidades microbianas a pesar de encontrarse a pH neutro, lo que genera una baja producción de biogás, pero, por otro lado, se tiene una buena conversión de compuestos carbonosos a metano debido al efecto que la temperatura tienen sobre las arqueas metanogénicas obteniendo con ello una buena remoción de esos compuestos carbonosos biodegradables.

**Palabras clave:** Reactor termofílico anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA), vinazas, demanda química de oxígeno (DQO), biogás, metano (CH<sub>4</sub>)

# CAPÍTULO 1

## PROBLEMÁTICA

### 1.1. Planteamiento del problema

Las actividades humanas deplorables tienen como consecuencia la producción de una gran cantidad de desechos orgánicos que aceleran la liberación de gases de efecto invernadero al ambiente, lo que resulta en la alteración del equilibrio ecológico. La contaminación ambiental causada por las grandes cantidades de desechos industriales y el calentamiento global, debido a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), dan la oportunidad para la implementación de energías renovables.

Los combustibles fósiles, el petróleo y sus derivados, como fuente de energía no renovable están llegando a niveles de agotamiento acelerado (Sandoval-Rojas, 2015). En este sentido, la producción de biocombustibles ha despertado el interés mundial para la transformación y aprovechamiento de la energía útil (COLPOS, 2010). Con ello, se pretende controlar y reducir las emisiones contaminantes, el vertimiento de aguas residuales a cuerpos receptores (aguas o suelos) y satisfacer las necesidades de diferentes sectores de la sociedad.

En los procesos para la elaboración del azúcar y alcohol de caña se tienen grandes problemas de contaminación en el aire, el agua y los suelos debido a las continuas descargas de aguas residuales y subproductos que no son aprovechados y las emisiones a la atmósfera o atmósfera de monóxido de carbono, hidrocarburos, óxidos de azufre y de nitrógeno debidos a la quema de cultivos y combustibles fósiles no reaprovechadas (Ramírez-Burgos et al., 2000a,b). Para el caso de los ingenios azucareros productores de alcohol etílico, si se desaprovechan estas corrientes de

agua y subproductos, en sistemas de enfriamiento, de condensadores, de evaporadores, de calderas y del bioproceso de fermentación se tiene contaminación.

La materia prima que se utiliza para la producción del alcohol etílico son las melazas provenientes de la caña de azúcar, las cuales se fermentan con nutrientes y levaduras (*Saccharomyces cerevisiae*) a un pH ácido alcanzado por la adición de ácido sulfúrico para evitar la competencia de otras especies microbianas por la glucosa (Castro-González, 2004).

El mosto fermentado, llamado coloquialmente vino, se envía al tren de destilación para enriquecer la concentración de etanol y quitar los residuos de la fermentación: Mosto muerto o mezcla de alcoholes y otros compuestos orgánicos, restos de levadura muerta y materia en suspensión.

En la columna fraccionadora se inicia la destilación por arrastre de vapor. Del fondo sale una corriente líquida a una temperatura entre 85 y 88°C, denominada **VINAZA**. Esta corriente contiene casi todos los productos secundarios de la fermentación (Bautista-Zúñiga, 2000).

El etanol concentrado en las diferentes columnas de destilación llega a casi 95% en volumen (antes de llegar a su punto azeotrópico). Posteriormente, se lleva a las torres de destilación rectificadoras para la recuperación del etanol por los domos.

Las vinazas provenientes de los complejos azucareros/alcoholeros pueden ser las aguas residuales más contaminantes por su gran volumen de generación, por su alto contenido de compuestos orgánicos e inorgánicos y su difícil y costosa separación ya que se producen en una proporción de 12 a 15 litros por cada litro de alcohol destilado (Sandoval-Rojas, 2015). Por ello, se tienen continuamente propuestas para darles un valor agregado que cubra los costos de su separación y aprovechamiento (Contreras-Contreras, 2019; Correa-López, 2022; Gaspar-Mendoza, 2022; Martínez-Arellano, 2022).

La materia orgánica e inorgánica disuelta, coloidal y en suspensión que contiene puede convertirse en gas metano si es biodegradable y si no lo es, puede separarse y usarse como antioxidante (Contreras-Contreras, 2019; Correa-López, 2022; Gaspar-Mendoza, 2022; Martínez-Arellano, 2022).

La temperatura a la cual son evacuados dificulta su transformación mediante un tratamiento convencional o proceso biológico (Rojas-Zamudio, 2018). Este subproducto, si no es reaprovechado, representa un fuerte problema de contaminación, ya que cuando se vierte sobre ríos, lagos, presas, canales y/o directamente sobre las tierras de cultivo ocasionando su deterioro al incrementar su temperatura y disminuir la cantidad de oxígeno disuelto disponible.

En México existe una ley que reglamenta las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1996) y que recientemente fue actualizada (DOF, 2021), que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales o cuerpos receptores propiedad de la nación.

Una buena opción para el tratamiento de aguas residuales de la industria alcoholera es la biodegradación anaerobia, con la cual se obtiene biogás para posteriormente ser utilizado como fuente de energía ya que está compuesto principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y, en menor cantidad, por ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), entre otros gases (Bailey y Ollis, 1986; Bernd et al., 2012; Poblano-Flores, 2015).

En México, se ha comenzado el desarrollo de la producción de biocombustibles al emplear políticas que permitan el fomento a la producción de energías más limpias, tal es el caso de la promulgación en 2008 de la Ley de Promoción y Desarrollo de Bioenergéticos, cuya finalidad es contribuir a la diversificación energética y de desarrollo sustentable del campo mexicano.

El programa Nacional de Desarrollo 2007-2012, del gobierno federal, estableció la Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC) para cumplir con los compromisos suscritos por el país en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), derivados del Protocolo de Kioto (Bernd et al., 2012). A pesar de los variados programas y proyectos que existen, la producción de biogás ha quedado rezagada a los últimos lugares en las estadísticas de energías más limpias.

Según estimaciones de expertos, se producen en México unos 114 Mm<sup>3</sup>/año de biogás con una generación eléctrica de 109 GWh/año, lo que representa una fracción minúscula de la meta establecida por la Ley General de Cambio Climático de 112, 000 GWh/año (Gutiérrez, 2018).

## **1.2. Justificación y propuesta de solución a la problemática planteada**

Para el tratamiento de aguas residuales de destilerías se emplean reactores RALLFA (reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente) en los que se establecen parámetros biológicos, químicos y físicos con la finalidad de que los diversos microorganismos inoculados degraden la materia orgánica presente en las vinazas. Estos reactores fueron desarrollados para el tratamiento de aguas residuales industriales con una concentración de materia orgánica mediana y elevada. Su diseño simple resulta ser una ventaja para la remoción de contaminantes (Toscano-Pérez, 2012); además, el proceso es económicamente factible al tener bajos costos de operación y no requerir de oxígeno. Esta bioconversión o degradación anaerobia (DA) resulta prometedora, ya que degrada la materia orgánica más eficientemente y una mayor eliminación de organismos patógenos (Castro-González, 2004). Algunas de las desventajas del proceso de la DA en los reactores RALLFA son: Largos tiempos de adaptación de las comunidades microbianas a altas temperaturas termofílicas (45 a 65°C); pérdida de lodo granular por el efluente; hedores por la formación de ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) presente en el

biogás y otra parte en el agua residual que posteriormente se transforma en sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) nuevamente si no se separan los sulfuros.

Por lo tanto, se busca emplear alternativas eficaces en la transformación de la materia orgánica mediante la degradación anaerobia en condiciones termofílicas. Parte de esta materia orgánica en ausencia de oxígeno se convierte en biogás, constituido principalmente por metano y dióxido de carbono para que, posteriormente, pueda ser utilizado el metano como combustible para la generación de energía. Resulta importante evaluar la eficiencia del biogás que se produce en un reactor anaerobio termofílico con el objeto de estudiar el efecto de la temperatura en un intervalo termofílico ( $65^\circ\text{C}$ ) sobre la actividad microbiana en reactores anaerobios, con el fin de establecer el comportamiento y la eficiencia del proceso que llevan a cabo los organismos productores de metano y la degradación de materia orgánica, ya que estos efluentes de la primera torre de destilación son desechados a una temperatura de aproximadamente  $80^\circ\text{C}$ .

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Estudiar el comportamiento de un reactor termofílico anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente convirtiendo los compuestos carbonosos de vinazas medidos como demanda química de oxígeno en biogás mediante métodos espectroscópicos y cromatográficos.

#### **1.3.2. Objetivos particulares**

- Caracterizar la vinaza, antes y después de su tratamiento, mediante análisis fisicoquímicos de acuerdo con las normas internacional aplicables

estableciendo las condiciones de operación en un reactor RALLFA operado a 65°C para favorecer la producción de metano y

- Realizar análisis fisicoquímicos del influente y efluente corroborando la estabilidad del reactor midiendo la demanda química de oxígeno (DQO) del influente y efluente de un reactor anaerobio a escala de laboratorio
- Determinar la cantidad de biogás producido en el biorreactor anaerobio evaluando por cromatografía de gases la cantidad de metano real que contiene.

#### **1.4. Metas y alcances**

- Estabilización del RALLFA operado a 65°C a un pH neutro
- Establecimiento de las condiciones de alimentación que permitan mejorar la etapa evitando la acidificación del RALLFA

A continuación, se presentan las bases de esta investigación.

## **CAPÍTULO 2**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Importancia de los ingenios azucareros y alcoholeros en México**

El cultivo de la caña de azúcar y la industria alcoholera en México constituyen uno de los pilares económicos y sociales en el desarrollo del país (Contreras-Contreras, 2019, SIAP, 2017). México es catalogado como el sexto país productor de azúcar a nivel mundial y el sexto como exportador (GCMA, 2022). En la zafra 2021/2022 operaron 49 ingenios azucareros con presencia en quince entidades federativas, mismos que industrializaron más de 54 millones de toneladas de caña bruta para obtener una producción de azúcar de más de 6 millones de toneladas (CONADESUCA, 2022a). La agroindustria de la caña de azúcar genera un motor económico y de desarrollo. En el 2020 representó el 2.6% PIB manufacturero, 13.8% PIB agropecuario y el 11.6% PIB de la industria alimentaria; lo cual benefició a más de 2.4 millones de mexicanos y se emplea a casi medio millón (CONADESUCA, 2020); para la zafra 2020/2021 representó el 0.50% de PIB nacional, 3.01% PIB manufacturero, 6.21% PIB agropecuario y el 16.74% PIB de la industria alimentaria (CONADESUCA, 2022b).

Se creó la Ley de Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar, publicada el 22 de agosto del 2005 en el Diario Oficial de la Federación, con el objetivo de establecer las reglas y condiciones en las que se debe de dar la relación entre productores e industria (SADER, 2019). También fija las normas de las actividades asociadas con la agricultura, industrialización y comercialización de la caña de azúcar, sus productos, subproductos, coproductos y derivados. Los subproductos como el bagazo, cachaza, gases de combustión y vinazas pueden ser utilizados como nuevas fuentes para la cogeneración de energía y productos orgánicos con el fin de proporcionar beneficios ambientales, económicos, sociales y de salud pública

(Durán-Domínguez-de-Bazúa, 2022). A pesar de ello, persisten graves problemas debido a la falta de soluciones sostenibles para el manejo y control de los subproductos o residuos generados.

En México se contaba con 60 ingenios a finales de la década de los noventa, pero a partir del 2019 solamente operan 50 ingenios, debido a una mayor competencia con otros productores de edulcorantes, factores económicos por la falta de eficiencia energética, la baja productividad y principalmente por los daños ocasionados por la contaminación ambiental. También, una de las principales fuentes de contaminación de agua es el sector industrial, que integra las descargas generadas de las actividades de extracción y transformación de recursos naturales usados como bienes de consumo y satisfactorios para la población (Detor-Méndez y Hernández-Segoviano, 2012).

### **2.1.1. Producción de azúcar**

Existen diferentes tecnologías y operaciones en cada etapa del proceso de la elaboración de azúcar de la caña que dependerán principalmente del contenido de sacarosa y del tipo que se desee obtener (refinada, estándar, mascabado, etc.). La primera etapa en el proceso consta de la evaluación del campo, labranza convencional o mecanizada, siembra de la caña y, finalmente, cuando la caña de azúcar alcanza su óptima maduración se lleva al área de batey para ser pesada, almacenada y lavada. Se pasa a cortado y molienda (más bien es prensado) donde se extrae el jugo de caña (guarapo). La pulpa final (bagazo) contiene el azúcar no extraído, fibra y entre 40 y 50% de agua. Para ayudar a la extracción se aplican aspersiones de agua llamada de imbibición (generalmente de los condensadores de los evaporadores) o guarapo diluido sobre la capa de bagazo. Esto, como se dijo antes, es conocido como proceso de imbibición, maceración o saturación (Bernal-González, 1997; Rojas-Cárdenas, 2014). El guarapo, debido a las reacciones enzimáticas, es ácido y de color verde oscuro que rápidamente pasa a café, por lo

que se clarifica para eliminar las impurezas solubles e insolubles por medio de la sulfitación y posterior ‘alcalización’ (como es llamada en los ingenios azucareros mexicanos). En la sulfitación el guarapo es tratado con anhídrido sulfuroso ( $\text{SO}_2$ ), con lo que se inactivan las enzimas que provocan el oscurecimiento enzimático, un procedimiento ampliamente usado en la producción de vinos, en el secado de orejones de fruta, etc. De esta forma se produce la llamada azúcar estándar. En la ‘alcalización’ se adiciona cal apagada,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , con calor, hasta el punto de ebullición, para neutralizar la acidez del guarapo; inhibir la inversión de la sacarosa (hidrólisis de glucosa y fructosa); coagular grasas, ceras y gomas y purificar el jugo por medio de la coagulación de partículas suspendidas o coloidales (Saúles-Aguilar, 2003). El bagacillo y otras partículas sólidas en suspensión se separan por sedimentación y posterior filtración; los lodos obtenidos, conocidos como cachaza, son enviados a los cañaverales para enriquecer el suelo. La Figura 2.1 presenta de manera general el proceso.

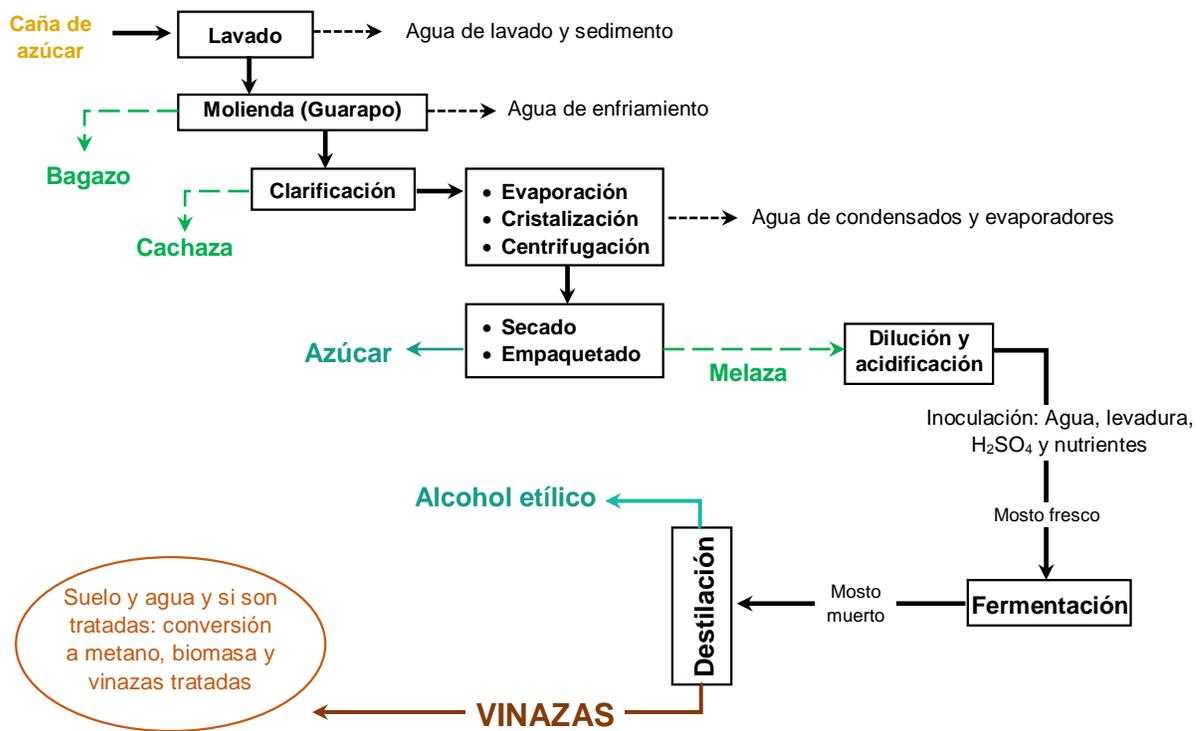


Figura 2.1. Diagrama del proceso de producción de azúcar y alcohol (Modificado de Bautista-Zúñiga, 2000; Rincón-Acelas, 2008; Vergara-Salgado, 2010)

El guarapo clarificado es enviado a un tren de evaporadores al vacío de múltiple efecto para concentrar la solución de azúcar y eliminar el 85% de agua. El jugo concentrado contiene aproximadamente 65% de sólidos y 35% de agua, concentración ideal para la cristalización; la cual es realizada en evaporadores de simple efecto, conocidos como tachos (Bernal-González, 1997). En ellos se siembra finos cristales de azúcar en polvo (los cristales y sus mieles se dividen en tres tipos A, B, C y este último es el que tiene tamaño de cristales más pequeño) que se mezclan con el jarabe conforme se evapora el agua para formar cristales más grandes que son el producto comercial de azúcar crudo o mascabado de color oro o café claro (sin sulfitación) o estándar de color beige (proveniente de mezclas de mieles A y B). La llamada masa cocida (*masse cuite* en francés, de donde viene la palabra masacote o mazacote) o miel concentrada ya con cristales en suspensión es enviada a las centrífugas donde son separados los cristales de sacarosa de las mieles finales o incristalizables (melazas); que tienen una alta concentración de sólidos solubles (88°Brix<sup>1</sup>) y una elevada viscosidad con aproximadamente una tercera parte de sacarosa, una quinta parte de glúcidos reductores (glucosa y fructosa) y cenizas (Bernal-González, 1997; Rojas-Cárdenas, 2014).

### **2.1.2. Producción de etanol**

Algunos de los ingenios azucareros cuentan con destilerías que utilizan las melazas, provenientes del procesamiento de la caña de azúcar como materia prima para producir alcohol etílico, a partir de una fermentación controlada y posterior destilación, la elaboración de alimentos para el ganado y la producción de levadura (Correa-López, 2022). El alcohol etílico o etanol, comúnmente llamado alcohol, es un compuesto de suma importancia, por su gran aplicación en diversas industrias como solvente, productos farmacéuticos, perfumes, productos alimenticios, combustible

---

<sup>1</sup> Los grados Brix especifican la concentración de la sacarosa en dilución acuosa y se definen como los gramos de sacarosa que contienen 100 gramos de disolución; es decir, el porcentaje en masa de sacarosa (Rodríguez-Rivera, 1993)

doméstico y en la elaboración de bebidas alcohólicas y licores. Dependiendo de su uso varía el grado de pureza. El etanol es obtenido sintéticamente a partir del etileno, pero también puede ser producido por la fermentación de hidratos de carbono o materias glucosadas (caña de azúcar, uvas, maíz, centeno, agaves); materias amiláceas, que son polímeros de glucosa (arroz, cebada, malta, trigo, sorgo, papa y otros tubérculos); productos lácteos (suero); materias celulósicas (residuos forestales, residuos de la pulpa del papel); residuos agrícolas y basura orgánica urbana. Estas fuentes de biomasa tienen la ventaja de ser renovables en la naturaleza, a diferencia de los combustibles fósiles derivados del petróleo (Bernal-González, 1997; Pacheco-Suárez, 2016; Wilkie et al., 2000).

La elaboración del etanol comienza con la preparación del sustrato. Consiste en diluir la melaza inicial, que contiene de un 50 a 55% de glúcidos fermentables, de tal manera que reduzcan su contenido de glúcidos alrededor del 14 y 18% en masa (Pacheco-Suárez, 2016). Otros autores como Rodríguez-Rivera (1993) y Saúles-Aguilar (2003) informaron que se debe diluir hasta alcanzar entre 20 y 22°Brix. Después se adiciona ácido sulfúrico para ajustar el pH entre 4 y 4.5. La mezcla, denominada mosto fresco, se lleva al pasteurizador donde se añaden nutrientes como sulfato de amonio  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  y fosfato de amonio  $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$  para el desarrollo de la levadura. En los tanques de prefermentación se desarrolla el mosto, con desprendimientos de  $\text{CO}_2$ , hasta alcanzar la maduración de la levadura. Posteriormente, en las tinas de fermentación, en condiciones anaerobias, se lleva a cabo la reacción bioquímica que convierte la glucosa a alcohol etílico y dióxido de carbono a una temperatura de 20-30°C, la verdadera fermentación de Louis Pasteur. La reacción producida es exotérmica, por lo que puede afectar negativamente la actividad celular de la levadura y el rendimiento de etanol, por esta razón los recipientes empleados para la fermentación deben contar con un medio eficiente de enfriamiento<sup>2</sup> (Pacheco-Suárez, 2016).

---

<sup>2</sup> Aunque debido a las condiciones imperantes en la mayor parte de los ingenios azucareros-alcoholeros, esto no ocurre (nota de la asesora)

Para detener la fermentación se deja incrementar la temperatura a 38°C, inactivando con ello a la levadura y reduciendo la liberación de CO<sub>2</sub>. Se obtiene un producto llamada mosto muerto o vino, que contiene una mezcla de alcoholes, en mayor proporción etanol, restos de sustratos, materia suspendida, levadura empleada y la levadura generada (Rodríguez-Rivera, 1993). El licor fermentado final, se pasa a un colador para eliminar cualquier partícula gruesa que pueda obstruir el trabajo de separación. Posteriormente, se envía a un sistema de columnas de destilación. Los sistemas de destilación son muy variados y pueden constar desde dos columnas hasta seis o más, dependiendo del grado de rectificación o pureza que se desee (Pacheco-Suárez, 2016).

El mosto fermentado es alimentado a la primera columna, conocida como destrozadora, fraccionadora o columna de agotamiento. La destilación por arrastre de vapor separa los componentes de más bajo punto de ebullición los cuales salen por el domo, constituida por agua, alcohol, aldehídos y cetonas<sup>3</sup>. Del fondo sale una corriente líquida a una temperatura entre 85 y 88°C, las vinazas (Bernal-González, 1997). Por la parte media se extrae alcohol diluido entre 0 a 10% v/v que es alimentado a la segunda columna.

En el domo de la depuradora, la cual purifica el alcohol diluido, se obtienen destilados ligeros que pasan por un condensador y una parte de la fase líquida retorna a la columna como reflujo y otra sale como cabezas, formadas por etanol, metanol, aldehídos y otras impurezas. Del fondo sale una mezcla de alcoholes sin aldehídos, conocida como colas, las cuales son separadas por diferencia de densidades para extraer un aceite conocido como *fusel* (Rodríguez-Rivera, 1993). De la parte media de la columna se obtiene etanol a una concentración entre 30 a 60% v/v que se envía a la siguiente columna (Bernal-González, 1997).

---

<sup>3</sup> De hecho, este es un punto de mejora ya que se diluye enormemente con el vapor de agua que se usa para arrastrar el etanol a la segunda columna. Debería ser una columna de rectificación para producir una cantidad muchísimo menor de vinazas construida con acero inoxidable de buena calidad para resistir la corrosión por el pH ácido de las vinazas (nota de la asesora)

De esta columna pasa a otra, conocida como de rectificación, donde se obtienen del domo los compuestos ligeros y otra parte se lleva a reflujo; de la parte inferior, las colas, están constituidas por alcoholes amílicos y residuos de aceite *fusel*; de la parte media, el etanol sale con una concentración de 95-96% de volumen (Bernal-González, 1997).

### **2.1.3. Vinazas**

Las vinazas habían sido consideradas hasta hace poco tiempo como residuos y eran enviadas a ríos, lagunas, cuencas y otros cuerpos receptores de agua y suelo lo que afecta el desarrollo de la flora y fauna en esos cuerpos receptores naturales (Contreras-Contreras et al., 2020; Correa-López, 2022; Gaspar-Mendoza, 2022; Martínez-Arellano, 2022). Ahora se sabe que es posible obtener beneficios de su contenido de compuestos carbonosos biodegradables y no biodegradables. La naturaleza y composición química de las vinazas es variable según el tipo de tratamiento al cual hayan sido sometidos primero los jugos y luego las mieles, los aditivos y productos químicos usados, el método seguido durante la fermentación para producir el etanol, las especies de levadura utilizadas y el proceso seguido en el tren de destilación (CONADESUCA, 2016a,b).

Como ya se ha mencionado antes, el volumen producido de las vinazas es de 12 a 15 litros por cada litro de alcohol destilado. Tienen un pH ácido de 3 a 5 debido a la adición del ácido sulfúrico para favorecer el desarrollo de las levaduras (*Saccharomyces cerevisiae*) e inhibir a otras especies microbianas que puedan competir por la fuente de carbono. Presenta una gran cantidad de materia orgánica que, medida como demanda química de oxígeno (DQO), oscila entre 40 y 150 g DQO L<sup>-1</sup> (Castro-González, 2004; Contreras-Contreras, 2019; Poblano-Flores, 2015). Se descargan a temperaturas entre 70 y 90°C ya que el punto de ebullición del etanol es de 78.4°C y, debido a la transformación del azúcar a fenoles y polifenoles durante

la concentración y cristalización de las mieles de jugo de caña, poseen un color café oscuro característico (Rincón-Acelas, 2008).

En la Tabla 2.1 se muestra una recopilación de la caracterización de la vinaza según varios autores.

**Tabla 2.1. Compendio de la caracterización de la vinaza (modificado de Contreras-Contreras, 2019)**

Parámetro	Unidad	Referencia						
		Contreras-Contreras, 2019	Rojas-Zamudio, 2018	Cabrera-Díaz et al., 2017	Detor-Méndez y Hernández-Segoviano, 2012	Rincón-Acelas, 2008	Castro-González y Durán-de Bazúa, 2002	Bautista-Zúñiga y Durán de Bazúa, 1998
pH	-	4.728	4.57	4.23	4.986	4.28	4.34	4.5
C. E.	mS/cm	20.211	n. d.	10.48	n. d.	26 500	n. d.	16 010
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub>	1 830.70	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
DQO	mg/L	66 791	123 682.96	46 080	72 448.85	116 250	100 428	117 876
DBO <sub>5</sub>	mg/L	6 870	n. d.	n. d.	61 440	98 250	91 771	n. d.
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/L	10 876.50	19 564.97	2 196.07	n. d.	8 150	n. d.	n. d.
S <sup>2-</sup>	mg/L	209.9	4 646.26	n. d.	0.5366	69	n. d.	n. d.
H <sub>2</sub>	mg/L	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	6.77 %	44.96	n. d.
Cl <sup>-</sup>	mg/L	n. d.	n. d.	n. d.	5.5x10 <sup>-4</sup>	5 230	n. d.	n. d.
N	mg/L	n. d.	n. d.	616	1.0027	6.10 %	1.24	n. d.
C	mg/L	n. d.	n. d.	n. d.	2.638	4.47 %	38.18	n. d.
ST	mg/L	32 069	n. d.	64 138	65 591	91 227	58 450	116 197
STV	mg/L	26 438	n. d.	50 818	36 099.33	63 792.00	47 250	82 222
SST	mg/L	5 642	n. d.	232	n. d.	7 591	4 300	10 683
SSV	mg/L	1 517	n. d.	572	n. d.	5 884	4 100	9 215
SDT	mg/L	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	83 683	54 150	105 514
SDV	mg/L	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	78 463	43 150	81 007
STF	mg/L	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	27 435	11 200	26 976
SSF	mg/L	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	1 706	200	1 468
SDF	mg/L	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	5 220	11 000	24 508

C.E.: Conductividad eléctrica; DQO: Demanda química de oxígeno; DBO<sub>5</sub>: Demanda bioquímica de oxígeno; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>: Sulfatos; S<sup>2-</sup>: Sulfuros; H<sub>2</sub>: Hidrógeno; Cl<sup>-</sup>: Cloruros; N: Nitrógeno; C: Carbono; ST: sólidos totales; STV: sólidos totales volátiles; SST: sólidos suspendidos totales; SSV: sólidos suspendidos volátiles; SDT: sólidos disueltos totales; SDV: sólidos disueltos volátiles; STF: sólidos totales fijos; SSF: sólidos suspendidos fijos; SDF: sólidos disueltos fijos; n. d.: no determinado

Por su alto contenido de agua, elementos orgánicos y minerales es un recurso muy importante para los campos de cultivo porque, si la composición química del suelo lo permite, se puede aplicar y distribuir cantidades adecuadas directamente al suelo. La fertirrigación (riego de suelo) estimula el crecimiento de la caña de azúcar posponiendo el periodo de su maduración y aumentando la humedad en el tallo (Pacheco-Suárez, 2016). Sin embargo, puede ocasionar cambios en el contenido de sacarosa y perjudicar la producción de alcohol. Se ha encontrado que presenta leves alteraciones en las propiedades químicas de los suelos después de 12 meses de aplicación de vinaza con aumento de pH (Detor-Méndez y Hernández-Segoviano, 2012).

La vinaza tiene atributos como fertilizante puesto que logra un incremento en los nutrientes agregados al suelo y debido a su acidez provoca el desarrollo de la biomasa microbiana. Se ha usado como sustituto de alimento para cerdos, peces, pollos (Detor-Méndez y Hernández-Segoviano, 2012); como fuente energética vía incineración y para la producción de biogás mediante un tratamiento de degradación anaerobia, con lo que se evitaría la liberación de metano a la atmosfera (Poblano-Flores, 2015). Recientemente, debido a la pandemia de la enfermedad denominada Covid-19 han salido algunas investigaciones bibliográficas más amplias sobre sus usos (Correa-López, 2022; Gaspar-Mendoza, 2022; Martínez-Arellano, 2022).

## **2.2. Degradación anaerobia**

La digestión<sup>4</sup> o degradación anaerobia (DA) es un proceso biológico en el que la materia orgánica e inorgánica presente en las vinazas, en ausencia de oxígeno, es transformada a biogás; una mezcla de gases compuesta principalmente por metano y dióxido de carbono con trazas de otros elementos. La materia orgánica

---

<sup>4</sup> La digestión es un proceso inherentemente anaerobio, es decir, se realiza sin la presencia de oxígeno molecular. Por ello, el nombrar al proceso “digestión” anaerobia es un pleonasma [Nota de la asesora]

biodegradable es metabolizada por una variedad de consorcios microbianos. Los consorcios microbianos realizan la bioconversión al adaptarse a condiciones favorables de temperatura y disponibilidad de nutrientes, pueden sustentar sus necesidades metabólicas a través del rompimiento enzimático de las moléculas orgánicas mediante muchas reacciones bioenzimáticas. Para estudiar dicho proceso se ha dividido en cuatro grandes etapas (Tabla 2.2): Hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

**Tabla 2.2. Etapas globales metabólicas y procesos en la degradación anaerobia (Castro-González, 2004; Celis-García, 2000)**

<b>Etapas</b>	<b>Proceso</b>
<b>Hidrólisis</b>	1. Conversión de polímeros orgánicos complejos a monómeros solubles por Bacterias o genéricamente microorganismos hidrolíticos. A Hidrólisis de proteínas B Hidrólisis de carbohidratos C Hidrólisis de lípidos
<b>Acidogénesis</b>	2. Fermentación de aminoácidos, glúcidos, alcoholes 3. Oxidación anaerobia de ácidos grasos de cadena larga D Microorganismos acidogénicos productores de ácido acético E Microorganismos acidogénicos productores de ácidos orgánicos y alcoholes F Microorganismos acidogénicos productores de hidrógeno
<b>Acetogénesis</b>	4. Oxidación anaerobia de ácidos grasos volátiles (AGV) G Microorganismos homoacetogénicos H Microorganismos acetogénicos obligados productores de hidrógeno (OHPA) 5. Conversiones por la actividad de sulfato reducción I Microorganismos sulfato reductores acetotróficos J Microorganismos sulfato hidrogenotróficos
<b>Metanogénesis</b>	6. Producción de metano K Arqueas metanogénicas acetoclásticas/ metanogénesis acetotrófica L Arqueas metanogénicas hidrogenófilas/ metanogénesis hidrogenotrófica

En la DA más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose solo un 10% de la energía en la proliferación microbiana

(Vergara-Salgado, 2010) a diferencia de un sistema aerobio donde se consume el 50% para su reproducción (Rincón-Acelas, 2008).

La primera gran etapa de la DA es la hidrólisis, en la cual se lleva a cabo la degradación de material orgánico complejo (carbohidratos, proteínas, grasas), que fragmenta las macromoléculas orgánicas a especies de menor tamaño como los ácidos grasos, aminoácidos y glúcidos. Para la segunda etapa, los microorganismos acidogénicos llevan a cabo la transformación de esos últimos componentes a ácidos grasos volátiles, alcoholes, aldehídos, amoníaco, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e hidrógeno ( $\text{H}_2$ ); con el objeto de eliminar cualquier vestigio de oxígeno disuelto en el sistema. Posteriormente, las bacterias acetogénicas producen esencialmente ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno a partir de los ácidos grasos volátiles. Finalmente, los microorganismos metanogénicos o arqueas metanogénicas (AM) utilizan los productos finales de las etapas anteriores como  $\text{H}_2$ , acetato,  $\text{CO}_2$  y compuestos metilados para producir metano ( $\text{CH}_4$ ) (Evans et al., 2019); si hay sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), estos son reducidos a ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y sulfuros ( $\text{S}^{2-}$ ) (Rincón-Acelas, 2008).

La conversión de la materia orgánica depende de la actividad de los microorganismos anaerobios obligados (aquellos que no requieren de oxígeno y la presencia de este las inhibe) y facultativas (que pueden ser aerobias o anaerobias dependiendo de las condiciones existentes donde se encuentren). La actividad en un digestor se puede resumir en varios procesos que llevan a cabo la población mixta de microorganismos, las cuales están englobadas en las cuatro etapas metabólicas mostradas esquemáticamente en la Figura 2.2 (Koster y Cramer, 1987).

Las arqueas metanogénicas (AM) intervienen en el proceso final de la DA y la formación de metano. Se ha descubierto que las secuencias de ARN y otras características fisiológicas de un grupo de procariontes eran diferentes a las de las bacterias y clasificaron a este grupo en un nuevo dominio: Archaeabacteria (ahora Archaea). El dominio Archaea se divide en diferentes filos: Eukarchaeota,

Bathyarchaeota, Crenarchaeota, Crenarchaeota de aguas termales Euryarchaeota, Korarchaeota, Nanoarchaeota, Thaumarchaeota y, el más reciente, Verstraetearchaeota (López-Reyes et al., 2022).

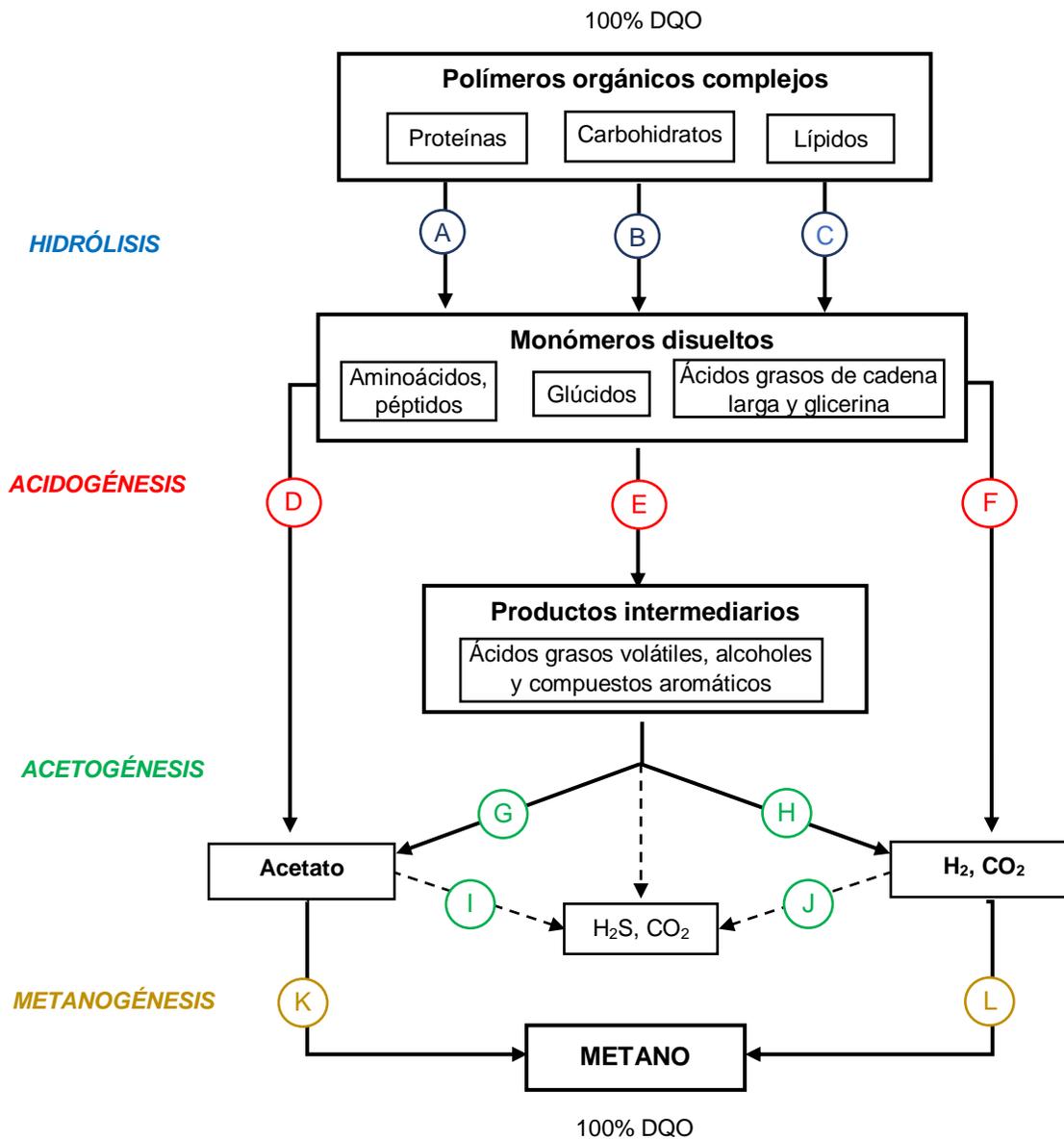


Figura 2.2. Diagrama modificado de la degradación anaerobia (Castro-González, 2004; Gujer y Zehnder, 1983; Koster y Cramer, 1987)

La enzima metil-coenzima M reductasa (Mcr), cataliza el último paso de la metanogénesis (Evans et al., 2019). De acuerdo con su fuente de energía, las AM se clasifican en tres grupos: 1) las hidrogenotróficas, que usan el H<sub>2</sub> y el formiato; 2) las acetoclásticas, que usan el acetato; y las metilotróficas que usan compuestos de metilo (X-CH<sub>3</sub>). Los metanógenos son muy diversos con respecto a la morfología celular, desde formas de células cocoidales regulares e irregulares, hasta varillas cortas y filamentos largos (Angelidaki et al., 2011; Ferrer y Pérez, 2010). En la Tabla 2.3 se presenta una clasificación de estas arqueas.

**Tabla 2.3. Clasificación y propiedades de las arqueas metanogénicas en condiciones termófilicas (Citada por Castro-González, 2004)**

Especie	Morfología	Pared celular	Sustrato	Temp. óptima (°C)	Factor de desarrollo	Referencia
<i>Methanobacterium thermoaggregans</i>	Bastones largos a filamentos formando agregados	DND	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	65	-	Blotevogel y Fischer
<i>Methanobacterium thermoalcaliphilum</i>	Bastones largos a filamentos	DND	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	58-62	Extracto de levadura	Blotevogel et al., 1985
<i>Methanobacterium thermoautotrophicum</i>	Bastones largos a filamentos	Pseudo mureína	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	65-70	-	Balch et al., 1979; Mah, 1980
<i>Methanobacterium thermoformicicum</i>	Bastones	DND	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> , formato	55	-	Zhilina e Ilarionov, 1984
<i>Methanobacterium wolfei</i>	Bastones	Pseudo mureína	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	55-65	Extracto de levadura	Winter et al., 1984
<i>Methanobacterium ivanovii</i>	Bastones a filamentos	DND	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	45	-	Belyaev et al., 1983
<i>Methanothermus fervidus</i>	Bastones cortos	Pseudo mureína	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	83	Extracto de levadura	Stetter et al., 1981
<i>Methanococcus jannaschii</i>	Cocos irregulares	DND	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	85	-	Jonas et al., 1983a
<i>Methanococcus thermolithotrophicus</i>	Cocos irregulares	Proteína	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> , formato	65	-	Huber et al., 1982
<i>Methanogenium fritonii</i>	Cocos irregulares	Proteína	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> , formato	57	-	Harris y col, 1984
<i>Methanogenium thermophilicum</i>	Cocos irregulares	Proteína	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> , formato	55-58	Ácido acético, tripticasa	Rivard y Smith, 1982; Zabel et al., 1985
<i>Methanogenium wolfei</i>	Cocos irregulares	DND	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> , formato	45	Ácido acético, arginina	-
<i>Methanosarcina thermophila</i>	Cocos irregulares formando agregados	Heteropolisacáridos	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> , metanol, metilaminas, acetato	50	p-amino benzoico	Zinder et al., 1985
<i>Methanotherix thermoacetophila</i>	Bastones a filamentos	DND	Ácido acético	65	-	Nozhevnikova y Chudina, 1984

DND: Dato no disponible

### 2.2.1. Inhibidores en la degradación anaerobia

Los inhibidores comúnmente presentes en los digestores o biorreactores anaerobios incluyen amoníaco, sulfuro, iones de metales y compuestos orgánicos resistentes (Chen et al., 2008). Una de las causas más frecuentes de falla de proceso en los digestores o reactores anaerobios es cuando se tiene una sobrecarga orgánica resultante de la inhibición de metanógenos debido a la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV), acidosis, o toxicidad por  $\text{NH}_4^+$  (Basak et al., 2021). La acumulación de AGV es causada directamente por el desequilibrio cinético entre la degradación acidogénica y la utilización de los AGV producidos por microorganismos acetogénicos y sintróficos y por las arqueas metanogénicas (Yuan et al., 2019). Cuando decaen los valores de pH, debido a la acidificación del reactor, varios autores recomiendan que se ajuste con NaOH y  $\text{NaHCO}_3$  para la estabilización; sin embargo, el uso de grandes cantidades de NaOH puede inhibir las actividades metabólicas de los metanógenos. Por eso siempre es mejor poner bicarbonato. Ferraz-Júnior et al. (2016) mencionan que el aumento en la carga orgánica (*OLR* en inglés, *organic load rate*) al reducir los TRH de los reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente y la adición de  $\text{NaHCO}_3$  al influente de los reactores tiene una fuerte influencia en la producción de metano.

Los factores que frecuentemente impulsan la inestabilidad de los sistemas de una sola etapa incluyen fluctuaciones de temperatura, pH, sobrecarga, ácidos grasos volátiles o entrada no deseada de inhibidores externos. Los problemas de procesamiento debido a la presión parcial de hidrógeno detienen el consumo de glucosa durante la acidogénesis, mientras que el pH elevado se apodera de la metanogénesis en gran medida. La sobrecarga del sistema, la baja tasa de carga, los tiempos de residencia hidráulica (TRH) más largos y la acumulación de inhibidores podrían restringir la explotación de los sistemas de una sola etapa para la producción de biogás a gran escala (Divya et al., 2015). De acuerdo con lo reportado por Divya et al. (2015) tener un sistema de digestión de dos etapas mejora la estabilidad del proceso, reduce los TRH y se tiene una mayor producción de biogás al separar las

etapas de hidrólisis/acidogénesis de la acetogénesis/metanogénesis y la disminución moderada de los inhibidores.

Luo et al. (2011) observaron una mejora del 11% en la eficiencia energética general de un sistema de dos etapas en comparación con una etapa al tratar vinaza de yuca a 55°C. Nasr et al. (2012) lograron un 18.5% en el rendimiento total de energía mediante la DA en dos etapas en comparación con una etapa para la producción de metano e hidrogeno utilizando vinaza fina. Por otro lado, Ferraz-Júnior et al. (2016) evaluaron el desempeño de reactores tipo RALLFA metanogénicos termofílicos en la cual el de dos etapas tuvo una producción de energía del 25.7 % mayor que el de una etapa. Niz et al. (2021) evaluaron la DA en una etapa (metanogénica) y dos etapas (acidogénica/ metanogénica) a 70°C obteniendo una producción de metano del 13% y 17%, respectivamente; sin embargo, en dos etapas no produjo metanogénesis acetoclástica resultando en una acumulación de ácido acético; por lo que las condiciones termófilas extremas son una alternativa para la producción de hidrógeno y ácido acético. Mao et al. (2015) reportaron que las condiciones óptimas para la DA serían la hidrólisis / acidogénesis termófila y la acetogénesis / metanogénesis mesófila, lo cual es consistente con un proceso de digestión o degradación anaerobia de dos fases.

Los sulfatos no son considerados una amenaza cuando están disueltos en las vinazas, pues es químicamente inerte, no volátil y no tóxico en condiciones anaerobias (Castro-González, 2004); no obstante, el alto contenido de sulfato causa problemas en la DA puesto que los microorganismos sulfatoredutores (MSR) son capaces de utilizar sulfato como aceptor terminal de electrones y convertir el sulfato en azufre divalente, por ejemplo, sulfuro ( $S^{2-}$ ) (Wu et al., 2019). Los MSR compiten por las fuentes de carbono (sustrato) con las AM para la producción de  $CH_4$ . Esta ventaja depende de gran medida de la termodinámica del crecimiento microbiano, que determina en qué medida se producirá metano y sulfuro en un reactor anaerobio (Wu et al., 2019).

En general, la inhibición de sulfuro no se encuentra en el tratamiento anaerobio cuando la relación DQO/SO<sub>4</sub> de las aguas residuales está por encima de 10 g/g, mientras que la inhibición es severa cuando la relación está por debajo de 0.5 g/g. Esto es debido al efecto de extracción de las tasas más altas de producción de biogás que eliminan rápidamente el sulfuro a medida que se forma (Wilkie et al., 2000). De acuerdo con Wilkie y colaboradores (2000) se pueden mitigar los altos niveles de sulfuro agregando Fe<sup>3+</sup> soluble, que promueve la precipitación del sulfuro de hierro. En cuanto al sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), normalmente se encuentran concentraciones superiores a 5000 mg L<sup>-1</sup> en las vinazas de melaza, lo que también puede contribuir a la generación de olores desagradables debido a la generación de sulfuros (S<sup>2-</sup>) vía sulfato-reducción (Fuess y García, 2014).

El consumo de hidrógeno por parte de las AM puede reducir la presión parcial y aumentar rápidamente la tasa de degradación del acetato. Sin embargo, si hay un aumento en la presión parcial de hidrógeno puede provocar una inhibición en la degradación de los ácidos grasos volátiles (AGV), por lo que es de suma importancia reducir la concentración del acetato producido en la biodegradación para bioconvertir la glucosa/AGV. Los metanógenos acetoclásticos, en comparación metanógenos hidrogenotróficos, son más sensibles a la toxicidad del amoníaco que inhibe la reacción enzimática específica de la síntesis de metano (Yan et al., 2019).

El amoníaco total existe en equilibrio entre los iones de amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) y el amoníaco libre (NH<sub>3</sub>) en solución acuosa; este último aumenta con el pH y la temperatura y es la forma más tóxica para el proceso de la DA. Por lo tanto, la DA en un rango termofílico generalmente enfrenta un estrés de amoníaco mucho mayor en comparación con el proceso mesofílico. Los niveles altos de NH<sub>3</sub> se consideran la principal causa de inhibición de la microflora metanogénica debido a su alta permeabilidad a la membrana celular bacteriana (Rajagopal et al., 2013). De acuerdo con Rajagopal et al. (2013) cuando se utilizan sustratos ricos en nitrógeno para la DA, con el fin de obtener un alto potencial de metano, el rendimiento del reactor presenta una baja eficiencia. En la Unión Europea las plantas de biogás perdieron

más del 30% de su potencial de metano y, consecuentemente, de su producción de energía, debido a los altos niveles de amoníaco.

Una manera de contrarrestar la inhibición del amoníaco en la DA es la bioaumentación en la que se presenta el desarrollo de microorganismos tolerantes al amoníaco con el fin de mejorar la producción de metano. La bioaumentación en reactores termofílicos es un desafío debido a un mayor estrés de amoníaco, mayor sensibilidad a los cambios del entorno y la falta de consorcios termofílicos tolerantes al amoníaco (Tian et al., 2019). Otra estrategia es la optimización y tener una amplia gama de relaciones C:N que pueden regular la concentración total del amoníaco y tener C:N y alcanzar un rendimiento óptimo de biogás. Además, la aclimatación de los microorganismos a altas concentraciones de amoníaco, altas temperaturas y el control del pH pueden garantizar una digestión estable y sin alteraciones (Rajagopal et al, 2013). La presencia de compuestos fenólicos en las vinazas dificulta la DA a través de su acción tóxica sobre los microorganismos, por lo que los procesos de oxidación avanzada pueden emplearse para oxidar eficazmente los compuestos recalcitrantes en moléculas más simples. La ozonización es particularmente atractiva para el tratamiento de aguas residuales porque el ozono es soluble en agua y puede descomponerse rápidamente para formar varios radicales libres, incluidos  $\text{OH}^\bullet$  (hidroxilo),  $\text{HO}_3^\bullet$ ,  $\text{O}_2^\bullet$  (superóxido). Estos radicales libres están fácilmente disponibles para reaccionar instantáneamente con cualquier compuesto orgánico presente en el agua como colorantes, compuestos fenólicos, plaguicidas<sup>5</sup>, compuestos organoclorados y compuestos de amonio (Siles et al., 2011).

### **2.3. Reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente**

La degradación anaerobia se efectúa en reactores tipo RALLFA (reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente) o *UASB reactor, upflow anaerobic sludge*

---

<sup>5</sup> Plaga se dice en inglés 'pest', por lo que no es necesario escribir la palabra 'pesticida' sino usar la palabra correcta que es plaguicida

*blanket reactor*, por sus siglas en inglés. Este reactor fue desarrollado por Lettinga y sus colaboradores en Holanda, actuales Países Bajos, en los años 80 del siglo XX. Su diseño consiste en una zona de reacción en la parte inferior, en la que se acumula la biomasa, la de mejor sedimentabilidad en el fondo y encima los lodos más ligeros, lo que forma todo el lecho de lodos (Rincón-Acelas, 2008). Los lodos son agrupaciones de microorganismos de la misma comunidad microbiana que forman flóculos en suspensión.

Las aguas residuales que deben ser tratadas son introducidas por la parte inferior del reactor (influyente) y fluyen en dirección ascendente por el lecho de lodos. En este se lleva a cabo el proceso de conversión de materia orgánica, contenida en las aguas residuales, a biogás; a través del rompimiento enzimático de las moléculas orgánicas mediante las cuatro etapas ya mencionadas antes (Rincón-Acelas, 2008). Al atravesar el lodo, el biogás formado y algunos sólidos se adhieren a los flóculos y ascienden a la parte superior del reactor donde se encuentran una cámara desgasificadora. Los flóculos desgasificados caen de nuevo sobre la superficie del lecho o manto de lodos y el gas libre se captura en el domo del reactor (efluente gaseoso). La porción líquida fluye al área de sedimentación donde se separan los sólidos del líquido restante. Después, los sólidos se deslizan hacia el lecho de lodos, mientras que el agua abandona la zona de sedimentación por la parte superior del reactor (efluente) (Reynoso-Deloya, 2019).

Este sistema tiene grandes ventajas ya que soporta cargas orgánicas más altas de lo habitual con bajos tiempos de residencia hidráulica, THR, que logran la transformación de aproximadamente el 80% de los compuestos carbonosos biodegradables en productos volátiles (biogás); forma una fase semisólida conocida como lodo granular con buena sedimentación que la mantiene dentro del reactor y reduce la pérdida de la biomasa por elutriación. Es aplicable a pequeña y gran escala y requiere de menor inversión en la construcción, producción y mantenimiento que otros sistemas. Sin embargo, la granulación es lenta y no necesariamente controlable, requiere de un inóculo con determinadas características y riesgos de

flotación de los lodos durante el arranque (Saulés-Aguilar, 2003); además, no pueden manejar la alta cantidad de sólidos en suspensión si se tuvieran en el fluido a bioconvertir (Andalib et al., 2012).

En los reactores se requiere un consorcio microbiano activo y granular y la adición de micronutrientes, un pH alrededor de 6.8 a 7.2 en el efluente para lograr el desarrollo microbiano óptimo y alcanzar altas eficiencias de depuración del efluente y formación del biogás rico en metano (Lorenzo-Acosta, 2016). Por otro lado, la vida útil de los reactores es menor debido a la producción de ácido sulfhídrico, el cual es un compuesto altamente corrosivo que si se oxida en contacto con el aire se convierte en ácido sulfúrico nuevamente.

Los reactores en condiciones termofílicas mejoran significativamente la tasa de producción del biogás. Según Wang et al. (2017) una transición mesofílica a la termófila también puede contribuir al aumento de la recuperación de energía, debido a una mayor eficiencia en la conversión de la demanda química de oxígeno (DQO).

## **2.4. Reaprovechamiento del biogás rico en metano**

En muchos países, el biogás se considera una alternativa ambientalmente atractiva al diésel y la gasolina para la generación de energía (Wilkie, 2008). El Panel Internacional sobre el Cambio Climático (IPCC) ha presentado una afirmación de que se triplicaría el consumo de energía para 2100, mientras que la generación de energía mejorada probable a partir de biomasa se prevé que sea de 50 000 TWh en 2050, 75 000 TWh en 2075 y 89 000 TWh en 2100 (Divya et al., 2015).

El biogás es una forma flexible de energía renovable que se puede usar directamente para procesar calor y vapor o convertirse en electricidad en motores alternativos, turbinas de gas o celdas de combustible (Wilkie, 2008). El biogás tiene un contenido de metano relativamente más bajo, de 50 a 60%, que el GLP y el GNC. Sin embargo,

las tecnologías que existen para mejorar la cantidad y calidad del biogás no son suficientes para capturar el metano absoluto de varias fuentes (Divya et al., 2015).

El llamado biogás es la mezcla de los gases producidos de la descomposición de la materia orgánica, constituido en su mayoría por metano ( $\text{CH}_4$ ) con una concentración en volumen de 50 a 75-80%, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) entre 25 a 50%, hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) entre 1 a 10%, nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) entre 1 a 2% y ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) en un 0.1%. El poder calorífico del biogás está determinado por la fracción del metano que puede variar entre 50 hasta 80%, equivalente a 14.3 hasta 28.6  $\text{MJ/m}^3$ , respectivamente (Bernd et al., 2012; Poblano-Flores, 2015).

El biogás generado en los reactores anaerobios tiene un valor energético que muchas veces no es aprovechado debido a que su manejo resulta ser relativamente complicado, ya que para ciertos usos se tienen que realizar algunos pasos de purificación antes de su almacenamiento y utilización (Reynosa-Deloya, 2019).

El alto contenido de azufre en la vinaza puede causar efectos indeseables en la formación de biogás debido a la competencia de la reducción de sulfato con la metanogénesis, lo que reduce la conversión de ácidos orgánicos en biogás. A partir de 1 g DQO en condiciones estándar ( $0^\circ\text{C}$  y 1 atm), se pueden producir 0.35 L de gas metano; por lo tanto, 10-26.4  $\text{m}^3$  de biogás (que contiene un 60% de metano) se puede producir a partir de 1  $\text{m}^3$  de vinaza. La cantidad de 1.5-10 kW de energía se genera a partir de 1  $\text{m}^3$  del biogás producido en el sistema de generación con una potencia térmica de 6.5  $\text{kWh/m}^3$  (Parsaee et al., 2019).

En comparación con otras tecnologías para producir biocombustibles, la industria del etanol concentra dos ventajas importantes, que incluyen su consolidación tecnológica a nivel mundial y la gran variedad de materias primas convertibles que se pueden producir en diferentes condiciones climáticas (Fuess y García, 2015). En la Tabla 2.4 presenta información de la producción de metano en reactores anaerobios a partir de las concentraciones de materia orgánica de diferentes materias primas.

**Tabla 2.4. Producción de metano y potencial energético de vinazas a partir de diferentes materias primas (Fuess y García, 2015)**

<b>Materia prima de etanol</b>	<b>DQO (g L<sup>-1</sup>)</b>	<b>Producción de metano (kg CH<sub>4</sub> L<sup>-1</sup> EtOH)</b>	<b>Potencial energético (MJ L<sup>-1</sup> EtOH)</b>	<b>Referencia</b>
Jugo de la caña de azúcar	30.40	0.079	1.73	Wilkie et al. (2000)
Caña de azúcar (melaza)	84.90	0.221	4.83	Wilkie et al. (2000)
Caña de azúcar (jugo + melaza)	45.80	0.119	2.61	Souza et al. (1992); Prada et al. (1998)
Maíz	60.25	0.157	3.43	Wilkie (2008)
Mandioca	62.20	0.161	3.54	Luo et al. (2009, 2010, 2011)

El mejoramiento biológico del biogás *in situ* es una técnica sostenible para aumentar el contenido de metano del biogás producido en condiciones anaerobias. La principal ventaja es la posibilidad de eliminar el dióxido de carbono presente en el biogás sin necesidad de energía externa ni utilizando productos químicos nocivos; permitiendo aumentar la densidad energética del biogás al combinarlo con otras fuentes de energía renovable (Palú et al., 2022).

La energía producida de la vinaza podría sustituir entre el 5 y 15% del consumo mundial de energía en la industria del etanol, independientemente de la materia prima (caña de azúcar, maíz o yuca) (Fuess y García, 2015) y la relación del balance energético (producción de energía por insumo) mejoraría de 3.20 a 3.93 (aproximadamente 22%) en melaza (Wang et al., 2017). La asociación entre la combustión del bagazo y la digestión de la vinaza en las destilerías a base de caña de azúcar podría proporcionar un excedente de bioenergía de al menos el 130% del total de combustibles fósiles ingresados a la planta de etanol, considerando solamente la energía del metano (Bailey y Ollis, 1986).

En términos financieros, las ganancias económicas podrían llegar a \$0.1901 y \$ 0.0512 US por litro de etanol producido, respectivamente, para las cadenas productivas de melaza (Brasil) y maíz (EE.UU.). Además, el gas metano producido dentro del proceso constituye un portador de energía eficiente, por lo que su poder

calorífico inferior ( $54.7 \text{ MJ kg}^{-1}$ ) es aproximadamente dos veces mayor que el del etanol ( $26.9 \text{ MJ kg}^{-1}$ ) ( $21.22 \text{ MJ L}^{-1} \text{ EtOH}$ ) (Fuess y García, 2015).

Ogden (2002) menciona que el poder calorífico alto del metano es de  $55.5 \text{ MJ kg}^{-1}$  y el bajo de  $50 \text{ MJ kg}^{-1}$ , mayor que la gasolina con un alto valor de  $47.3 \text{ MJ kg}^{-1}$  y un bajo de  $44 \text{ MJ kg}^{-1}$ . De acuerdo con Pazuch et al. (2017), por cada  $\text{m}^3$  de etanol producido se genera  $15 \text{ m}^3$  de vinaza; si la DA produce  $10 \text{ m}^3$  de biogás (60% metano) se tendrá un poder calorífico inferior a  $6.5 \text{ kWh m}^{-3}$ .

Teóricamente, valores altos de DQO de las vinazas, pueden generar volúmenes significativos de metano; sin embargo, se podría sobreestimar el potencial energético real de la vinaza ya que dependiendo del producto final de la destilación (etanol combustible o bebida), pueden estar presentes en las melazas de las que proviene el etanol altas concentraciones de materia orgánica no biodegradable, p. ej., compuestos fenólicos, como ácidos tánicos y húmicos, melanoidinas, sulfato y antibióticos (Correa-López, 2022; Fuess y García, 2015; Gaspar-Mendoza et al., 2022).

Fuess y García (2014) encontraron que el rendimiento del metano correspondía al 57.7% del valor teórico, las cuales pueden explicarse por las pérdidas de metano disuelto en los efluentes de los reactores, que pueden variar del 36 al 41% del volumen total de metano producido. Una carga orgánica baja (*OLR*, en inglés, *organic load rate*) y un TRH grande proporcionan la mejor estrategia para lograr rendimientos de metano constantes y máximos (Mao et al., 2015).

Varias sales inorgánicas se utilizan para estimular la producción de biogás, especialmente las sales de hierro. Además, el hierro es utilizado para liberar la corrosión de  $\text{H}_2\text{S}$  presente en el biogás al formar  $\text{FeS}$ . La adición de oligoelementos depende de muchos factores, por ejemplo, la composición del sustrato, el contenido de metales, los mecanismos de degradación, parámetros operativos, la comunidad microbiana activa y la disponibilidad limitada de estos elementos afecta tanto la

estabilidad del proceso como la producción de biogás y puede inhibir el proceso microbiológico (Mao et al., 2015).

En el siguiente capítulo se presenta la metodología seguida en esta investigación.

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGÍA

#### 3.1. Reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) a escala de laboratorio

En la presente investigación se utilizó un reactor tipo RALLFA a escala de laboratorio con un volumen total de 2.3 L, 2 L de operación, una altura de 67 cm, que cuenta con un tubo de vidrio exterior con 7.27 cm de d.i. y un tubo concéntrico de 4.0 cm de d.i. (Figura. 3.1). Contiene el 37% de inóculo equivalente a 740 mL de biomasa (Figura 3.2). La vinaza cruda (VC) utilizada en este proyecto proviene de un ingenio azucarero/alcoholero cooperante que se mantiene en un cuarto frío a temperatura de  $4\pm 1^{\circ}\text{C}$ .

#### 3.2. Parámetros de operación y seguimiento

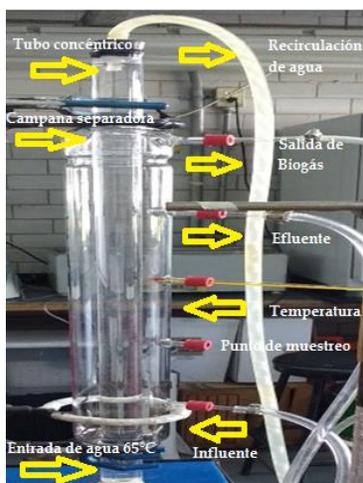
La alimentación del sistema se realizó en forma intermitente con 250 mL de líquido compuesto de vinaza:agua:solución de sulfato de ferroso ( $0.01 \text{ g L}^{-1}$ ) o sea 25:65:10%, respectivamente, llamándola vinaza diluida (VD) (Figura 3.3). El sistema se mantiene a una temperatura de  $65^{\circ}\text{C}$  mediante una recirculación de agua previamente calentada en una plancha de calentamiento y el tiempo de residencia<sup>6</sup> hidráulica (TRH) es de 7 días.

---

<sup>6</sup> En los años 80 del siglo XX en un congreso internacional en Europa se homogeneizó el uso de los términos **tiempo de residencia** y **tiempo de retención** dando el nombre de residencia para el fluido que permanece en un reactor, por lo que debe decirse **tiempo de residencia hidráulico** cuando el fluido es agua o una disolución acuosa, TRH. Consecuentemente, el **tiempo de retención celular** se le da al lapso de permanencia en un bio-reactor cuando el material es sólido o semisólido (pastoso) como es el caso de los microorganismos, TRC [nota de la asesora]

Previamente al trabajo realizado, el reactor tuvo un proceso de acidificación llegando a tener valores promedio en el efluente de  $\text{pH}_{\text{E65}} = 5.6 \pm 1.26$ ,  $\text{C.E.}_{\text{E65}} = 13.1 \pm 2.75$ ,  $\text{T}_{\text{E65}} = 61.9 \pm 1.01$  y remociones de DQO cercanas al 10%. Para acondicionar el sistema, se alimentó el reactor con un medio nutritivo metanogénico presentado por Vergara-Salgado (2010) por un ciclo de alimentación. Después, se adicionó al reactor un tercio de su volumen de operación con inóculo acondicionado por 14 días; finalmente, en cinco ciclos se fue aumentando la cantidad de VC en la alimentación hasta llegar a una alimentación de 45:45:10 de vinaza:agua: $\text{FeSO}_4$ , con la finalidad de tener las condiciones óptimas para el funcionamiento del reactor. Sin embargo, se observó que con una alimentación de 1:1 vinaza: agua a  $65^\circ\text{C}$  el reactor no degrada eficientemente la cantidad de materia orgánica con la posibilidad de inhibir el proceso de producción de metano, por lo que la alimentación se estableció como se describió previamente.

Es necesario el seguimiento del sistema y de la generación de biogás, por medio de toma de muestras del influente y efluente del reactor. En La Tabla 3.1 se muestran los parámetros de seguimiento en el reactor y en la Tabla 3.2 las técnicas que fueron aplicadas. En el anexo A se muestra las metodologías específicas para cada una de las técnicas.



**Figura 3.1. Reactor tipo RALLFA (Cruz-Rodríguez, 2019)**



**Figura 3.2. Inoculación del RALLFA (Cruz-Rodríguez, 2019)**



**Figura 3.3. Alimentación del RALLFA**

**Tabla 3.1. Parámetros de seguimiento evaluados en el reactor tipo RALLFA**

Parámetro	Periodo de evaluación	Punto de muestreo
pH	Diario	Influyente y efluente
Conductividad eléctrica	Diario	Influyente y efluente
Temperatura	Diario	Reactor (interior)
Alcalinidad	Diario	Influyente y efluente
Sulfatos	Una vez a la semana	Influyente y efluente líquido
Sulfuros	Una vez a la semana	Influyente y efluente líquido
DQO	Una vez a la semana	Influyente y efluente líquido
Composición de metano	Una vez a la semana	Efluente gaseoso
Producción de biogás	Diario	Efluente gaseoso

**Tabla 3.2. Técnicas analíticas**

Parámetro	Método	Referencia	Equipo
pH	Potenciométrico	NMX-AA-008-SFCI-2011(DOF, 2011), APHA, AWWA, WEF (2012)	Potenciómetro HANNA HI4522 y HI1131b
Conductividad eléctrica (C.E.)	Amperimétrico	APHA, AWWA, WEF (2012)	Potenciómetro HANNA HI4522 HI76310
Temperatura, T	Termométrico	NMX-AA-007-SCFI-2013 (DOF, 2013), APHA, AWWA, WEF (2012)	Potenciómetro HANNA HI4522 HI7662-T
Alcalinidad y factores	Titulación	NMX-AA-036-SCFI-2001 (DOF, 2001b), APHA, AWWA, WEF (2012), Pérez, A y Torres, P, 2008.	Bureta 50 mL
Sulfatos	Colorimétrico	NMX-AA-074-SCFI-1981 (DOF, 1981)	Espectrofotómetro UV-VIS Rayleigh UV-1800
Sulfuros	Azul de metileno	NMX-AA-084-SCFI-1982 (DOF, 1982)	Espectrofotómetro UV-VIS Rayleigh UV-1800
Sólidos en todas sus formas	Método gravimétrico	NMX-AA-034-SCFI-2015 (DOF, 2015), APHA (2012)	Mufla Lindbergh 51894, Horno FELISA FE-293A, balanza analítica OHAUS Mod. AG245 Horno FELISA FE-293A
DQO	Reflujo cerrado	NMX-AA-030-SCFI-2001 (DOF, 2001a), APHA, AWWA, WEF (2012)	Espectrofotómetro UV-VIS Rayleigh UV-1800
Composición de metano	Cromatografía de gases con detector de ionización de flama (CG-DIF)	(Bernal-González et al., 2012; Poblano-Flores, 2015)	Cromatógrafo de gases PERKIN ELMER Modelo CG-SRI310c
Producción de biogás	Desplazamiento de líquido	(Rincón-Acelas, 2008)	Tanques Ámbar y matraces de vidrio de 2L

### 3.3. Diagrama general de la metodología desarrollada

El diagrama de flujo de la metodología que se siguió se presenta en la Figura 3.4.

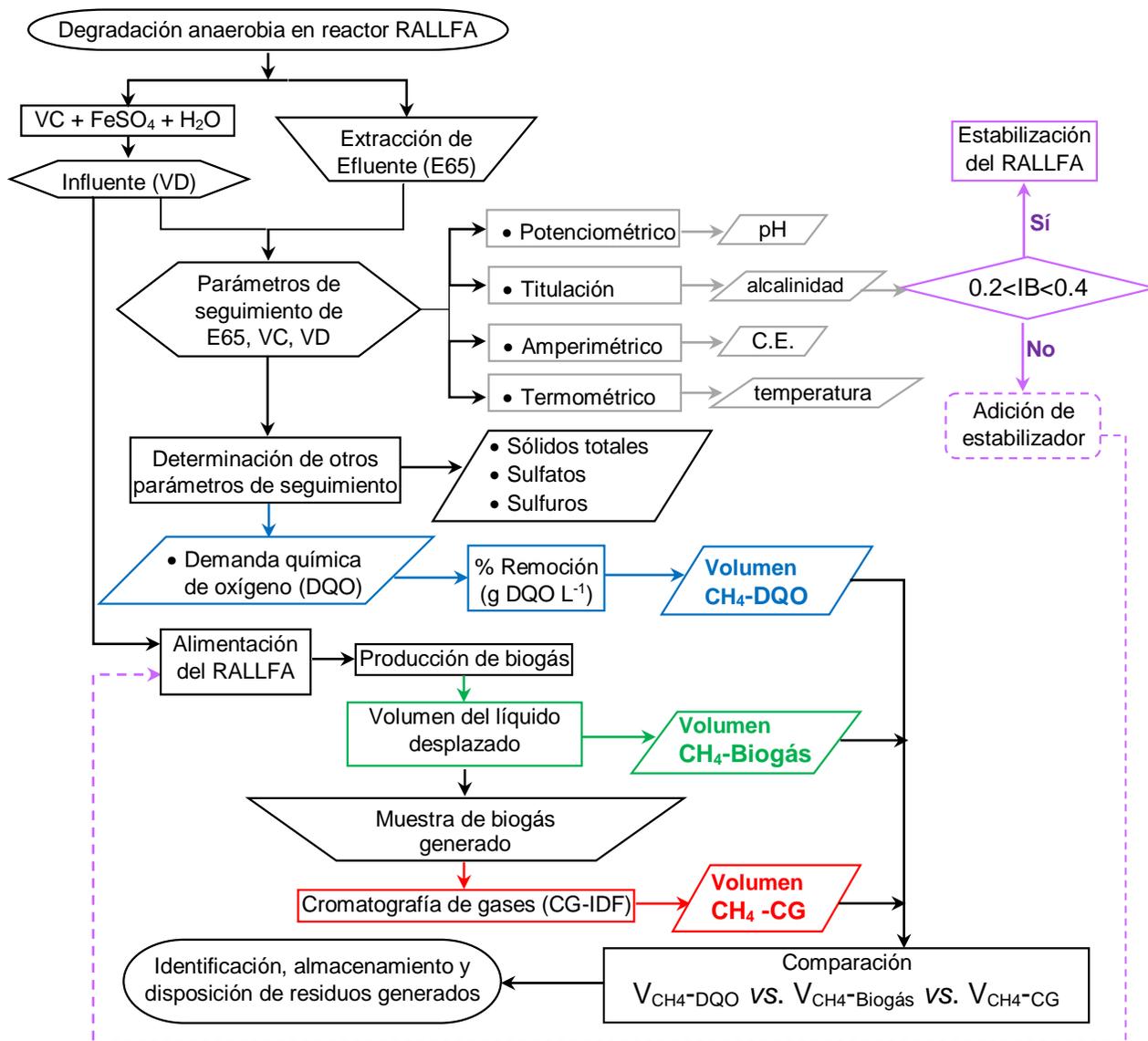


Figura 3.4. Diagrama de flujo de la metodología empleada

### 3.4. Composición del biogás: Contenido de metano

Para la determinación del contenido de metano se utiliza una metodología modificada, similar a la presentada por Bernal-González et al. (2012), Villalobos-Juvenal (2015) y Contreras-Contreras (2019), que se basa en el desplazamiento de líquido o “Principio de Arquímedes”. El sistema consta de dos recipientes (A y B) (Figura 3.5), donde A es un tanque recolector que contiene una solución de hidróxido de sodio (NaOH), pH>10 y almacena el biogás generado proveniente del reactor. El tanque B es el recipiente receptor del líquido desplazado, donde se colecta el volumen para su medición. El Recipiente A tiene un tapón de rosca con septos de tres vías, de modo que en la primera vía (I) ingresa el biogás generado proveniente de la salida del efluente gaseoso del RALLFA; la segunda vía (II) para la extracción (muestreador) del biogás contenido en el recipiente; el último (III), conectado del Recipiente A donde la solución de NaOH se desplazada al Recipiente B. Esto permite cuantificar el volumen del biogás producido de la semana 5 a la 24 y determinar el porcentaje de metano real presente en el biogás.

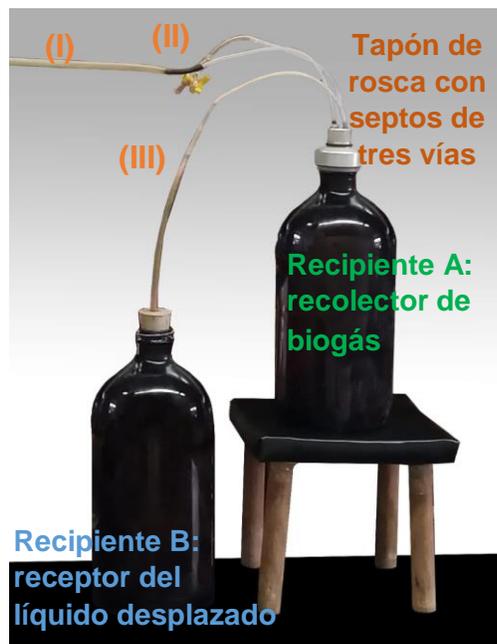


Figura 3.5. Sistema de recolección de biogás (elaboración propia)

### 3.4.1. Determinación del porcentaje de metano

La recolección, preservación y almacenamiento de muestras del biogás se inicia con la succión del biogás contenido en el Recipiente A (vía II) mediante una jeringa de plástico PLASTIPAK de 5 mL. El volumen del biogás es inyectado a viales inyectables sellados que contiene aproximadamente 15 mL de una solución saturada de cloruro de sodio (NaCl) con ácido clorhídrico (HCl) de 10:1 e indicador de rojo de metilo (Figura 3.6). Al mismo tiempo, se coloca una aguja para liberar el volumen que ocupa el biogás. Se debe tener extrema precaución durante el muestreo evitando contaminar la muestra con aire ambiente que diluya la concentración. La determinación del porcentaje de metano ( $\text{CH}_4$ ) presente en el biogás producido por los sistemas, se realiza mediante un equipo cromatografía de gases Perkin Elmer Modelo CG-SRI310c (Figura 3.7) y de acuerdo con la metodología presentada en el Anexo A10. Se cuantificó durante 10 semanas a partir de la semana 15 a la 24 del trabajo experimental.



Figura 3.6. Viales para cromatografía



Figura 3.7. Equipo de cromatografía de gases Perkin Elmer Modelo CG-SRI310c

En el siguiente capítulo se presentan los resultados obtenidos y la discusión derivada de ellos.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Caracterización de la vinaza

En la Tabla 4.1 se presenta la caracterización de la vinaza con las que se trabajó en esta investigación; la cual fue proporcionada por un ingenio azucarero cooperante, como ya se mencionó.

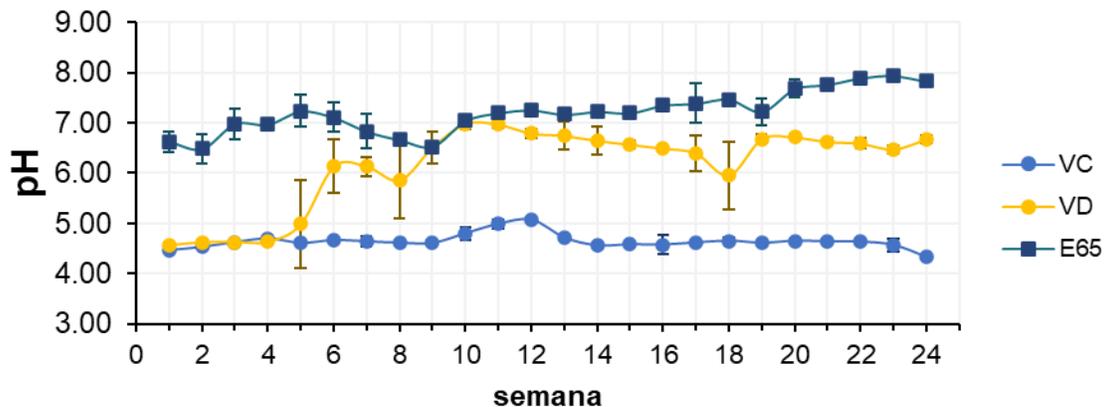
**Tabla 4.1. Caracterización de la vinaza cruda (VC) y vinaza diluida (VD)**

Parámetro	Vinaza cruda VC		Vinaza diluida (VD)	
	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.
pH)	4.6	0.14	6.1	0.80
C. E. (mS cm <sup>-1</sup> )	29.1	0.75	15.7	1.67
T (°C)	13.5	4.55	23.0	3.29
DQO (mg L <sup>-1</sup> )	79,639	2,309	28,961	6,002
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	9,859	176	3,009	970
S <sup>2-</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	35.9	1.7	10.7	3.0
Sólidos en todas sus formas:				
ST (mg L <sup>-1</sup> )	76,197	6,749	26,672	3,156
STV (mg L <sup>-1</sup> )	52,227	4,455	15,210	2,826
STF (mg L <sup>-1</sup> )	23,970	7,869	12,060	1,295
SDT (mg L <sup>-1</sup> )	64,718	3,374	23,073	2,956
SDV (mg L <sup>-1</sup> )	43,723	840	12,663	2,708
SDF (mg L <sup>-1</sup> )	20,995	3,495	10,950	1,140
SST (mg L <sup>-1</sup> )	11,478	4,820	4,290	1,182
SSV (mg L <sup>-1</sup> )	8,503	3,747	2,940	800
SSF (mg L <sup>-1</sup> )	2,975	6,284	1,372	402

T: Temperatura; pH: Potencial de hidrógeno; C.E.: Conductividad eléctrica; DQO: Demanda química de oxígeno; DBO<sub>5</sub>: Demanda bioquímica de oxígeno; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>: Sulfatos; S<sup>2-</sup>: Sulfuros; ST: sólidos totales; STV: sólidos totales volátiles; SST: sólidos suspendidos totales; SSV: sólidos suspendidos volátiles; SDT: sólidos disueltos totales; SDV: sólidos disueltos volátiles; STF: sólidos totales fijos; SSF: sólidos suspendidos fijos; SDF: sólidos disueltos fijos

#### 4.2.1. Datos del pH

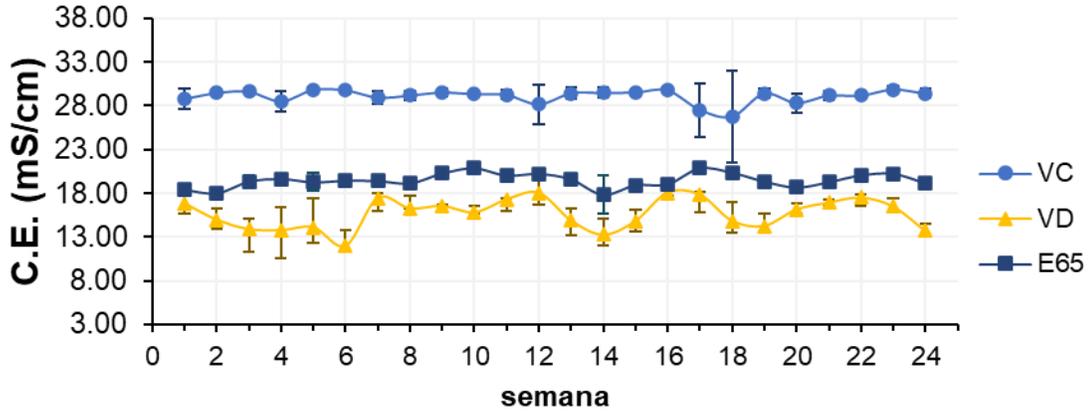
Por lo general, un reactor anaerobio debe estar operando en un medio neutro para asegurar que las condiciones sean las adecuadas para mantener a las arqueas (organismos metanogénicos) en un ambiente idóneo para su supervivencia y reproducción (Rincón-Acelas, 2008). En la Gráfica 4.1 se presentan los registros del  $\text{pH}_{\text{VC}} = 4.6 \pm 0.14$ ,  $\text{pH}_{\text{VD}} = 6.1 \pm 0.8$  y el del efluente  $\text{pH}_{\text{E65}} = 7.2 \pm 0.41$ . El efluente del RALLFA presenta valores ideales ya que se encuentra con un pH alrededor de un valor de 7, por lo que se puede considerar que se está logrando operar bajo condiciones estables.



Gráfica 4.1. Datos de pH del efluente líquido del RALLFA operado a 65°C (E65), del influente vinaza diluida (VD) y la vinaza cruda (VC)

#### 4.2.2. Datos de la conductividad eléctrica

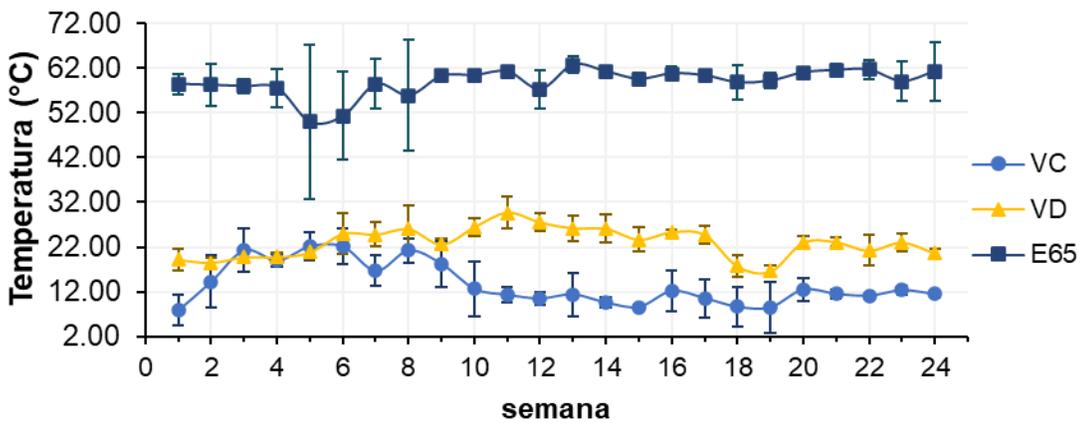
Este parámetro es una medida de la concentración de los componentes ionizados en una muestra (Contreras-Contreras, 2019). En la Gráfica. 4.2 se muestran los registros de la conductividad eléctrica de  $\text{C.E.}_{\text{VC}} = 29.1 \pm 0.75$ ,  $\text{C.E.}_{\text{VD}} = 15.7 \pm 1.67$  y del efluente  $\text{C.E.}_{\text{E65}} = 19.5 \pm 0.78$ . El aumento en la conductividad eléctrica puede deberse a que se están arrastrando sólidos en el efluente.



Gráfica 4.2. Datos de la C.E. del efluente del RALLFA operado a 65°C (E65), del influente vinaza diluida (VD) y la vinaza cruda (VC)

#### 4.2.3. Datos de la temperatura

Para establecer un equilibrio en los sistemas anaerobios es de suma importancia que la temperatura del sistema se mantenga constante, por lo que, en la Gráfica 4.3 se muestran los registros de la temperatura de  $T_{VC} = 13.5 \pm 4.55$ ,  $T_{VD} = 23.0 \pm 3.29$  y del efluente  $T_{E65} = 59.0 \pm 2.99$ . La temperatura es de suma importancia para los consorcios microbianos que se desarrollan en el RALLFA en este caso microorganismos termófilos los cuales son los encargados de transformar la materia orgánica en biogás.



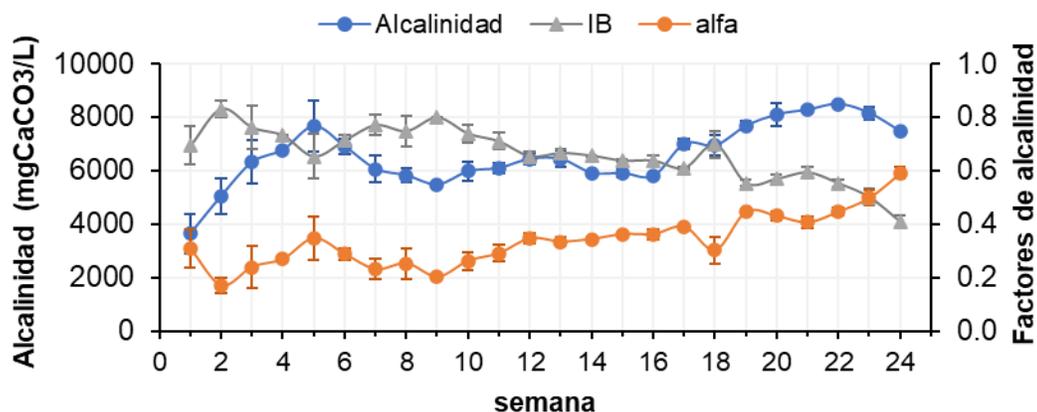
Gráfica 4.3. Datos de la temperatura del efluente líquido del RALLFA operado a 65°C (E65), del influente vinaza diluida (VD) y la vinaza cruda (VC)

#### 4.2.4. Datos de alcalinidad y factores de alcalinidad

En un reactor anaerobio el bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), compuesto con capacidad amortiguadora, y parte del  $\text{CO}_2$ , gas proveniente de la descomposición de la materia orgánica que posteriormente se transforma en  $\text{HCO}_3^-$  soluble, son los principales reguladores que mantiene el pH del sistema en un intervalo óptimo para la actividad de las AM (Castro-González, 2004). De acuerdo con Pérez y Torres (2008) se tienen diferentes factores de la relación de volúmenes titulados que valora la alcalinidad debida a  $\text{HCO}_3^-$ , las sales de ácidos débiles y la alcalinidad total presentes.

Los factores de alcalinidad son una medida de la capacidad amortiguadora del medio en los reactores tipo RALLFA, con lo cual se puede evitar la acidificación y por lo tanto que se produzca una menor cantidad de biogás y una menor proporción de metano. El factor conocido como *buffer* (IB) es la relación entre la alcalinidad debida a los AGV y la alcalinidad total y cuyo rango óptimo está entre 0.2 a 0.4. El factor alfa( $\alpha$ ) corresponde a la relación entre la alcalinidad bicarbonática y la alcalinidad total, recomendándose valores en condiciones estables arriba de 0.5. El índice AI/AP es la relación entre la alcalinidad debida a los AGV (Alcalinidad Intermedia) y la alcalinidad bicarbonática (Alcalinidad Parcial) cuyos valores estables entre 0.4 y 0.55; no obstante, se recomienda su verificación (Pérez y Torres, 2008).

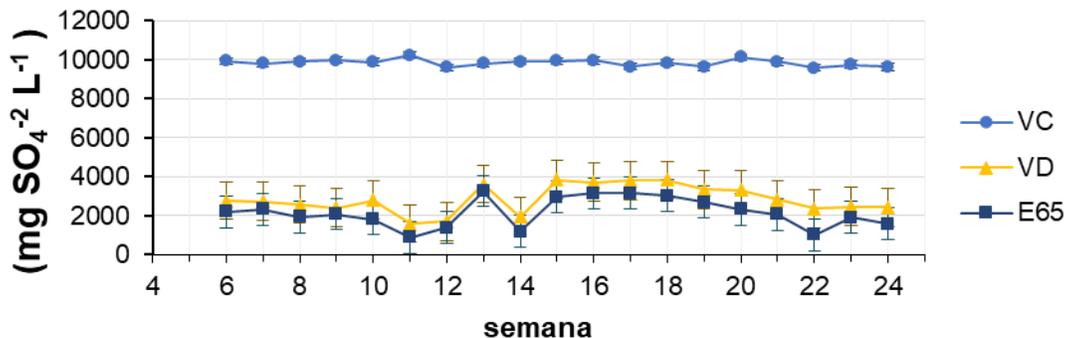
La metodología empleada y las ecuaciones para calcular los factores se describen en el Anexo A.1.4. En la Gráfica 4.4 se presentan las determinaciones hechas en el reactor operado a  $65^\circ\text{C}$ , con un efluente cuyo promedio es factor  $\text{IB} = 0.7 \pm 0.1$ , factor  $\alpha = 0.3 \pm 0.1$  y factor  $\text{AI/AP} = 2.3 \pm 1$ . Esto podría indicar que el sistema aún no llega a un periodo estable, ya que cada uno de los factores presentan valores alejados a lo que recomiendan Pérez y Torres (2008). A fin de que dichos factores estén en los intervalos óptimos ya mencionados se adicionó 1 g de bicarbonato a los 250 mL de VD a partir de la semana 9, ya que la relación AI/AP indica una mayor producción de AGV. La alcalinidad del efluente es de  $6,596 \pm 1,120 \text{ mgCaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ .



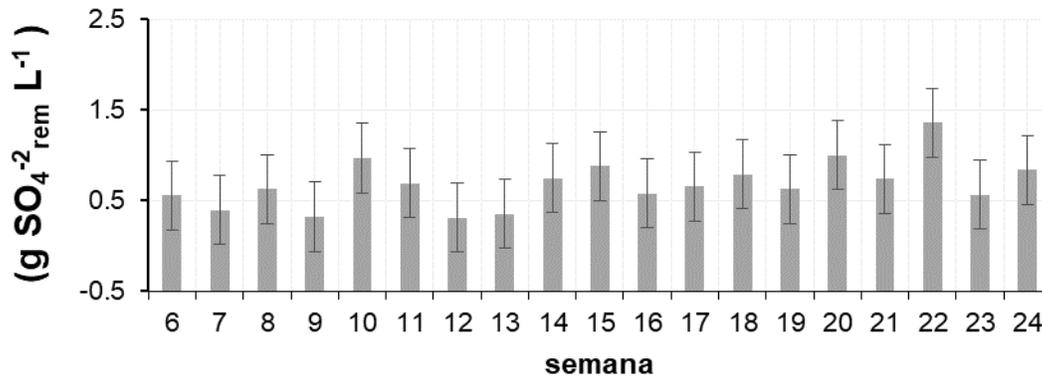
Gráfica 4.4. Datos de la alcalinidad, factor amortiguador o *buffer* (IB) y factor alfa ( $\alpha$ ) del efluente proveniente del RALLFA operado a 65°C

#### 4.2.5. Datos de sulfatos

Su presencia en las vinazas está relacionada con la adición del ácido sulfúrico en la etapa de degradación en la elaboración del azúcar y en la producción del etanol. Altas concentraciones de sulfatos en la alimentación pueden inhibir la actividad metanogénica e impedir la formación del biogás debido a la competencia del sustrato con los microorganismos sulfato-reductores (MSR), ya que estos tienen más afinidad por el sustrato de H<sub>2</sub>, acetato y CO<sub>2</sub>. En la Gráfica 4.5 se muestran los registros de  $SO_4^{2-}VC = 9,859 \pm 176$ ,  $SO_4^{2-}VD = 3,009 \pm 970$   $SO_4^{2-}E65 = 2,256 \pm 811$ . El promedio de sulfatos removidos del efluente líquido fue de  $0.753 \pm 0.382$ . g  $SO_4^{2-}Rem$  L<sup>-1</sup>, equivalente al  $26 \pm 0.11\%$  de remoción.



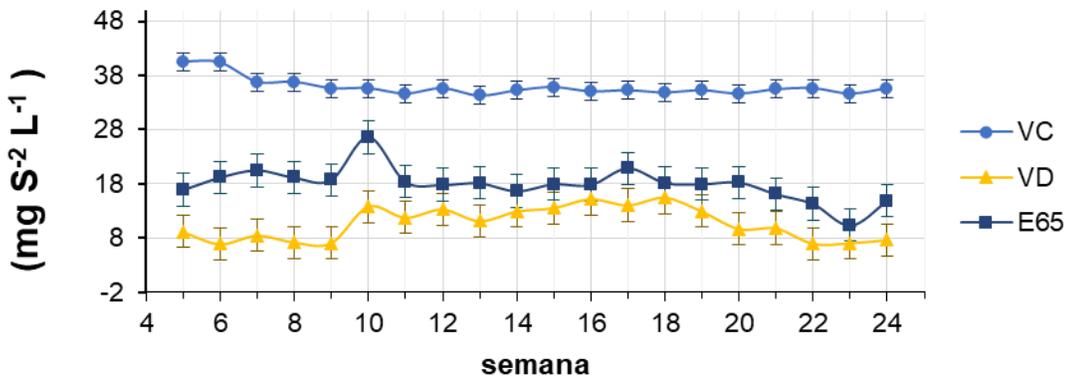
Gráfica 4.5. Datos de iones sulfatos de la vinaza cruda (VC), vinaza diluida (VD) y el efluente líquido del RALLFA operado a 65°C (E65)



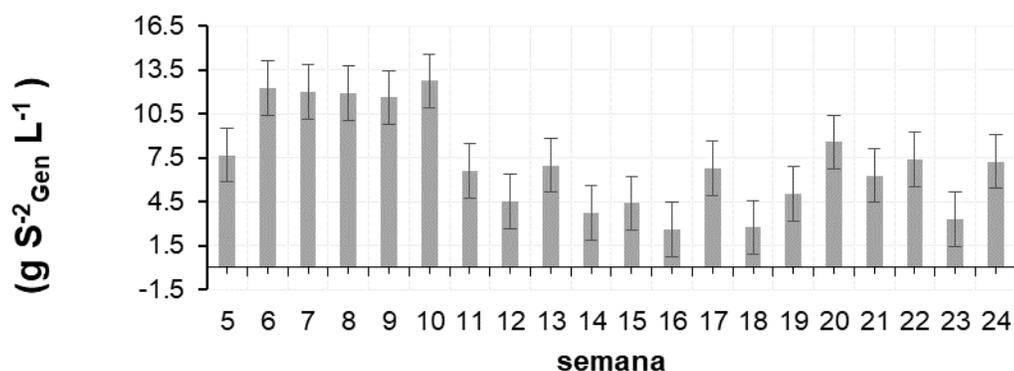
Gráfica 4.6. Remoción de sulfatos del efluente líquido del RALLFA operado a 65°C

#### 4.2.6. Datos de sulfuros

La actividad metanogénica se ve inhibida por los iones sulfuro ( $S^{2-}$ ). Además, su forma no ionizada ( $H_2S$ ) es extremadamente tóxica. Este compuesto se produce a partir de los sulfatos presentes en el medio por los microorganismos sulfato-reductores. En la Gráfica 4.7 se muestran los registros de  $S^{2-}_{VC} = 35.9 \pm 1.7$ ,  $S^{2-}_{VD} = 10.7 \pm 3.0$ ,  $S^{2-}_{E65} = 18.0 \pm 3.0$ . Los gramos producidos que salen con el efluente líquido tuvieron un promedio de  $5.43 \pm 1.85$  g  $S^{2-}_{Gen}$  L<sup>-1</sup>, equivalente a  $52 \pm 0.3\%$  de generación. (Gráfica 4.8).



Gráfica 4.7. Datos de iones sulfuros en la vinaza cruda (VC), vinaza diluida (VD) y el efluente líquido del RALLFA operado a 65°C (E65)



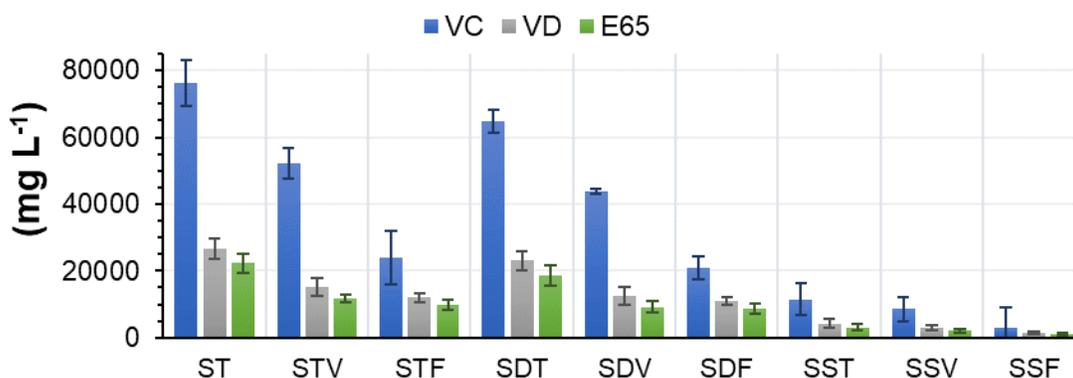
Gráfica 4.8. Generación de sulfuros del efluente líquido del RALLFA operado a 65°C

#### 4.2.7. Datos de sólidos en todas sus formas

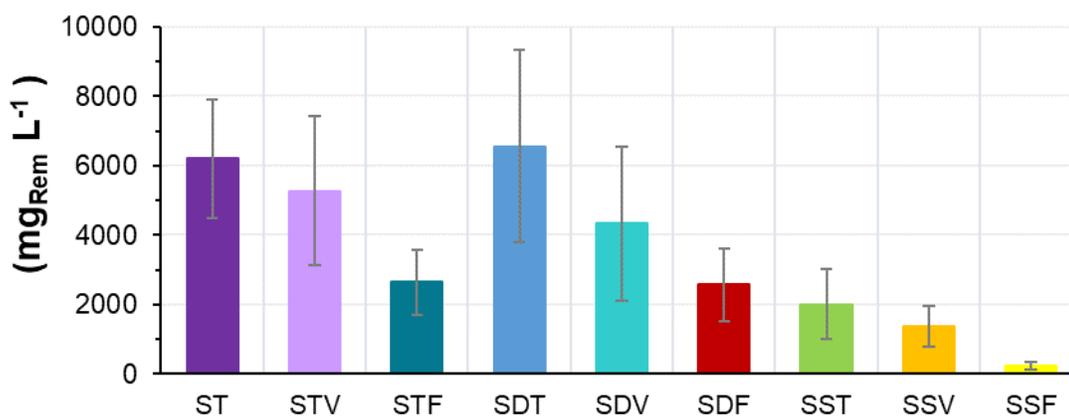
Los sólidos son parámetros que reflejan la disminución de materia orgánica biodegradable. En la Tabla 4.2 se muestran los datos promedio de los sólidos en mg L<sup>-1</sup> medidos en la vinaza cruda (VC), en la vinaza diluida (influyente) y en el efluente líquido y la remoción del RALLFA operado a 65°C, así como en la Gráfica 4.9. Se puede observar que las remociones son bajas y no muestran una tendencia indicando que el reactor se encuentra todavía en la fase de estabilización (Gráfica 4.10).

Tabla 4.2. Datos promedio de sólidos en el RALLFA a 65°C

Sólidos	Vinaza cruda (VC)		Vinaza diluida (VD)		Efluente (E65)		Remoción	
	mg L <sup>-1</sup>		mg L <sup>-1</sup>		mg L <sup>-1</sup>		mg Rem L <sup>-1</sup>	
<b>ST</b>	76,197	± 6,749	26,672	± 3,156	22,258	± 2,755	6,200	± 1,697
<b>STV</b>	52,227	± 4,455	15,210	± 2,826	11,698	± 1,270	5,277	± 2,152
<b>STF</b>	23,970	± 7,869	12,060	± 1,295	9,962	± 1,548	2,644	± 931
<b>SDT</b>	64,718	± 3,374	23,073	± 2,956	18,455	± 3,072	6,550	± 2,771
<b>SDV</b>	43,723	± 840	12,663	± 2,708	9,173	± 1,745	4,340	± 2,219
<b>SDF</b>	20,995	± 3,495	10,950	± 1,140	8,742	± 1,504	2,568	± 1,052
<b>SST</b>	11,478	± 4,820	4,290	± 1,182	3,112	± 900	2,013	± 1,017
<b>SSV</b>	8,503	± 3,747	2,940	± 800	2,123	± 603	1,370	± 580
<b>SSF</b>	2,975	± 6,284	1,372	± 402	958	± 317	231	± 106



Gráfica 4.9. Sólidos en todas sus formas de la vinaza cruda (VC), vinaza diluida (VD) y el efluente líquido del RALLFA operado a 65°C (E65)

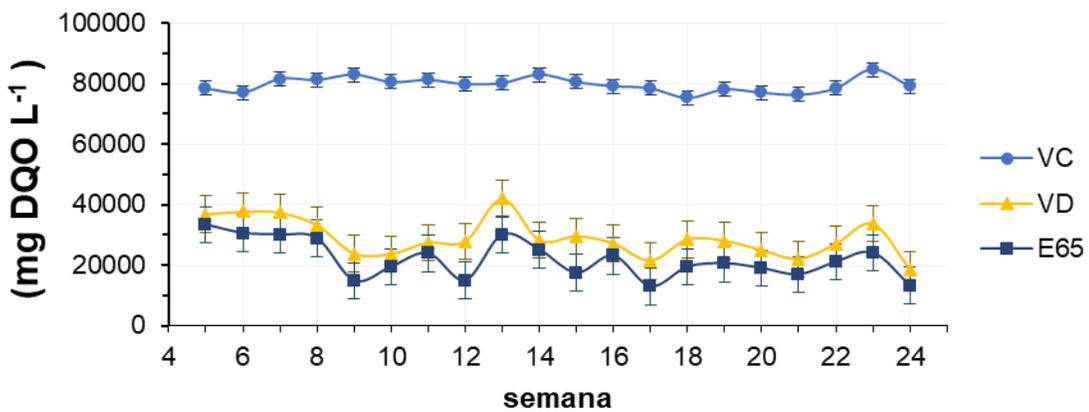


Gráfica 4.10. Remoción de sólidos del RALLFA operado a 65°C

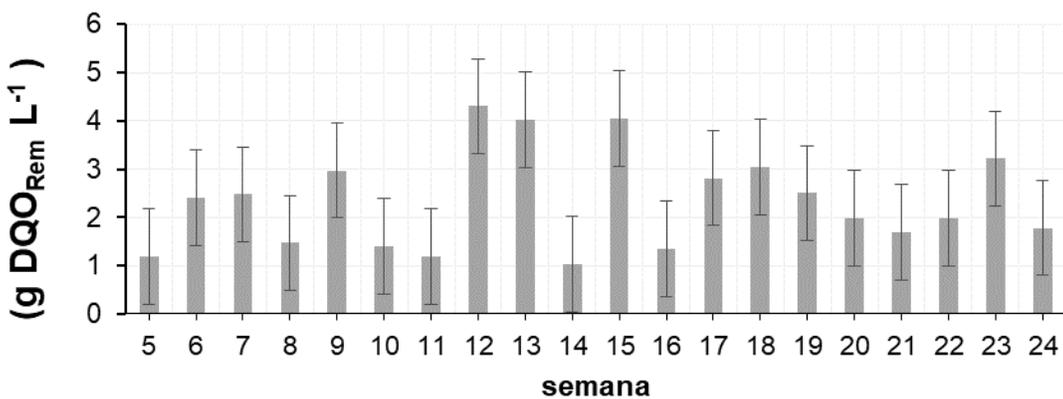
#### 4.2.8. Datos de la demanda química de oxígeno (DQO)

La demanda química de oxígeno (DQO) mide toda la materia orgánica e inorgánica sea biodegradable o no de una muestra que es susceptible a oxidación por un fuerte oxidante químico. Esta prueba se realiza para establecer una comparación entre el influente y el efluente y así determinar la carga orgánica que queda sin transformación en el RALLFA y la diferencia posiblemente se esté convirtiendo en biogás rico en metano y en biomasa anaerobia (Villegas-Bolaños, 2015).

En la Gráfica 4.11 se presentan los registros de  $DQO_{VC} = 79,639 \pm 2,309 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ , la  $DQO_{VD} = 28,961 \pm 6,002 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ , la DQO en el efluente es de  $DQO_{E65} = 21,933 \pm 6,025 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ . Se puede apreciar que la vinaza cruda es la que contiene mayor concentración de materia orgánica y la vinaza diluida tiene la cuarta parte de la carga de materia orgánica. El efluente presenta reducción de materia orgánica lo que indica que los microorganismos dentro del RALLFA consumen la materia orgánica para ser transformada a otros compuestos, teniendo una remoción cercana a  $2.34 \text{ gO}_2 \text{ Rem L}^{-1}$ , es decir  $28 \pm 0.09\%$  (Gráfica 4.12).



Gráfica 4.11. Datos de DQO de la vinaza cruda (VC), vinaza diluida (VD) y el efluente líquido del RALLFA operado a 65°C (E65)



Gráfica 4.12. Remoción de DQO del efluente líquido del RALLFA operado a 65°C

### 4.3.1. Producción de metano

Después de 24 semanas de experimentación el comportamiento del RALLFA fue relativamente estable al mantenerse en un  $\text{pH}_{\text{E65}} = 7.2 \pm 0.41$ . Se realizó el seguimiento de los parámetros de control y operación del reactor. Los valores de los factores de alcalinidad están por arriba de lo que indica la literatura (Pérez y Torres, 2008), mientras que el pH se puede considerar un valor relativamente óptimo para llevar a cabo una producción de biogás rico en metano. No obstante, se tiene baja remoción de DQO en comparación con otras investigaciones (Poblano-Flores, 2015, Rojas-Zamudio, 2018, Villegas-Bolaños, 2015) que, es importante mencionar, que trabajaron a otras temperaturas termofílicas en los RALLFA. Por esta razón es importante comparar la producción de metano real y la conversión de DQO a metano teórico.

Se puede calcular la producción del volumen teórico de metano a partir de la remoción de DQO en el proceso a través de una ecuación empírica (Ecuación 4.1) (Castro-González, 2004; Torres-Lozada y Pérez, 2010); así como la producción del volumen de metano experimental por cromatografía de gases a partir del biogás producido (Ecuación 4.1 y 4.2) (Villegas-Bolaños, 2015):

$$V_{\text{CH}_4\text{-DQO}} = \frac{\text{DQO}_{\text{Rem}} R (273.15 + T)}{k_1 P} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

$$PV = nRT \quad \text{Ecuación 4.2}$$

donde:

$V_{\text{CH}_4\text{-DQO}}$  = volumen teórico de  $\text{CH}_4$  liberado

$\text{DQO}_{\text{Rem}}$  = gramos de DQO removido

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

T = temperatura de operación del RALLFA ( $^{\circ}\text{C}$ )

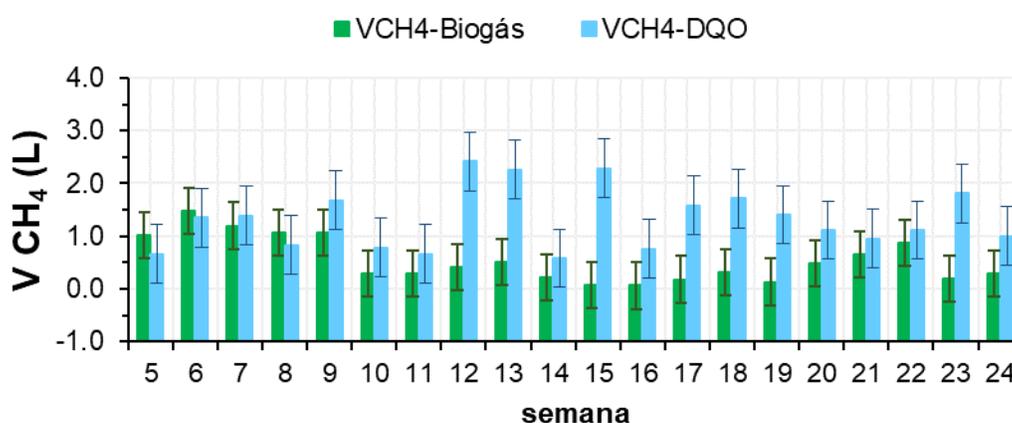
P = presión atmosférica (atm)

n = número de moles

$k_1$  = gramos DQO por 1 mol de  $\text{CH}_4$  (64gDQO/ mol  $\text{CH}_4$ )

### 4.3.2. Producción de biogás

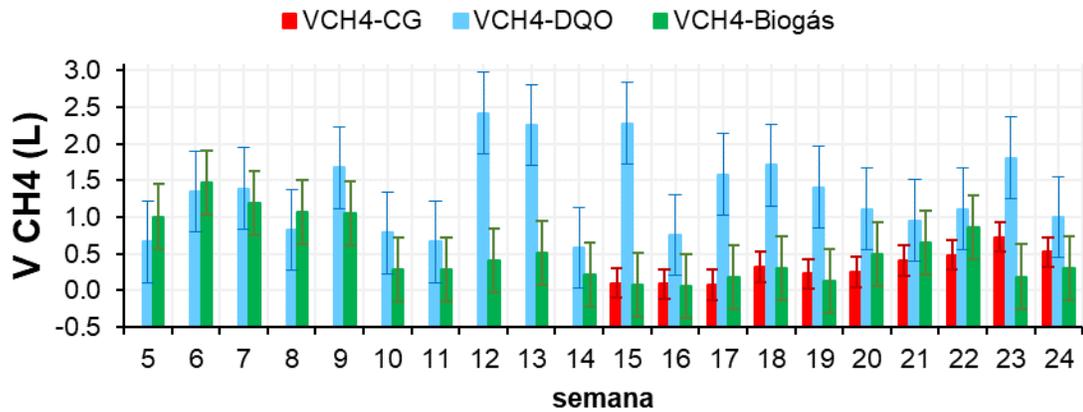
El biogás generado por el RALLFA fue cuantificado durante 20 semanas. En la Gráfica 4.13 se presenta el volumen de biogás experimental ( $V_{CH_4-Biogás}$ ) vs. el volumen de metano teórico ( $V_{CH_4-DQO}$ ) de la semana 5 a la 24. Se espera que a medida que el factor de IB entre a un intervalo entre 0.2 a 0.4, el volumen de biogás generado aumente y, con ello, la proporción de metano.



Gráfica 4.13. Producción de metano presente en el biogás generado en el RALLFA operado a 65°C vs. metano teórico a partir de la DQO

Para la determinación de metano contenido en el biogás, por criterios de estabilización, se cuantificó a partir de la semana 15 a la 24 dado que se mantuvo el reactor estable por tres semanas con un pH alrededor de 7.2.

En la Tabla 4.3 se encuentran los volúmenes promedio de las semanas trabajadas, por otro lado, en la Gráfica 4.14 se muestra la comparación del volumen de  $CH_4$  experimental ( $V_{CH_4-Biogás} = 0.61 \pm 0.44$  L/semana) vs. volumen de  $CH_4$  teórico ( $V_{CH_4-DQO} = 1.32 \pm 0.56$  L/semana) vs. volumen de  $CH_4$  real medido mediante cromatografía de gases ( $V_{CH_4-CG} = 0.32 \pm 0.20$  L/semana).



Gráfica 4.14. Producción de metano presente en el biogás del RALLFA operado a 65°C vs la producción de metano real medido por CG DIF vs metano teórico a partir de la DQO

Tabla 4.3. Comparación de los volúmenes de  $V_{CH_4-DQO}$  vs.  $V_{CH_4-Biogás}$  vs.  $V_{CH_4-CG}$ .

Semana	Teórico $V_{CH_4-DQO}$ (L/semana)	Experimental $V_{CH_4-Biogás}$ (L/semana)	Real $V_{CH_4-CG}$ (L/semana)
5	0.67	1.01	n. d.
6	1.35	1.47	n. d.
7	1.39	1.20	n. d.
8	0.83	1.07	n. d.
9	1.67	1.06	n. d.
10	0.79	0.29	n. d.
11	0.67	0.29	n. d.
12	2.42	0.41	n. d.
13	2.26	0.51	n. d.
14	0.58	0.21	n. d.
15	2.28	0.08	0.10
16	0.76	0.06	0.09
17	1.58	0.18	0.07
18	1.71	0.31	0.32
19	1.41	0.13	0.23
20	1.12	0.50	0.25
21	0.95	0.66	0.41
22	1.12	0.87	0.49
23	1.81	0.19	0.73
24	1.00	0.30	0.52
Promedio	$1.32 \pm 0.56$	$0.61 \pm 0.44$	$0.32 \pm 0.2$

n. d.: no determinado

## 4.4. Análisis estadísticos

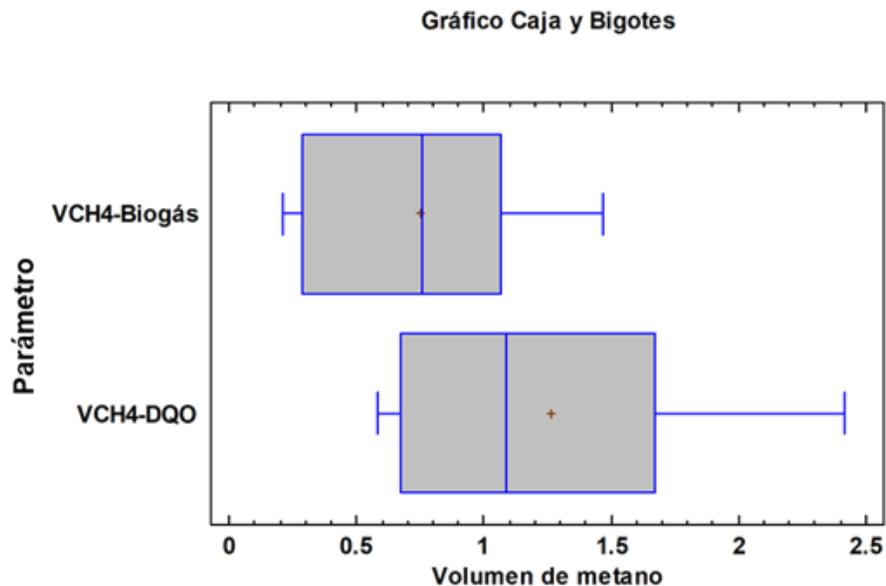
Los datos experimentales recopilados y obtenidos de 20 semanas fueron analizados usando el paquete de cómputo Statsgraphic Centurion Version 19.4.01 como se mencionó en la metodología. Se realizó un análisis de varianza, ANDEVA (ANOVA, por sus siglas en inglés *Analysis of variance*), para comparar la varianza de un factor para el volumen de metano producido en el RALLFA 65°C. La producción del biogás generado en el RALLFA se cuantificó de la semana 5 a la 24, así como la obtención del metano teórico a partir de la DQO. Para el contenido de metano real medido por cromatografía presente en el biogás se reportó de la semana 15 a la 24. En consecuencia, se tiene la primera etapa donde se realizará la comparación de los volúmenes de metano experimental vs. teórico ( $V_{\text{CH}_4\text{-Biogás-1}}$  vs.  $V_{\text{CH}_4\text{-DQO-1}}$ ) obtenidos de la semana 5 a la 14. Finalmente, la segunda etapa se tiene la comparación de los volúmenes de metano experimental vs. teórico vs. real ( $V_{\text{CH}_4\text{-Biogás-2}}$  vs.  $V_{\text{CH}_4\text{-DQO-2}}$  vs.  $V_{\text{CH}_4\text{-CG}}$ ) de la semana 15 a la 24.

### 4.4.1. Primera etapa de evaluación de volumen de CH<sub>4</sub> semana 5 a 14

Se realizó un análisis de varianza de un factor para el volumen de metano considerando dos diferentes niveles de parámetros: Volumen de metano experimental ( $V_{\text{CH}_4\text{-Biogás-1}}$ ) contenido en el biogás generado y el volumen de metano teórico ( $V_{\text{CH}_4\text{-DQO-1}}$ ) calculado a partir de la DQO con las ecuaciones 4.1 y 4.2. En la Tabla 4.4 se presenta el resumen estadístico de las pruebas realizadas de la semana 5 a la 14. En la Figura 4.1 se muestra la gráfica de caja y bigotes de cada parámetro ( $V_{\text{CH}_4\text{-Biogás}}$  vs.  $V_{\text{CH}_4\text{-DQO}}$ ) vs. el factor (volumen de CH<sub>4</sub>).

**Tabla 4.4. Resumen estadístico para los datos de la semana 5 a 14 comparando los volúmenes de metano**

Parámetro	Recuento	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación
$V_{\text{CH}_4\text{-Biogás-1}}$	10	0.752	0.456431	60.70%
$V_{\text{CH}_4\text{-DQO-1}}$	10	1.263	0.675196	53.46%
<b>Total</b>	20	1.0075	0.619149	61.45%



**Figura 4.1. Gráfico de Caja y Bigotes: Parámetro ( $V_{CH_4-Biogás}$  y  $V_{CH_4-DQO}$ ) vs. Volumen de metano en la semana 5 a 14**

El análisis de varianza, ANDEVA, de un factor compara las medias de los diferentes niveles ( $V_{CH_4-Biogás-1}$  y  $V_{CH_4-DQO-1}$ ), descompone la varianza del volumen de metano en dos componentes: Un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 3.93, que es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es mayor que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media del volumen del metano entre un nivel de parámetro y otro, con un nivel del 5% de significancia que se puede observar en la Tabla 4.5.

**Tabla 4.5. Tabla de ANDEVA para volumen de metano por parámetro**

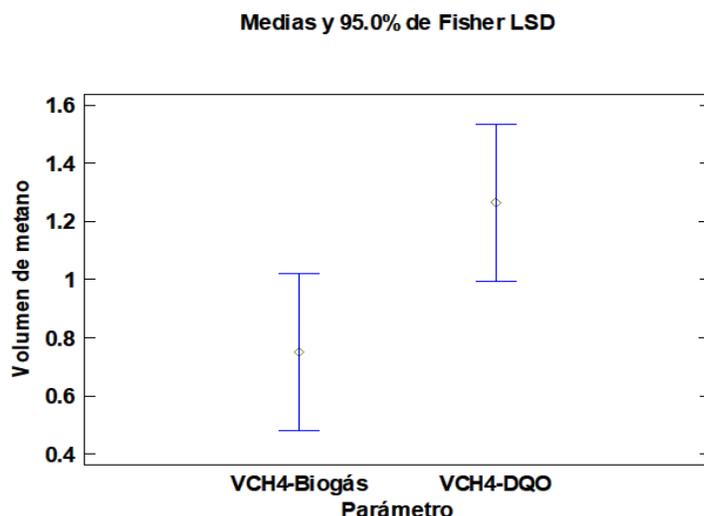
Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	1.3056	1	1.3056	3.93	0.0629
Intra grupos	5.97797	18	0.332109		
Total (Corr.)	7.28357	19			

Para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras se aplica un procedimiento de comparación múltiple. En la Tabla 4.6 se muestra que la mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. No hay diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (*LSD* de Fisher por sus siglas en inglés).

**Tabla 4.6. Pruebas de rangos múltiples para volumen de metano por parámetro. Método 95% *LSD* semana 5 a 14.**

Parámetro	Casos	Media	Grupos homogéneos
$V_{CH4-Biogás-1}$	10	0.752	X
$V_{CH4-DQO-1}$	10	1.263	X
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
$V_{CH4-Biogás-1} - V_{CH4-DQO-1}$		-0.511	0.54146

\* indica una diferencia significativa



**Figura 4.2. Volumen de metano vs. Parámetro ( $V_{CH4-Biogás} - V_{CH4-DQO}$ )**

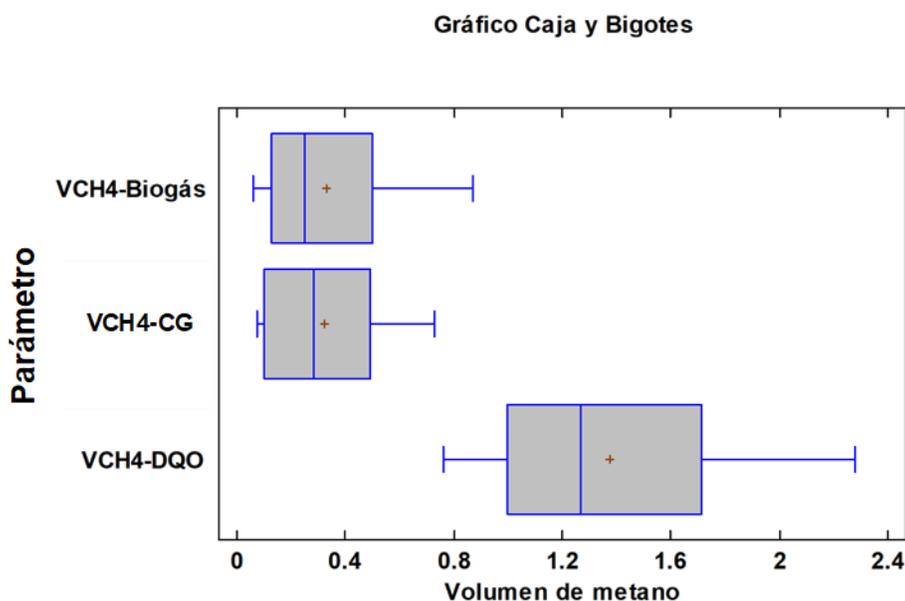
#### 4.4.2. Segunda etapa de evaluación de volumen de $CH_4$ semana 15 a 24

Para la segunda etapa correspondiente en la semana 15 a 24, se realizó un análisis de varianza de un factor para volumen de metano para comparar los valores medios

de los tres diferentes niveles de Parámetro: experimental ( $V_{CH_4-Biogás-2}$ ), real ( $V_{CH_4-CG}$ ) y teórico ( $V_{CH_4-DQO-2}$ ). El resumen de los resultados estadísticos se presenta en la Tabla 4.7.

**Tabla 4.7. Resumen estadístico para volumen de metano semana 15 a 24**

Parámetro	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de variación
$V_{CH_4-Biogás-2}$	10	0.328	0.268361	81.82%
$V_{CH_4-CG}$	10	0.321	0.21651	67.45%
$V_{CH_4-DQO-2}$	10	1.374	0.470607	34.25%
<b>Total</b>	30	0.674	0.599038	88.83%



**Figura 4.3. Gráfico de Caja y Bigotes: Parámetro ( $V_{CH_4-Biogás}$  vs.  $V_{CH_4-CG}$  vs.  $V_{CH_4-DQO}$ ) vs. Volumen de metano Semana 15 a 24**

El análisis de varianza del volumen de metano para cada uno de los 3 niveles de parámetro da que la razón-F, que en este caso es igual a 32.36, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos como se muestra en la Tabla 4. 8. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Volumen de Metano entre un nivel de Parámetro y otro, con un nivel del 5% de significancia.

Tabla 4.8. Tabla ANDEVA para volumen de metano por parámetro semana 15 a 24

Fuente	Suma de cuadrados	GI	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	7.34325	2	3.67162	32.36	0.0000
Intra grupos	3.06329	27	0.113455		
<b>Total (Corr.)</b>	10.4065	29			

En la Tabla 4.9 se muestran los resultados de la comparación de múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. se han identificado 2 grupos homogéneos según la alineación de las X en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X.

Tabla 4.9. Pruebas de rangos múltiples para volumen de metano por parámetro. Método 95.0% LSD semana 15 a 24

Parámetro	Casos	Media	Grupos homogéneos
V <sub>CH4-CG</sub>	10	0.321	X
V <sub>CH4-Biogás-2</sub>	10	0.328	X
V <sub>CH4-DQO-2</sub>	10	1.374	X
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
V <sub>CH4-Biogás-2</sub> - V <sub>CH4-CG</sub>		0.007	0.309079
V <sub>CH4-Biogás-2</sub> - V <sub>CH4-DQO-2</sub>	*	-1.046	0.309079
V <sub>CH4-CG</sub> - V <sub>CH4-DQO-2</sub>	*	-1.053	0.309079

\* indica una diferencia significativa

Medias y 95.0% de Fisher LSD

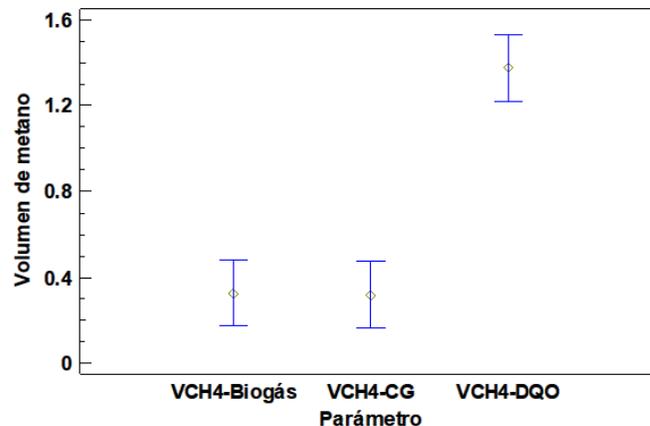


Figura 4.4. Volumen de metano vs. Parámetros (V<sub>CH4-Biogás</sub> vs. V<sub>CH4-CG</sub> vs. V<sub>CH4-DQO</sub>)

## 4.5. Discusión final

La agroindustria azucarera es un sector que tiene la necesidad de desarrollar e implementar innovaciones tecnológicas para la generación de bioenergía con un punto de vista sustentable y de responsabilidad social. México es parte de los principales productores de la caña de azúcar y generador de subproductos con alto valor para la generación de biogás debido a su alto contenido de material biodegradable, mediante degradación anaerobia en condiciones termofílicas, ya que se tienen una gran ventaja al mostrar mayores tasas de conversión de materia y generación de metano. México al ser un país en vías de desarrollo se ha comprometido a fortalecer sus industrias y que estas sean competitivas a nivel mundial. Uno de los sectores más importantes es la que se relaciona con el sector alcoholero-azucarero, que da origen a las vinazas azucareras y son clave para esta investigación. Dentro de los parámetros revisados, se puede apreciar cómo el contenido carbonoso de estas se puede aprovechar como biogás rico en metano después de un tratamiento anaerobio.

Experimentalmente se le dio un seguimiento continuo a los parámetros establecidos para evaluar la degradación anaerobia termofílica en el RALLFA que opera a 65°C y la producción de biogás rico en metano. Dado que el reactor se encontraba en condiciones ácidas debido a problemas con el sistema de calentamiento y probablemente por la carga orgánica con la que fue alimentando, afectó su estabilización, la producción de biogás y la composición de metano debido a un gran consumo de bicarbonatos para la neutralización de los ácidos grasos volátiles. Durante las primeras semanas se puso a prueba el reactor para determinar si se estabilizaba sin ningún aditivo; sin embargo, las fugas en mangueras y en el sistema de recirculación del agua en la semana 6 hasta la 8 en el sistema afectaron el pH. En consecuencia, se tomaron medidas para aumentar el pH con la adición de 1 g de bicarbonato de sodio y reducir los factores de alcalinidad ya que estos son más

elevados a los que se recomienda, observando que la relación de AI/AP indica una producción mayor de AGV.

En esta investigación experimental se realizó el seguimiento del funcionamiento de un reactor tipo RALLFA operado a 65°C durante 24 semanas. En este lapso se observaron distintas etapas. Las etapas se identificaron a partir de las pruebas de control realizadas que se describen en la metodología (ANEXO A). En la investigación, que consta de la semana 1 a la 24, se realizaron las pruebas de control de la VC, VD (influyente) y E65 (efluente), de los parámetros de pH, C.E., temperatura y alcalinidad; dando como resultado  $\text{pH}_{\text{VC}} = 4.6 \pm 0.14$ ,  $\text{pH}_{\text{VD}} = 6.1 \pm 0.8$  y  $\text{pH}_{\text{E65}} = 7.2 \pm 0.41$ ;  $\text{C.E.}_{\text{VC}} = 29.1 \pm 0.75$ ,  $\text{C.E.}_{\text{VD}} = 15.7 \pm 1.67$  y  $\text{C.E.}_{\text{E65}} = 19.5 \pm 0.78$ ;  $T_{\text{VC}} = 13.5 \pm 4.55$ ,  $T_{\text{VD}} = 23.0 \pm 3.29$  y  $T_{\text{E65}} = 59.0 \pm 2.99$ ; factor IB=  $0.7 \pm 0.1$ , factor  $\alpha = 0.3 \pm 0.1$ , factor AI/AP de  $2.3 \pm 1.01$ , alcalinidad  $6,596 \pm 1,120 \text{ mgCaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ .

Otros parámetros que se realizaron a la VC, VD (influyente) y E65 (efluente) partir de la semana 5 a la 24 fueron las determinaciones de los parámetros de sulfatos, sulfuros, sólidos en todas sus formas, DQO y biogás generado en el RALLFA. Como resultado se tiene que para la determinación de iones sulfatos en promedio  $\text{SO}_4^{2-}\text{VC} = 9,859 \pm 176$ ,  $\text{SO}_4^{2-}\text{VD} = 3,009 \pm 970$ ,  $\text{SO}_4^{2-}\text{E65} = 2,256 \pm 811$  y  $0.753 \pm 0.382$ .  $\text{g SO}_4^{2-}\text{Rem L}^{-1}$ ; para la determinación de sulfuros en promedio  $\text{S}^{2-}\text{VC} = 35.9 \pm 1.7$ ,  $\text{S}^{2-}\text{VD} = 10.7 \pm 3.0$ ,  $\text{S}^{2-}\text{E65} = 18.0 \pm 3.0$  y  $5.43 \pm 1.85 \text{ g S}^{2-}\text{Gen L}^{-1}$ . Para la determinación de la demanda química de oxígeno se tiene en promedio  $\text{DQO}_{\text{VC}} = 79,639 \pm 2,309 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ ,  $\text{DQO}_{\text{VD}} = 28,961 \pm 6,002 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ ,  $\text{DQO}_{\text{E65}} = 21,933 \pm 6,025 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$  y  $2.34 \text{ gO}_2 \text{ Rem L}^{-1}$ ; y finalmente el volumen de biogás generado  $V_{\text{CH}_4\text{-Biogás}} = 0.61 \pm 0.44 \text{ L/semana}$ .

En el caso de los ST y los SDT se observa que hay una mayor concentración, lo que puede indicar que hay presencia de sustancias inorgánica que no pueden eliminarse durante la digestión en el RALLFA. Los sólidos con mayor porcentaje de remoción se presentan en los SST y SSV con 40% mayor remoción, sin embargo, la cantidad en el influyente y efluente es menor indicando la dificultad para medir su composición

heterogénea al tomar la alícuota. Por otro lado, los sólidos volátiles, que son un indicador clave para el control de los lodos activos en el reactor, se muestran que los STV y los SDV también tienen altas remociones con un 31% pero, igualmente, con concentraciones bajas en el influente y efluente.  $ST_{Rem} = 6,200 \pm 1,697$ ;  $STV_{Rem} = 5,277 \pm 2,152$ ;  $STF_{Rem} = 2,644 \pm 931$ ;  $SDT_{Rem} = 6,550 \pm 2,771$ ;  $SDV_{Rem} = 4,340 \pm 2,219$ ;  $SDF_{Rem} = 2,568 \pm 1,052$ ;  $SST_{Rem} = 2,2013 \pm 1,017$ ;  $SSV_{Rem} = 1,370 \pm 580$ ;  $SSF_{Rem} = 231 \pm 106$ .

La primera etapa se caracterizó por la comparación que corresponde al periodo de la semana 5 a la 14; durante esta etapa se realizaron las pruebas de DQO y producción de biogás. Como resultado se obtuvo.  $V_{CH_4-Biogás-1} = 0.75 \pm 0.46$  L/semana y  $V_{CH_4-DQO-1} = 1.26 \pm 0.68$  L/semana. Se encontró que no existe una diferencia significativa en la prueba realizada del análisis de varianza (Tabla 4.6).

Finalmente, en la segunda etapa que corresponde de la semana 15 al final de la investigación, se realizaron análisis de los parámetros de los volúmenes de metano experimental ( $V_{CH_4-Biogás}$ ) vs. teórico ( $V_{CH_4-DQO}$ ) vs. real ( $V_{CH_4-CG}$ ). Durante esta etapa se obtuvo que los volúmenes de metano fueron  $V_{CH_4-Biogás-2} = 0.33 \pm 0.27$  L/semana,  $V_{CH_4-DQO-2} = 1.37 \pm 0.47$  L/semana y  $V_{CH_4-CG} = 0.32 \pm 0.22$  L/semana. Como resultado se tuvo una diferencia significativa del volumen experimental con respecto al volumen teórico y el volumen real con respecto a volumen teórico (Tabla 4.9), como se puede observar en la Gráfica 4.13, así como en la Figura 4.3 y Figura 4.4. De acuerdo con Karahan et al. (2008) y Pire-Sierra et al. (2011) es importante tener en cuenta las tasas de degradación de las fracciones de la DQO ya que se tiene material soluble y particulado, biodegradable y no biodegradable y, por lo tanto, se pueden obtener producciones del volumen de metano teórico muy altos al reflejar todo el contenido orgánico e inorgánico.

La producción de metano contenido en el biogás y el cuantificado por cromatografía indicaron volúmenes similares y mediante su análisis estadístico (Tabla 4.9). Se observa que el biogás producido tiene un gran porcentaje de metano al no tener

diferencia significativa el volumen experimental y volumen real. Las arqueas metanogénicas son inhibidas a pH menores de 6.7 y al no tener fuentes de carbono como el acetato por lo que es importante estar en un rango mayor a ese para favorecer su proliferación.

A continuación, se dan las conclusiones derivadas de estos datos experimentales y se proponen algunas líneas a seguir.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

Con base en los objetivos planteados en este proyecto: Estudiar el comportamiento de un reactor termofílico anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente convirtiendo los compuestos carbonosos de vinazas medidos como demanda química de oxígeno en biogás, así como caracterizar la vinaza, antes y después de su tratamiento, mediante análisis fisicoquímicos de acuerdo con las normas internacional aplicables estableciendo las condiciones de operación en un reactor RALLFA operado a 65°C para favorecer la producción de metano y realizar análisis fisicoquímicos del influente y efluente corroborando la estabilidad del reactor midiendo la demanda química de oxígeno (DQO) del influente y efluente de un reactor anaerobio a escala de laboratorio, determinando la cantidad de biogás producido en el biorreactor anaerobio y evaluando por cromatografía de gases la cantidad de metano real que contiene, se puede concluir que:

- En las etapas trabajadas en esta investigación se lograron identificar las condiciones de operación idóneas para su funcionamiento,  $T=60^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{DQO}_{\text{E65}}=21,933 \pm 6,025 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ ,  $\text{TRH}=7$  días. Como resultado de estas condiciones de operación se determinó que el biogás producido era  $V_{\text{CH}_4\text{-Biogás}}=0.61 \pm 0.44$  L/semana con un rendimiento de  $47 \pm 28\%$  y que el contenido de metano real  $V_{\text{CH}_4\text{-CG}}=0.32 \pm 0.20$  L/semana con rendimiento del  $34 \pm 0.13\%$ .
- Se pudo llevar a cabo la degradación anaerobia termofílica. No obstante, hasta el momento, todavía los porcentajes de remoción de DQO son modestos, con  $28 \pm 0.09\%$ , debido a las condiciones ácidas que se presentaron, por lo que se

tuvieron que adicionar sustancias para la modificación del pH sin afectar la producción de biogás con mayor contenido de metano.

- La estabilización en condiciones termofílicas altas es un proceso largo y como se observó se pueden tener un pH neutro con bajas producciones de metano y factores de alcalinidad por debajo de los rangos estables por lo que, en la etapa de estabilización, los THR y ORL deben ser bajos para asegurar una buena degradación.
- El tratamiento termofílico a una temperatura de 65°C (en realidad, 60°C) permitió una disminución en el contenido de materia orgánica, independientemente de la inhibición de las bacterias metanogénicas, ya que estas necesitan periodos largos de adaptación y la adición de bicarbonato de sodio durante la etapa de estabilización.

A continuación, con fundamento en lo realizado, se ofrecen las siguientes

## **5.2. Recomendaciones**

- Extender el tiempo en que se alimenta el RALLFA a cada 48 horas dado que, en este proyecto, así como otras investigaciones que trabajaron con la temperatura de 65°C (Contreras-Contreras, 2019; Rojas-Zamudio, 2018), se observó que el RALLFA disminuye su capacidad de degradabilidad y generación de biogás. Se debe tener mucha precaución porque un cambio en la carga orgánica con los mismos TRH tienden a disminuir la producción de metano y puede provocar el aumento en la producción de AGV.
- En caso de que la acidificación del RALLFA tenga periodos muy largos se deberán enfocar en la proliferación de los microorganismos en el RALLFA alimentando con un porcentaje de otro efluente obtenido a temperaturas termofílicas (45°C o 55°C) para mejorar la estabilización y que la flora

microbiana se adapte mejor a nuevas cargas orgánicas, así como la ayuda de bicarbonato de sodio aumentando su cantidad por ciclos hasta llegar a 1 o 2g.

- Para las determinaciones de DQO, sulfatos, sulfuros, sólidos totales, así como de otros parámetros y análisis fisicoquímicos, se deberá tener un factor de dilución en el que las concentraciones calculadas puedan ser cuantificadas dentro de los rangos de concentraciones de las curvas de calibración correspondientes y las diferentes metodologías empleadas; con el fin de aumentar la concordancia entre cada uno de los resultados individuales. Teniendo en cuenta los volúmenes necesarios para alícuotas y el volumen de residuo que se podría generar.
- El sistema de calentamiento en el RALLFA a 65°C es más susceptible a presentar fugas continuamente, por lo que el mantenimiento de las mangueras y sus conexiones deben ser revisadas cada semana, así como el funcionamiento de la bomba de calentamiento y de alimentación.

# ANEXOS

## Anexo A. Metodologías analíticas específicas<sup>7</sup>

### A1. Determinación de pH

La determinación de pH del efluente e influente del RALLFA se realiza siguiendo el manual del equipo del potenciómetro HANNA modelo HI4522 y el electrodo HI1131b de acuerdo con la norma NMX-AA-008-SFCI-2011(DOF, 2011) y APHA, AWWA, WEF (2012). El procedimiento se describe en la Figura A1.

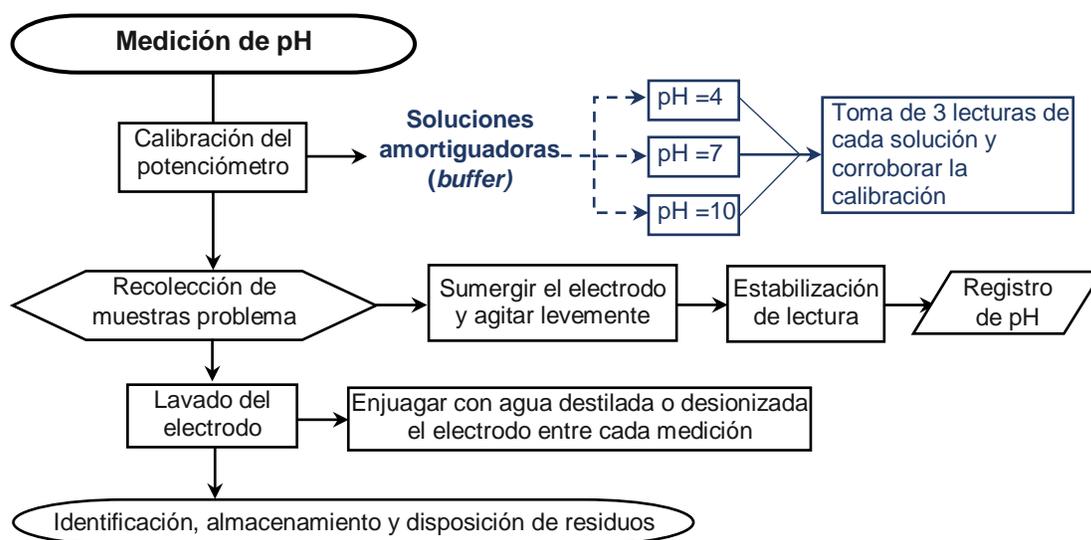


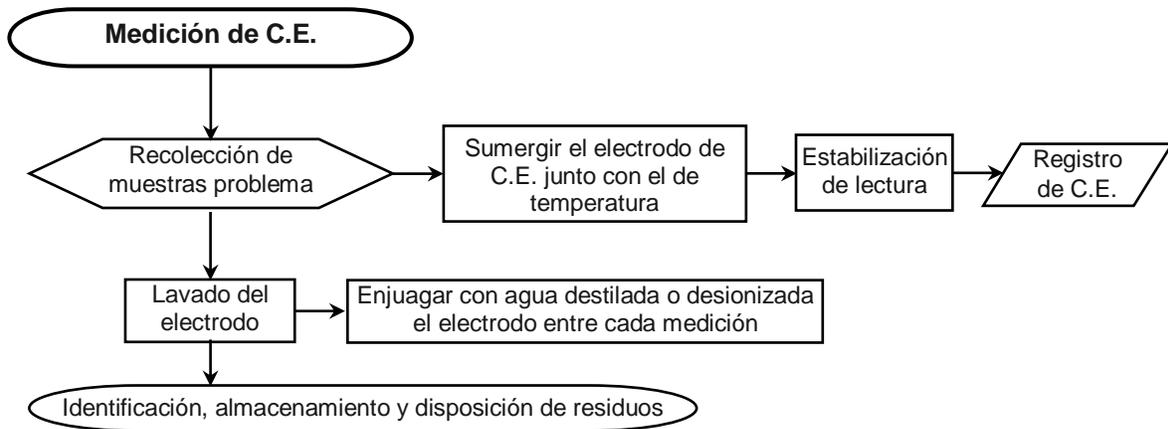
Figura A1. Determinación del pH

### A2. Conductividad eléctrica

La determinación de conductividad eléctrica del efluente e influente del RALLFA se realiza siguiendo el manual del equipo (potenciómetro HANNA modelo HI4522) y del

<sup>7</sup> Todos los análisis se realizaron a muestras tomadas por duplicado a menos que se especifique algo diferente

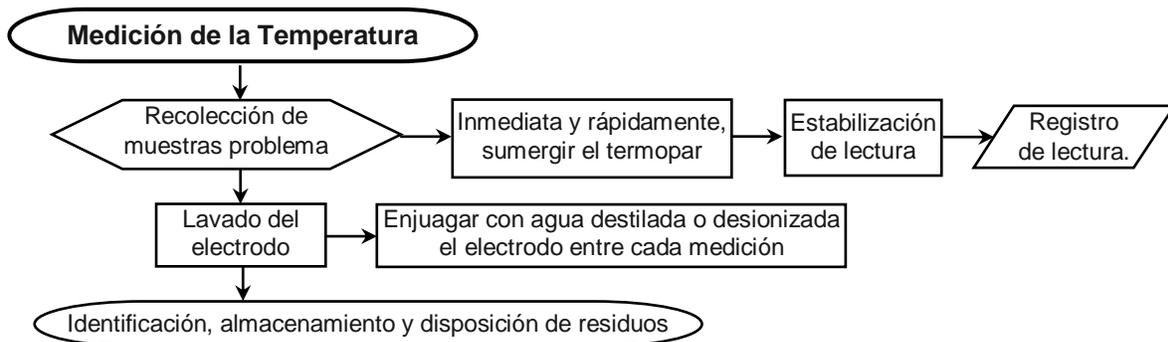
electrodo HI76310 de acuerdo con APHA, AWWA, WEF (2012). El procedimiento se describe en la Figura A2.



**Figura. A2. Determinación de la conductividad eléctrica**

### A3. Temperatura

La determinación de la temperatura del efluente e influente del RALLFA se realiza utilizando el equipo potenciométrico HANNA modelo HI4522 y el electrodo HI7662-T de acuerdo con la NMX-AA-007-SCFI-2013 y APHA, AWWA, WEF (2012). El procedimiento se describe en la Figura A3.



**Figura A3. Determinación de la temperatura**

## A4. Alcalinidad y factores de alcalinidad

La determinación de la alcalinidad y los factores del efluente del RALLFA se realiza utilizando el equipo potenciométrico HANNA modelo HI4522 y electrodo HI1131b de acuerdo con la NMX-AA-036-SCFI-2001 (DOF, 2001b), APHA, AWWA, WEF (2012) y Pérez y Torres (2008). El procedimiento se describe en el Figura A4.

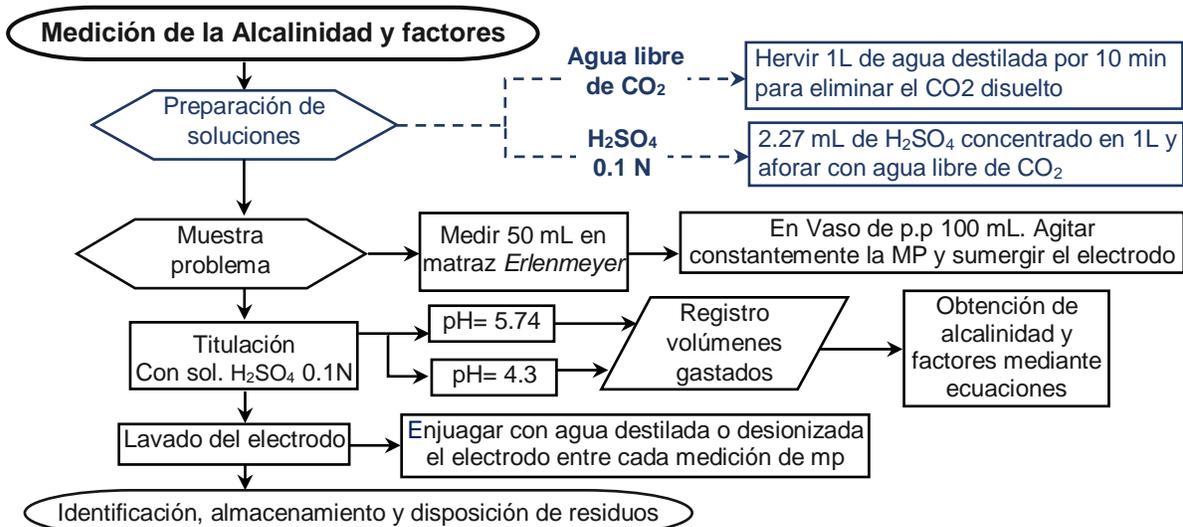


Figura A4. Determinación de alcalinidad y factores de alcalinidad (IB,  $\alpha$ , AI/AP)

$$\text{Alcalinidad} = \frac{V_{4.3} * N_{H_2SO_4} * (50\,000 \text{ mg } CaCO_3 / 1eq \text{ ac})}{V_m} \quad \text{Ecuación A4.1}$$

$$IB = \frac{V_{4.3}}{V_{AT}} \quad \text{Ecuación A4.2}$$

$$\alpha = \frac{V_{5.75}}{V_{AT}} \quad \text{Ecuación A4.3}$$

$$\frac{AI}{AP} = \frac{V_{5.75}}{V_{4.3}} \quad \text{Ecuación A4.4}$$

Donde:

$N_{H_2SO_4}$  = normalidad del ácido sulfúrico (0.1 N)

$V_m$  = volumen de la muestra problema (50 mL)

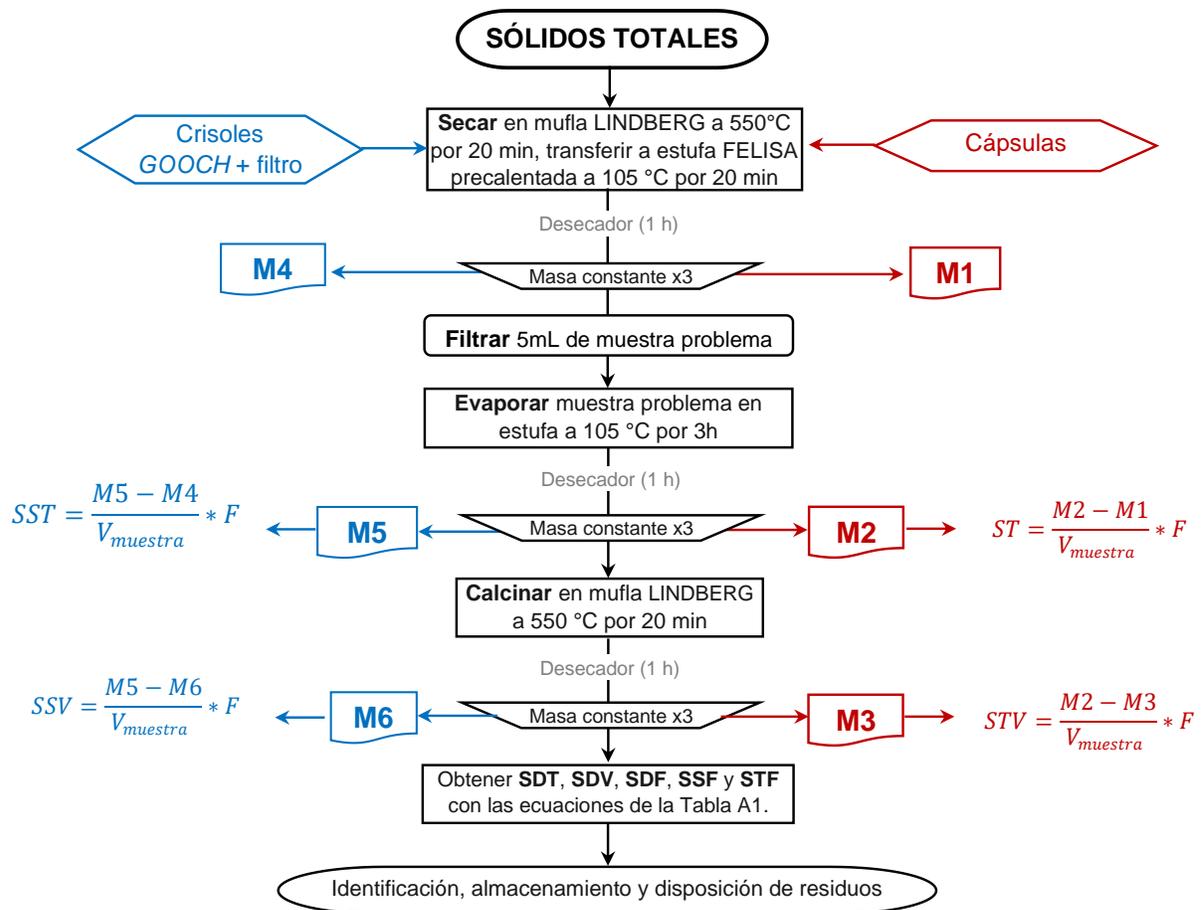
$V_{AT} = V_{5.75} + V_{4.3}$ , alcalinidad total (valora el 99% de  $HCO_3^-$  y 65% de AGV)

$V_{5.75}$ : volumen titulado para llevar la muestra problema a pH=5.75 (valora el 80% de  $HCO_3^-$  y 6% de AGV)

$V_{4.3}$ : volumen titulado para llevar la muestra problema a pH=4.3

## A5. Sólidos en todas sus formas

Los sólidos en todas sus formas se determinaron con base en la norma NMX-AA-034-SCFI-2015 (DOF, 2015) y APHA, AWWA, WEF (2012) para la medición por método gravimétrico de sólidos presentes.



F=factor de conversión

Figura A5. Determinación de sólidos en todas sus formas

<b>Tabla A1. Ecuaciones para sólidos disueltos y sólidos fijos</b>		
Sólidos disueltos totales	$SDT = ST - SST$	<b>Ecuación A5.1</b>
Sólidos disueltos volátiles	$SDV = STV - SSV$	<b>Ecuación A5.2</b>
Sólidos disueltos fijos	$SDF = SDT - SDV$	<b>Ecuación A5.3</b>
Sólidos suspendidos fijos	$SSF = SST - SSV$	<b>Ecuación A5.4</b>
Sólido totales fijos	$STF = ST - STV$	<b>Ecuación A5.5</b>

#### **A6. Determinación del contenido de compuestos carbonosos medidos como DQO total**

La DQO se determinó mediante el método de flujo cerrado, descrito en la norma NMX-AA-030-SCFI-2001(DOF, 2001a) y en APHA, AWWA, WEF (2012). La metodología para la determinación de DQO se presenta en la Figura A6. Para cuantificar la demanda química de oxígeno por medio de reflujo cerrado se realiza la curva de calibración.

#### **Curva de calibración para la determinación de la DQO**

$$C_1 V_1 = C_2 V_2 \quad \text{Ecuación A.1}$$

Donde:

C<sub>1</sub>= Concentración conocida (Solución Patrón 1000 mg DQO/L)

C<sub>2</sub>= Concentración que se requiere (mg/L)

V<sub>1</sub>= Volumen conocido (L)

V<sub>2</sub>= Volumen desconocido (L)

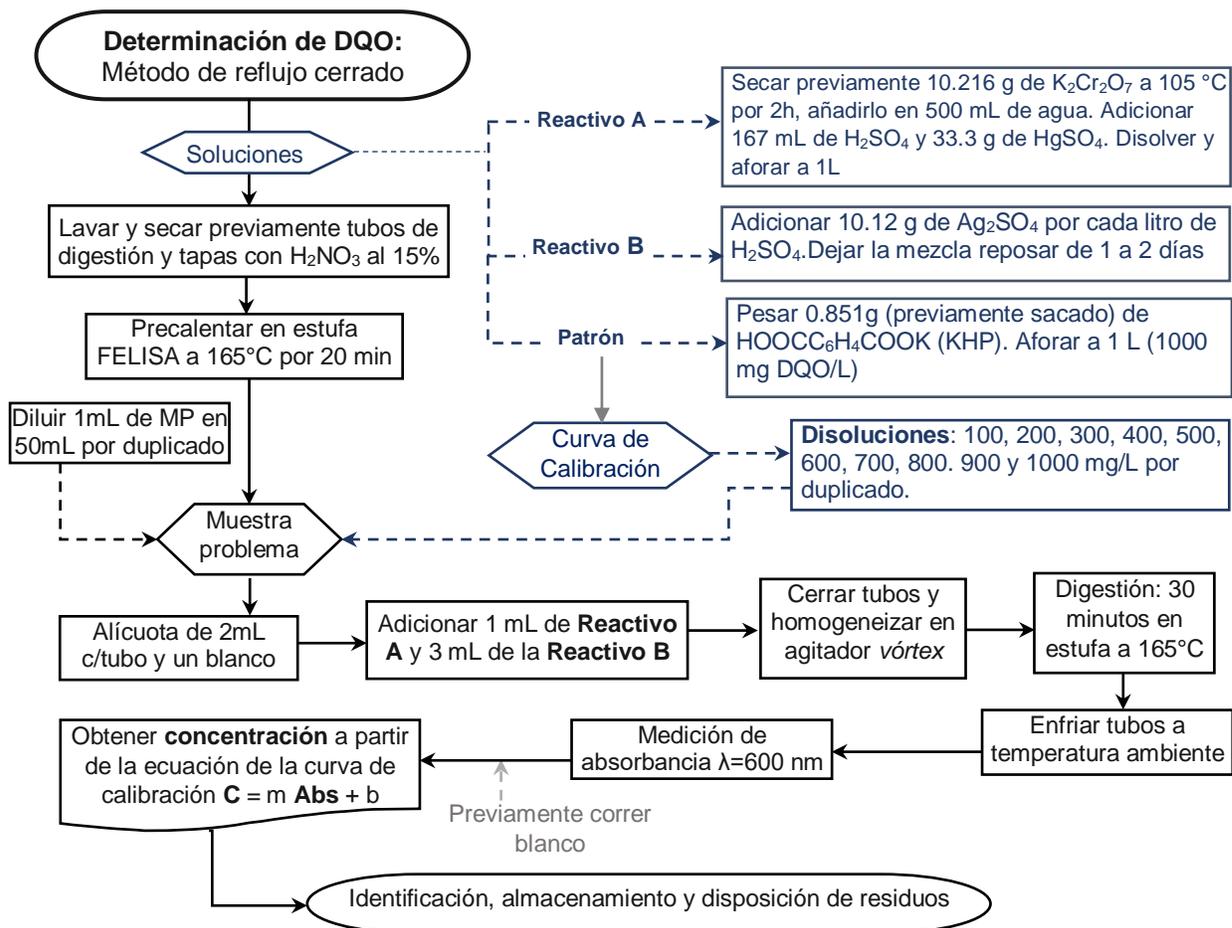
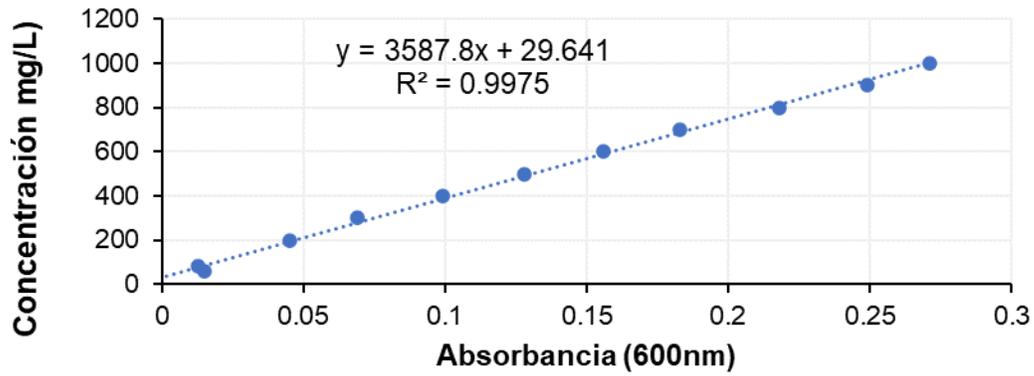


Figura A6. Determinación de DQO

Tabla A2. Registro de datos para la curva de calibración de DQO

Concentración (mg/L)	Volumen total (mL)	Volumen de solución patrón (mL)	Volumen de agua (mL)	Absorbancia $\lambda=600\text{ nm}$
Blanco				0.001
60	5	3.75	1.25	0.015
80	10	4	6	0.013
200	15	10	5	0.045
300	20	15	5	0.069
400	25	20	5	0.099
500	30	25	5	0.128
600	35	30	5	0.156
700	40	35	5	0.183
800	45	40	5	0.218
900	50	45	5	0.249
1000	55			0.271

## Curva de absorbancia



Gráfica A1. Curva de calibración de la DQO

## A7. Determinación del contenido de sulfatos presentes

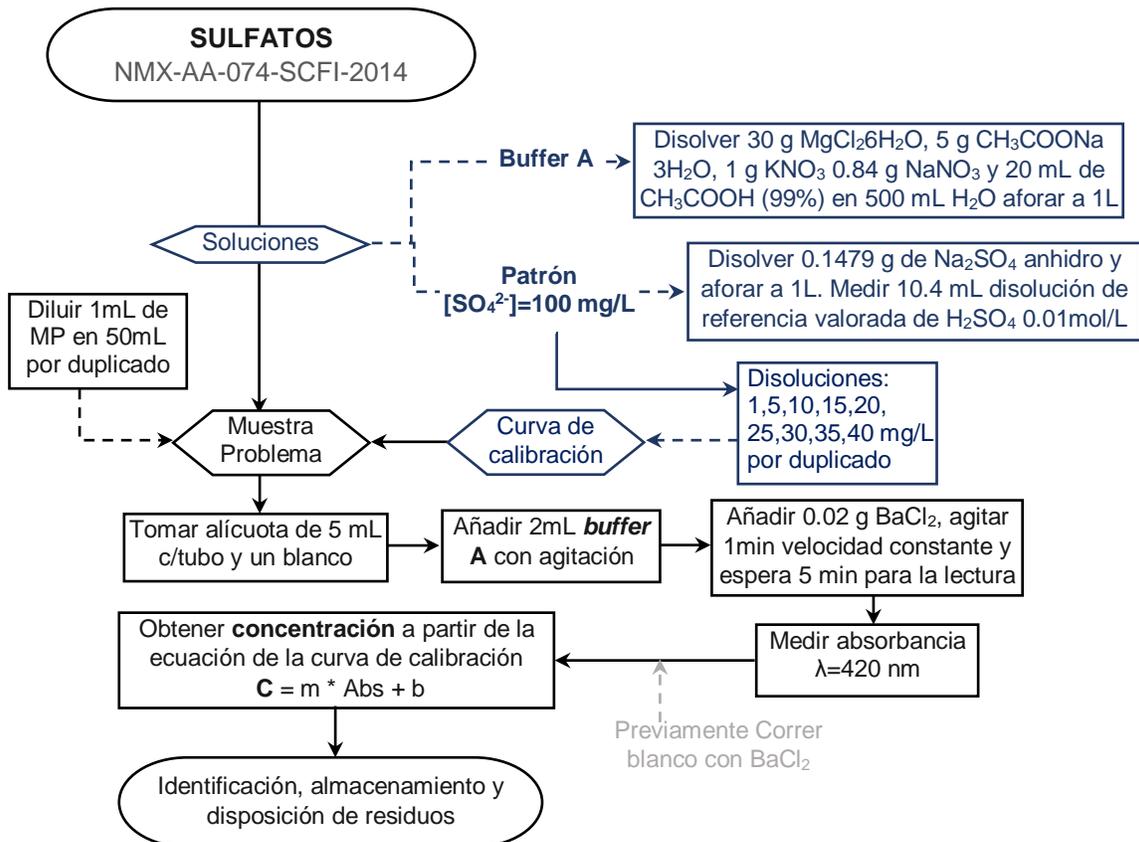


Figura A7. Determinación de sulfatos

## Curva de calibración para la determinación de sulfatos

Concentración de la Solución Patrón 100 mg SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/L

$$C_1 V_1 = C_2 V_2$$

De la Ecuación A.1.

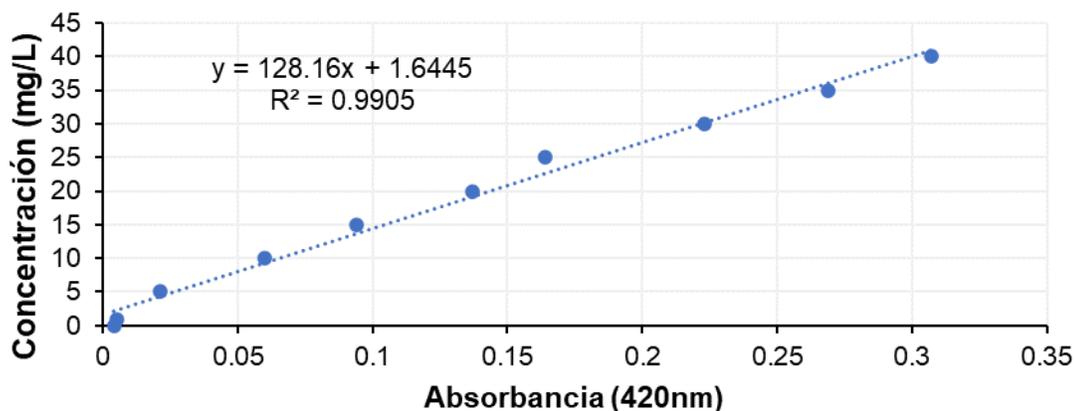
$$(100 \text{ mg/L})V_1 = (40 \text{ mg/L})(108L)$$

$$V_1 = \frac{40 \text{ mg/L}}{100 \text{ mg/L}} * 108L$$

Tabla A3. Datos para la curva de calibración de sulfatos.

Concentración (mg/L)	Volumen total (mL)	Volumen de solución patrón (mL)	Volumen de agua (mL)	Absorbancia $\lambda=420 \text{ nm}$
0	-	-	10	0.004
1	12	2.4	9.6	0.005
5	24	12	12	0.021
10	36	24	12	0.060
15	48	36	12	0.094
20	60	48	12	0.137
25	72	60	12	0.164
30	84	72	12	0.223
35	96	84	12	0.269
40	108	43.2	64.8	0.307

## Curva de absorbancia



Gráfica A2. Curva de calibración de sulfatos

Nota: Ver en la Tabla C6 del Anexo C en la página 80 (caso especial)

## A8. Determinación del contenido de sulfuros presentes

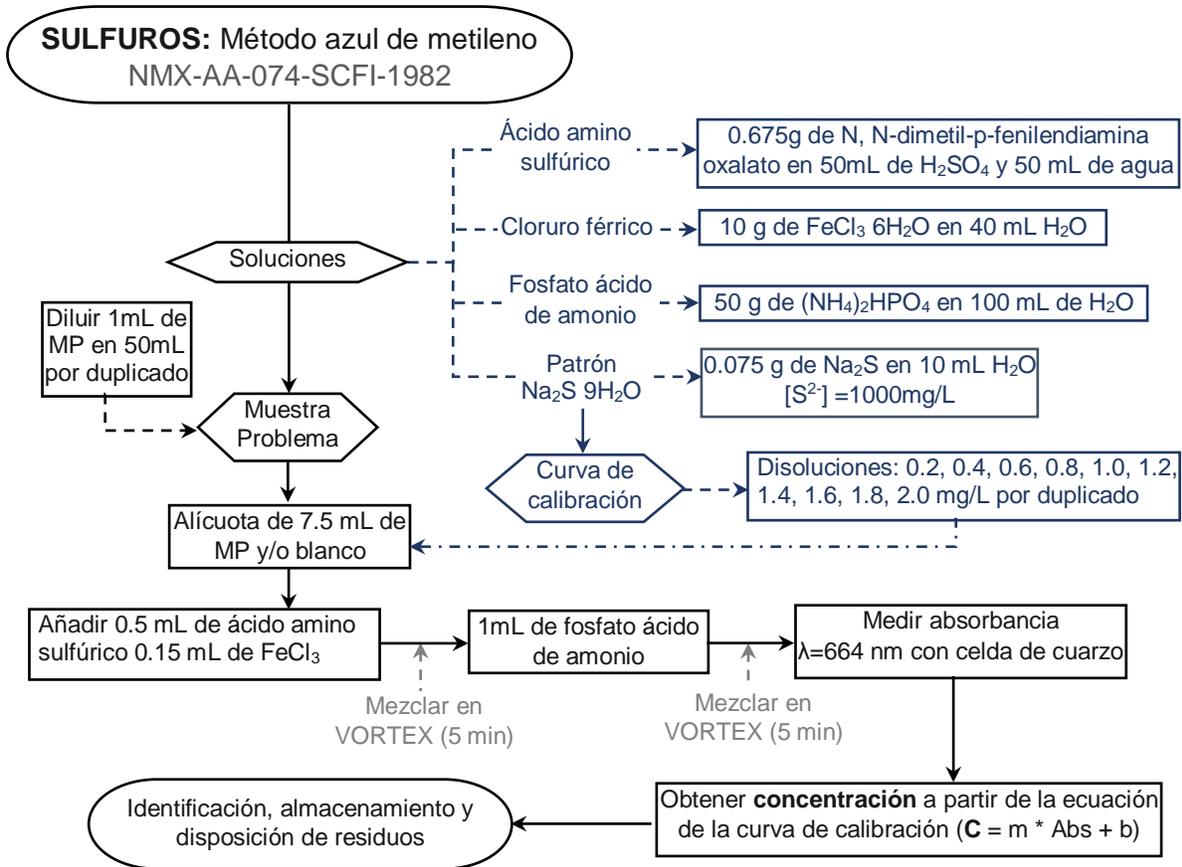


Figura A8. Determinación de sulfuros

Concentración de la Solución Patrón 1000 mg S<sup>2-</sup>/L

$$C_1 V_1 = C_2 V_2$$

De la Ecuación A.1.

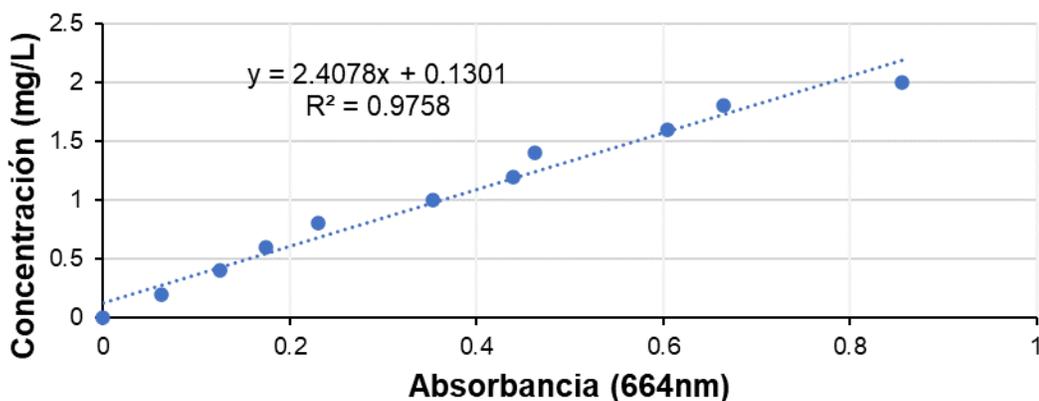
$$(1000 \text{ mg/L}) V_1 = (2 \text{ mg/L})(L)$$

$$V_1 = \frac{2 \text{ mg/L}}{1000 \text{ mg/L}} * L$$

**Tabla A4. Datos para la curva de calibración de sulfuros**

Concentración (mg/L)	Volumen total (mL)	Volumen de solución patrón (mL)	Volumen de agua (mL)	Absorbancia $\lambda=664$ nm
0	15			0
0.2	35	17.5	17.5	0.062
0.4	50	33.33	16.67	0.126
0.6	65	48.75	16.25	0.174
0.8	80	64.0	26.0	0.23
1.0	100	83.33	16.67	0.354
1.2	115	98.57	16.43	0.439
1.4	130	113.75	16.25	0.463
1.6	145	128.88	16.12	0.605
1.8	160	144.0	16.0	0.665
2.0	180	0.36	179.64	0.856

### Curva de absorbancia

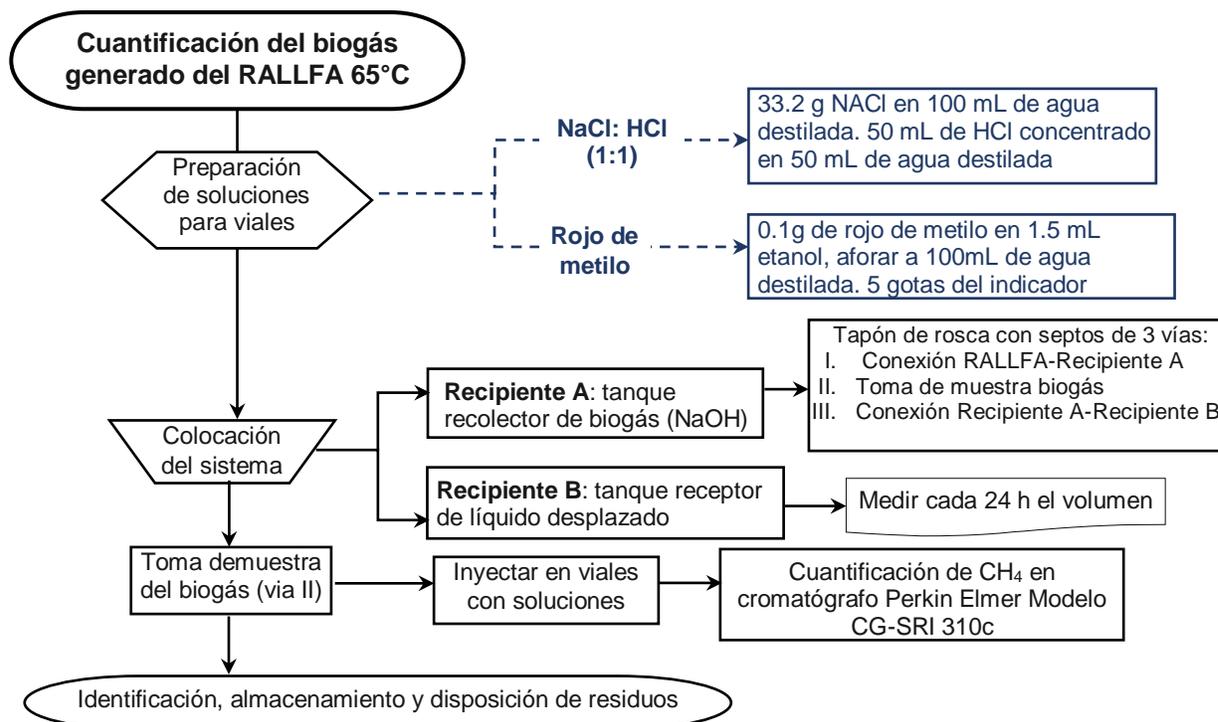


**Gráfica A3. Curva de calibración de sulfuros**

### A9. Determinación del contenido de metano en el biogás generado en el RALLFA 65°C

Para la medición del biogás se implementó un sistema descrito en el apartado 3.4. Este sistema está compuesto por un recipiente recolector lleno de una solución de hidróxido de sodio (NaOH) que está cerrado herméticamente por una tapa con tres vías. Una de ellas proviene del reactor y contiene el efluente gaseoso del mismo, la

segunda lleva la solución desplazada del tanque a un depósito donde se colecta este volumen para su medición. La tercera lleva a una llave de tres vías que sirve como muestreador del biogás atrapado en el tanque.



**Figura A9. Determinación del biogás generado en el RALLFA a 65°C**

### **A10. Determinación del contenido de metano en el biogás por CG**

La determinación del porcentaje de metano ( $\text{CH}_4$ ) presente en el biogás producido por el sistema se describió en el apartado 3.4. Se realiza con el equipo de cromatografía de gases Perkin Elmer Modelo CG-SRI310c (Figura 3.7) con un detector de ionización de flama (temperatura de columna de  $170^\circ\text{C}$  con incremento de  $10^\circ\text{C min}^{-1}$  y del detector,  $150^\circ\text{C}$ ; gas acarreador nitrógeno a 200 kPa). Se realizó

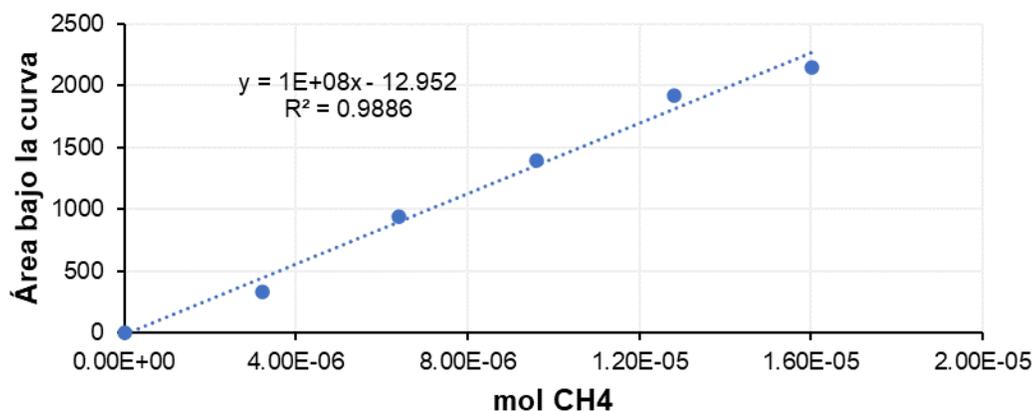
una curva de calibración (Tabla A.5) realizando la inyección de cada punto por triplicado y siguiendo la descripción que se presenta en el Figura 10.

### Curva de calibración para el porcentaje de metano

Dentro de los viales para cromatografía tubos *Hungate* de 15 mL (Figura 3.6), son inyectados 5 mL del gas estándar de metano. Posteriormente, se toma una muestra con una jeringa Hamilton tipo *pressure lock* 1005SL de 500  $\mu\text{L}$ . El número de  $\mu\text{moles mL}^{-1}$  en la muestra se determinó directamente de la curva de calibración (Gráfica A4).

**Tabla A5. Curva de calibración para %CH<sub>4</sub>**

Volumen ( $\mu\text{L}$ )	Área (metano)	n(mol)
0	3.60	0
100	337.5925	3.20322E-06
200	939.2665	6.40644E-06
300	1393.752567	9.60966E-06
400	1921.063167	1.28129E-05
500	2143.7715	1.60161E-05



Gráfica A4. Curva de calibración para la determinación del CH<sub>4</sub> en el biogás

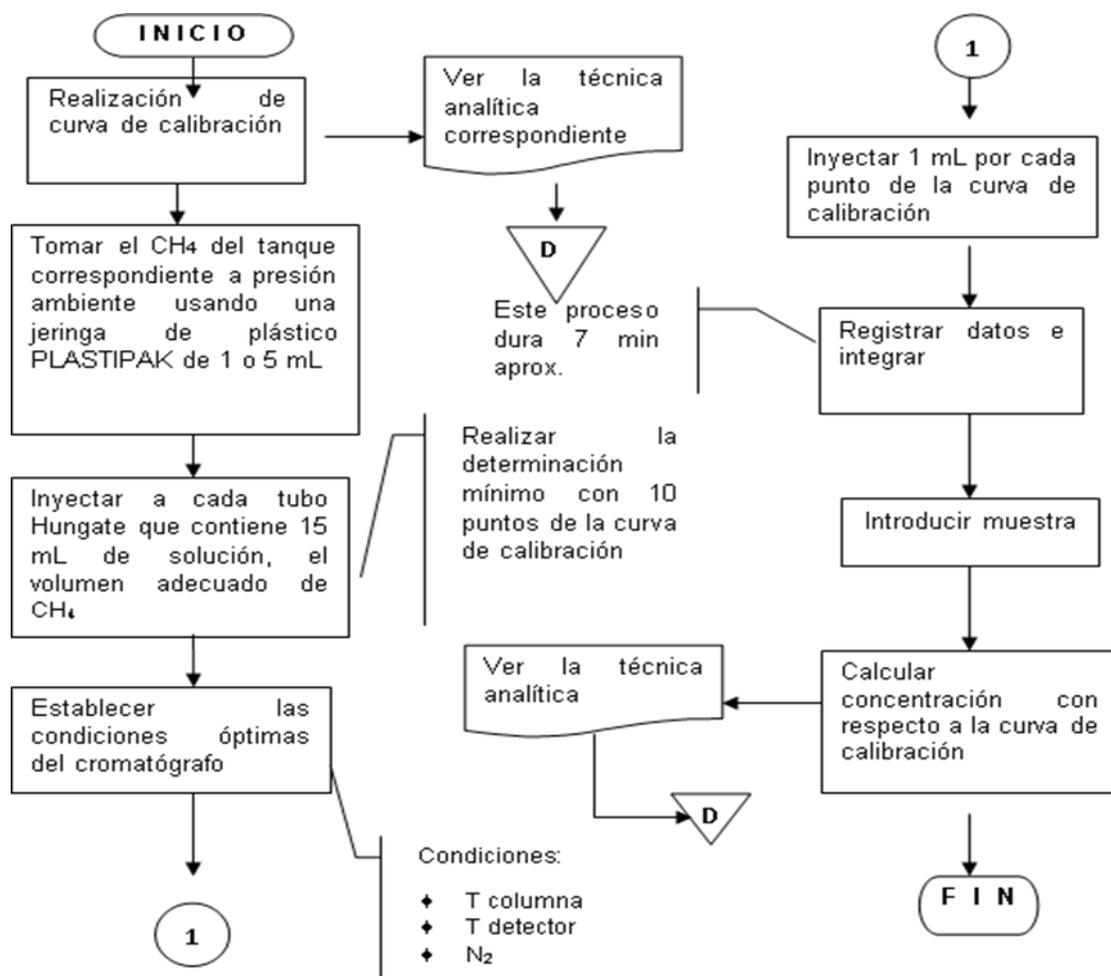


Figura A10. Cuantificación del % de metano por CG-DIF

**Nota:** Dentro de los viales para cromatografía tubos *Hungate* (Figura 4.1): Los tubos deben estar completamente llenos de la solución de NaCl:HCl, el metano es inyectado y la solución se desplaza, de acuerdo con la dilución que se requiera; la presión dentro de los tubos es la misma que la del ambiente (1 mol de metano a 25°C 1 atm = 24.5 L en la Ciudad de México).

## Anexo B. Acervo fotográfico



Figura B1. Determinación de sólidos totales (crisoles y cápsulas)



Figura B2. Determinación de sólidos, etapa de filtración (crisoles)



Figura B3. Curva de calibración para la determinación de DQO



Figura B4. Muestras: Blanco, VC, influente y efluente (izq. a der.)

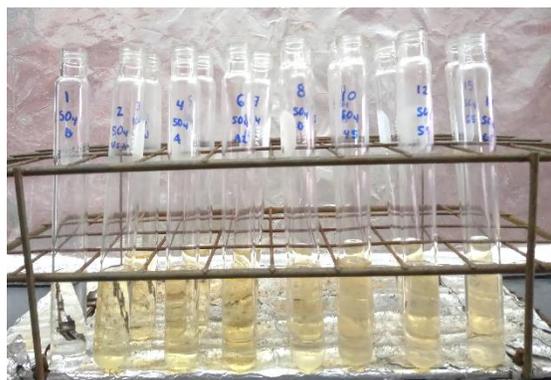


Figura B5. Curva de calibración para la determinación de sulfatos



Figura B6. Determinación  $\text{SO}_4^{2-}$ : Blanco, VC, influente y efluente (izq. a der.)



Figura B7. Curva de calibración para la determinación de sulfuros



Figura B8. Muestras VC, influente y efluente, blanco (izq. a der.)

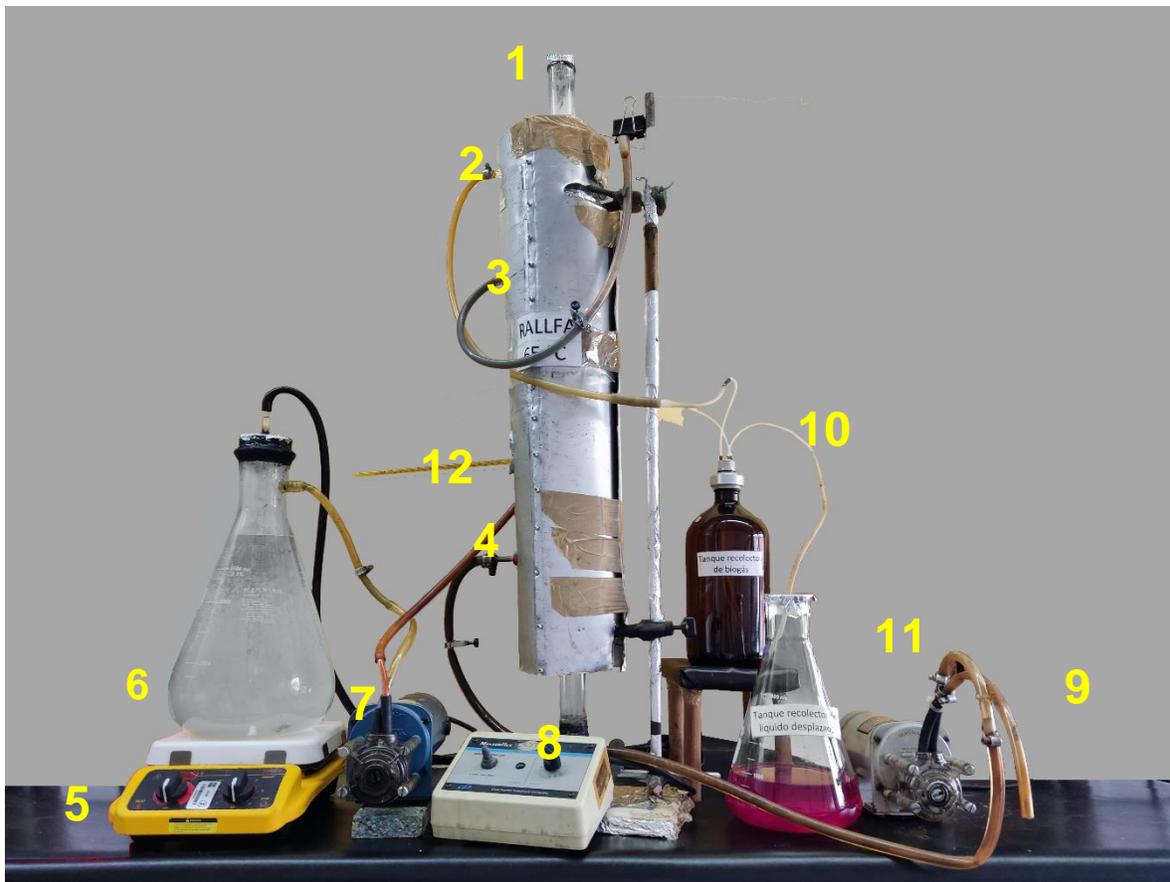


Figura B9. Sistema de Trabajo

- |                                  |   |  |
|----------------------------------|---|--|
| 1. Reactor tipo RALLFA a 65°C    | 5. Parrilla de calentamiento ThermoScientific Mod. SP121325 | 9. Bomba de alimentación. MasterFlex Mod. 7553-70  |
| 2. Salida del efluente de biogás | 6. Agua de calentamiento                                    | 10. Recipiente A: recolector de biogás             |
| 3. Salida del efluente líquido   | 7. Bomba de recirculación de agua MasterFlex Mod. 7553-70   | 11. Recipiente B: recolector de líquido desplazado |
| 4. Entrada de influente          | 8. Control de bomba de alimentación                         | 12. Termómetro                                     |

## Anexo C. Tablas de datos con evaluaciones estadísticas

**Tabla C1. Promedios de pH**

<b>Semana</b>	<b>VC</b>	<b>VD</b>	<b>E65</b>
1	4.47	4.56	6.63
2	4.53	4.62	6.48
3	4.63	4.63	6.98
4	4.70	4.63	6.97
5	4.61	4.99	7.23
6	4.67	6.13	7.11
7	4.64	6.13	6.83
8	4.61	5.86	6.66
9	4.61	6.52	6.53
10	4.80	6.99	7.04
11	4.99	6.97	7.20
12	5.07	6.79	7.25
13	4.72	6.75	7.17
14	4.56	6.65	7.22
15	4.58	6.57	7.20
16	4.58	6.49	7.35
17	4.62	6.39	7.39
18	4.65	5.95	7.47
19	4.61	6.68	7.22
20	4.65	6.71	7.68
21	4.64	6.63	7.76
22	4.64	6.59	7.89
23	4.57	6.48	7.94
24	4.47	6.67	7.83
<b>Promedio</b>	<b>4.6±0.14</b>	<b>6.1±0.8</b>	<b>7.2±0.41</b>

**Tabla C2. Promedio de C. E.**

<b>Semana</b>	<b>VC</b>	<b>VD</b>	<b>E65</b>
1	28.79	16.87	18.43
2	29.49	14.98	18.04
3	29.63	13.92	19.35
4	28.51	13.78	19.68
5	29.84	14.12	19.28
6	29.79	12.01	19.47
7	28.95	17.48	19.43
8	29.19	16.27	19.17
9	29.53	16.56	20.28
10	29.35	15.82	20.89
11	29.26	17.30	20.06
12	28.17	18.04	20.25
13	29.45	14.90	19.62
14	29.49	13.28	17.87
15	29.54	14.83	18.95
16	29.80	18.07	19.06
17	27.54	17.85	20.87
18	26.75	14.87	20.39
19	29.41	14.28	19.38
20	28.33	16.14	18.70
21	29.18	16.92	19.29
22	29.17	17.50	20.08
23	29.89	16.49	20.27
24	29.42	13.72	19.21
<b>Promedio</b>	<b>29.1±0.75</b>	<b>15.7±1.67</b>	<b>18.9±1.82</b>

**Tabla C3. Promedio de Temperatura**

<b>Semana</b>	<b>VC</b>	<b>VD</b>	<b>E65</b>
1	7.82	19.16	58.50
2	14.26±	18.54	58.28
3	21.24	19.75	58.00
4	18.94	19.76	57.58
5	22.12	20.86	50.00
6	22.04	24.97	51.36
7	16.62	24.80	58.46
8	21.18	26.00	55.94
9	18.16	22.60	60.30
10	12.60	26.47	60.47
11	11.28	29.69	61.30
12	10.46	27.50	57.33
13	11.36	26.20	62.80
14	9.54	26.10	61.30
15	8.56	23.67	59.63
16	12.12	25.34	60.83
17	10.52	24.73	60.43
18	8.60	17.73	58.87
19	8.48	16.58	59.23
20	12.44	23.00	61.06
21	11.50	23.10	61.60
22	11.06	21.20	61.70
23	12.30	23.03	59.12
24	11.45	20.65	61.30
<b>Promedio</b>	<b>13.5±4.55</b>	<b>23±3.29</b>	<b>59±2.99</b>

**Tabla C4. Promedio de Factores de Alcalinidad**

<b>Semana</b>	<b>IB</b>	<b>Alfa</b>	<b>AI/AP</b>	<b>Alcalinidad</b>
1	0.69	0.31	2.40	3,642
2	0.83	0.17	5.03	5,058
3	0.76	0.24	3.67	6,315
4	0.73	0.27	2.72	6,776
5	0.72	0.28	4.67	7,118
6	0.71	0.29	2.49	6,900
7	0.77	0.23	3.44	6,060
8	0.75	0.25	3.14	5,814
9	0.80	0.20	3.95	5,475
10	0.74	0.26	2.86	5,970
11	0.71	0.29	2.46	6,095
12	0.65	0.35	1.89	6,433
13	0.67	0.33	2.00	6,430
14	0.66	0.34	1.91	5,910
15	0.64	0.36	1.76	5,900
16	0.64	0.36	1.76	5,800
17	0.61	0.39	1.56	7,000
18	0.64	0.36	1.81	6,910
19	0.73	0.27	2.81	5,930
20	0.76	0.24	3.13	5,340
21	0.69	0.31	2.24	5,620
22	0.68	0.32	2.17	6,643
23	0.72	0.28	2.52	6,512
24	0.72	0.28	2.65	6,135
<b>Promedio</b>	<b>0.7±0.05</b>	<b>0.3±0.05</b>	<b>2.7±0.89</b>	<b>6,074±734</b>

**Tabla C5. Promedio de DQO**

Semana	CONCENTRACIÓN (mg DQO L <sup>-1</sup> )			Remoción (g DQO <sub>Rem</sub> L <sup>-1</sup> )
	VC	VD	E65	
5	78,433	42,592	26,890	1.18
6	77,054	37,753	30,547	2.40
7	81,536	37,430	30,009	2.47
8	81,191	33,236	28,826	1.47
9	82,914	23,771	14,845	2.97
10	80,501	23,664	19,470	1.40
11	81,191	27,428	23,879	1.18
12	79,812	27,858	14,953	4.30
13	80,157	44,958	30,547	4.01
14	82,914	28,197	25,095	1.03
15	80,501	29,576	17,425	4.05
16	79,122	27,163	23,113	1.35
17	78,433	21,389	12,944	2.82
18	75,330	28,542	19,407	3.05
19	78,088	18,804	16,563	2.50
20	77,054	24,923	18,976	1.98
21	76,365	21,992	16,908	1.69
22	78,433	7,083	4,153	1.98
23	84,638	17,166	14,926	3.22
24	79,122	18,631	13,288	1.78
<b>Promedio</b>	79,639±2,309	28,961±6,003	21,933±6,025	2.34±0.99

**Tabla C6. Promedio de sulfatos**

Semana	CONCENTRACIÓN (mg SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> L <sup>-1</sup> )			Remoción (g SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> Rem L <sup>-1</sup> )
	VC	VD	E65	
<b>5</b>	<b>10,074</b>	<b>6,019</b>	<b>4,001</b>	<b>2.018</b>
6	9,926	2,769	2,209	0.559
7	9,799	2,736	2,339	0.397
8	9,916	2,576	1,948	0.628
9	9,990	2,411	2,089	0.322
10	9,884	2,796	1,824	0.971
11	10,244	1,596	902	0.694
12	9,608	1,703	1,389	0.314
13	9,799	3,629	3,271	0.358
14	9,905	1,947	1,199	0.748
15	9,937	3,845	2,964	0.881
16	9,958	3,725	3,144	0.580
17	9,651	3,815	3,160	0.656
18	9,841	3,833	3,042	0.791
19	9,640	3,343	2,714	0.628
20	10,138	3,334	2,330	1.004
21	9,894	2,826	2,083	0.743
22	9,577	2,375	1,012	1.362
23	9,757	2,477	1,912	0.565
24	9,640	2,435	1,596	0.839
<b>Promedio</b>	<b>9,859±176</b>	<b>3,009±970</b>	<b>2,256±811</b>	<b>0.753±0.382</b>

**Nota: Estos datos fueron los primeros que se realizaron aplicando la metodología, pero hubo error experimental por lo que no aparecen en la Gráfica 4.5**

**Tabla C7. Promedio de sulfuros**

Semana	CONCENTRACIÓN (mg S <sup>-2</sup> L <sup>-1</sup> )			Generación (g S <sup>-2</sup> <sub>Gen</sub> L <sup>-1</sup> )
	VC	VD	E65	
5	40.6	9.2	16.9	7.7
6	40.4	6.9	19.2	12.2
7	36.8	8.5	20.5	12.0
8	36.8	7.2	19.2	11.9
9	35.6	7.1	18.7	11.6
10	35.6	13.8	26.6	12.7
11	34.6	11.8	18.4	6.6
12	35.6	13.3	17.8	4.5
13	34.3	11.2	18.2	7.0
14	35.2	13.0	16.7	3.7
15	35.8	13.6	18.0	4.4
16	35.0	15.2	17.8	2.6
17	35.2	14.1	20.9	6.8
18	34.8	15.5	18.2	2.7
19	35.2	13.0	18.0	5.0
20	34.6	9.7	18.3	8.6
21	35.4	9.8	16.1	6.3
22	35.6	7.0	14.3	7.4
23	34.6	7.1	10.4	3.3
24	35.6	7.7	14.9	7.2
<b>Promedio</b>	35.9±1.7	10.7±3.0	18.0±3.0	5.43±1.85

## Anexo D. Disposición controlada de residuos en esta investigación

En la presente investigación se generan diversos residuos debido a las técnicas analíticas que utilizan; por lo que se requiere una disposición de los residuos peligrosos para evitar cualquier afectación.

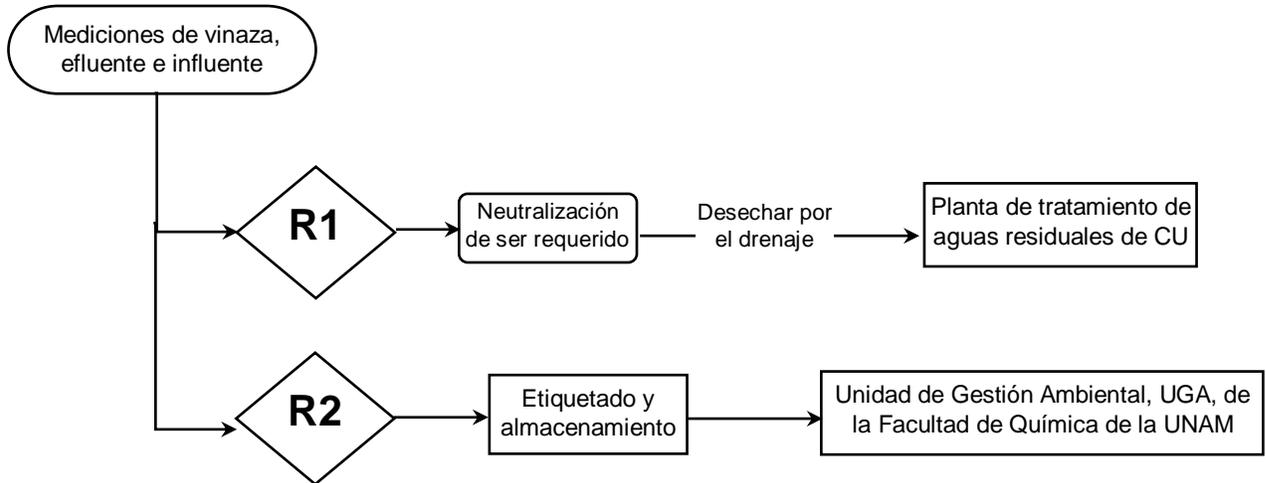


Figura D1. Disposición de residuos

Tabla D.1. Residuos

Residuo	Medición de la vinaza, efluentes e influente
R1	pH, temperatura, conductividad eléctrica, alcalinidad, sólidos en todas sus formas, biogás, cromatografía
R2	DQO, sulfatos, sulfuros

## REFERENCIAS

- Andalib, M., Hafez, H., Elbeshbishy, E., Nakhla, G., Zhu, J. 2012. Treatment of thin stillage in a high-rate anaerobic fluidized bed bioreactor (AFBR). *Bioresource Technology*. 121: 411-418. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.07.008>.
- Angelidaki, I., Karakashev, D., Batstone, D. J., Plugge, C. M., Stams, A. J. M. 2011. Biomethanation and its potential. In *Methods in Enzymology*. Amy C. Rosenzweig, Stephen W. Ragsdale, editors. Academic Press. Volume 494. Chapter Sixteen. Pp. 327-351. ISSN 0076-6879. ISBN 9780123851123. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385112-3.00016-0>.
- APHA, AWWA, WEF. 2012. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington, EE.UU.
- Bailey, J.E., Ollis, D.F. 1986. *Biochemical Engineering Fundamentals*. 2<sup>a</sup> ed. McGraw-Hill International Editions. Singapur.
- Basak, B., Patil, S.M., Saha, S., Kurade, M.B., Ha, G., Govindwar, S.P., Lee, S.S., Chang, S.W., Chung, W.J., Jeon, B. 2021. Rapid recovery of methane yield in organic overloaded-failed 'anaerobic'<sup>8</sup> digesters through bioaugmentation with acclimatized microbial consortium. *Science of The Total Environment*. 764, 144219. ISSN 0048-9697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144219>.
- Bautista-Zúñiga, F. 2000. Efecto de la aplicación de vinazas crudas y modificadas por microorganismos anaerobios y aerobios sobre las propiedades químicas de dos suelos del municipio de Miguel Alemán del Estado de Veracruz, México. Tesis de Doctorado en Ciencias. División de Estudios de Posgrado. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. Defensa: enero 31. Ciudad de México, México. 132.248.9.195/pd2000/272955/Index.html
- Bautista-Zúñiga, F., Durán-de-Bazúa, M.d.C. 1998. Análisis del beneficio y riesgo potenciales de la aplicación al suelo de vinazas crudas y tratadas biológicamente. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 14(1): 13-19. <https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/32919>
- Bernal-González, M. 1997. Tratamiento anaerobio-aerobio a nivel laboratorio de aguas residuales de la industria alcohólica a partir de melazas de caña de azúcar aciduladas con HCL. Tesis profesional de Ingeniería Química. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química. Defensa: abril 14. Ciudad de México, México. 132.248.9.195/ppt2002/0248614/Index.html
- Bernal-González, M., Poblano-Flores, A., Toscano-Pérez, D. y Durán-de-Bazúa, C. 2012. 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. *Tecnol. Ciencia Ed. (IMIQ, México)*. 27: 80-88.
- Bernd, W., Rojas-Oropeza, M., Torres-Bernal, M., Pampillón-González, L. 2012. Producción de biogás en México: Estado actual y perspectivas. Cuaderno

---

<sup>8</sup> *Digestion is inherently anaerobic, and thus, it does not require the adjective [Note of the adviser of this thesis]*

- Temático No. 5. Red Mexicana de Bioenergía, A. C. Obtenido de <http://rembio.org.mx/wp-content/uploads/2014/12/CT5.pdf>
- Cabrera-Díaz, Ania, Urbano-Quintero, Maite, Pereda-Reyes, Ileana, Díaz-Marrero, Miguel Ángel, Chávez-Fando, Ivonne. 2017. Digestión 'anaerobia'<sup>9</sup> de vinaza pura cubana en un sistema combinado UASB-filtro anaerobio. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*. 38(3): 3-16.  
[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1680-03382017000300001&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382017000300001&lng=es&tlng=es).
- Castro-González, A. 2004. Efecto de la temperatura en la actividad metanogénica y sulfatorreductora de consorcios microbianos en condiciones anaerobias. Tesis de Doctorado en Ciencias. Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Químicas (Ingeniería Química). Universidad Nacional Autónoma de México. Defensa: enero 28. Ciudad de México. México.  
[132.248.9.195/ppt2004/0327304/Index.html](http://132.248.9.195/ppt2004/0327304/Index.html)
- Castro-González, A., Durán-de-Bazúa, M.d.C. 2002. Arrhenius equation constants and thermodynamic analysis of CH<sub>4</sub> and H<sub>2</sub>S production for the vinasses anaerobic treatment. En: Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Vol. 28, pp. 1-8. Cancún, Q.R., México.  
[file:///C:/Users/Dra%20Duran/Downloads/nanopdf.com\\_arrhenius-equation-constants-and-thermodynamic-analysis-of-ch-and-h.pdf](file:///C:/Users/Dra%20Duran/Downloads/nanopdf.com_arrhenius-equation-constants-and-thermodynamic-analysis-of-ch-and-h.pdf)
- Celis-García, M.d.L.B. 2000. Efecto del sulfato en la biodegradación anaerobia de acetato. Tesis de Maestría en Ciencias Bioquímicas. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Química. UNAM. Defensa: Julio 7.  
[132.248.9.195/pd2000/279432/Index.html](http://132.248.9.195/pd2000/279432/Index.html)
- Chen, Y., Cheng, J.J., Creamer, K.S. 2008. Inhibition of 'anaerobic'<sup>10</sup> digestion process: A review. *Bioresource Technology*. Volume 99, Issue 10. Pages 4044-4064. ISSN 0960-8524. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.057>.
- COLPOS. 2010. Bases técnicas para el fomento a la producción de biocombustibles en el país a partir de caña de azúcar. Colegio de Posgraduados. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). Documento informativo. Obtenido de <https://es.calameo.com/read/0037316021d547eba4de7>
- CONADESUCA. 2016a. Reducción del consumo de agua en los procesos productivos del ingenio. Boletín Informativo. Obtenido de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/114364/Boletin\\_Tecnico\\_Informativo\\_Abril\\_2016\\_Reducci\\_n\\_del\\_consumo\\_de\\_agua\\_en\\_los\\_procesos\\_productivos\\_del\\_ingenio.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/114364/Boletin_Tecnico_Informativo_Abril_2016_Reducci_n_del_consumo_de_agua_en_los_procesos_productivos_del_ingenio.pdf)
- CONADESUCA. 2016b. Vinazas: Alternativas de uso. Nota informativa sobre innovaciones en materia de productividad del sector. Obtenido de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/171932/Nota\\_Informativa\\_Septiembre\\_Vinazas.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/171932/Nota_Informativa_Septiembre_Vinazas.pdf)

---

<sup>9</sup> La digestión es inherentemente anaerobia por lo que no requiere de adjetivos. Este error provino de dos ingenieros civiles que acuñaron esa combinación y no solamente eso sino que hasta señalaron que había digestión aerobia, una aberración [Nota de la asesora]

<sup>10</sup> *Digestion is inherently anaerobic, and thus, it does not require the adjective [Note of the adviser of this thesis]*

- CONADESUCA. 2020. Comunicado de prensa CONADESUCA. Obtenido de <https://www.gob.mx/conadesuca/prensa/concluye-la-zafra-2019-2020?idiom=es>
- CONADESUCA. 2022a. Noveno Informe estadístico del sector agroindustrial de la caña de azúcar en México, zafras 2012-2013 / 2021-2022. Obtenido de [https://www.siiba.conadesuca.gob.mx/siiba/docext/9no\\_informe\\_estadistico.pdf](https://www.siiba.conadesuca.gob.mx/siiba/docext/9no_informe_estadistico.pdf)
- CONADESUCA. 2022b. Comunicado de prensa CONADESUCA. Obtenido de <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/mexico-cuenta-con-disponibilidad-suficiente-de-azucar-para-atender-el-abasto-nacional-y-exportaciones?idiom=es%C2%A0#:~:text=Reportes%20del%20sector%20estima n%20que,con%20el%206.21%20por%20ciento>
- Contreras-Contreras, J.A. 2019. Caracterización química de vinazas de torres de destilación y posible remoción de polifenoles de ellas empleando sistemas bioquímicos anaerobios. Tesis de Maestría. Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Químicas. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México. México.
- Contreras-Contreras, J.A., Bernal-González, M., Solís-Fuentes, J.A., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. 2020. Polyphenols from sugarcane vinasses, quantification and removal using activated carbon after biochemical treatment in laboratory-scale thermophilic upflow anaerobic sludge blanket reactors. *Water Air and Soil Pollution*. 231(12), 401: 1-8. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04733-5>
- Correa-López, R.E. 2022. Métodos de tratamiento alternos tanto biológicos como fisicoquímicos, para el reaprovechamiento de vinazas provenientes de una planta cooperante productora de bioetanol. Tesis profesional de Ingeniería Química. Facultad de Química, UNAM. Defensa: junio 30. Ciudad de México, México. <http://132.248.9.195/ptd2022/marzo/0823752/Index.html>
- Cruz-Rodríguez, D.J. 2020. Evaluación de la calidad del biogás producido en reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) a nivel de laboratorio transformando el contenido carbonoso de vinazas azucareras a 45° y 55°C. Informe de Estancia Académica. Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.
- Detor-Méndez, V.I., Hernández-Segoviano, E. 2012. Comportamiento de cuatro reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA), bajo diferentes temperaturas de operación, 35, 45, 55 y 65°C. Tesis que para obtener el título de Químicas. Licenciatura en Química Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. Defensa: diciembre 4. Cuautitlán, México. [132.248.9.195/ptd2012/noviembre/0688363/Index.html](http://132.248.9.195/ptd2012/noviembre/0688363/Index.html)
- Divya, D., Gopinath, L.R., Merlin Christy, P. 2015. A review on current aspects and diverse prospects for enhancing biogas production in sustainable means. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 42: 690-699. ISSN 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.055>.
- DOF. 1982. Norma Mexicana NMX-AA-084-SCFI-1982 Análisis de agua – Determinación de sulfuros – Método de prueba. Esta Norma fue modificada de Norma Oficial Mexicana a Norma Mexicana, de acuerdo con el Decreto publicado en el Diario Oficial de la Federación de fecha 6 de noviembre de 1992. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 1996. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas

- residuales en aguas y bienes nacionales. Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 24 de junio de 1996. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos. [Ver abajo DOF, 2021]
- DOF. 2001a. Norma Mexicana NMX-AA-030-SCFI-2001 Análisis de agua – determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – método de prueba – parte 2 – determinación del índice de la demanda química de oxígeno – método de tubo sellado a pequeña escala. Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 1 de abril de 2011. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos
- DOF. 2001b. Norma Mexicana NMX-AA-036-SCFI-2001 Análisis de agua - Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba. Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 1 de agosto de 2001. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 2009. 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. 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. Sistema general de unidades de medida. Secretaría de Economía. Jueves 24 de septiembre de 2009. DIARIO OFICIAL (Primera Sección). Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 2011. Norma Mexicana NMX-AA-008-SCFI-2000 Análisis de agua – determinación del pH – Método de prueba. Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 05 de octubre del 2011. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 2013. Norma Mexicana NMX-AA-007-SCFI-2013. Análisis de agua – Medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba. Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 23 de enero de 2013. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 2014. Norma Mexicana NMX-AA-074-SCFI- 2014. Análisis de agua – Determinación del ion sulfato en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba. Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación de fecha 13 de enero de 2014. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 2016. NMX-AA-034-SCFI-2015. Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba Norma Mexicana de Análisis de Agua. Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 18 de abril del 2016. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 2021. NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 11 de marzo de 2022. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.

- [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#sc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#sc.tab=0)
- Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. 2022. Aprovechamiento de los subproductos del procesamiento de la caña de azúcar: Bagazo, cachaza, vinazas, metano, polifenoles, aguas residuales tratadas, etc. / *Use of by-products from sugarcane processing: Bagasse, cachasse, stillage (vinasse), methane, polyphenols, treated wastewater, etc.* Revista RD ICUAP. 8(23):115-130.  
<http://rd.buap.mx/ojs-dm/index.php/rdicuap/article/view/812/924>
- Evans, P.N., Boyd, J.A., Leu, A.O., Woodcroft, B.J., Parks, D.H., Hugenholtz, P., Tyson, G.W. 2019. An evolving view of methane metabolism in the Archaea. *Nature Reviews Microbiology*. 17: 219-232. <https://doi.org/10.1038/s41579-018-0136-7>
- Ferraz-Júnior, A.D.N., Koyama, M.H., Araújo, M.M. 2016. Thermophilic ‘anaerobic’<sup>11</sup> digestion of raw sugarcane vinasse. *Renewable Energy*. 89: 245-252. ISSN 0960-1481. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.064>.
- Ferrer, Y., Pérez, H. 2010. Los microorganismos en la digestión ‘anaerobia’<sup>12</sup> y la producción de biogás. Consideraciones en la elección del inóculo para el mejoramiento de la calidad y el rendimiento. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 43 (1): 9-20.  
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120681002>
- Fuess, L.T., García, M.L. 2014. Implications of stillage land disposal: A critical review on the impacts of fertigation. *Journal of Environmental Management*. 145: 210-229. ISSN 0301-4797. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.003>.
- Fuess, L.T., García, M.L. 2015. Bioenergy from stillage ‘anaerobic’<sup>13</sup> digestion to enhance the energy balance ratio of ethanol production. *Journal of Environmental Management*. 162: 102-114. ISSN 0301-4797.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.07.046>.
- Gaspar-Mendoza, L. 2022. Adsorción y desorción de polifenoles para su uso medicinal a partir de vinazas de bioetanol de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) usando carbón activado del propio bagazo de la caña. Tesis profesional de Ingeniería Química. Facultad de Química, UNAM. Defensa: noviembre 11. Ciudad de México, México.
- Gaspar-Mendoza, L., Bernal-González, M., García-Gómez, R.S., Solís-Fuentes, J.A., Navarro-Frómeta, A.E., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. 2022. Aprovechamiento integral de las vinazas de alcohol de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) mediante anaerobiosis y la posible separación de polifenoles útiles usando carbón activado de bagazo de caña / *Comprehensive use of sugarcane (Saccharum officinarum) alcohol stillage through anaerobiosis and the possible separation of useful polyphenols using activated carbon from cane bagasse. Mix Tec*. 2(3):12-54.
- GCMA. 2022. Perspectivas del mercado de azúcar julio 2022. Reporte informativo. <https://gcma.com.mx/reportes/perspectivas/azucar/>

---

<sup>11</sup> Digestion is inherently anaerobic, and thus, it does not require the adjective [Note of the adviser of this thesis]

<sup>12</sup> La digestión es inherentemente anaerobia por lo que no requiere de adjetivos [Nota de la asesora]

<sup>13</sup> Digestion is inherently anaerobic, and thus, it does not require the adjective [Note of the adviser of this thesis]

- Gujer, W., Zehnder A.J.B. 1983. Conversion processes in 'anaerobic'<sup>14</sup> digestion. *Journal Water Science and Technology*. 15: 127-167.
- Gutiérrez, J.P. 2018. Situación actual y escenarios para el desarrollo del biogás en México hacia 2024 y 2030. Red Mexicana de Bioenergía y Red temática de bioenergía de CONACYT, Morelia, México. <http://rembio.org.mx/situacion-actual-y-escenarios-para-el-desarrollo-del-biogas-en-mexico-hacia-2024-y-2030/>
- Karahan, Ö., Dogruel, S., Dulekgurgen, E., Orhon, D. 2008. COD fractionation of tannery wastewaters—Particle size distribution, biodegradability and modeling, *Water Research*. 42(4-5): 1083-1092. ISSN 0043-1354. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.10.001>.
- Koster, I.W., Cramer, A. 1987. Inhibition of methanogenesis from acetate in granular sludge by long-chain fatty acids. *Applied and Environmental Microbiology*. 53(2): 403-409.
- López-Reyes, N., Ábrego-García, A., Poggi-Varaldo, H.M. 2022. Mecanismos de inhibición de la metanogénesis con lovastatina y análisis de la expresión génica. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 38: 58-67. <https://doi.org/10.20937/RICA.54357>
- Lorenzo-Acosta, Y. 2016. La producción de biogás a partir de vinazas de destilerías en reactores UASB. Cálculos operacionales y económicos de una planta industrial como caso de estudio. [http://karin.fq.uh.cu/acc/2016/CIENCIAS\\_TECNICAS/032/New/Documentaci%C3%B3n/Parte%20IV/Bibliograf%C3%ADa/Cap.%20II.2/23.pdf](http://karin.fq.uh.cu/acc/2016/CIENCIAS_TECNICAS/032/New/Documentaci%C3%B3n/Parte%20IV/Bibliograf%C3%ADa/Cap.%20II.2/23.pdf)
- Luo, G., Xie, Li., Zhou, Qi. 2009. Enhanced treatment efficiency of an anaerobic sequencing batch reactor (ASBR) for cassava stillage with high solids content. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 107(6): 641-645. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2009.01.015>.
- Luo, G., Xie, L., Zou, Z., Wang, W., Zhou, Q., Shim, H. 2010. Anaerobic treatment of cassava stillage for hydrogen and methane production in continuously stirred tank reactor (CSTR) under high organic loading rate (OLR). *International Journal of Hydrogen Energy*. 35(21): 11733-11737. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.08.033>.
- Luo, G., Xie, L., Zhou, Q., Angelidaki, I. 2011. Enhancement of bioenergy production from organic wastes by two-stage anaerobic hydrogen and methane production process. *Bioresource Technology*. 102(18): 8700-8706. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.02.012>.
- Martínez-Arellano, D. 2022. Recuperación de polifenoles de vinazas sometidas a un tratamiento anaerobio en reactores de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) termofílicos. Tesis profesional de Ingeniería Química. Facultad de Química, UNAM. Defensa: noviembre 25. Ciudad de México, México.
- Mao, C., Feng, Y., Wang, X., Ren, G. 2015. Review on research achievements of biogas from 'anaerobic'<sup>15</sup> digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 45: 540-555. ISSN 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032>.

---

<sup>14</sup> *Digestion is inherently anaerobic, and thus, it does not require the adjective [Note of the adviser of this thesis]*

<sup>15</sup> *Digestion is inherently anaerobic, and thus, it does not require the adjective [Note of the adviser of this thesis]*

- Nasr, N., Elbeshbishy, E., Hafez, H., Nakhla, G., Hesham El Naggar, M. 2012. Comparative assessment of single-stage and two-stage 'anaerobic'<sup>16</sup> digestion for the treatment of thin stillage. *Bioresource Technology*. 111: 122-126. ISSN 0960-8524. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.019>.
- Niz, M.Y.K., Fuentes, L., Etchebehere, C., Zaiat, M. 2021. Sugarcane vinasse extreme thermophilic digestion: A glimpse on biogas free management. *Bioprocess Biosystems Engineering*. 44: 1405–1421. <https://doi.org/10.1007/s00449-021-02517-7>
- Ogden, J.M. 2002. Hydrogen – The fuel of the future? *Phys. Today*. 55: 69-75.
- Pacheco-Suárez, G. 2016. Estudio técnico-económico de las alternativas para el tratamiento y/o aprovechamiento de los efluentes de la industria alcoholera (vinazas), por fermentación de melazas. Tesis profesional de Ingeniería Química, UNAM Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, FESZ. Ciudad de México, México.
- Palú, M., Peprah, M., Tsapekos, P., Kougias, P., Campanaro, S., Angelidaki, I., Treu, L. 2022. *In-situ* biogas upgrading assisted by bioaugmentation with hydrogenotrophic methanogens during mesophilic and thermophilic co-digestion. *Bioresource Technology*. 348, 126754. ISSN 0960-8524. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126754>.
- Parsaee, M., Kiani Deh Kiani, M., Karimi, K. 2019. A review of biogas production from sugarcane vinasse. *Biomass and Bioenergy*. 122: 117-125. ISSN 0961-9534. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.034>.
- Pazuch, F.A., Nogueira, C.E.C., Souza, S.N.M., Micuanski, V.C., Friedrich, L., Lenz, A.M. 2017. Economic evaluation of the replacement of sugar cane bagasse by vinasse, as a source of energy in a power plant in the state of Paraná, Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 76: 34-42. ISSN 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.047>.
- Pérez, A., Torres, P. 2008. Índices de alcalinidad para el control del tratamiento anaerobio de aguas residuales fácilmente acidificables. *Ingeniería de y Competitividad*. 10(2): 41-52. Universidad del Valle. Cali, Colombia. <https://doi.org/10.25100/iyc.v10i2.2473>
- Pire-Sierra, M.C., Rodríguez-Sargent, K., Fuenmayor-Reyes, M., Fuenmayor, Y., Acevedo, H., Carrasquero-Ferrer, S., Díaz-Montiel, A. 2011. Biodegradabilidad de las diferentes fracciones de agua residual producidas en una tenería. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. 21(2): 5-19. ISSN: 0124-8170. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=9112344000>
- 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. Tesis profesional de Ingeniería Química. Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Química. Defensa: mayo 22. Ciudad de México. México. 132.248.9.195/ptd2015/abril/0728512/Index.html
- Prada, S.M., Guekezian, M., Suárez-Iha, M.E.V. 1998. Metodología analítica para a determinação de sulfato em vinhoto. *Química Nova*. 21: 249-252. <https://doi.org/10.1590/S0100-40421998000300002>

---

<sup>16</sup> *Digestion is inherently anaerobic, and thus, it does not require the adjective [Note of the adviser of this thesis]*

- Rajagopal, R., Massé, D.I., Singh, G. 2013. A critical review on inhibition of 'anaerobic'<sup>17</sup> digestion process by excess ammonia. *Bioresource Technology*. 143: 632-641. ISSN 0960-8524. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.06.030>.
- Ramírez-Burgos, L.I., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C., Enríquez-Poy, M. 2000. La auditoría ambiental en los ingenios azucareros: Un ejemplo de aumento de productividad en este sector industrial. Segunda Parte. *Ingenio*. 5(47):4-8.
- Ramírez-Burgos, L.I., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C., Enríquez-Poy, M. 2000. La auditoría ambiental en los ingenios azucareros: Un ejemplo de aumento de productividad en este sector industrial. Primera Parte. *Ingenio*. 5(46):5-7.
- Reynoso-Deloya, N. 2019. Tratamiento de vinazas tequileras a través de un reactor anaerobio electroquímico. Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería Ambiental-Agua. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México. México.
- Rincón-Acelas, I.R. 2008. Cinética de la degradación anaerobia termofílica de vinazas de caña. Tesis de Maestría. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Defensa: junio 30. Ciudad de México. México.  
[132.248.9.195/ptd2008/septiembre/0632214/Index.html](http://132.248.9.195/ptd2008/septiembre/0632214/Index.html)
- Rodríguez-Rivera F. de J. 1993. Tratamiento de vinazas empleando reactores anaerobios avanzados (UASB y FA) con eliminación de H<sub>2</sub>S. Tesis profesional de Ingeniería Química. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química. Ciudad de México, México.
- Rojas-Cárdenas, J.C. 2014. Consumo y alternativas energéticas de la industria azucarera mexicana. Tesis de Maestría. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. Ingeniería en Energía. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.
- Rojas-Zamudio, M.M. 2018. Arranque y operación de un reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) para el tratamiento de un efluente proveniente del proceso de destilación del alcohol o "vinaza". Tesis profesional de Ingeniería Química. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Química. Defensa: octubre 02. Ciudad de México, México.  
<http://132.248.9.195/ptd2018/agosto/0779922/Index.html>
- SADER, 2019. Caña de azúcar, un dulce reto para el sector. *Revista de Agricultura mexicana* No. 3. Obtenida de <http://www.agricultura.gob.mx/agriculturamexicana>
- Sandoval-Rojas, M.E. 2015. Tratamiento de vinazas provenientes de etanol en un reactor de lecho 'fluidizado'<sup>18</sup> inverso. Tesis doctoral de la Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.
- Saulés-Aguilar, A. 2003. Tratamiento anaerobio de vinazas, recirculación de biogás y adición de micronutrientes esenciales en la metanogénesis. Tesis profesional de Ingeniería Química. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química. Ciudad de México, México.

---

<sup>17</sup> *Digestion is inherently anaerobic, and thus, it does not require the adjective [Note of the adviser of this thesis]*

<sup>18</sup> El diccionario de la lengua española señala que la palabra fluidizar no está en él por lo que no hay participio pasado. El verbo es fluidificar con el sustantivo fluidificación o fluidización (sustantivo aceptado solamente para ingeniería química) [Nota de la asesora]

- SIAP. 2017. La caña de azúcar en México. Obtenido de:  
[siaprendes.siap.gob.mx/contenidos/3/03-cana-azucar/contexto-3.html](http://siaprendes.siap.gob.mx/contenidos/3/03-cana-azucar/contexto-3.html)
- Siles, J.A., García-García, I., Martín, A., Martín M.A. 2011. Integrated ozonation and biomethanization treatments of vinasse derived from ethanol manufacturing. *Journal of Hazardous Materials*. 188(1-3): 247-253. ISSN 0304-3894.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.01.096>.
- Souza, M.E., Fuzaro, G., Polegato, A.R. 1992. Thermophilic 'anaerobic'<sup>19</sup> digestion of vinasse in pilot plant UASB reactor. *Water Science y Technology*. 25(7): 213-222.  
<https://doi.org/10.2166/wst.1992.0153>
- Tian, H., Yan, M., Treu, L., Angelidaki, I., Fotidis, I. A. 2019. Hydrogenotrophic methanogens are the key for a successful bioaugmentation to alleviate ammonia inhibition in thermophilic 'anaerobic'<sup>20</sup> digesters. *Bioresource Technology*. 293: 122070. ISSN 0960-8524. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122070>.
- 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 (Universidad del Valle. Cali, Colombia)*. 9: 5-14.  
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=231116434001>
- Toscano-Pérez D. 2012. Estudio de la diversidad filogenética de arqueas metanogénicas en tres reactores tipo RALLFA operando a 45, 55 y 65°C para el tratamiento de vinazas. Tesis que para obtener el título de Químicas. Licenciatura en Química Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química. Defensa: diciembre 4. Ciudad de México, México.  
[132.248.9.195/ptd2013/enero/0686723/Index.htm](http://132.248.9.195/ptd2013/enero/0686723/Index.htm)
- Vergara-Salgado, S. 2010. Identificación de bacterias metanogénicas y sulfato-reductoras en tres reactores de lecho de lodo de flujo ascendente (RALLFA) operando a 45, 55 y 65°C. Tesis para título de Biólogo. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México. <http://132.248.9.195/ptb2011/agosto/0671339/Index.html>
- Villalobos-Juvenal, G. E. 2015. Implementación de un medidor volumétrico de biogás rico en metano a nivel de laboratorio en tres reactores de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) operando a 45, 55 y 65°C. Tesis profesional de Ingeniería Química. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química. Defensa: mayo 8. Ciudad de México, México.  
[132.248.9.195/ptd2015/marzo/0727529/Index.html](http://132.248.9.195/ptd2015/marzo/0727529/Index.html)
- Villegas-Bolaños, O. 2015. Seguimiento de la producción de biogás rico en metano a nivel de laboratorio en tres reactores de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) operando a 45, 55 y 65°C. Tesis profesional de Ingeniería Química. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química. Defensa: septiembre 25. Ciudad de México, México.  
<http://132.248.9.195/ptd2015/agosto/0734862/Index.html>
- Wang, S., Ruan, Y., Zhou, W., Li, Z., Wu, J., Liu, D. 2017. Net energy analysis of

---

<sup>19</sup> *Digestion is inherently anaerobic, and thus, it does not require the adjective [Note of the adviser of this thesis]*

<sup>20</sup> *Digestion is inherently anaerobic, and thus, it does not require the adjective [Note of the adviser of this thesis]*

- small-scale biogas self-supply 'anaerobic'<sup>21</sup> digestion system operated at psychrophilic to thermophilic conditions. *Journal of Cleaner Production*. 174: 226-236. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.186>.
- Wilkie, A.C., Riedesel, K.J., Owens, J.M. 2000. Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks. *Biomass and Bioenergy*. 19(2): 63-102. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00017-9](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00017-9)
- Wilkie, A.C. 2008. Biomethane from Biomass, Biowaste, and Biofuels. In *Bioenergy*. Wall, J.D., Harwood, C.S., Demain, A., eds. Chapter 16. ASM Press. Edición 1. <https://doi.org/10.1128/9781555815547.ch16>
- Wu, J., Liu, Q., Feng, B., Kong, Z., Jiang, B., Li, Y. 2019. Temperature effects on the methanogenesis enhancement and sulfidogenesis suppression in the UASB treatment of sulfate-rich methanol wastewater. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 142: 182-190. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.05.013>.
- Yan, M., Fotidis, I. A., Tian, H., Khoshnevisan, B., Treu, L., Tsapekos, P., Angelidaki, I. 2019. Acclimatization contributes to stable 'anaerobic'<sup>22</sup> digestion of organic fraction of municipal solid waste under extreme ammonia levels: Focusing on microbial community dynamics. *Bioresource Technology*. 286, 121376. ISSN 0960-8524. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121376>.
- Yuan, Y., Hu, X., Chen, H., Zhou, Y., Zhou, Y., Wang, D. 2019. Advances in enhanced volatile fatty acid production from 'anaerobic'<sup>23</sup> fermentation of waste activated sludge. *Science of The Total Environment*. 694, 133741. ISSN 0048-9697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133741>.

---

<sup>21</sup> *Digestion is inherently anaerobic, and thus, it does not require the adjective [Note of the adviser of this thesis]*

<sup>22</sup> *Digestion is inherently anaerobic, and thus, it does not require the adjective [Note of the adviser of this thesis]*

<sup>23</sup> *Fermentation is inherently anaerobic, and thus, it does not require the adjective. Besides, the term fermentation is only applicable to glucose being transformed into ethyl alcohol and carbon dioxide by *Saccharomyces cerevisiae* [Note of the adviser of this thesis]*