



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**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

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

PRESENTA

MICHELLE MABEL ROJAS ZAMUDIO



CIUDAD UNIVERSITARIA, C.D.M.X., 2018



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

Presidente: M. en C. Lucía Cornejo Barrera
Vocal: M. en A.I. Landy Irene Ramírez Burgos
Secretario: Dra. en Ing. Marisela Bernal González
Primer Suplente: M. en C. Rolando Salvador García Gómez
Segundo Suplente: Dr.-Ing. María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa

Sitio de realización del tema:

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

Sustentante

Michelle Mabel Rojas Zamudio

Asesora

Dra. en Ing. Marisela Bernal González

Supervisora Técnica

Dr.-Ing. María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa

RECONOCIMIENTOS

Los reactivos, materiales, consumibles y equipos fueron proporcionados a través de los diferentes proyectos financiados por la DGAPA de la UNAM a través de los Programas denominados PAPIME y PAPIIT, y por el apoyo otorgado a cada profesor por la Secretaría Académica de Investigación y Posgrado de la FQ de la UNAM.

ÍNDICE

RESUMEN	I
CAPÍTULO 1	II
ANTECEDENTES	II
CAPÍTULO 2	IV
OBJETIVOS	IV
CAPÍTULO 3	V
METODOLOGÍA	V
3.1 <i>Descripción de los reactores biológicos</i>	<i>V</i>
3.2. <i>Arranque del reactor</i>	<i>VI</i>
3.2.1. Primera etapa	<i>VI</i>
3.2.2. Segunda etapa	<i>VI</i>
3.2.3. Tercera etapa	<i>VI</i>
3.3. <i>Parámetros de seguimiento del RALLFA</i>	<i>VI</i>
3.4. <i>Registro de la producción de biogás</i>	<i>VII</i>
CAPÍTULO 4	IX
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	IX
4.1. <i>Caracterización de las vinazas</i>	<i>IX</i>
4.2. <i>Arranque del reactor</i>	<i>IX</i>
4.2.1. Primera etapa	<i>IX</i>
4.2.2. Segunda etapa	<i>X</i>
4.2.3. Tercera etapa	<i>X</i>
4.3. <i>Parámetros de seguimiento del RALLFA</i>	<i>XI</i>
4.3.1. Valores de pH	<i>XI</i>
4.3.2. Factor de alcalinidad de los efluentes de los reactores a 45, 55 y 65°C	<i>XII</i>

4.3.3. Temperatura	XIII
4.3.4. Sulfatos	XIV
4.3.5. Sulfuros	XV
4.3.6. DQO	XVI
4.3.7. Producción de biogás	XVII
4.3.8. Nitratos	XVIII
4.3.9. Fosfatos	XIX
CAPÍTULO 5.	XXI
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	XXI
5.1. Conclusiones	XXI
5.2. Recomendaciones	XXII
ANEXOS	XXIII
A.1. Resultados experimentales	XXIII
A.2. Disposición controlada de los residuos producidos en esta investigación	XLV
BIBLIOGRAFÍA	XLVI

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de seguimiento	VII
Tabla 2. Caracterización de las vinazas	IX
Tabla 3. Preparación de agua sintética (Vergara-Salgado, 2010)	X
Tabla 4. Incremento del porcentaje de vinaza y pH	XI
Tabla 5. Valores de pH promedio	XI
Tabla 6. Valores de alcalinidad promedio	XII
Tabla 7. Valores de temperatura promedio	XIII
Tabla 8. Valores de sulfatos promedio	XIV
Tabla 9. Valores de sulfuros promedio	XV
Tabla 10. Valores de DQO promedio	XVI
Tabla 11. Valores de producción de biogás promedio	XVII
Tabla 12. Valores de nitratos promedio	XVIII
Tabla 13. Valores de fosfatos promedio	XIX
Tabla 14. Porcentaje de eliminación de los parámetros medidos	XXI
Tabla A1.1. Registro de valores de pH durante las 31 semanas	XXIII
Tabla A1.2. Registro de valores del factor de alcalinidad durante las 31 semanas	XXVII
Tabla A1.3. Registro de valores de temperatura durante las 31 semanas	XXXI
Tabla A1.4. Registro de valores de sulfatos durante las 31 semanas	XXXV
Tabla A1.5. Registro de valores de sulfuros durante las 31 semanas	XXXVII
Tabla A1.6. Registro de valores de DQO durante las 31 semanas	XXXIX
Tabla A1.7. Registro de valores de producción de biogás de las últimas 14 semanas	XLI
Tabla A1.8. Registro de valores de nitratos durante las últimas 19 semanas	XLIII
Tabla A1.9. Registro de valores de fosfatos durante las últimas 19 semanas	XLIV

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Diagrama de generación de vinazas	II
Fig. 2. Reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente, RALLFA (Castro-González, 2004)	V
Fig. 3. RALLFA operando a 45, 55 y 65°C, de izquierda a derecha	V
Fig. 4. Sistema montado para la medición de biogás	VIII
Fig. 5. Instalación del RALLFA a 65°C	IX
Fig. 6. RALLFA a 65°C ya inoculado	IX
Fig. 7. Gráfica de pH durante 31 semanas de experimentación	XII
Fig. 8. Gráfica de alcalinidad registradas durante las 31 semanas	XIII
Fig. 9. Gráfica de las temperaturas registradas durante las 31 semanas	XIV
Fig. 10. Gráfica de cuantificación de sulfatos durante las 31 semanas	XV
Fig. 11. Gráfica de cuantificación de sulfuros durante las 31 semanas	XVI
Fig. 12. Gráfica de cuantificación de DQO durante las 31 semanas	XVII
Fig. 13. Gráfica de producción de biogás durante las últimas 14 semanas	XVIII
Fig. 14. Gráfica de cuantificación de nitratos durante las últimas 19 semanas	XIX
Fig. 15. Gráfica de cuantificación de fosfatos durante las últimas 19 semanas	XX
Fig. 16. Diagrama de disposición controlada de los residuos producidos en esta investigación	XLV

GLOSARIO

(NH₄)₂SO₄	Sulfato de amonio
Absorbancia	Medida que refleja cómo se atenúa la radiación cuando atraviesa un elemento
Acetogénesis	Proceso a través del cual organismos anaerobios producen acetato a partir de diversas fuentes de energía y de carbono
Acidogénesis	Conversión bioquímica de los compuestos producidos en la primera etapa de la digestión o degradación anaerobia, en compuestos intermedios identificables de menor masa molecular como los llamados ácidos orgánicos de cadena corta o ácidos grasos volátiles, AGV, como el ácido acético, el propiónico, el butírico y el valérico, entre otros
Agua destilada	Sustancia cuya composición se basa en la unidad de moléculas de H ₂ O y ha sido purificada o limpiada mediante destilación
Anaerobio	Que puede subsistir pese a la falta de oxígeno
Archaea	Grupo de microorganismos unicelulares que, al igual que las bacterias, tienen morfología procariota (sin núcleo ni, en general, orgánulos membranosos internos), pero son fundamentalmente diferentes a éstas, de tal manera que conforman su propio dominio y reino. Los organismos productores de metano (metanogénicos) son esencialmente arqueas
atm	Atmósfera (unidad de presión)
Ba	Bario
Bacteria	Plural de <i>bacterium</i> en latín. Microorganismos procariotas que presentan un tamaño de unos pocos micrómetros, no tienen el núcleo definido y en general no presentan orgánulos membranosos internos
Biogás	Nombre dado al gas combustible que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos, por las reacciones de biodegradación de la materia orgánica, mediante la acción de microorganismos y otros factores, en ausencia de oxígeno
CaCl₂.2H₂O	Cloruro de calcio dihidratado
CH₄	Metano (hidrocarburo alcano más sencillo)
cm	Centímetros (unidad de longitud)
CO₂	Dióxido de carbono (gas incoloro y vital para la vida vegetal en la Tierra)

d	Día
Digestión	Degradación de materia orgánica mediante calor, reactivos químicos o microorganismos. El diccionario no especifica que esta conversión o degradación es intrínsecamente anaerobia, por lo que decir digestión anaerobia es innecesario. Este pleonasma fue desafortunadamente acuñado por ingenieros civiles estadounidenses que no eran cuidadosos del uso de los términos semánticos y, hasta la fecha, sigue apareciendo en nombres de eventos académico-tecnológicos y en publicaciones periódicas e incluso en libros
DQO	Demanda química de oxígeno, parámetro que mide de manera global la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos que hay disueltas o en suspensión en una muestra líquida de agua
Ec.	Ecuación
Efluente	Fluido que sale de un sistema, en este caso del reactor o los reactores en estudio
Enchaquetado	Que tiene aislamiento térmico
FeSO₄.7H₂O	Sulfato ferroso heptahidratado
Fig.	Figura
g	Gramos (unidad de masa)
Gránulos	Partícula dispersa en una suspensión
H₂	Hidrógeno molecular
H₂O	Agua
H₂S	Ácido sulfhídrico
HCl	Ácido clorhídrico
Heterogeneidad	De composición no uniforme, formado por elementos desiguales o de diferente naturaleza
Homogeneizar	Estandarizar, normalizar, igualar
Incrystalizable	Que no se cristaliza
Influente	Fluido que se introduce a un sistema, en este caso del reactor o los reactores en estudio
Ionización	Fenómeno químico o físico mediante el cual producen iones. Estos son átomos o moléculas cargadas eléctricamente debido al exceso o falta de electrones respecto a un átomo o molécula neutra

kPa	Kilopascal (unidad de presión)
K₂HPO₄	Difosfato de potasio (el potasio, el sodio, el calcio, etc., no son potasosos ni sodosos ni calzosos, por lo que no hay potásico, sódico, cálcico, etc., barbarismos aceptados por el diccionario de la lengua española porque no fueron debidamente asesorados por químicos reconocidos)
L	Litros (unidad de volumen)
lbf in⁻²	Libra por pulgada cuadrada (unidad de presión en el sistema inglés)
Masa	Magnitud física que expresa la cantidad de materia de un cuerpo, medida por la inercia de este, que determina la aceleración producida por una fuerza que actúa sobre él, y cuya unidad en el sistema internacional es el kilogramo (kg). No debe confundirse con peso ni usarse este último término en sustitución de la masa
Melazas	Residuos de cristalización final del azúcar, de los cuales no se puede obtener más azúcar por métodos físicos
Metanogénesis	Formación de metano por parte de los seres vivos conocidos como arqueas metanogénicas
mg	Miligramo (unidad de masa)
MgSO₄.7H₂O	Sulfato de magnesio heptahidratado
min	Minuto (unidad de tiempo)
mL	Mililitro (unidad de volumen)
mm	Milímetro (unidad de longitud)
mM	Milimolar (unidad de concentración molar)
Mol	Cantidad de sustancia de un sistema que contiene tantas entidades elementales como átomos hay en 0.0012 kilogramos de carbono 12
N	Normalidad, número de equivalentes de soluto por litro de solución
NaCl	Cloruro de sodio
NaHCO₃	Bicarbonato de sodio
NO₃⁻	Ion nitrato
Peso	Fuerza con que la Tierra atrae a un cuerpo. Esta variable física se mide con la unidad Newton. Por ello no es equivalente a la masa. Las personas tienen una masa corporal no un peso (se pesan en una báscula para obtener su masa)

pH	Medida de acidez o alcalinidad de una disolución. El pH indica la concentración de iones hidrógeno $[H]^+$ presentes en determinadas disoluciones
pH_{efluente}	Valor de pH del efluente
pH_{influyente}	Valor de pH del influente
PO₄⁻³	Ion fosfato
ppm	Partes por millón
psia	Libras por pulgada cuadrada (unidad de presión) ya considerando la presión del lugar donde sea medida con un dispositivo, por sus siglas en inglés <i>pound per square inch absolute</i>
psig	Libras por pulgada cuadrada (unidad de presión) medidas con un dispositivo, por sus siglas en inglés <i>pound per square inch gauge</i>
RALLFA	Reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente
Resazurina	Indicador redox que permite detectar la viabilidad de las células por la conversión de una tinción no fluorescente a un color rojo altamente fluorescente en respuesta a una reducción química del medio de cultivo resultado del desarrollo de los microorganismos conocido como “crecimiento celular”
SO₄²⁻	Ion sulfato
ST	Sólidos totales
T	Temperatura
V	Volumen
V_{Biogás}	Volumen de biogás producido
V_{prom}	Volumen promedio
V_{4.30}	Volumen de titulación requerido para llegar a un pH=4.30
V_{5.75}	Volumen de titulación requerido para llegar a un pH=5.75

Símbolos

α	Alcalinidad
”	Pulgadas
%	Porcentaje
±	Símbolo de más/menos
°C	Grado Celsius (unidad termométrica)
μL	Microlitro (unidad de volumen)
μm	Micrómetro (unidad de longitud)
μmoles	Micromoles

Nota: esta tesis usa el punto decimal (DOF, 2009)

RESUMEN

Se realizó a escala laboratorio el reaprovechamiento de las vinazas provenientes de la fermentación¹ de la melaza de caña y su posterior destilación (subproducto de un ingenio azucarero-alcoholero cooperante ubicado en Veracruz, México), mediante reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) a tres diferentes temperaturas 45, 55 y 65°C transformando los compuestos carbonosos en metano mediante el uso de arqueas metanogénicas. Este proyecto consistió en arrancar desde cero el reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) que opera a 65°C y, a su vez, se evaluó la eficiencia de transformación de la materia orgánica medida como demanda química de oxígeno (DQO) a biogás en este y otros dos reactores operando a 45 y 55°C. Para los tres RALLFA se evaluaron diferentes parámetros de seguimiento como: determinación de pH, alcalinidad, medición de temperatura, determinación de la demanda química de oxígeno (DQO), determinación de sulfuros, determinación de sulfatos, determinación de nitratos y determinación de fósforo. Los resultados de los tres reactores indican que el RALLFA que opera a 55°C fue el más eficiente para la transformación de los compuestos carbonosos medidos globalmente como DQO total a biogás, teniendo como el menos eficiente el RALLFA de 65°C, con una diferencia entre estos dos casi del doble de producción de biogás. La temperatura juega un papel importante en este proyecto ya que tiene un efecto positivo en la generación de biogás por parte de las arqueas metanogénicas e inhibe la proliferación de los organismos sulfato-reductores.

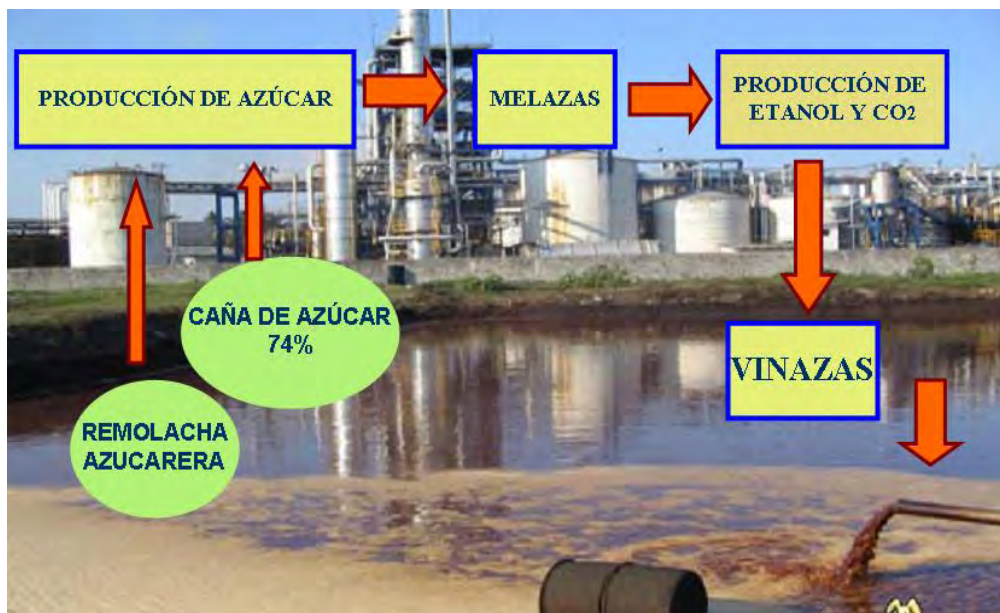
Palabras clave: Arranque, operación, reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA), tratamiento, efluente, proceso de destilación, alcohol, “vinaza”

¹ Luis Pasteur fue el investigador que comprobó que no había generación espontánea a través de un experimento muy sencillo poniendo una disolución de glucosa e inoculándola con levadura (*Saccharomyces cerevisiae*) produciendo alcohol etílico y bióxido de carbono. A esta reacción la denominó FERMENTACIÓN, por lo que cualquier otra biorreacción NO debe llamarse fermentación. En 1976 en una reunión de investigadores que realizaban bioreacciones para producir sustancias útiles para la sociedad (antibióticos, aminoácidos, vacunas, etc.) se tomó la decisión de **no llamar** fermentadores a los biorreactores ni fermentaciones a las bioreacciones.

CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES

Las vinazas son las aguas residuales provenientes de la primera torre de destilación del alcohol etílico obtenido por fermentación, especialmente de las melazas o mieles incristalizables de la industria cañera. En México, anualmente se producen aproximadamente 1.5 millones de metros cúbicos de vinazas de caña (esto depende de la proporción de alcohol con respecto a vinazas, que va de 10 a 14 litros de vinazas por litro de alcohol). Con los sistemas de tratamiento convencionales para las aguas residuales no se alcanza a cumplir con la norma oficial mexicana relacionada con su reutilización (DOF, 1997), principalmente por la gran cantidad y heterogeneidad del material orgánico disuelto presente en ellas (Castro-González, 2004, Castro-González y col., 2004).

Uno de los subproductos de la obtención de azúcar a partir de la caña (*Saccharum officinarum*) son las mieles incristalizables o finales o melazas, como se mencionó arriba, las cuales son empleadas como fuente de carbono para producir etanol mediante un proceso bioquímico llamado fermentación usando levaduras (*Saccharomyces cerevisiae*) que transforman la glucosa en etanol y bióxido de carbono en condiciones anaerobias. Una vez obtenido el llamado mosto o vino (con concentraciones entre 10 y 15% de etanol en volumen) se envía a un tren de destilación para concentrar hasta 96% de alcohol en volumen. En la primera torre de destilación se producen entre 10 y 14 litros de vinazas por cada litro de alcohol destilado (Fig. 1) (Castro-González, 2004; Castro-González y col., 2004).



**Fig. 1. Diagrama de generación de vinazas
(Detor-Méndez y Hernández-Segoviano, 2012)**

Estos efluentes acuosos son conocidos como **vinazas** y se caracterizan por tener un pH ácido, ya que en la etapa de fermentación se adiciona ácido sulfúrico para

promover la proliferación de la levadura cervecera únicamente ya que, en general, los fermentadores operan en condiciones sépticas. Estos valores de pH están en un intervalo de 3 a 4. Poseen, además, un elevado contenido de materia orgánica e inorgánica disuelta, coloidal y en suspensión proveniente del proceso de fabricación del azúcar a partir de la caña. Esta materia disuelta, coloidal y en suspensión se mide como demanda química de oxígeno y está entre 80-120 g DQO L⁻¹; sulfatos de 4 a 6 g L⁻¹; potasio entre 6 y 8 g L⁻¹ y sólidos totales de 80 a 120 g ST L⁻¹. Otra problemática que presenta este residuo es la elevada temperatura a la cual es evacuado de la primera torre de destilación, entre 80 y 85°C, dificultando su transformación mediante un tratamiento convencional o proceso biológico anaerobio, ya que la temperatura más adecuada para los microorganismos en dicho tratamiento se encuentra entre 30 y 35°C, para obtener eficiencias de remoción entre 55 y 60% (Durán y col., 1994a).

Por otra parte, el biogás producido durante la conversión anaerobia de los componentes carbonosos de la vinaza es rico en metano, pudiendo ser utilizado en la planta de producción de etanol como fuente de energía, por lo cual, una planta tratamiento de vinazas representa una fuente de ahorro para la industria alcoholera de caña de azúcar (Durán-de-Bazúa y col., 1988; 1991; 1994b).

El tratamiento de las vinazas puede realizarse mediante un reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente, conocido con las siglas RALLFA, el cual se refiere a una clase especial de reactor también conocido como de "alta tasa" para el tratamiento anaerobio de aguas residuales (Castro-González, 2004).

En un RALLFA el agua residual asciende a través de un lecho de lodo anaerobio donde los microorganismos transforman la materia orgánica para llevar a cabo su metabolismo. En inglés se conoce como *upflow anaerobic sludge blanket reactor*, *UASB reactor* (Castro-González, 2004).

El movimiento ascendente de las burbujas de gas realiza la labor de homogeneizar el reactor sin necesidad de partes mecánicas. En la parte superior del reactor se encuentra una campana invertida en la cual la fase acuosa es separada de los sólidos del lodo y del gas de tal forma que el gas y el efluente se pueden colectar por separado, sin que se extraigan del reactor los gránulos de lodo, ya que son el biocatalizador. El lecho de lodos está compuesto de microorganismos anaerobios pertenecientes a los dominios archaea y bacteria; que se distribuyen formando gránulos y llevando a cabo múltiples procesos que pueden agruparse en acidogénesis, acetogénesis, metanogénesis y reducción de sulfatos, además de producir biogás compuesto por CH₄, CO₂ y H₂S (Castro-González, 2004).

Con base en esto se plantean los objetivos de esta investigación.

CAPÍTULO 2

OBJETIVOS

Los objetivos de esta investigación son:

- Arrancar un reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) a escala de laboratorio que opere a 65°C para el tratamiento de un efluente proveniente del proceso de destilación de alcohol conocido como vinaza proporcionado por un ingenio azucarero-alcoholero cooperante.
- Evaluar la eficiencia de transformación de la materia orgánica medida como demanda química de oxígeno (DQO) a biogás, comparando los resultados con otros dos sistemas RALLFA a escala de laboratorio que operan a 45 y 55°C.

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

3.1 Descripción de los reactores biológicos

En el presente trabajo se utilizaron tres reactores construidos de vidrio (Figs. 2 y 3) con un volumen de trabajo de 3 L de tipo RALLFA, los cuales se mantienen a una temperatura de 45, 55 y 65°C, respectivamente. Tienen dos tubos concéntricos: uno con una altura de 65 cm y diámetro de 7.27 cm y el otro de la misma altura con un diámetro de 3.7 cm y, a través del espacio anular, se hace pasar agua caliente a 45, 55 y 65°C, para mantener la temperatura constante dentro los tres reactores (Castro-González, 2004).

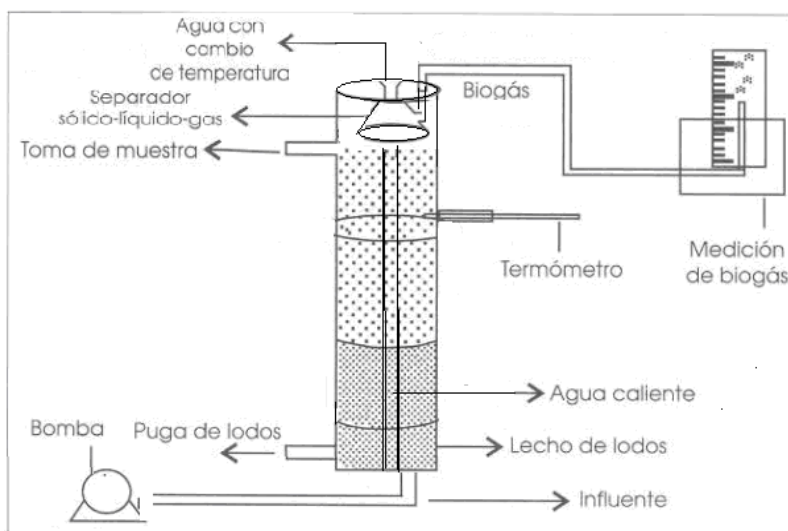


Fig. 2. Reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente, RALLFA (Castro-González, 2004)



Fig. 3. RALLFA operando a 45, 55 y 65°C, de izquierda a derecha

3.2. Arranque del reactor

La duración del arranque depende de los parámetros biológicos, químicos y físicos. El arranque está influenciado por la concentración y composición de las aguas residuales, el volumen, la actividad y la adaptación del inóculo, condiciones ambientales, parámetros de operación y, por último, la configuración del reactor (Castro-González, 2004).

El arranque del reactor se realizó por etapas llevando un seguimiento con pruebas analíticas, observando y registrando su comportamiento siendo estas pruebas las que marcarán si el arranque del reactor está siendo correcto (Castro-González, 2004).

3.2.1. Primera etapa

Inoculación del sistema mediante 1000 mL de lodos provenientes de otro RALLFA que también trataba agua residual de la destilación de “vinos” para producir alcohol de 96% en volumen a partir de mieles incristalizables de caña de azúcar, conocida como vinazas.

3.2.2. Segunda etapa

Alimentación del reactor en forma de lotes. Diariamente fueron introducidos mediante una bomba peristáltica 333 mL de solución, la cual se preparó con un 20% del agua residual (vinaza) y un 80% del medio de cultivo específico para microorganismos metanogénicos, Se le adicionó bicarbonato de sodio, de 2.5 a 3 g a los 333 mL para tener un pH neutro. Esta cantidad se fue reduciendo hasta llegar a cero una vez adaptados los microorganismos al ambiente del reactor (Castro-González y Durán-de-Bazúa, 2001).

3.2.3. Tercera etapa

Se continuó alimentando en lotes e incrementando el porcentaje de vinaza hasta llegar al 50%, tomando como criterio general para decidir si se aumentaba el volumen de vinaza la capacidad del RALLFA para producir alcalinidad, ya que uno de los problemas más comunes durante la etapa de arranque es la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV), lo cual puede llevar a una total acidificación si no se procede con mesura (Villalobos-Juvenal, 2015).

3.3. Parámetros de seguimiento del RALLFA

Los parámetros de seguimiento en el reactor (mediciones al influente y efluente) indican la efectividad de la degradación biológica dentro del mismo. Dichos parámetros de seguimiento son: valor de pH, temperatura, alcalinidad, DQO soluble y cuantificación de sulfatos, sulfuros, fósforo y nitratos.

En la Tabla 1 se presenta un resumen de los principales parámetros a utilizar. Todas las mediciones se hicieron por duplicado.

Tabla 1. Parámetros de seguimiento

Parámetro	Norma mexicana	Método usado
Determinación de pH	NMX- AA-008-SCFI-2011(DOF, 2011)	Electrométrico
Determinación de la demanda química de oxígeno (DQO) en aguas naturales, residuales y residuales tratadas	NMX-AA-030-SCFI-2001 (DOF, 2001b)	Digestión ácida y colorimetría
Determinación de sulfuros	NMX-AA-084-1982 (DOF, 1982)	Titulación iodométrico
Determinación del ion sulfato	NMX-AA-074-1981 (DOF, 1981)	Turbidimetría, precipitación de sulfato de bario (BaSO ₄)
Determinación de nitratos	NMX-AA-079-SCFI-2001 (DOF, 2001c)	Método espectrofotométrico ultravioleta
Determinación de alcalinidad	NMX-AA-036-SCFI-2001(DOF, 2001e)	Valoración de la muestra
Temperatura	NMX-AA-007-SCFI-2013 (DOF, 2013)	Medición directa
Determinación de fósforo	NMX-AA-029-SCFI-2001 (DOF, 2001a)	Método colorimétrico

3.4. Registro de la producción de biogás

Este procedimiento se realizó durante un periodo estable de los RALLFA. Se inicia con la succión del biogás contenido en cada uno de los reactores que operan a 45, 55 y 65°C.

El volumen del biogás fue medido a través de desplazamiento de volumen; sistema conformado por una manguera que conecta el RALLFA a un matraz Erlenmeyer cerrado, que contiene una trampa de CO₂ (solución de agua con cal), este matraz se conecta con una manguera, la cual tiene un filtro de H₂S, a un segundo matraz Erlenmeyer (lleno de una solución de NaOH mas fenolftaleína) y este a su vez se conecta a través de otra manguera a una probeta, como se observa en la Fig. 4.

El biogás generado en el RALLFA desplaza la solución contenida en el segundo matraz y esta caerá en la probeta, el volumen de la solución que se contiene en la probeta es el volumen del biogás producido.

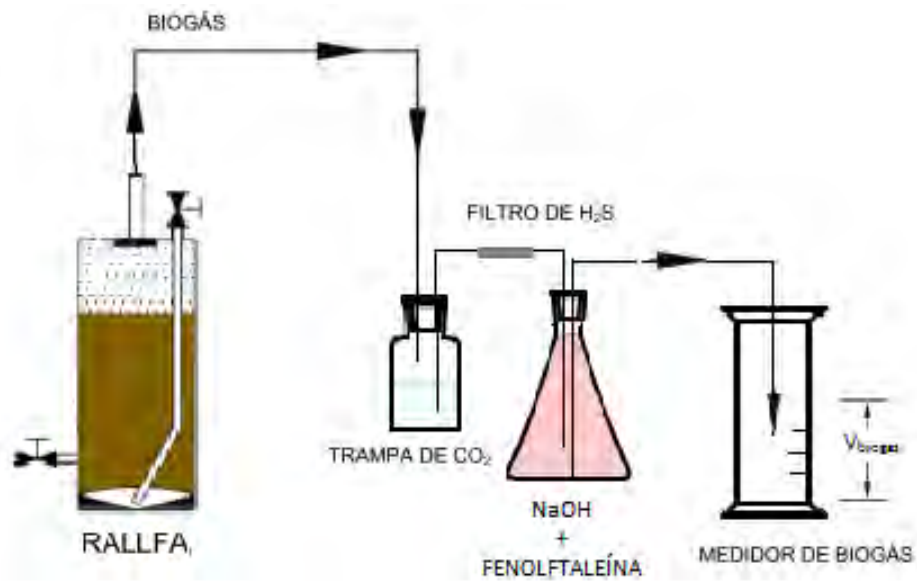


Fig. 4. Sistema montado para la medición de biogás

CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización de las vinazas

Proviene de un ingenio azucarero-alcoholero cooperante del estado de Veracruz y son traídas y almacenadas en un cuarto frío (4°C) enfriándose en este lapso. En la Tabla 2 se presenta la caracterización de las vinazas en tratamiento.

Tabla 2. Caracterización de las vinazas

Parámetro	Valor promedio	Unidades
Valor de pH	4.57 ± 0.24	-
DQO	123682.96 ± 18662.54	mg L ⁻¹
Sulfatos	19564.97 ± 3584.02	mg L ⁻¹
Sulfuros	4646.26 ± 276.47	mg L ⁻¹
Temperatura	6.16 ± 2.22	°C
Nitratos	321.52 ± 48.70	mg L ⁻¹
Fosfatos	5650.19 ± 389.92	mg L ⁻¹

Promedio de los valores de todos los lotes de vinazas que llegaron al laboratorio

4.2. Arranque del reactor

4.2.1. Primera etapa

El RALLFA empleado, como se mencionó en la metodología, tiene un volumen de trabajo útil de 3 L y cuenta con 1000 mL de inóculo. Tiene un tubo concéntrico para mantener condiciones isotérmicas de trabajo (65°C). La alimentación se realizó mediante una bomba peristáltica en forma de lotes, 333 mL d⁻¹. (Figs. 5 y 6).



Fig. 6. Instalación del RALLFA a 65°C



Fig. 5. RALLFA a 65°C ya inoculado

4.2.2. Segunda etapa

La alimentación original del RALLFA fue mediante una mezcla de 80:20 de agua sintética y vinazas respectivamente. El agua sintética fue preparada según la Tabla 3 y el porcentaje de esta fue disminuyendo según la etapa de adaptación en la cual se encontraba el reactor (de la semana 7 a la semana 11).

Tabla 3. Preparación de agua sintética (Vergara-Salgado, 2010)

Componente	Modo de preparación	Volumen
Solución mineral 1	6g de K_2HPO_4 , aforar* a 1 L	50 mL
Solución mineral 2	6g K_2HPO_4 , 6g $(NH_4)_2SO_4$, 12g NaCl, 2.6g $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, 0.16g $CaCl_2 \cdot 2H_2O$, aforados 1L con H_2O	50 mL
Resazurina (0.1%)	0.1 g de resazurina aforada* a 100 mL	1 mL
Solución acuosa* $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ (2%)	0.002 g de $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ aforado* en 1L	1 mL
Cisteína	-	0.5 g
Solución de oligoelementos (Sigma Aldrich)	-	10 mL
Solución de vitaminas (Sigma Aldrich)	-	10 mL
Extracto de levadura (Sigma Aldrich)	-	1 g
Peptona caseína	-	1 g
Bicarbonato de sodio	-	3 g
Molibdato de sodio	-	2 mM

**Se usó agua destilada para aforar todas las soluciones
- No se prepara*

Una vez que ya estuvo estable se procedió a ir cambiando la alimentación substituyendo el agua sintética por agua de la llave.

4.2.3. Tercera etapa

El reactor al llegar a la semana 5 ya se encontraba alimentado al 50% con agua de la llave y vinaza, el pH del efluente estaba en un intervalo entre 7.039 y 7.428. A partir de ese momento se continuó trabajando en la disminución del $NaHCO_3$ que se fue agregando en cada vez menos proporción hasta lograr su eliminación (de la semana 7 a la semana 8).

En la Tabla 4 se muestran los resultados de las semanas de experimentación con las proporciones suministradas.

Tabla 4. Incremento del porcentaje de vinaza y pH

Semana	NaHCO ₃ (g)	%Vinaza	%Medio de cultivo	Influyente (mL)	Valor de pH _{influyente}	Valor de pH _{efluente}
2	2.50	0	100	333	4.52	5.03
3	2.50	10	90	333	4.28	5.32
3	2.50	20	80	333	4.56	6.13
4	2.50	30	70	333	4.33	6.73
4	2.50	40	60	333	4.89	7.04
5	2.50	50	50	333	4.65	7.43

4.3. Parámetros de seguimiento del RALLFA

A partir del día primero de marzo, el sistema ya se encontraba estable. Se utilizaron las pruebas analíticas para llevar a cabo el seguimiento del reactor durante esta investigación.

Para el influente y el efluente líquidos del reactor los parámetros analizados fueron: valor de pH, factor de alcalinidad (α), demanda química de oxígeno (DQO), sulfuros y sulfatos (SO₄²⁻), nitratos (NO₃⁻) y fosfatos (PO₄³⁻).

4.3.1. Valores de pH

Diariamente se midió el valor de pH empleando un potenciómetro Orion Modelo 720, tanto del influente como del efluente, para poder medir posteriormente el factor de alcalinidad. En la Fig. 7 se observa el comportamiento del pH del influente y efluente durante las 31 semanas de trabajo experimental.

Durante la primera etapa del arranque del sistema, el pH del efluente fue alrededor de 4.52 y, a medida que los reactores se estabilizaban, el valor de pH aumentó hasta un intervalo entre 6.08± 0.75 y 7.91± 0.31 (Tabla 5).

Tabla 5. Valores de pH promedio

Muestra	pH
Influyente	4.56 ± 0.23
Efluente de RALLFA 45°C	7.67 ± 0.45
Efluente de RALLFA 55°C	7.91 ± 0.31
Efluente de RALLFA 65°C	6.08 ± 0.75

Los valores de pH que se registraron para los reactores de 45°C y 55°C son recomendables, para que la variedad de microorganismos que se encuentran en cada uno de los reactores se desarrollen y establezcan un equilibrio.

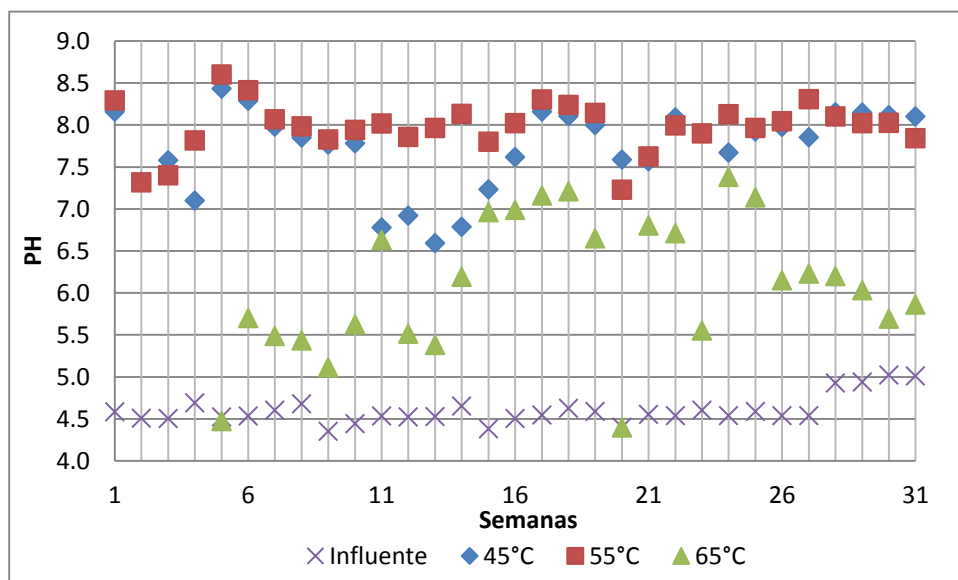


Fig. 7. Gráfica de pH durante 31 semanas de experimentación

4.3.2. Factor de alcalinidad de los efluentes de los reactores a 45, 55 y 65°C

Para realizar la medición del factor de alcalinidad (α) (Tabla 6), se realizó una titulación de los efluentes de los tres reactores (45°C, 55°C y 65°C). Para ello, se tomaron 10 mL de muestra de cada efluente, se titularon con HCl 0.01 N, hasta alcanzar un pH igual a 5.75. Posteriormente, se continuó titulando con HCl 0.01 N, ahora hasta alcanzar un pH de 4.30. Se registraron los dos volúmenes y se obtuvieron los valores de alcalinidad mediante la ecuación 1:

$$\alpha = \frac{V_{4.3} - V_{5.75}}{V_{4.3}} \quad \text{Ec. 1}$$

Tabla 6. Valores de factor de alcalinidad promedio

Muestra	Alcalinidad (α)
Efluente de RALLFA 45°C	0.39 ± 0.06
Efluente de RALLFA 55°C	0.35 ± 0.05
Efluente de RALLFA 65°C	0.54 ± 0.08

El factor de alcalinidad para estos sistemas juega un papel muy importante pues permite mantener un cierto control sobre la operación de los reactores. La alcalinidad α es una medida de la capacidad amortiguadora del medio en los reactores tipo RALLFA, con lo cual evita la acidificación y que se produzca una menor cantidad de biogás y una menor proporción de metano (Poblano-Flores, 2015).

En la Fig. 8 se presentan los registros de $\alpha_{45^\circ\text{C}}$ 0.39 ± 0.06 , $\alpha_{55^\circ\text{C}}$ 0.35 ± 0.05 y $\alpha_{65^\circ\text{C}}$ 0.54 ± 0.08 .

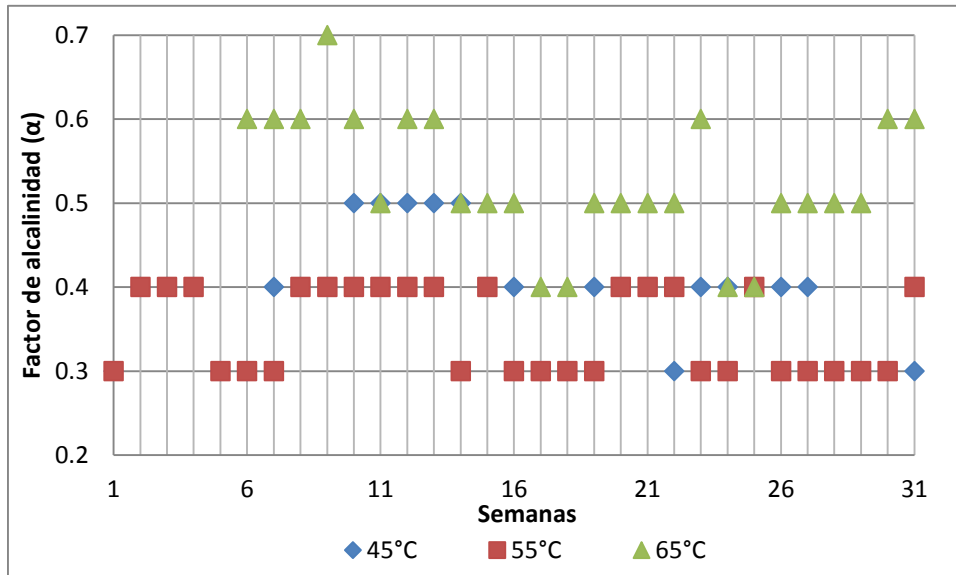


Fig. 8. Gráfica de factor de alcalinidad registradas durante las 31 semanas

4.3.3. Temperatura

La temperatura tiene un efecto positivo en la generación de metano por parte de bacterias metanogénicas e inhibe la proliferación de bacterias sulfato-reductoras.

El que tiene una temperatura con mayor fluctuación es el reactor de 65°C, ya que este reactor aún no se encontraba encaquetado para mantener la temperatura como los otros dos, ya que sufrió una fractura y tuvo que sustituirse con uno nuevo fabricado en el Taller de Vidrio de la Facultad de Química. Hasta el momento de realizar esta investigación ha seguido en etapa de estabilización ya que se han presentado fallas en la bomba que recircula el agua caliente, provocando que la recirculación pare y la temperatura descienda (Fig. 9).

Tabla 7. Valores de temperatura promedio

Muestra	T (°C)
Influyente	12.78 ± 2.81
Efluente de RALLFA 45°C	42.97 ± 3.51
Efluente de RALLFA 55°C	51.80 ± 3.99
Efluente de RALLFA 65°C	41.81 ± 16.70

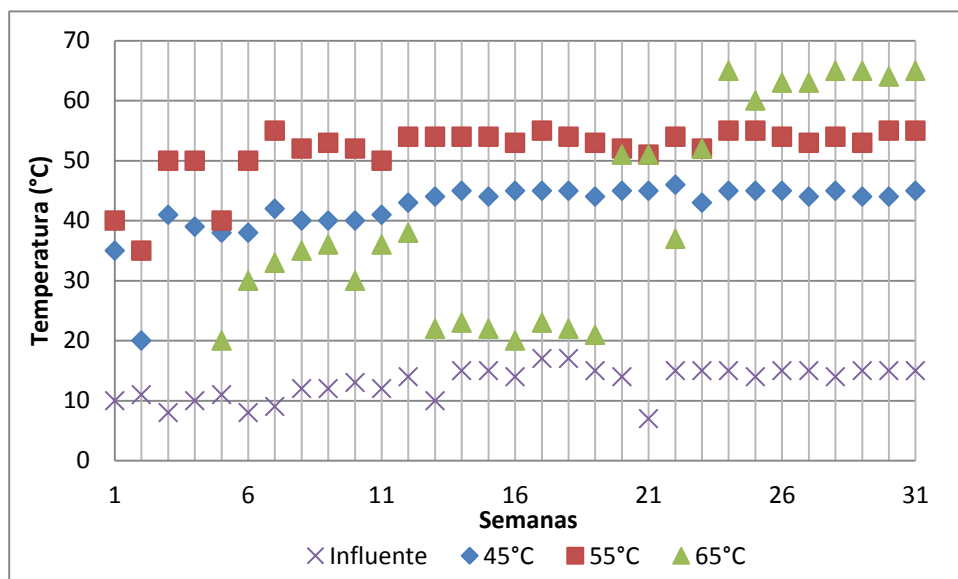


Fig. 9. Gráfica de las temperaturas registradas durante las 31 semanas

4.3.4. Sulfatos

La determinación del contenido de sulfatos NMX-AA-074-1981 (DOF, 1981) puede hacerse por diferentes métodos, uno de ellos es el utilizado en esta investigación. El método turbidimétrico no es recomendable para aguas con color, con materiales en suspensión o con elevado contenido en materiales orgánicos. Por ello, las muestras fueron diluidas con agua destilada para reducir la intensidad del color y permitir el desarrollo del método. El ión sulfato SO_4^{2-} precipita en un medio de ácido acético con ión Ba^{2+} , de modo que forma cristales de sulfato de bario (BaSO_4) de tamaño uniforme, los que deben mantenerse en suspensión homogénea durante un periodo que resulte suficiente para medir la absorbancia que la misma produzca.

El seguimiento de los sistemas se presenta en la Fig. 10. Los resultados que presentaron los RALLFA a las temperaturas de trabajo se registraron en la Tabla 8. En cuanto al porcentaje de eliminación de dicho parámetro en el RALLFA 45°C fue de 36.56%, en el RALLFA 55°C de 40.05% y en el RALLFA 65°C de 21.84%. El reactor de mayor eficiencia fue el que operó a 55°C .

Tabla 8. Valores de sulfatos promedio

Muestra	Sulfatos (mg L^{-1})
Influyente	9639.05 ± 2815.29
Efluente de RALLFA 45°C	6115.41 ± 1790.66
Efluente de RALLFA 55°C	5778.54 ± 1669.61
Efluente de RALLFA 65°C	7533.90 ± 2635.78

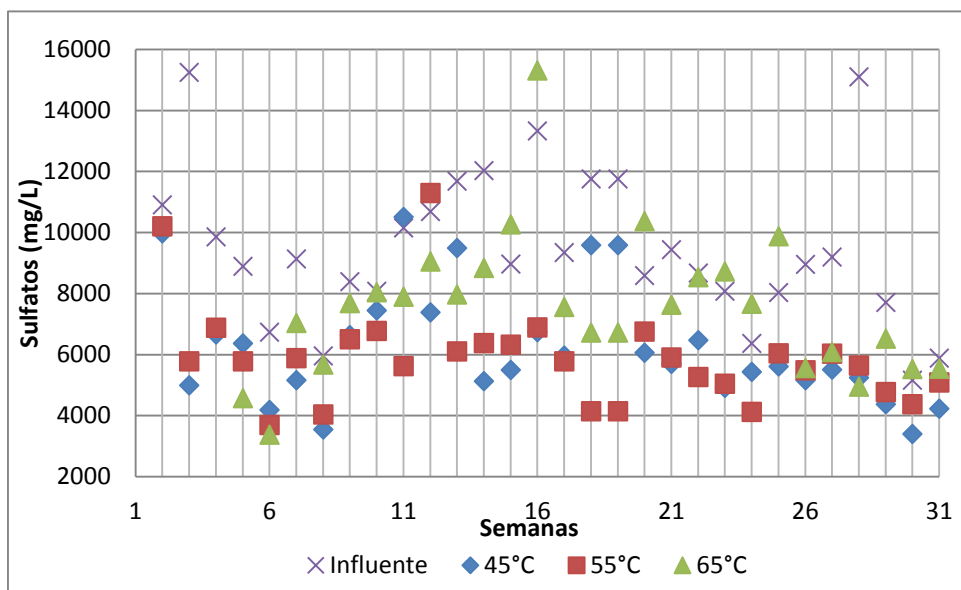


Fig. 10. Gráfica de cuantificación de sulfatos durante las 31 semanas

4.3.5. Sulfuros

En química, un sulfuro es la combinación del azufre (número de oxidación -2) con un elemento químico o con un radical. Hay unos pocos compuestos covalentes del azufre, como el disulfuro de carbono (CS₂) y el sulfuro de hidrógeno (H₂S) que son también considerados como sulfuros.

Uno de los sulfuros más importantes es el de hidrógeno. Este compuesto es un gas con olor a huevos podridos y es altamente tóxico.

Para su determinación se empleó la NMX-AA-084-1982 (DOF, 1982), como ya se mencionó en el capítulo sobre metodología.

En las primeras ocho semanas (Fig. 8), la remoción que se presentó para el RALLFA_{45°C} fue del 4.46%, el RALLFA_{55°C} tuvo una remoción del 3.14% y, finalmente, el RALLFA_{65°C} registró un porcentaje de eliminación de tan solo el 1.43%. Los sulfuros en el efluente de cada sistema y del Influyente se presentan en la Tabla 9 y Fig.11.

Tabla 9. Valores de sulfuros promedio

Muestra	Sulfuros (mg L ⁻¹)
Influente	4671.43 ± 437.94
Efluente de RALLFA 45°C	4462.89 ± 344.57
Efluente de RALLFA 55°C	4524.80 ± 411.52
Efluente de RALLFA 65°C	4604.57 ± 354.29

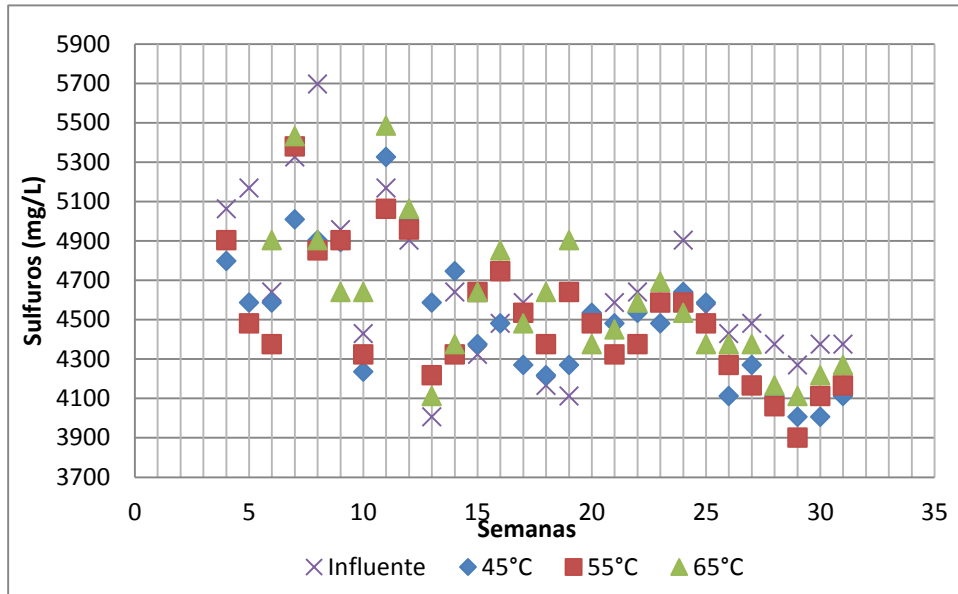


Fig. 11. Gráfica de cuantificación de sulfuros durante las 31 semanas

4.3.6. DQO

La DQO_{vinaza} muestra una alta concentración de materia orgánica, $123682.96 \pm 18662.54 \text{ mg L}^{-1}$, pero al diluir las vinazas con agua y mezclarlas con sulfato ferroso, la DQO baja a $75923.35 \pm 14026.74 \text{ mg L}^{-1}$. Los valores que se presentan en los efluentes ya biotransformados por los consorcios microbianos de los RALLFA a las diferentes temperaturas se presentan en la Tabla 10.

Durante el seguimiento de los sistemas (Fig. 12), se observa una remoción en el RALLFA_{45°C} de 31.9%, en el RALLFA_{55°C} de 45.78% y en el RALLFA_{65°C} de 17.07%; por lo que se puede notar que el reactor de 55°C sigue siendo el de mayor eficiencia.

Tabla 10. Valores de DQO promedio

Muestra	DQO (mg L ⁻¹)
Influyente	75923.35 ± 14026.74
Efluente de RALLFA 45°C	52318.04 ± 17626.21
Efluente de RALLFA 55°C	41168.54 ± 16565.78
Efluente de RALLFA 65°C	62963.67 ± 16851.44

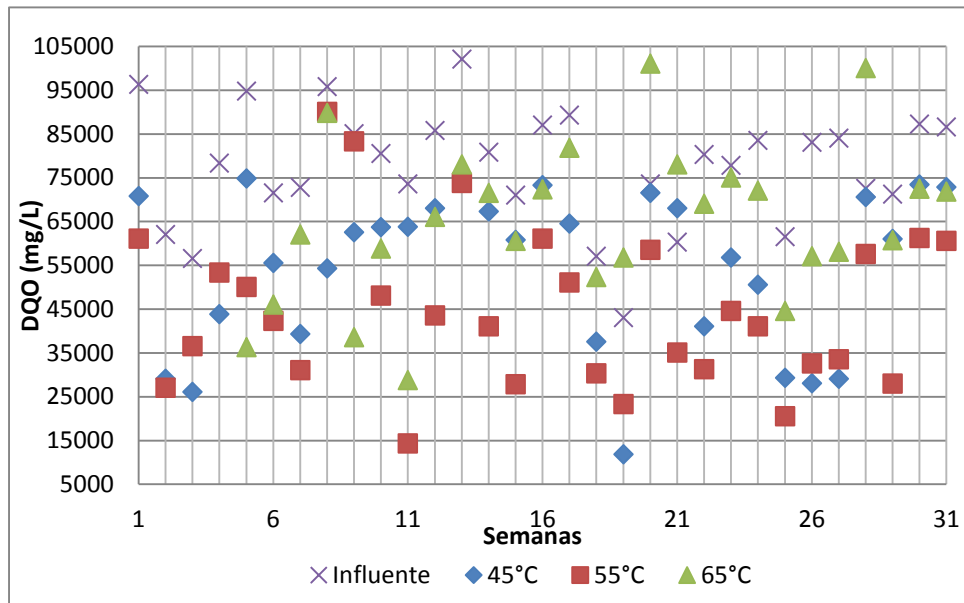


Fig. 12. Gráfica de cuantificación de DQO durante las 31 semanas

4.3.7. Producción de biogás

La producción de biogás en los RALLFA de la semana 18 a la semana 31, se presenta en la Fig. 13, en la cual se observa que el reactor que opera a 55°C es el de mayor producción de biogás, seguido de RALLFA que opera a 45°C.

El RALLFA de 65°C todavía no produjo tanto biogás como los dos anteriores ya que el sistema no llegó a un periodo estable o de equilibrio, por lo cual existen muchas fluctuaciones en cuanto a la producción de biogás.

Es importante señalar que una desventaja de los sistemas anaerobios es que su estabilización es mucho más lenta que la de los sistemas aerobios (Castro-González, 2004).

La producción de biogás registrada en la Tabla 11 y Fig. 13 fue de: RALLFA_{45°C} 9.66 ± 1.53, RALLFA_{55°C} 10.10 ± 1.65 y RALLFA_{65°C} 1.99 ± 0.76 L d⁻¹, siendo así el reactor que más produce biogás el RALLFA operado a 55°C.

Tabla 11. Valores de producción de biogás promedio

Reactor	Producción de biogás (L d ⁻¹)
RALLFA 45°C	9.66 ± 1.53
RALLFA 55°C	10.10 ± 1.65
RALLFA 65°C	1.99 ± 0.76

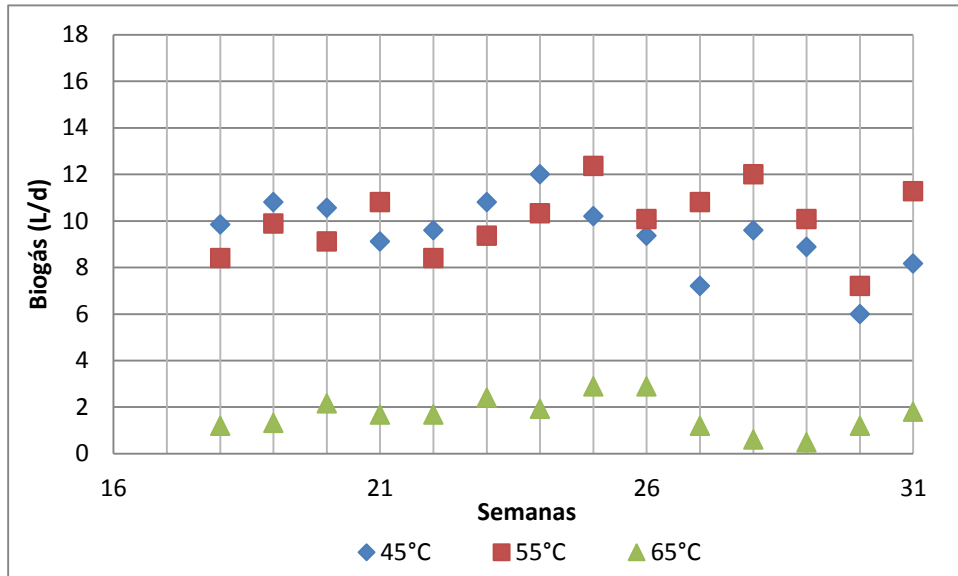


Fig. 13. Gráfica de producción de biogás durante las últimas 14 semanas

4.3.8. Nitratos

En la fase de la experimentación de la semana 13 a 31, se midió la concentración de nitratos en el efluente de cada uno de los RALLFA (Tabla 12). Los siguientes valores promedio fueron obtenidos durante dicho periodo RALLFA_{45°C} 99.34 ± 6.33, RALLFA_{55°C} 89.92 ± 10.04 y RALLFA_{65°C} 119.81 ± 7.62 mg NO₃⁻ L⁻¹.

En el análisis de datos para los iones nitratos, se observa que el factor de la temperatura en los reactores influye claramente en la eliminación de este contaminante en la vinaza, que presentaron valores de 22.85 para el RALLFA_{45°C}, 30.16 para RALLFA_{55°C} y de 6.95 para RALLFA_{65°C}.

En la Figura 14, se presenta el comportamiento de los tres sistemas, siendo el que opera a 55°C, el más eficiente de los tres reactores, ya que fue el que removió más nitratos.

Tabla 12. Valores de nitratos promedio

Muestra	Nitratos (mg L ⁻¹)
Influente	128.76 ± 11.64
Efluente de RALLFA 45°C	99.34 ± 6.33
Efluente de RALLFA 55°C	89.92 ± 10.04
Efluente de RALLFA 65°C	119.81 ± 7.62

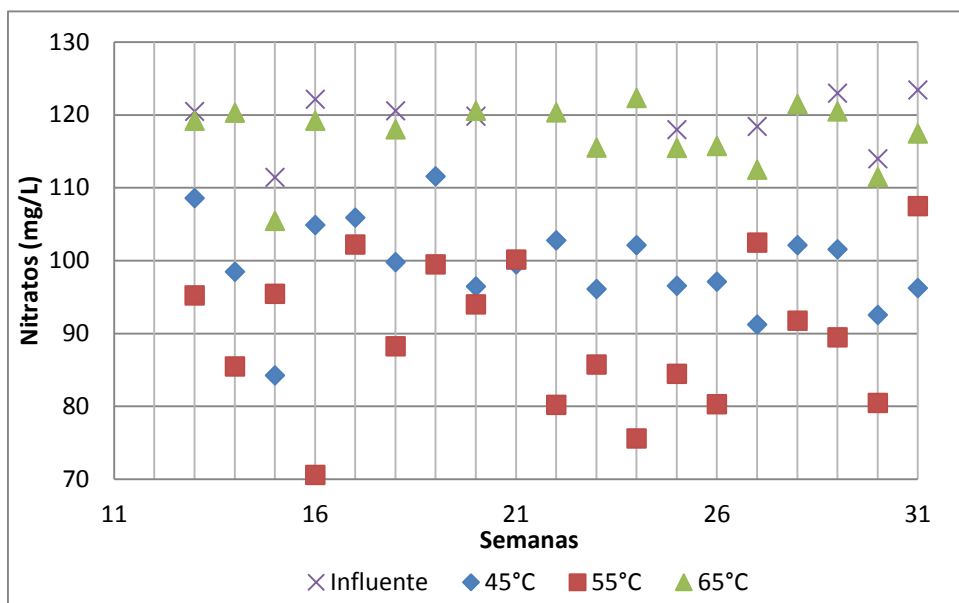


Fig. 14. Gráfica de cuantificación de nitratos durante las últimas 19 semanas

4.3.9. Fosfatos

La presencia de fosfatos en este proceso es favorable para el desarrollo de los microorganismos presentes en los reactores, ya que el fósforo es elemental en los procesos metabólicos como el crecimiento.

En la Fig. 15 se muestra que el comportamiento de los tres RALLFA durante la semana 13 a la semana 31, que fue similar al de los anteriores parámetros teniendo valores constantes, siendo el reactor que opera a 55°C el que resultó ser más eficiente para la remoción de iones fosfato.

Registrándose en la Tabla 13 las concentraciones de los efluentes del RALLFA_{45°C} 1915.07 ± 138.45, RALLFA_{55°C} 1777.74 ± 129.75 y RALLFA_{65°C} 2439.15 ± 233.99 mg PO₄⁻³ L⁻¹.

Tabla 13. Valores de fosfatos promedio

Muestra	Fosfatos (mg L ⁻¹)
Influyente	2852.38 ± 423.98
Efluente de RALLFA 45°C	1915.07 ± 138.45
Efluente de RALLFA 55°C	1777.74 ± 129.75
Efluente de RALLFA 65°C	2439.15 ± 233.99

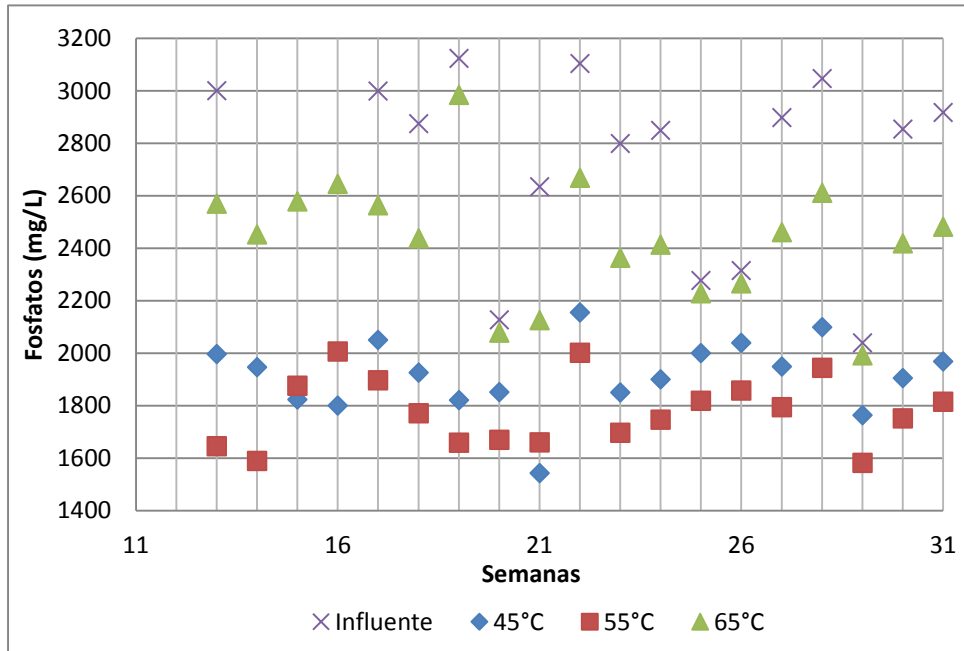


Fig. 15. Gráfica de cuantificación de fosfatos durante las últimas 19 semanas

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

De acuerdo con el primer objetivo de este proyecto, que fue arrancar un reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) a escala de laboratorio que opere a 65°C para el tratamiento de un efluente proveniente del proceso de destilación de alcohol conocido como vinaza proporcionado por un ingenio azucarero-alcoholero cooperante, se tuvieron las siguientes conclusiones:

El RALLFA como fue explicado en la metodología, se inoculó y fue alimentado para el acondicionamiento paulatino de los microorganismos que se encontraban en el lodo anaerobio que fue utilizado para dicho procedimiento de inoculación. Sin embargo, no se llegó a un periodo estable indicado por el factor de alcalinidad (α), ya que, registró valores de 0.54 ± 0.08 , y debían encontrarse en un intervalo del factor de alcalinidad entre 0.2 a 0.4 para considerarlo estable. Además, la temperatura de operación del reactor fue de 41.81 ± 16.70 , por lo que, tuvo muchas fluctuaciones con respecto a la temperatura de operación objetivo de 65°C. Lo anterior es debido a problemas con la bomba que recirculaba el agua caliente. Por otro lado, dado que el sistema no estaba “enchaquetado” había pérdidas de calor.

Todo esto se ve reflejado claramente con los resultados de los RALLFA a 45°C y 55°C, que se encuentran operando de manera favorable con valores de pH entre 7.67 a 7.91 y a la temperatura deseada, la cual se mantiene constante. Con los resultados obtenidos durante las 31 semanas, el RALLFA de mayor eficiencia es el que opera a la temperatura de 55°C.

En cuanto a los otros parámetros el sistema operado a 65°C obtuvo un porcentaje de eliminación de DQO, sulfatos, nitratos, fosfatos y sulfuros de aproximadamente la mitad del porcentaje de eliminación del RALLFA a 55°C, que fue el de mayor eficiencia, como se presenta en la Tabla 14.

Tabla 14. Porcentaje de eliminación de los parámetros medidos

Reactor	%DQO	%Sulfatos	%Sulfuros	%Fosfatos	%Nitratos
45°C	31.09	36.56	4.46	32.86	22.85
55°C	45.78	40.05	3.14	37.68	30.16
65°C	17.07	21.84	1.43	14.49	6.95

Respecto del segundo objetivo, evaluar la eficiencia de transformación de la materia orgánica medida como demanda química de oxígeno (DQO) a biogás, comparando los resultados con otros dos sistemas RALLFA a escala de laboratorio que operan a 45 y 55°C, se obtuvo la siguiente información a nivel experimental:

La producción de biogás registrada en el RALLFA_{65°C} fue de solo 1.99 ± 0.76 L d⁻¹, si se compara con la producción del RALLFA_{45°C} y RALLFA_{55°C} se observa que

representa la quinta parte de la producción de éstos, ya que ambos se encuentran en un intervalo de 9.66 ± 1.53 a 10.10 ± 1.65 , respectivamente.

En experimentos anteriores realizados a 35, 45 y 55°C, también el reactor a 55°C fue el más efectivo en la producción de biogás rico en metano obtenido de la transformación por parte de los consorcios anaerobios de los compuestos carbonosos presentes en las vinazas (Castro-González, 2004).

Por ello, puede concluirse que la temperatura es de gran importancia para la transformación de los diferentes compuestos carbonosos en biogás rico en metano y biomasa anaerobia (en una proporción de 90 y 10, respectivamente) y debido a que la temperatura no se logró estabilizarse a 65°C la producción de biogás fue baja.

Así mismo, puede concluirse de esta investigación que la principal utilidad del empleo de un RALLFA para el tratamiento de las aguas residuales de una operación unitaria como la destilación, con altas cargas orgánicas, es que se logra la transformación de al menos el 45.78% del contenido de compuestos carbonosos, en este caso disueltos, a biogás rico en metano. En los experimentos realizados en este tiempo, esto se logró a una temperatura de operación de 55°C.

El tratamiento anaerobio termofílico a 45, 55 y 65°C, de cualquier agua residual, independientemente de la competencia de los microorganismos sulfatorreductores y los metanogénicos, permite la degradación de materia orgánica más eficientemente.

5.2. Recomendaciones

1. Para llegar a un equilibrio en el reactor que opera a 65°C, es necesario:
 - Seguir alimentado el sistema con micronutrientes y con una baja carga orgánica para que el sistema se acondicione lentamente al sustrato.
 - Mantener el RALLFA a la temperatura de operación de 65°C, esto se puede lograr cambiando a la parrilla por otra que permita calentar más el agua de recirculación y enchaquetando debidamente el reactor.
2. Mantener las condiciones de operación en las que se encuentran los RALLFA de 45°C y 55°C, ya que estos dos reactores arrojaron resultados eficientes para este proyecto.
3. En cuanto a la medición de biogás, se debe tener precaución durante el muestreo evitando contaminar las soluciones, contenidas en los matraces, con las vinazas.
4. Alimentar debidamente los reactores ya que, al momento de introducir el influente, estos pueden llenarse de aire, provocando que los lodos salgan y la eficiencia de los RALLFA se vea afectada.

ANEXOS

A.1. Resultados experimentales

Tabla A1.1. Registro de valores de pH durante las 31 semanas

Semana	Fecha	pH				
		Vinaza cruda	Influyente	45°C	55°C	65°C
1	04-ene	4.54	4.59	8.16	8.29	-
	05-ene	3.24	3.27	7.29	7.24	-
	06-ene	3.35	3.40	7.53	7.15	-
	07-ene	4.52	4.49	7.29	7.03	-
	08-ene	5.58	4.59	7.14	7.17	-
2	11-ene	4.49	4.51	7.33	7.32	-
	12-ene	4.51	4.53	7.00	7.31	-
	13-ene	4.52	4.51	7.08	7.14	-
	14-ene	4.51	4.56	7.13	7.09	-
	15-ene	4.55	4.48	7.01	7.07	-
3	18-ene	4.50	4.50	7.58	7.40	-
	19-ene	4.52	4.51	7.41	7.23	-
	20-ene	4.49	4.47	7.31	7.46	-
	21-ene	4.47	4.48	7.32	7.40	-
	22-ene	4.56	4.55	8.35	8.29	-
4	25-ene	4.64	4.69	7.10	7.82	-
	26-ene	4.53	4.55	8.21	8.12	-
	27-ene	4.70	4.64	7.80	7.74	-
	28-ene	4.68	4.64	7.92	8.15	-
	29-ene	4.51	4.59	7.74	7.96	7.43
5	02-feb	4.48	4.52	8.43	8.60	4.47
	03-feb	4.52	4.54	7.77	7.80	6.32
	05-feb	4.52	4.39	8.01	8.03	6.01
6	08-feb	4.52	4.53	8.29	8.41	5.70
	09-feb	4.57	4.55	7.84	7.90	5.42
	10-feb	4.54	4.55	7.79	8.08	5.19
	11-feb	4.58	4.61	7.80	8.02	5.07
	12-feb	4.62	4.62	7.66	8.00	5.02
7	15-feb	4.62	4.60	7.98	8.07	5.49
	16-feb	4.57	4.58	7.85	7.55	5.34
	17-feb	4.54	4.57	7.96	8.16	5.31
	18-feb	4.61	4.62	7.93	8.17	5.53
	19-feb	4.22	4.26	7.67	7.98	5.07

Tabla A1.1. Registro de valores de pH durante las 31 semanas (continua...)

Semana	Fecha	pH				
		Vinaza cruda	Influyente	45°C	55°C	65°C
8	22-feb	4.75	4.68	7.85	7.98	5.44
	24-feb	4.78	4.73	7.81	8.08	5.33
	25-feb	4.62	4.54	7.57	7.80	5.19
	26-feb	4.60	4.54	7.68	7.92	5.28
9	01-mar	4.42	4.35	7.76	7.83	5.11
	02-mar	4.72	4.65	7.70	7.84	5.28
	03-mar	4.61	4.56	7.89	7.93	5.24
	04-mar	4.49	4.46	7.65	7.82	5.11
10	08-mar	4.46	4.44	7.78	7.94	5.62
	09-mar	4.56	4.50	7.81	7.79	6.22
	10-mar	4.62	4.56	7.50	7.81	5.68
	11-mar	4.44	4.37	7.30	7.70	6.10
11	15-mar	4.59	4.54	6.78	8.02	6.63
	16-mar	4.86	4.81	6.80	8.14	6.20
	17-mar	4.29	4.33	6.70	8.33	5.53
12	28-mar	4.59	4.52	6.92	7.86	5.51
	29-mar	4.60	4.53	6.71	7.78	5.38
	30-mar	4.57	4.55	6.82	7.86	5.56
	31-mar	4.65	4.55	6.58	7.88	5.44
	01-abr	4.61	4.54	6.46	7.78	5.35
13	05-abr	4.58	4.53	6.59	7.96	5.38
	06-abr	4.60	4.53	6.45	8.05	5.32
	08-abr	4.58	4.53	6.46	7.96	5.42
14	12-abr	4.72	4.65	6.79	8.13	6.19
	13-abr	4.72	4.65	6.87	7.66	6.99
	14-abr	4.67	4.61	7.09	7.80	7.22
15	19-abr	4.44	4.38	7.23	7.80	6.96
	20-abr	4.52	4.45	7.72	8.26	7.31
	21-abr	4.53	4.46	7.60	8.25	7.26
16	26-abr	4.57	4.50	7.62	8.02	6.99
	27-abr	4.48	4.43	7.70	8.41	7.15
	28-abr	4.49	4.43	7.34	8.15	6.89
	29-abr	4.66	4.60	7.70	8.20	7.20
17	03-may	4.59	4.55	8.16	8.30	7.16
	04-may	4.60	4.56	7.50	8.18	7.02
	06-may	4.64	4.59	7.58	8.05	6.94

Tabla A1.1. Registro de valores de pH durante las 31 semanas (continua...)

Semana	Fecha	pH				
		Vinaza cruda	Influyente	45°C	55°C	65°C
18	11-may	4.67	4.63	8.10	8.24	7.21
	12-may	4.68	4.62	7.76	7.94	6.77
	13-may	4.69	4.61	7.80	8.00	6.85
19	17-may	4.62	4.59	8.00	8.14	6.65
	18-may	4.66	4.64	8.01	8.02	6.09
	20-may	4.65	4.64	8.05	8.20	6.12
20	05-jul	4.38	4.40	7.59	7.23	4.40
	06-jul	4.39	4.43	7.76	8.10	6.66
	07-jul	4.40	4.40	7.58	7.65	7.01
21	21-jul	4.56	4.55	7.57	7.63	6.80
	25-jul	4.37	4.59	7.74	7.67	6.02
	26-jul	4.40	4.46	7.93	7.79	4.86
22	01-ago	4.48	4.54	8.09	8.00	6.71
	02-ago	4.50	4.54	7.79	7.98	6.57
	03-ago	4.58	4.57	7.91	8.00	6.07
	04-ago	4.51	4.55	7.68	7.90	5.74
23	11-ago	4.55	4.60	7.90	7.90	5.55
	12-ago	4.55	4.57	7.86	8.08	5.41
	15-ago	4.55	4.56	7.88	7.94	5.22
	16-ago	4.54	4.58	7.79	7.90	5.20
24	18-ago	4.52	4.54	7.67	8.13	7.38
	23-ago	4.58	4.57	8.02	8.00	6.92
	25-ago	4.67	4.65	7.95	8.08	7.23
	29-ago	4.56	4.67	7.87	7.87	7.28
25	01-sep	4.56	4.59	7.92	7.96	7.14
	05-sep	4.50	4.59	8.23	8.01	7.21
	06-sep	4.45	4.50	7.55	8.03	6.42
	08-sep	4.55	4.55	8.13	8.26	6.10
26	13-sep	4.56	4.54	7.97	8.05	6.15
	19-sep	4.55	4.53	7.97	7.99	6.68
	20-sep	4.50	4.55	8.07	8.36	6.23
	22-sep	4.60	4.61	8.02	8.18	6.28
27	26-sep	4.55	4.54	7.85	8.31	6.23
	27-sep	4.57	4.58	7.84	7.92	5.93
	28-sep	4.59	4.43	7.95	7.91	6.19
	29-sep	4.57	4.58	8.11	8.16	6.53

Tabla A1.1. Registro de valores de pH durante las 31 semanas (continua...)

Semana	Fecha	pH				
		Vinaza cruda	Influyente	45°C	55°C	65°C
28	03-oct	4.84	4.93	8.15	8.10	6.20
	04-oct	4.92	4.97	8.23	8.08	5.97
	06-oct	4.50	4.51	8.03	8.12	6.72
29	10-oct	4.95	4.94	8.15	8.02	6.03
	11-oct	4.45	5.00	8.06	8.05	5.96
	12-oct	4.30	4.31	8.07	8.10	6.15
	13-oct	4.22	4.38	8.00	8.12	6.24
30	17-oct	4.95	5.02	8.12	8.02	5.69
	18-oct	4.89	4.95	8.10	8.08	5.58
	19-oct	4.93	5.00	8.15	7.91	5.59
	20-oct	4.92	5.03	7.89	7.89	5.53
31	24-oct	4.94	5.01	8.10	7.84	5.86
	25-oct	4.94	4.98	7.91	7.89	5.72
	26-oct	4.93	4.98	8.00	7.86	6.80
	27-oct	4.97	5.01	7.89	7.79	6.25

Tabla A1.2. Registro de valores del factor de alcalinidad durante las 31 semanas

Semana	Fecha	Alcalinidad (α)		
		45°C	55°C	65°C
1	04-ene	0.30	0.30	-
	05-ene	0.40	0.40	-
	06-ene	0.40	0.40	-
	07-ene	0.40	0.40	-
	08-ene	0.40	0.40	-
2	11-ene	0.40	0.40	-
	12-ene	0.40	0.40	-
	13-ene	0.40	0.40	-
	14-ene	0.40	0.40	-
	15-ene	0.40	0.40	-
3	18-ene	0.40	0.40	-
	19-ene	0.40	0.40	-
	20-ene	0.40	0.40	-
	21-ene	0.40	0.40	-
	22-ene	0.30	0.30	-
4	25-ene	0.40	0.40	-
	26-ene	0.30	0.30	-
	27-ene	0.40	0.40	-
	28-ene	0.40	0.30	-
	29-ene	0.40	0.40	-
5	02-feb	0.30	0.30	-
	03-feb	0.40	0.40	0.50
	05-feb	0.30	0.30	0.50
6	08-feb	0.30	0.30	0.60
	09-feb	0.40	0.40	0.60
	10-feb	0.40	0.30	0.60
	11-feb	0.40	0.30	0.70
	12-feb	0.40	0.40	0.70
7	15-feb	0.40	0.30	0.60
	16-feb	0.40	0.40	0.60
	17-feb	0.40	0.30	0.60
	18-feb	0.40	0.30	0.60
	19-feb	0.40	0.40	0.70

Tabla A1.2. Registro de valores del factor de alcalinidad durante las 31 semanas (continua...)

Semana	Fecha	Alcalinidad (α)		
		45°C	55°C	65°C
8	22-feb	0.40	0.40	0.60
	23-feb	0.40	0.30	0.60
	24-feb	0.40	0.30	0.60
	25-feb	0.40	0.40	0.70
	26-feb	0.40	0.40	0.60
9	01-mar	0.40	0.40	0.70
	02-mar	0.50	0.40	0.70
	03-mar	0.50	0.40	0.60
	04-mar	0.50	0.40	0.70
10	08-mar	0.50	0.40	0.60
	09-mar	0.50	0.40	0.50
	10-mar	0.50	0.40	0.60
	11-mar	0.50	0.40	0.50
11	15-mar	0.50	0.40	0.50
	16-mar	0.50	0.30	0.50
	17-mar	0.50	0.30	0.60
	18-mar	0.50	0.30	0.60
12	28-mar	0.50	0.40	0.60
	29-mar	0.50	0.40	0.60
	30-mar	0.50	0.40	0.60
	31-mar	0.50	0.40	0.60
	01-abr	0.50	0.40	0.60
13	05-abr	0.50	0.40	0.60
	06-abr	0.50	0.30	0.60
	08-abr	0.50	0.40	0.60
14	12-abr	0.50	0.30	0.50
	13-abr	0.50	0.40	0.50
	14-abr	0.40	0.40	0.40
15	19-abr	0.40	0.40	0.50
	20-abr	0.40	0.30	0.40
	21-abr	0.40	0.30	0.40
16	26-abr	0.40	0.30	0.50
	27-abr	0.40	0.30	0.40
	28-abr	0.40	0.30	0.50
	29-abr	0.40	0.30	0.40

Tabla A1.2. Registro de valores del factor de alcalinidad durante las 31 semanas (continua...)

Semana	Fecha	Alcalinidad (α)		
		45°C	55°C	65°C
17	03-may	0.30	0.30	0.40
	04-may	0.40	0.30	0.40
	06-may	0.40	0.30	0.50
18	11-may	0.30	0.30	0.40
	12-may	0.40	0.40	0.50
	13-may	0.40	0.30	0.50
19	17-may	0.40	0.30	0.50
	18-may	0.30	0.30	0.50
	20-may	0.30	0.30	0.50
20	05-jul	0.40	0.40	0.50
	06-jul	0.40	0.30	0.50
	07-jul	0.40	0.40	0.40
21	21-jul	0.40	0.40	0.50
	25-jul	0.40	0.40	0.50
	26-jul	0.40	0.40	0.50
22	01-ago	0.30	0.40	0.50
	02-ago	0.40	0.40	0.50
	03-ago	0.30	0.40	0.50
	04-ago	0.40	0.40	0.60
23	11-ago	0.40	0.30	0.60
	12-ago	0.40	0.40	0.60
	15-ago	0.40	0.40	0.60
	16-ago	0.40	0.40	0.60
24	18-ago	0.40	0.30	0.40
	23-ago	0.40	0.30	0.40
	25-ago	0.40	0.30	0.40
	29-ago	0.40	0.40	0.40
25	01-sep	0.40	0.40	0.40
	05-sep	0.30	0.30	0.40
	06-sep	0.40	0.30	0.50
	08-sep	0.30	0.30	0.50
26	13-sep	0.40	0.30	0.50
	19-sep	0.40	0.40	0.50
	20-sep	0.30	0.30	0.50
	22-sep	0.30	0.30	0.50

Tabla A1.2. Registro de valores del factor de alcalinidad durante las 31 semanas (continua...)

Semana	Fecha	Alcalinidad (α)		
		45°C	55°C	65°C
27	26-sep	0.40	0.30	0.50
	27-sep	0.40	0.40	0.60
	28-sep	0.40	0.40	0.50
	29-sep	0.30	0.30	0.50
28	03-oct	0.30	0.30	0.50
	04-oct	0.30	0.30	0.60
	06-oct	0.30	0.30	0.50
29	10-oct	0.30	0.30	0.50
	11-oct	0.30	0.30	0.60
	12-oct	0.30	0.30	0.50
	13-oct	0.30	0.30	0.50
30	17-oct	0.30	0.30	0.60
	18-oct	0.30	0.30	0.60
	19-oct	0.30	0.40	0.60
	20-oct	0.40	0.40	0.60
31	24-oct	0.30	0.40	0.60
	25-oct	0.40	0.40	0.60
	26-oct	0.40	0.40	0.50
	27-oct	0.40	0.40	0.50

Tabla 15A1.3. Registro de valores de temperatura durante las 31 semanas

Semana	Fecha	Temperatura (°C)				
		Vinaza cruda	Influyente	45°C	55°C	65°C
1	04-ene	7.00	10.00	35.00	40.00	-
	05-ene	6.00	10.00	45.00	50.00	-
	06-ene	6.00	8.00	45.00	48.00	-
	07-ene	6.00	12.00	40.00	50.00	-
	08-ene	7.00	11.00	40.00	49.00	-
2	11-ene	7.00	11.00	20.00	35.00	-
	12-ene	5.00	10.00	42.00	46.00	-
	13-ene	6.00	11.00	44.00	52.00	-
	14-ene	6.00	11.00	39.00	53.00	-
	15-ene	5.00	10.00	42.00	54.00	-
3	18-ene	4.00	8.00	41.00	50.00	-
	19-ene	3.00	9.00	40.00	47.00	-
	20-ene	3.00	9.00	37.00	49.00	-
	21-ene	3.00	10.00	40.00	48.00	-
	22-ene	3.00	9.00	42.00	47.00	-
4	25-ene	3.00	10.00	39.00	50.00	-
	26-ene	3.00	10.00	38.00	45.00	-
	27-ene	4.00	9.00	45.00	50.00	-
	28-ene	2.00	10.00	45.00	47.00	-
	29-ene	5.00	10.00	41.00	53.00	38.00
5	02-feb	4.00	11.00	38.00	40.00	20.00
	03-feb	4.00	12.00	39.00	49.00	20.00
	05-feb	4.00	11.00	40.00	52.00	35.00
6	08-feb	2.00	8.00	38.00	50.00	30.00
	09-feb	3.00	10.00	43.00	48.00	30.00
	10-feb	3.00	10.00	43.00	50.00	30.00
	11-feb	3.00	8.00	41.00	50.00	30.00
	12-feb	3.00	10.00	43.00	51.00	31.00
7	15-feb	3.00	9.00	42.00	55.00	33.00
	16-feb	4.00	11.00	41.00	23.00	35.00
	17-feb	3.00	11.00	38.00	52.00	34.00
	18-feb	3.00	10.00	41.00	47.00	31.00
	19-feb	3.00	11.00	38.00	52.00	35.00

**Tabla A1.3. Registro de valores de temperatura durante las 31 semanas
(continua...)**

Semana	Fecha	Temperatura (°C)				
		Vinaza cruda	Influyente	45°C	55°C	65°C
8	22-feb	3.00	12.00	40.00	52.00	35.00
	23-feb	2.00	11.00	43.00	53.00	35.00
	24-feb	12.00	2.00	45.00	53.00	36.00
	25-feb	12.00	2.00	42.00	50.00	35.00
	26-feb	2.00	12.00	40.00	52.00	36.00
9	01-mar	3.00	12.00	40.00	53.00	36.00
	02-mar	2.00	11.00	40.00	52.00	34.00
	03-mar	4.00	12.00	40.00	52.00	30.00
	04-mar	4.00	13.00	40.00	52.00	25.00
10	08-mar	5.00	13.00	40.00	52.00	30.00
	09-mar	4.00	12.00	40.00	51.00	39.00
	10-mar	5.00	12.00	40.00	51.00	35.00
	11-mar	5.00	12.00	40.00	51.00	35.00
11	15-mar	5.00	12.00	41.00	50.00	36.00
	16-mar	5.00	12.00	41.00	53.00	37.00
	17-mar	5.00	13.00	43.00	55.00	38.00
	18-mar	14.00	6.00	43.00	54.00	37.00
12	28-mar	5.00	14.00	43.00	54.00	38.00
	29-mar	7.00	14.00	43.00	55.00	30.00
	30-mar	7.00	15.00	42.00	54.00	30.00
	31-mar	6.00	15.00	52.00	47.00	30.00
	01-abr	6.00	15.00	56.00	54.00	22.00
13	05-abr	6.00	10.00	44.00	54.00	22.00
	06-abr	7.00	15.00	45.00	54.00	22.00
	08-abr	8.00	15.00	45.00	54.00	22.00
14	12-abr	7.00	15.00	45.00	54.00	23.00
	13-abr	7.00	16.00	46.00	50.00	23.00
	14-abr	7.00	15.00	45.00	55.00	23.00
15	19-abr	7.00	15.00	44.00	54.00	22.00
	20-abr	7.00	16.00	44.00	54.00	21.00
	21-abr	7.00	14.00	45.00	53.00	20.00
16	26-abr	7.00	14.00	45.00	53.00	20.00
	27-abr	7.00	15.00	45.00	53.00	21.00
	28-abr	7.00	15.00	45.00	54.00	21.00
	29-abr	7.00	16.00	45.00	53.00	22.00

**Tabla A1.3. Registro de valores de temperatura durante las 31 semanas
(continua...)**

Semana	Fecha	Temperatura (°C)				
		Vinaza cruda	Influyente	45°C	55°C	65°C
17	03-may	8.00	17.00	45.00	55.00	23.00
	04-may	8.00	15.00	45.00	55.00	24.00
	06-may	8.00	15.00	45.00	54.00	23.00
18	11-may	7.00	17.00	45.00	54.00	22.00
	12-may	7.00	15.00	45.00	54.00	22.00
	13-may	7.00	16.00	43.00	52.00	20.00
19	17-may	7.00	15.00	44.00	53.00	21.00
	18-may	8.00	15.00	46.00	54.00	20.00
	20-may	8.00	16.00	45.00	55.00	22.00
20	05-jul	7.00	14.00	45.00	52.00	51.00
	06-jul	9.00	15.00	45.00	52.00	51.00
	07-jul	7.00	15.00	45.00	52.00	50.00
21	21-jul	14.00	7.00	45.00	51.00	51.00
	25-jul	8.00	14.00	45.00	52.00	51.00
	26-jul	8.00	14.00	45.00	52.00	50.00
22	01-ago	7.00	15.00	46.00	54.00	37.00
	02-ago	7.00	15.00	46.00	55.00	52.00
	03-ago	7.00	15.00	45.00	54.00	52.00
	04-ago	7.00	15.00	46.00	54.00	52.00
23	11-ago	7.00	15.00	43.00	52.00	52.00
	12-ago	7.00	15.00	47.00	54.00	40.00
	15-ago	7.00	10.00	44.00	52.00	61.00
	16-ago	7.00	15.00	45.00	54.00	63.00
24	18-ago	7.00	15.00	45.00	55.00	65.00
	23-ago	8.00	14.00	45.00	55.00	65.00
	25-ago	7.00	15.00	44.00	53.00	50.00
	29-ago	7.00	15.00	36.00	52.00	50.00
25	01-sep	7.00	14.00	45.00	55.00	60.00
	05-sep	8.00	15.00	44.00	52.00	63.00
	06-sep	8.00	14.00	45.00	54.00	64.00
	08-sep	7.00	14.00	45.00	54.00	63.00
26	13-sep	7.00	15.00	45.00	54.00	63.00
	19-sep	7.00	15.00	44.00	53.00	63.00
	20-sep	8.00	15.00	44.00	53.00	61.00
	22-sep	8.00	14.00	43.00	52.00	62.00

**Tabla A1.3. Registro de valores de temperatura durante las 31 semanas
(continua...)**

Semana	Fecha	Temperatura (°C)				
		Vinaza cruda	Influyente	45°C	55°C	65°C
27	26-sep	7.00	15.00	44.00	53.00	63.00
	27-sep	7.00	14.00	45.00	55.00	66.00
	28-sep	8.00	15.00	45.00	53.00	65.00
	29-sep	7.00	15.00	45.00	54.00	65.00
28	03-oct	7.00	14.00	45.00	54.00	65.00
	04-oct	8.00	15.00	45.00	55.00	66.00
	06-oct	7.00	14.00	45.00	55.00	63.00
29	10-oct	7.00	15.00	44.00	53.00	65.00
	11-oct	7.00	14.00	45.00	54.00	64.00
	12-oct	7.00	14.00	45.00	55.00	64.00
	13-oct	7.00	15.00	46.00	54.00	66.00
30	17-oct	7.00	15.00	44.00	55.00	64.00
	18-oct	8.00	15.00	44.00	54.00	61.00
	19-oct	8.00	16.00	45.00	55.00	64.00
	20-oct	7.00	14.00	42.00	53.00	63.00
31	24-oct	7.00	15.00	45.00	55.00	65.00
	25-oct	7.00	14.00	43.00	54.00	62.00
	26-oct	7.00	14.00	43.00	53.00	63.00
	27-oct	6.00	13.00	40.00	51.00	60.00

Tabla A1.4. Registro de valores de sulfatos durante las 31 semanas

Semana	Fecha	Sulfatos (mg L ⁻¹)				
		Vinaza cruda	Influyente	45°C	55°C	65°C
2	13-ene	25914.75	10906.56	9972.13	10201.64	-
3	21-ene	15259.02	15242.62	4988.52	5775.41	-
	22-ene	19275.41	8824.59	6504.92	5152.46	-
4	25-ene	19791.80	9857.38	6660.66	6873.77	-
	29-ene	10636.07	9177.05	7619.67	7144.26	-
5	02-feb	19422.95	8890.16	6365.57	5775.41	4570.49
	05-feb	9800.00	3914.75	2259.02	1849.18	2996.72
6	08-feb	18849.18	6734.43	4177.05	3685.25	3373.77
	10-feb	15734.43	6357.38	6103.28	5185.25	4496.72
7	15-feb	13783.61	9127.87	5160.66	5881.97	7029.51
	17-feb	18595.08	9759.02	7800.00	6414.75	7996.72
8	23-feb	13144.26	5955.74	3537.70	4029.51	5668.85
	25-feb	19259.02	8800.00	8160.66	7029.51	10849.18
9	01-mar	20283.61	8381.97	6636.07	6496.72	7685.25
	03-mar	17734.43	10750.82	7446.36	4750.82	8922.95
10	08-mar	19062.30	8070.49	7444.00	6767.21	8037.70
	10-mar	17922.95	10037.70	7144.26	5652.46	6922.95
11	15-mar	19931.15	10144.26	10504.92	5619.67	7898.36
	17-mar	21898.36	11463.93	7898.36	9496.72	7791.80
12	31-mar	21808.20	10685.25	7381.97	11291.80	9045.90
	01-abr	19611.48	10406.56	7144.26	6439.34	8521.31
13	06-abr	21029.51	11677.05	9488.52	6095.08	7963.93
14	12-abr	21291.80	12029.51	5127.87	6373.77	8832.79
15	21-abr	19685.25	8963.93	5488.52	6316.39	10259.02
16	26-abr	24275.41	13324.59	6734.43	6881.97	15308.20
	27-abr	20988.52	11340.98	8013.11	7562.30	9291.80
17	03-may	20849.18	9340.98	5963.93	5775.41	7562.30
18	11-may	24431.15	11750.82	9578.69	4136.07	6718.03
19	20-may	24431.15	11750.82	9578.69	4136.07	6718.03
20	06-jul	19873.77	8586.89	6062.30	6750.82	10365.57
21	21-jul	20013.11	9431.15	5693.44	5898.36	7628.29
	25-jul	25455.74	8455.74	5242.62	5308.20	8215.66
	26-jul	19668.85	9349.18	5127.87	5095.08	7562.30
22	01-ago	20160.66	8668.85	6463.93	5259.02	8529.51
	03-ago	21914.75	9619.67	5422.95	4947.54	7045.90

**Tabla A1.4. Registro de valores de sulfatos durante las 31 semanas
(continua...)**

Semana	Fecha	Sulfatos (mg L ⁻¹)				
		Vinaza cruda	Influyente	45°C	55°C	65°C
23	11-ago	20259.02	8070.49	4906.56	5037.70	8718.03
	16-ago	20439.34	17701.64	6177.05	9914.75	16734.43
24	18-ago	17701.64	6357.38	5431.15	4119.67	7660.66
	23-ago	20947.54	10750.82	8562.30	3045.90	8881.97
	25-ago	26972.13	17316.39	5824.59	5988.52	8086.89
25	01-sep	18963.93	8029.51	5603.28	6037.70	9873.77
	08-sep	22931.15	9570.49	3636.07	4340.98	5398.36
26	13-sep	20603.28	8947.54	5152.46	5480.33	5554.10
	20-sep	20340.34	8070.49	4021.31	4037.70	2300.00
	22-sep	21668.85	8144.26	5488.52	5931.15	5865.57
27	27-sep	20947.54	9193.44	5504.92	6029.51	6078.69
	29-sep	24422.95	10750.82	5873.77	6127.87	10578.69
28	04-oct	24095.08	15095.08	5242.62	5636.07	4947.54
	06-oct	21029.51	15095.08	4783.61	4816.39	8898.36
29	11-oct	16357.38	7701.64	4373.77	4767.21	6521.31
	13-oct	16800.00	5881.97	4226.23	5078.69	5701.64
30	18-oct	15242.62	5160.66	3390.16	4373.77	5521.31
	20-oct	15767.21	9193.44	5504.92	6029.51	6078.69
31	25-oct	14619.67	5881.97	4226.23	5078.69	5537.70
	27-oct	14177.05	5455.74	3521.31	3898.36	3947.54

Tabla A1.5. Registro de valores de sulfuros durante las 31 semanas

Semana	Fecha	Sulfuros (mg L ⁻¹)				
		Vinaza cruda	Influente	45°C	55°C	65°C
4	28-ene	4534.40	5062.40	4798.40	4904.00	-
5	03-feb	4640.00	5168.00	4587.20	4481.60	-
	05-feb	4956.80	4112.00	3584.00	5326.40	4640.00
6	09-feb	4323.20	4640.00	4587.20	4376.00	4904.00
	12-feb	4851.20	5062.40	5484.80	5696.00	4956.80
7	18-feb	4798.40	5326.40	5009.60	5379.20	5432.00
	19-feb	4851.20	4904.00	5062.40	4798.40	4956.80
8	24-feb	4640.00	5696.00	4904.00	4851.20	4904.00
9	02-mar	5168.00	4956.80	4893.50	4904.00	4640.00
	04-mar	5696.00	6752.00	4712.40	6065.60	5696.00
10	09-mar	4534.40	4428.80	4235.50	4323.20	4640.00
11	16-mar	4640.00	5168.00	5326.40	5062.40	5484.80
	18-mar	5379.20	5326.40	4376.00	4481.60	5273.60
12	29-mar	4745.60	4904.00	5009.60	4956.80	5062.40
	30-mar	4587.20	4640.00	4481.60	4112.00	4323.20
13	05-abr	4376.00	4006.40	4587.20	4217.60	4112.00
	08-abr	4376.00	4640.00	4956.80	4376.00	4956.80
14	13-abr	4112.00	4640.00	4745.60	4323.20	4376.00
	14-abr	4851.20	5009.60	4323.20	4376.00	4270.40
15	19-abr	4323.20	4323.20	4376.00	4640.00	4640.00
	20-abr	4692.80	4481.60	4376.00	4164.80	4428.80
16	28-abr	4904.00	4481.60	4481.60	4745.60	4851.20
	29-abr	4428.80	4481.60	4164.80	4904.00	4956.80
17	04-may	4640.00	4587.20	4270.40	4534.40	4481.60
	06-may	4481.60	4640.00	4112.00	4640.00	4640.00
18	12-may	4059.20	4164.80	4217.60	4376.00	4640.00
	13-may	4640.00	4376.00	4428.80	4692.80	4745.60
19	18-may	4059.20	4112.00	4270.40	4640.00	4904.00
20	05-jul	4587.20	4481.60	4534.40	4481.60	4376.00
	07-jul	4640.00	4692.80	4745.60	4692.80	4640.00
21	21-jul	4534.40	4587.20	4481.60	4323.20	4450.00
	25-jul	4692.80	4904.00	4534.40	4640.00	4800.00
	26-jul	4956.80	4904.00	4481.60	4481.60	4745.60
22	02-ago	4692.80	4640.00	4534.40	4376.00	4587.20
	04-ago	4640.00	4587.20	4323.20	4323.20	4481.60

**Tabla A1.5. Registro de valores de sulfuros durante las 31 semanas
(continua...)**

Semana	Fecha	Sulfuros (mg L ⁻¹)				
		Vinaza cruda	Influyente	45°C	55°C	65°C
23	12-ago	4481.60	4587.20	4481.60	4587.20	4692.80
	16-ago	4640.00	4534.40	4376.00	4428.80	4481.60
24	23-ago	4481.60	4904.00	4640.00	4587.20	4534.40
	25-ago	4640.00	4587.20	4376.00	4376.00	4428.80
25	01-sep	4481.60	4534.40	4587.20	4481.60	4376.00
	06-sep	4640.00	4376.00	4323.20	4376.00	4164.80
	08-sep	4798.40	4640.00	4428.80	4481.60	4534.40
26	13-sep	4640.00	4428.80	4112.00	4270.40	4376.00
	20-sep	4720.40	4890.20	4481.60	4376.00	4428.80
	22-sep	4640.00	4376.00	4217.60	4112.00	4270.40
27	27-sep	4745.60	4481.60	4270.40	4164.80	4376.00
	29-sep	4904.00	4534.40	4376.00	4112.00	4323.20
28	04-oct	4640.00	4376.00	4112.00	4059.20	4164.80
	06-oct	4640.00	4481.60	4217.60	4217.60	4376.00
29	11-oct	4376.00	4270.40	4006.40	3900.80	4112.00
	13-oct	4376.00	4217.60	4059.20	4112.00	4164.80
30	18-oct	4640.00	4376.00	4006.40	4112.00	4217.60
	20-oct	4745.60	4534.40	4164.80	4059.20	4376.00
31	25-oct	4640.00	4376.00	4112.00	4164.80	4270.40
	27-oct	4640.00	4534.40	4112.00	4217.60	4376.00

Tabla A1.6. Registro de valores de DQO durante las 31 semanas

Semana	Fecha	DQO (mg L ⁻¹)				
		Vinaza cruda	Influyente	45°C	55°C	65°C
1	07-ene	157800.00	96300.00	70800.00	61050.00	-
2	11-ene	139050.00	62050.00	29050.00	27050.00	-
	14-ene	117050.00	72050.00	45550.00	37300.00	-
3	21-ene	107050.00	56550.00	26050.00	36550.00	-
	22-ene	83800.00	54550.00	27050.00	34300.00	-
4	25-ene	115300.00	78300.00	43800.00	53300.00	-
	29-ene	152300.00	100050.00	46050.00	41800.00	-
5	02-feb	136050.00	94800.00	74800.00	50050.00	36300.00
	05-feb	151050.00	83300.00	46300.00	55550.00	54800.00
6	08-feb	121800.00	71550.00	55550.00	42300.00	46050.00
	11-feb	112800.00	63050.00	44300.00	32800.00	52050.00
7	16-feb	137800.00	72800.00	39300.00	31050.00	62050.00
	18-feb	146800.00	96050.00	47800.00	55800.00	60300.00
8	22-feb	140300.00	95800.00	54300.00	90050.00	89800.00
	25-feb	124050.00	69550.00	39550.00	36550.00	53800.00
9	01-mar	133550.00	85050.00	62550.00	83300.00	38550.00
	03-mar	133550.00	67050.00	62949.00	36800.00	78800.00
10	08-mar	82800.00	80550.00	63675.00	48050.00	58800.00
	10-mar	83800.00	46800.00	68050.00	4050.00	21050.00
11	15-mar	120050.00	73550.00	63800.00	14300.00	28800.00
	17-mar	104800.00	68050.00	55550.00	32550.00	44300.00
12	31-mar	138550.00	85800.00	68050.00	43550.00	66050.00
	01-abr	122050.00	77550.00	79300.00	35550.00	81800.00
13	06-abr	139300.00	102050.00	75300.00	73800.00	78050.00
14	12-abr	138550.00	80800.00	67300.00	41050.00	71550.00
15	21-abr	110550.00	71050.00	60800.00	27800.00	60550.00
16	26-abr	121300.00	87050.00	73300.00	61050.00	72300.00
	27-abr	125550.00	76800.00	65050.00	33050.00	77550.00
17	03-may	134800.00	89300.00	64550.00	51050.00	81800.00
18	11-may	134050.00	57050.00	37550.00	30300.00	52300.00
19	17-may	65550.00	43050.00	11800.00	23300.00	56800.00
	20-may	134050.00	57050.00	37550.00	30300.00	52300.00
20	06-jul	137550.00	73550.00	71550.00	58550.00	101050.00
21	21-jul	105550.00	60300.00	68050.00	35050.00	78050.00
	26-jul	92300.00	43550.00	7050.00	17300.00	39050.00

Tabla A1.6. Registro de valores de DQO durante las 31 semanas (continua...)

Semana	Fecha	DQO (mg L ⁻¹)				
		Vinaza cruda	Influyente	45°C	55°C	65°C
22	01-ago	131550.00	80300.00	41050.00	31300.00	69050.00
	03-ago	131050.00	79800.00	42800.00	44800.00	75550.00
23	18-ago	128800.00	77800.00	56800.00	44550.00	75050.00
24	25-ago	134300.00	83550.00	50550.00	41050.00	72050.00
	29-ago	140800.00	93050.00	45050.00	36300.00	60751.00
25	01-sep	109300.00	61550.00	29300.00	20550.00	44550.00
26	13-sep	129300.00	83050.00	28050.00	32550.00	57050.00
27	26-sep	130302.00	84052.00	29052.00	33552.00	58052.00
	29-sep	131809.00	80559.00	41309.00	31559.00	69309.00
28	03-oct	136545.00	72545.00	70545.00	57545.00	100045.00
	06-oct	110679.00	71179.00	60929.00	27929.00	60679.00
29	10-oct	110751.00	71251.00	61001.00	28001.00	60751.00
	13-oct	130380.00	84130.00	29130.00	33630.00	58130.00
30	17-oct	121458.00	87208.00	73458.00	61208.00	72458.00
	20-oct	120678.00	86428.00	72678.00	60428.00	71678.00
31	24-oct	120813.00	86563.00	72813.00	60563.00	71813.00
	27-oct	111749.00	72249.00	61999.00	28999.00	61749.00

Tabla A1.7. Registro de valores de producción de biogás de las últimas 14 semanas

Semana	Fecha	Biogás (L d ⁻¹)		
		45°C	55°C	65°C
18	11-may	9.84	8.40	1.20
	12-may	9.60	8.54	1.34
	13-may	11.57	11.64	1.92
19	17-may	10.80	9.89	1.32
	18-may	12.00	11.90	1.63
	20-may	9.96	10.80	1.68
20	05-jul	10.56	9.12	2.16
	06-jul	9.60	9.38	1.20
	07-jul	10.20	9.84	1.56
21	21-jul	9.12	10.80	1.68
	25-jul	12.00	10.32	1.32
	26-jul	11.40	9.60	1.56
22	01-ago	9.60	8.40	1.68
	02-ago	10.80	12.00	1.56
	03-ago	12.00	10.80	1.68
	04-ago	9.36	9.60	1.92
23	11-ago	10.80	9.36	2.40
	12-ago	10.20	8.40	2.88
	15-ago	9.36	10.68	2.40
	16-ago	10.80	12.00	1.80
24	18-ago	12.00	10.32	1.92
	23-ago	9.36	14.40	2.40
	25-ago	10.80	7.44	2.88
	29-ago	11.04	10.80	2.52
25	01-sep	10.20	12.36	2.88
	05-sep	9.60	9.84	2.40
	06-sep	12.00	7.20	1.80
	08-sep	9.89	9.60	1.20
26	13-sep	9.36	10.08	2.88
	19-sep	10.92	10.56	2.16
	20-sep	8.52	9.12	2.40
	22-sep	6.24	7.20	3.00

Tabla A1.7. Registro de valores de producción de biogás de las últimas 14 semanas (continua...)

Semana	Fecha	Biogás (L d ⁻¹)		
		45°C	55°C	65°C
27	26-sep	7.20	10.80	1.20
	27-sep	8.40	9.60	2.40
	28-sep	10.20	15.60	0.60
	29-sep	7.44	10.32	3.00
28	03-oct	9.60	12.00	0.60
	04-oct	7.68	10.68	3.60
	06-oct	9.36	9.96	2.88
29	10-oct	8.88	10.08	0.48
	11-oct	9.36	9.84	2.52
	12-oct	7.20	9.60	1.20
	13-oct	8.88	9.72	3.00
30	17-oct	6.00	7.20	1.20
	18-oct	9.00	9.60	2.52
	19-oct	6.00	7.20	1.20
	20-oct	8.88	9.84	2.52
31	24-oct	8.16	11.28	1.80
	25-oct	11.04	9.84	3.60
	26-oct	10.80	12.00	1.20
	27-oct	8.88	9.60	2.88

Tabla A1.8. Registro de valores de nitratos durante las últimas 19 semanas

Semana	Fecha	Nitratos (mg L ⁻¹)				
		Vinaza cruda	Influyente	45°C	55°C	65°C
13	05-abr	350.45	120.45	108.56	95.20	119.20
14	13-abr	200.54	134.45	98.45	85.45	120.30
15	19-abr	299.45	111.42	84.23	95.45	105.45
16	26-abr	398.87	122.11	104.89	70.56	119.20
17	04-may	261.36	145.65	105.90	102.21	130.48
18	13-may	345.45	120.55	99.80	88.25	118.00
19	20-may	312.95	132.96	111.54	99.45	130.45
20	05-jul	399.45	119.80	96.45	94.00	120.56
21	26-jul	400.48	150.74	99.45	100.14	140.15
22	04-ago	350.68	140.78	102.78	80.21	120.35
23	16-ago	310.56	135.95	96.1	85.74	115.49
24	25-ago	348.87	142.11	102.10	75.60	122.30
25	08-sep	297.95	117.96	96.54	84.45	115.45
26	13-sep	300.45	130.78	97.1	80.3	115.7
27	29-sep	306.45	118.42	91.23	102.45	112.45
28	04-oct	316.56	141.95	102.1	91.74	121.49
29	12-oct	302.95	122.96	101.54	89.45	120.45
30	20-oct	293.95	113.96	92.54	80.45	111.45
31	27-oct	311.45	123.42	96.23	107.45	117.45

Tabla A1.9. Registro de valores de fosfatos durante las últimas 19 semanas

Semana	Fecha	Fosfatos (mg L ⁻¹)				
		Vinaza cruda	Influyente	45°C	55°C	65°C
13	05-abr	5102.36	3000.46	1996.00	1645.56	2569.65
14	14-abr	6123.56	3656.60	1946.25	1589.23	2453.30
15	21-abr	5948.19	3462.87	1823.78	1875.12	2578.35
16	27-abr	5260.40	3215.36	1799.89	2006.45	2645.36
17	06-may	6004.65	2999.45	2050.45	1896.30	2563.45
18	11-may	5879.65	2874.45	1925.45	1771.30	2438.45
19	17-may	5014.30	3123.65	1820.45	1658.12	2984.56
20	06-jul	5315.70	2126.50	1850.74	1668.99	2078.65
21	25-jul	4999.65	2634.65	1542.36	1659.45	2126.40
22	03-ago	6109.65	3104.45	2155.45	2001.30	2668.45
23	12-ago	5804.65	2799.45	1850.45	1696.30	2363.45
24	29-ago	5854.65	2849.45	1900.45	1746.30	2413.45
25	06-sep	5465.70	2276.50	2000.74	1818.99	2228.65
26	13-sep	5503.70	2314.50	2038.74	1856.99	2266.65
27	28-sep	5902.65	2897.45	1948.45	1794.30	2461.45
28	04-oct	6052.65	3047.45	2098.45	1944.30	2611.45
29	13-oct	5228.70	2039.50	1763.74	1581.99	1991.65
30	19-oct	5859.65	2854.45	1905.45	1751.30	2418.45
31	27-oct	5923.17	2917.97	1968.97	1814.82	2481.97

A.2. Disposición controlada de los residuos producidos en esta investigación



Fig. A2.1. Diagrama de disposición controlada de los residuos producidos en esta investigación

R1.- Muestras para medir pH, temperatura y alcalinidad.

Como se trata de vinazas, sólo se neutralizaron y vertieron a la tarja del laboratorio, para que llegaran diluidos a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ciudad Universitaria.

R2, R3, R4, R5, R6.- Residuos peligros de la digestión de dicromato de potasio y sulfatos de mercurio y plata en ácido sulfúrico.

Se vacían en su respectivo contenedor, bien etiquetado y se envían a la Unidad de Gestión Ambiental (UGA) de la Facultad de Química para su disposición controlada.

BIBLIOGRAFÍA

- Castro-González, A. 2004. Efecto de la temperatura en la actividad metanogénica y sulfatorreductora de consorcios microbianos en condiciones anaerobias / Temperature effect on methanogenic and sulfatoreducing activity in microbial consortia at anaerobic conditions. Tesis Doctoral en Ingeniería Química. UNAM, Facultad de Química. México D.F., México.
- Castro-González, A., Durán-de-Bazúa, C. 2001. Adaptación de biomasa anaerobia a un nuevo sustrato en un reactor anaerobio de lecho de lodos. *Tecnol. Ciencia Ed. (IMIQ)*, 16(1):49-55.
- Castro-González, A., Bernal-González, M., Durán-de-Bazúa, C. 2004. Tratamiento de vinazas de plantas destiladoras de alcohol usando consorcios microbianos anaerobios. *Bebidas Mexicanas*, 13(3):12-14, 16-20, 22-25 (2004)
- 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 profesional (Química). Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM. Defensa: diciembre 4. Cuautitlán Izcalli, México.
- DOF. 2013. Análisis de agua – Medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba. Norma Mexicana NMX-AA-007-SCFI-2013. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 2011. Análisis de agua - Determinación del pH – Método de Prueba. Norma Mexicana NMX-AA-008-SCFI-2011. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 2009. Norma Oficial Mexicana. Modificación del inciso 0, el encabezado de la Tabla 13, el último párrafo del Anexo B y el apartado Signo decimal de la Tabla 21 de la Norma Oficial Mexicana NOM-008-SCFI-2002, Sistema general de unidades de medida. Jueves 24 de septiembre de 2009. Diario Oficial (Primera Sección). Tabla 21 - Reglas para la escritura de los números y su signo decimal. Signo decimal. El signo decimal debe ser una coma sobre la línea (,) o un punto sobre la línea (.). Si la magnitud de un número es menor que la unidad, el signo decimal debe ser precedido por un cero. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. México D.F. México.
- DOF. 2001a. Análisis de aguas-Determinación de fósforo en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de Prueba. Norma Mexicana NMX-AA-029-SCFI-2001. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.

- DOF. 2001b. Análisis de aguas-Determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de Prueba. Norma Mexicana NMX-AA-030-SCFI-2001. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 2001c. Análisis de aguas-Determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - Método de Prueba. Norma Mexicana NMX-AA-079-SCFI-2001. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 2001d. Análisis de aguas-Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de Prueba. Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos DOF.
- DOF. 2001e. Análisis de agua- Determinación de acidez y alcalinidad e aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba NMX-AA-036-SCFI-2001 Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 1997. Aguas tratadas. Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Norma Oficial Mexicana NOM-003- ECOL-1997. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 1982. Análisis de aguas- Determinación de sulfuros – Método de Prueba. Norma Mexicana NMX-AA-084-1982. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 1981. Análisis de aguas- Determinación del ión sulfato – Método de Prueba. Norma Mexicana NMX-AA-074-1981. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- Durán, C., Noyola, A., Poggi, H., Zedillo, L.E. 1994a. Water and energy use in sugar mills and ethyl alcohol plants. In Efficient Water Use. Eds. H. Garduño-Velasco, F. Arreguín-Cortés. Pub. UNESCO-ROSTLAC. ISBN 92-9089-340-0. Pp. 361-370. Montevideo, Uruguay.
- Durán-de-Bazúa, C., Medellín, P., Noyola, A., Poggi-Varaldo, H., Zedillo, L.E. 1988. Caracterización de vinazas y su degradación en un sistema combinado de tres reactores anaerobios y un reactor aerobio de biodiscos. Tecnol. Ciencia Ed. (IMIQ), 3(2):33-43.
- Durán-de-Bazúa, C., Noyola, A., Poggi-Varaldo, H. M., Zedillo, L. E. 1991. Biodegradation of process industry wastewater. Case problem: Sugarcane

- industry. En *Biological Degradation of Wastes*. Ed. A. M. Martin. Ch. 17. Pp. 363-388. Elsevier Science Pub.Ltd. ISBN 1-85166635-4. London, England.
- Durán-de-Bazúa, C., Noyola-Robles, A., Poggi-Varaldo, H., Zedillo-Ponce-de-León, L.E. 1994. Paquete tecnológico para tratar vinazas de ingenios azucareros-alcoholeros 1994b: Sistema anaerobio/aerobio. *Rev. IMIQ*, 35(8):42-47.
- Poblano-Flores, A. 2015. Contenido de metano en biogás producido a nivel de laboratorio en tres reactores de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) operando a 45, 55 y 65°C. Tesis profesional (Ingeniería Química). UNAM, Facultad de Química. Defensa: mayo 22. México, D.F., México.
- Vergara-Salgado, S. 2010. Identificación de bacterias metanogénicas y sulfatorreductoras en tres reactores de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) operando a 45, 55 y 65°C. Tesis profesional (Biología), Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, FESZ, UNAM. Ciudad de México, México.
- 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 (Ingeniería Química). UNAM, Facultad de Química. Defensa: mayo 8. Ciudad de México, México.