

Digestión anaerobia de vinaza pura cubana en un sistema combinado UASB-filtro anaerobio

Ania Cabrera Díaz e-mail: ania@quimica.cujae.edu.cu
Centro de Estudio de Ingeniería de Procesos (CIPRO), Facultad de Ingeniería Química (*),
Maite Urbano Quintero e-mail: maiteuq@laboratorio.cubacontrol.com.cu
Laboratorio de Supervisión de la Calidad CUBACONTROL S.A. La Habana. Cuba
Ileana Pereda Reyes e-mail: ileana@quimica.cujae.edu.cu
Centro de Estudio de Ingeniería de Procesos (CIPRO), Facultad de Ingeniería Química (*),
Miguel Ángel Díaz Marrero e-mail: migueld@quimica.cujae.edu.cu
Centro de Estudio de Ingeniería de Procesos (CIPRO), Facultad de Ingeniería Química (*),
Ivonne Chávez Fando e-mail: ivonne@quimica.cujae.edu.cu
Centro de Estudio de Ingeniería de Procesos (CIPRO), Facultad de Ingeniería Química (*),
(*) Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae). Habana. Cuba.

RESUMEN

Este trabajo evalúa por primera vez el empleo de un sistema anaerobio de reactores UASB-FAFA para el tratamiento de vinazas puras, con y sin ajuste de pH y sin adicionar nutrientes. La digestión anaerobia se desarrolló satisfactoriamente sin necesidad de diluir las vinazas ni adicionar nutrientes. Los mejores resultados se lograron con ajuste de pH al incrementarse la carga orgánica volumétrica (B_v). La condición estable de operación para el sistema UASB-FAFA resultó a B_v de 10 y 3 kgDQO $m^{-3}d^{-1}$ respectivamente. El rendimiento de metano alcanzado fue de 0,236 y 0,159 $Nm^3CH_4 kg^{-1}DQO_e$. El uso de este sistema de reactores permitió incrementar la eficiencia en la reducción de la DQO en más del 90%, lográndose una mejor disposición de los efluentes anaerobios y mayor recuperación de energía.

Palabras clave: carga orgánica volumétrica, digestión anaerobia, metano, vinaza pura.

Anaerobic digestion of Cuban raw vinasse in an UASB-anaerobic filter combined system

ABSTRACT

The present paper evaluates for the first time, an anaerobic system of UASB-Upflow anaerobic filter (UAF) to treat raw vinasse with and without pH adjustment and without nutrient addition. The anaerobic digestion was properly developed without diluting the vinasse nor with nutrient addition. The best results were achieved with pH adjustment while increasing the organic loading rate (OLR). The stable condition for UASB-UAF system was at OLR 10 and 3 kgDQO $m^{-3}d^{-1}$ respectively. The methane yield was 0,236 and 0,159 $Nm^3CH_4 kg^{-1}DQO_e$. It was demonstrated that the use of UASB-UAF system allowed increasing the removal efficiency in terms of COD in more than 90%. A better final disposal of the anaerobic effluents and higher energy recovery was possible.

Keywords: organic loading rate, anaerobic digestion, methane, vinasse.

INTRODUCCIÓN

En Cuba existen 16 destilerías, caracterizadas por poseer una pequeña capacidad instalada de aproximadamente $50 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ cada una.

En las mismas, la tecnología instalada es convencional y conserva esquemas de hace más de 60 años, con bajos niveles de eficiencia en el proceso de fermentación, entre 75 y 78% (Garrido y Alonso 2016).

Las vinazas o mostos de destilerías son el principal residual obtenido en la producción de etanol por fermentación-destilación que, por el contenido de materia orgánica y volumen en que se generan, representan un gran problema en cuanto a su disposición final (Cabrera y Díaz 2013).

Los procesos biológicos convencionales han sido muy empleados en el tratamiento de vinazas. Estos se fundamentan en una considerable eliminación del contenido de materia orgánica expresada como Demanda química de oxígeno (DQO) o Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).

Dentro de los tratamientos biológicos, la digestión anaerobia (DA) es una de las principales tecnologías que se emplean como tratamiento o pre-tratamiento para este tipo de residual.

Sus principales ventajas están asociadas con una reducción de DQO y DBO igual o superior al 90 %, recuperación de energía en forma de biogás y la obtención de un biofertilizante (Moraes et al. 2014).

La DA resulta una excelente alternativa para la sustitución de combustibles fósiles no renovables (Fuess and García 2015).

Numerosas tecnologías anaerobias han sido propuestas para el tratamiento de las vinazas, destacándose dentro de estas, los reactores anaerobios de cama de lodos, más conocidos por sus siglas en inglés como UASB. Estos reactores poseen como ventaja su baja producción de lodos y conversión de más del 50% de la DQO en biogás (España et al. 2012).

Otras tecnologías como son los reactores empacados o los llamados filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA) también han sido muy empleados en tratamiento de vinazas por las bondades que ofrece (Cabrera y Díaz 2013).

Los reactores híbridos, es decir, sistemas que generalmente están integrados por un UASB y un filtro anaerobio o viceversa en el mismo reactor, han sido evaluados con el objetivo de evitar el lavado de biomasa de baja densidad que ocurre en los reactores UASB (Rajagopal et al. 2010).

Sin embargo, la compleja operación de los mismos se aleja de una propuesta industrial respecto al mantenimiento, por la oclusión del filtro. Además, requiere de mayor control incidiendo desfavorablemente en los costos de operación.

Uno de los parámetros empleados para evaluar la eficiencia de estos sistemas es la carga orgánica volumétrica (Bv) con que estos reactores trabajan, que puede ser calculada según la siguiente ecuación (1).

$$Bv = \frac{DQO * Q_0}{V} \quad (1)$$

donde:

Bv : carga orgánica volumétrica ($\text{kg DQO m}^{-3} \text{ d}^{-1}$)

DQO : demanda química de oxígeno de la alimentación ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

Q_0 : flujo de alimentación ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)

V : volumen del reactor (m^3)

Varios son los estudios realizados con estos dos reactores para el tratamiento de la vinaza. España et al. (2012) evaluaron el desempeño de un reactor UASB modificado en el tratamiento de vinaza pura, alcanzando una carga orgánica volumétrica (Bv) estable de $17,05 \text{ kgDQOm}^{-3} \text{d}^{-1}$ correspondiente a 7,5 d de tiempo retención hidráulica (TRH), con eficacia de reducción de DQO (Π) del 69% y un contenido de CH_4 en el biogás de 84 %.

Otros autores (Barros et al. 2016), operando 2 reactores UASB con vinaza diluida, alcanzaron valores de eficiencia de reducción de DQO entre 70 y 80 % para Bv entre 5 y $7,5 \text{ kgDQOm}^{-3} \text{d}^{-1}$ y rendimientos de CH_4 (Y_{CH_4}) expresados en metros cúbicos normalizados de metano por kilogramo de DQO reducido ($\text{Nm}^3 \text{CH}_4 \text{kg}^{-1} \text{DQO}_e$), de alrededor de $0,185 \text{ Nm}^3 \text{CH}_4 \text{kg}^{-1} \text{DQO}_e$.

Estudios realizados por Cabrera y Díaz (2013) operando un FAFA y empleando vinaza cubana diluida como sustrato alcanzaron condiciones estables con Bv de $15,6 \text{ kgDQOm}^{-3} \text{d}^{-1}$ y dos días de TRH, donde se obtienen eficiencias de reducción de DQO de aproximadamente 70 % y Y_{CH_4} de $0,276 \text{ Nm}^3 \text{CH}_4 \text{kg}^{-1} \text{DQO}_e$.

Otros autores evaluando el tratamiento de vinazas de vino diluidas en reactores híbridos (Rajagopal et al. 2010) obtienen para Bv de $18 \text{ kg DQOm}^{-3} \text{d}^{-1}$ y 1,08 días de TRH, eficiencias de reducción de DQO alrededor del 80 % y rendimientos de CH_4 de $0,33 \text{ Nm}^3 \text{CH}_4 \text{kg}^{-1} \text{DQO}_e$.

De forma general se puede plantear que, en la operación de los reactores anaerobios como sistemas independientes, varían las Bv aplicadas de acuerdo con la calidad de la alimentación y aún no se alcanza la eliminación del contenido de materia orgánica ni se recupera totalmente la energía contenida en las vinazas.

La evaluación de sistemas combinados para el tratamiento de las vinazas tal cual son generadas en las destilerías, sería una alternativa que pudiera favorecer la disminución del contenido de materia orgánica y la recuperación de energía que aún se encuentra contenida en los efluentes anaerobios tratados en una simple etapa.

Es por ello que el presente trabajo tiene como objetivo evaluar el proceso de digestión anaerobia de vinaza pura cubana en régimen continuo mesofílico cuando se utiliza una

combinación de reactores anaerobios de flujo ascendente en serie UASB-FAFA, sin adición de nutrientes, utilizando como parámetro la DQO.

MATERIALES Y MÉTODOS

Vinaza empleada como sustrato en el proceso de digestión anaerobia

Las vinazas empleadas como sustrato fueron colectadas en el complejo azucarero con destilería anexa “Héctor Molina Riaño” ubicado en la provincia Mayabeque, Cuba. La caracterización composicional de las mismas se muestra en la tabla 1.

Inóculo empleado en los reactores anaerobios

Los reactores UASB y FAFA fueron inoculados con un lodo floculento proveniente de un reactor UASB ubicado en la empresa azucarera con destilería anexa “Heriberto Duquesne”, el cual trabaja con vinazas diluidas como sustrato.

El mismo se mantuvo por un período de 20 días en condiciones anóxicas a $30 \pm 2^\circ\text{C}$ y fue alimentado con vinaza pura como sustrato a Bv de $2,5 \text{ kgDQO m}^{-3}\text{d}^{-1}$ hasta el momento de su utilización.

La caracterización del mismo arrojó los siguientes resultados: pH igual a 7,5 con sólidos suspendidos totales (SST), sólidos suspendidos volátiles (SSV) y SSV/SST de $88,5 \text{ g L}^{-1}$, $55,9 \text{ g L}^{-1}$ y 0,63 respectivamente; reflejando una buena calidad para un adecuado desempeño del proceso biológico.

Equipamiento para el ensayo en la tecnología combinada de reactores de flujo ascendente

Fueron operados en régimen continuo dos reactores metanogénicos, a escala de banco, un reactor UASB seguido en serie de un reactor FAFA. En la figura 1 se muestra el esquema de la instalación del sistema.

Ambos reactores consisten en una columna vertical de PVC y operaron con un volumen de trabajo de 4,73 L y 3,4 L respectivamente. El FAFA posee un volumen de empacado de 3,23 L y se empleó como empaque una estructura cilíndrica hueca y corrugada de PVC con área específica de $205 \text{ m}^2\text{m}^{-3}$, dispuesta al azar (Cabrera y Díaz 2013).

Los reactores durante el tiempo de puesta en marcha y trabajo operaron a temperatura ambiente ($28 \pm 2^\circ\text{C}$). Las vinazas fueron alimentadas por el fondo del reactor UASB a través de una bomba peristáltica de dos canales, el efluente obtenido de este reactor se dispuso en un recipiente y fue utilizado como alimentación al FAFA, empleando la misma bomba. Una segunda bomba peristáltica fue empleada para mantener la recirculación en el reactor UASB.

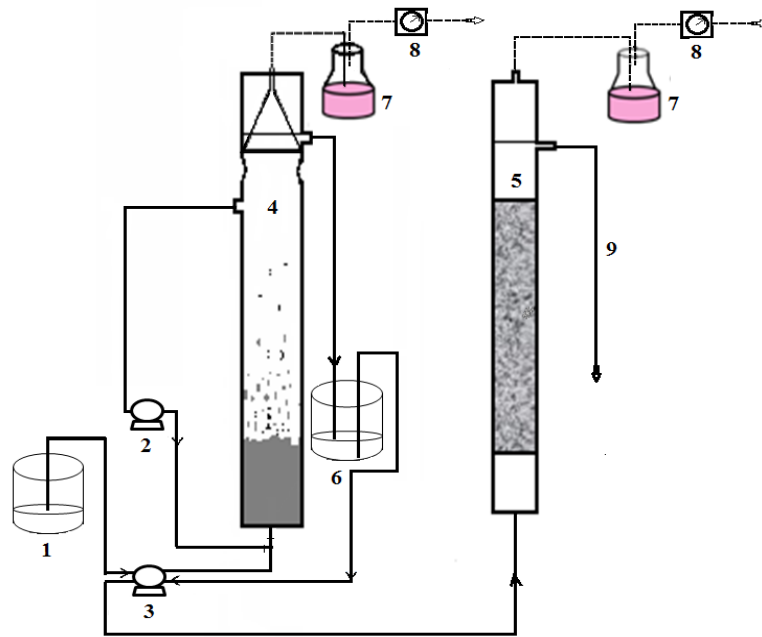
El biogás producido se colectó por la parte superior de los reactores, haciéndose burbujear en una solución de NaOH al 15% p/v para eliminar el CO_2 y el H_2S presentes en el mismo y únicamente cuantificar en el medidor de gas, el CH_4 producido.

Métodos analíticos

Análisis de pH, conductividad eléctrica (CE), DQO, alcalinidad, sólidos totales, disueltos y volátiles (ST, STD, STV); y nitrógeno total (NTK) fueron realizados a muestras de efluentes y alimentación. Además, fueron determinados Mg, Na, K, Fe, Ni, Co y Cu por espectroscopía de absorción atómica, para ello se empleó un Espectrofotómetro de Absorción Atómica VARIAN AA240FS. El Ca se determinó por valoración con EDTA 0,02 N.

Todos los ensayos analíticos se realizaron según los métodos normalizados para el análisis de aguas y aguas residuales (APHA et al. 2012). La relación ácidos grasos volátiles y carbonato inorgánico total (AGV/CIT) fue calculada y determinada de acuerdo con Lossie and Pütz (2009).

La composición de biogás (CO_2 , CH_4 , N_2 y H_2S) fue medida empleando un analizador de gases portátil Geotech GA2000. El flujo de metano fue medido en línea mediante un contador analógico. Los valores de metano se reportan en condiciones de temperatura y presión normal (TPN).



Notación. 1: Recipiente de vinaza a alimentar; 2: Bomba peristáltica de recirculación del reactor UASB; 3: Bomba peristáltica multicanal de alimentación a reactores UASB y FAFA; 4: Reactor UASB; 5: Reactor FAFA; 6: Recipiente de colecta de efluente proveniente del UASB; 7: Frascos de solución de NaOH; 8: Contadores analógicos de flujo de metano; 9: Salida de efluente del reactor FAFA.

Figura 1. Esquema de la instalación del sistema combinado de reactores de flujo ascendente

Puesta en marcha de los reactores UASB y FAFA

El reactor UASB fue inoculado mediante el uso de 1,9 L (40% del volumen efectivo) de lodo anaerobio. Posteriormente fue sometido a alimentaciones con vinaza pura con pH promedio sin ajustar de $4,31 \pm 0,15$ a razón de $2,5 \text{ kg DQO m}^{-3} \text{ d}^{-1}$.

Se empleó recirculación con una velocidad ascensional de flujo de $0,5 \text{ m h}^{-1}$ por 30 días, con el objetivo de mantener un buen mezclado entre la biomasa y el sustrato, favorecer la estabilidad del sistema y la formación de los gránulos. Estos valores coinciden con los límites permisibles de velocidad de flujo para reactores UASB que se encuentran entre $0,5$ y $1,5 \text{ m h}^{-1}$ (Asif et al. 2011).

El FAFA fue inoculado con 1,2 L del mismo lodo (35% del volumen efectivo) y se alimentó con vinaza pura a razón de $2,5 \text{ kg DQO m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ por 15 días. De igual forma en esta etapa de arranque, se trabajó con recirculación para favorecer el desarrollo de una biomasa activa y estable en el material de empaque. Su operación y control comenzó 15 días después del arranque del UASB. A partir de ese momento fue suspendida la recirculación y se comenzó a alimentar con los efluentes provenientes del reactor UASB.

Una vez estabilizadas las condiciones de operación y los valores de rendimiento de metano en ambos reactores, se inició la operación de los mismos con el objetivo de evaluar la eficiencia de reducción de DQO de las vinazas puras, bajo diferentes Bv que se corresponden a diferentes TRH tal como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Esquema de operación del sistema de reactores UASB-FAFA

Fase	UASB		FAFA	
	Bv ($\text{kg DQO m}^{-3} \text{ d}^{-1}$)	TRH (d)	Bv ($\text{kg DQO m}^{-3} \text{ d}^{-1}$)	TRH (d)
I	$2,52 \pm 0,16$	18,4	-	-
II	$4,77 \pm 0,20$	9,5	$0,57 \pm 0,21$	3,8
III	$7,50 \pm 0,47$	6,3	$1,50 \pm 0,65$	1,5
IV	$10,0 \pm 1,08$	5,0	$3,0 \pm 0,66$	0,81
V	$12,80 \pm 1,21$	3,5	$4,61 \pm 0,58$	0,28

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Caracterización del sustrato empleado en la alimentación

La vinaza empleada como sustrato en la alimentación del reactor UASB fue caracterizada según se muestra en la tabla 2.

Se aprecia que la misma posee un elevado contenido de materia orgánica, sulfatos y un bajo pH, típicos de este tipo de residual. Además, una relación STV/ST igual a 0,79 indicando que existe mayor contenido de materia orgánica que inorgánica, permitiendo que las vinazas puedan ser tratadas por procesos biológicos, concordando con los resultados de Cabrera y Díaz (2013).

En cuanto al contenido de macronutrientes, las concentraciones de iones Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ se encuentran por debajo de los valores reportados como inhibidores del proceso anaerobio (Chen et al. 2008). La relación DQO:N:P alcanza valores de 800:10,7:0,17, cercanos a lo propuesto por Deublein and Steinhauser (2008) de 800:5:1, evidenciando un déficit de fósforo.

Por otra parte, se ha demostrado que los metales trazas como el hierro, níquel, cobre y cobalto juegan un papel importante en la ruta bioquímica de degradación y formación de metano. En el caso de la vinaza empleada, la misma posee concentraciones de micronutrientes superiores que las necesarias para el proceso anaerobio.

Se consideran como estimulantes las concentraciones dentro del intervalo de 0,005 y 0,5 mg L^{-1} para el caso del Ni y 0,06 mg L^{-1} para el Co. Para el Fe, el mismo es requerido por las arqueas metanogénicas en concentraciones más elevadas, entre 1 y 10 mg L^{-1} (Deublein and Steinhauser 2008).

Teniendo en cuenta los resultados de la caracterización se puede concluir que el tratamiento anaerobio de las vinazas bajo estudio no precisa de la adición de macro y micronutrientes, por encontrarse sus concentraciones cercanas a las reportadas como adecuadas para el proceso biológico con excepción del fósforo tal como se discutió anteriormente.

Tabla 2. Caracterización de vinazas empleadas en el proceso de DA

Parámetros	Composición *
DQO	46080
pH	4,23
CE (mS cm^{-1})	10,48
ST	64138
STV	50818
SST	232
SSV	572
NTK	616
Pt	9,76
K	3500
Na	360
Ca	920
Mg	1263,6
SO_4^{-2}	2196,07
Cu	3,48
Fe	45,31
Ni	0,5
Co	0,186
* Todas las unidades excepto el pH y CE se reportan en mg L^{-1}	

Evaluación del desempeño en el sistema de reactores UASB-FAFA bajo diferentes B_v

Como se observa en la tabla 1, fueron evaluadas diferentes B_v , comportándose para el reactor UASB con valores promedios entre 2,52 - 12,8 kgDQO m⁻³d⁻¹ con TRH entre 18,4 - 3,5 d. En el FAFA las cargas orgánicas volumétricas se encontraron con valores promedios entre 0,57- 4,61 kgDQO m⁻³d⁻¹ con TRH entre 3,75 - 0,28 d.

Para evaluar el desempeño de los reactores fueron monitoreadas como variables de control el pH y la relación de alcalinidades AGV/CIT (Lossie and Pütz 2009). Esta última relación ofrece información sobre la estabilidad de operación del reactor y la calidad del efluente biodigerido. La misma debe encontrarse dentro del intervalo 0,2 - 0,3 (Lossie and Pütz 2009).

Como variables respuestas se tomaron el rendimiento de metano (Y_{CH_4}) y la eficacia de reducción de DQO (η). En las tablas 3 y 4 se muestran los principales resultados referentes a dichas variables en ambos reactores.

Como puede observarse en la tabla 3, en el caso del reactor UASB la relación AGV/CIT se mantuvo estable dentro de los límites permisibles hasta la fase III correspondiente a la B_v de 7,5 kg DQO m⁻³ d⁻¹.

La relación AGV/CIT según muestra la figura 2, comienza a incrementarse llegando a alcanzar valores de 0,64. Lo anterior es debido a la acumulación de los AGV, lo cual puede producir inhibición o toxicidad en el proceso anaerobio.

Tabla 3. Desempeño de reactores UASB-FAFA

Fase	UASB		FAFA	
	y	AGV/CIT	Y_{CH_4} (Nm ³ CH ₄ kg ⁻¹ DQO _e)	AGV/CIT
I	0,228 ± 0,03	0,17 ± 0,06	-	-
II	0,216 ± 0,02	0,18 ± 0,06	0,133 ± 0,04	0,14 ± 0,05
III	0,231 ± 0,03	0,32 ± 0,16	0,156 ± 0,06	0,13 ± 0,03
IV	0,236 ± 0,05	0,29 ± 0,13	0,159 ± 0,08	0,17 ± 0,07
V	0,276 ± 0,04	0,39 ± 0,14	0,259 ± 0,08	0,19 ± 0,04

En el caso de estudio la acumulación de AGV pudo deberse a la disminución de la capacidad buffer del sistema, causada por la no adición de una sustancia neutralizante. Una vez que se comenzó a adicionar Na₂CO₃ se observó una ligera disminución en la relación AGV/CIT hasta recuperar el reactor bajo este criterio.

El pH promedio en el efluente biodigerido proveniente del reactor UASB para todas las B_v estudiadas fue de 7,48 ± 0,02, encontrándose dentro del intervalo de 6,7 y 7,5 reportado como óptimo para las arqueas metanogénicas (Deublein and Steinhauser 2008).

En este caso los valores de pH no mostraron los disturbios en el reactor, por lo que se ratifica la importancia del monitoreo de la relación de alcalinidades AGV/CIT.

Para todas las B_v estudiadas se obtuvieron valores promedios de Y_{CH_4} de $0,237 \text{ Nm}^3\text{CH}_4\text{kg}^{-1} \text{ DQO}_e$. De igual forma se observa un ligero incremento luego de comenzar a ajustar el pH en la alimentación a mediados de la B_v de $7,5 \pm 0,47 \text{ kgDQO m}^{-3}\text{d}^{-1}$.

La mejor fase, dada por la relación AGV/CIT igual a $0,29 \pm 0,13$, fue la IV, correspondiente a la B_v de $10 \pm 1,08 \text{ kgDQO m}^{-3}\text{d}^{-1}$. Para esta fase se alcanzó un Y_{CH_4} igual a $0,236 \pm 0,05 \text{ Nm}^3\text{CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ DQO}_e$ y eficacia de reducción de DQO de $78 \pm 5,03 \%$, como se muestra en la tabla 3 y figuras 2 y 4.

Este rendimiento de metano, obtenido para la carga óptima de trabajo seleccionada, presenta valores cercanos a Cabrera y Díaz (2013) en un estudio con un reactor FAFA ($0,276 \text{ Nm}^3\text{CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ DQO}_e$), empleando vinaza diluida procedente de la misma destilería.

Resultados superiores también en cuanto a B_v y Y_{CH_4} , de 5 a $7,5 \text{ kgDQO m}^{-3}\text{d}^{-1}$ y Y_{CH_4} de $0,185 \text{ Nm}^3\text{CH}_4\text{kg}^{-1} \text{ DQO}_e$ respectivamente, alcanzados por Barros et al. (2016).

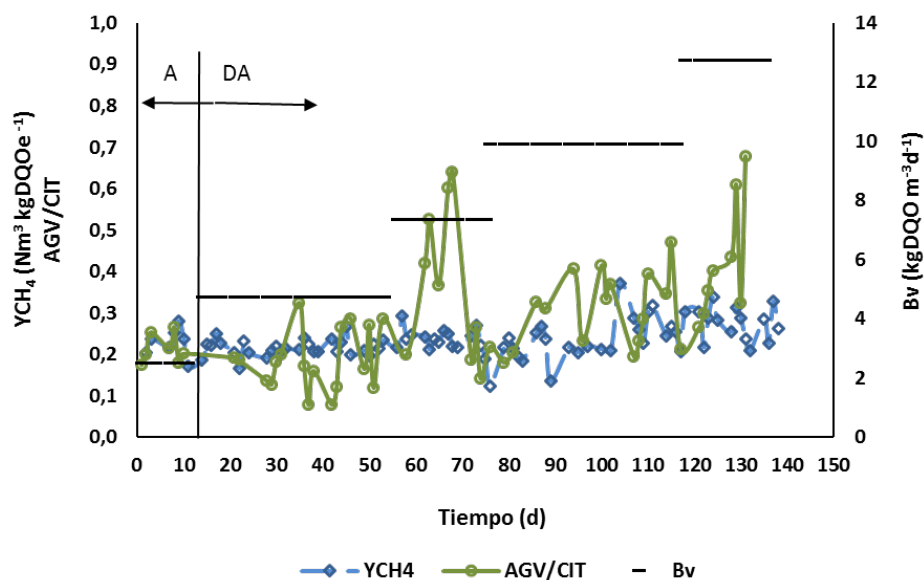


Figura 2. Comportamiento de Y_{CH_4} y relación AGV/CIT a diferentes B_v en el reactor UASB

Con el posterior incremento de la B_v a $12,8 \pm 1,21 \text{ kgDQO m}^{-3}\text{d}^{-1}$, como se aprecia en la figura 2, a pesar de observarse un incremento en el Y_{CH_4} , los valores correspondientes a la relación AGV/CIT en los efluentes a la salida del reactor comienzan a incrementarse.

Se demuestra que el reactor estaba presentando problemas aún con el ajuste previo de pH a la vinaza de alimentación y que para esta B_v es inoperable el sistema. Los resultados obtenidos en el presente trabajo son similares a los reportados por Barros et al.(2016) y España et al. (2012), al presentar inestabilidad en la digestión anaerobia de vinazas a elevadas B_v .

El FAFA tuvo un comportamiento normal, de acuerdo con la alimentación que recibió. A este reactor se incorpora el efluente biodigerido del UASB, con una fuente de carbono biodisponible casi agotada.

El pH promedio de este efluente que se empleó como sustrato al FAFA fue de $7,53 \pm 0,15$. En este reactor, como se aprecia en la tabla 3, para las fases II y III los valores de la relación AGV/CIT estuvieron por debajo de 0,2.

No obstante, para las fases IV y V, a medida que incrementó la B_v , la relación AGV/CIT aumentó hasta alcanzar el intervalo propuesto como adecuado (0,2 y 0,3) (Lossie and Pütz 2009).

El pH promedio del efluente biodigerido del FAFA para todas las B_v estudiadas fue de $7,65 \pm 0,15$, valor cercano al intervalo de pH óptimo propuesto por Deublein and Steinhauser (2008). Este comportamiento fue similar al del UASB.

El Y_{CH_4} (figura 3) para todas las B_v estudiadas en este reactor tuvo valores promedios de $0,177 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ DQO}_e$. Las dos mejores fases fueron la IV y la V, correspondiente a la B_v de $3 \pm 0,66$ y $4,61 \pm 0,58 \text{ kg DQO m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ respectivamente. Para estas fases se alcanzaron valores de Y_{CH_4} iguales a $0,159 \pm 0,08$ y $0,259 \pm 0,08 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ DQO}_e$.

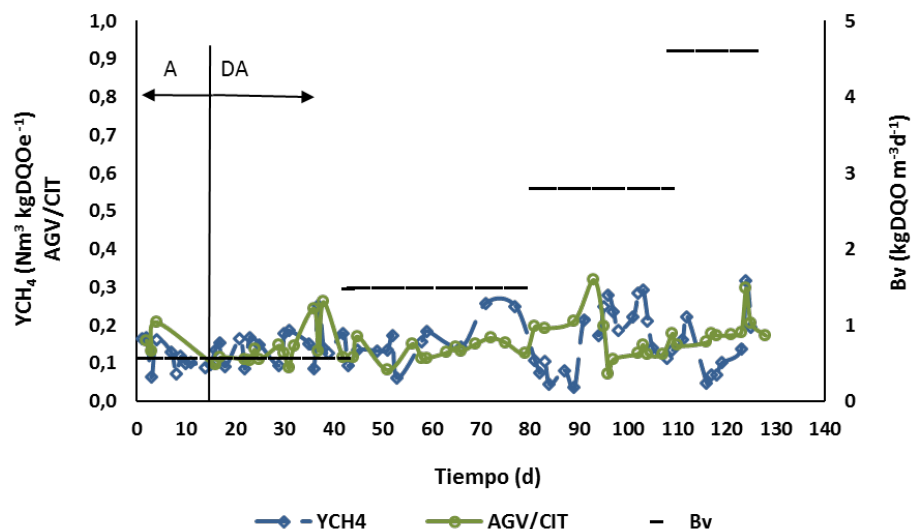


Figura 3. Comportamiento de Y_{CH_4} y relación AGV/CIT a diferentes B_v en el reactor FAFA

De igual forma la eficacia de reducción de DQO desde la fase II a la V se comportó entre valores promedios de $41 \pm 8,67$ a $70 \pm 6,48$ %, como se muestra en la tabla 4 y figura 4.

La mejor fase, dada por la relación AGV/CIT igual a $0,19 \pm 0,04$ fue la V, correspondiente a la B_v de $4,61 \pm 0,58$ kgDQO $m^{-3}d^{-1}$. En esta fase se alcanzó una eficacia de reducción de DQO de $70 \pm 6,48$ %.

A pesar de ser esta la mejor etapa de operación del FAFA, como se analiza el sistema UASB-FAFA, es necesario retomar las mejores condiciones de operación del UASB.

Tal como se concluyó previamente, la mejor etapa fue la fase IV. En este caso se debe tener en cuenta que la alimentación al FAFA se corresponde con la fase IV también, donde los resultados son menores que los de la fase V.

En la tabla 4 se muestra el comportamiento de la η (%) en reactores UASB, FAFA y combinación UASB-FAFA.

Las eficacias de reducción de DQO fueron analizadas anteriormente para cada reactor independiente. De forma combinada estas η se comportan de forma similar entre un 90 y 93%.

Debe tenerse en cuenta que, en esta evaluación como sistema, el FAFA recibe una fuente de carbono con poca biodisponibilidad y menor relación DBO_5/DQO (no determinada). Este comportamiento es normal por cuanto el proceso que le precede elimina la mayor parte de la fracción biodegradable y mantiene constante la fracción refractaria en las vinazas.

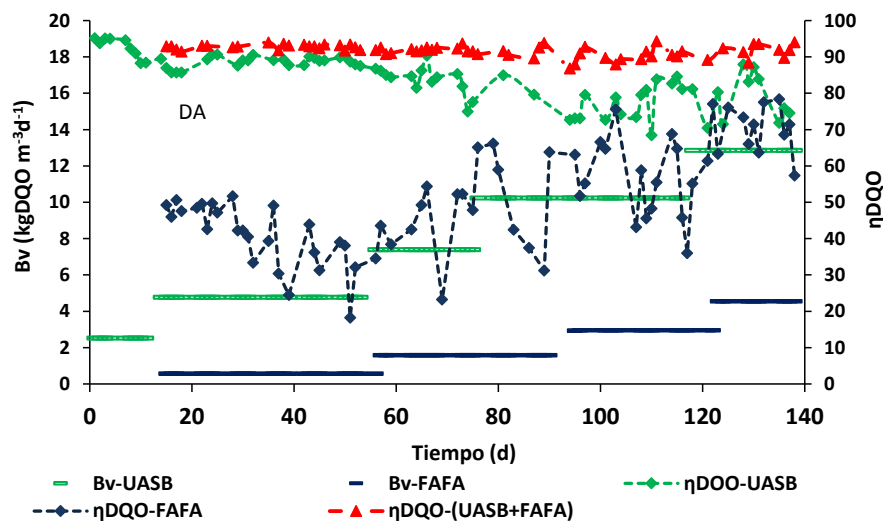


Figura 4. Comportamiento de la eficiencia de reducción de DQO a diferentes B_v en los reactores UASB, FAFA y UASB-FAFA

Tabla 4. Comportamiento de la η (%) en reactores UASB, FAFA y combinación UASB-FAFA

Fase	η (%) UASB	η (%) FAFA	η (%) UASB + FAFA
I	93 ± 2,79	-	-
II	89 ± 1,50	41 ± 8,67	93
III	84 ± 3,87	51 ± 17,30	92
IV	78 ± 5,03	58 ± 11,26	90
V	80 ± 6,07	70 ± 6,48	92

Lo anterior implica que la determinación de la eficiencia del reactor FAFA está subvalorada. De ser considerada la fracción biodegradable solamente, la eficiencia sería mucho mayor. Su reflejo está en el incremento paulatino del Y_{CH_4} .

El contenido de metano promedio en el biogás para las diferentes B_v aplicadas en los reactores UASB y FAFA fue de 53,7 y 56,1 % respectivamente, valores que son normales en el contenido de metano en el biogás.

En la tabla 5 se muestra la composición del biogás obtenido en el reactor UASB y FAFA para las B_v de $10 \pm 1,08$ y $3 \pm 0,66$ $\text{kgDQO m}^{-3}\text{d}^{-1}$ respectivamente (fase IV), en las que se logra mayor estabilidad del proceso.

Tabla 5. Composición del biogás obtenido para las mejores condiciones de operación

Composición	UASB	FAFA
CH ₄ (%)	52,3	68,1
CO ₂ (%)	40,2	14,7
O ₂ (%)	2,6	2,9
H ₂ (ppm)	104	123
H ₂ S (ppm)	117	481

Como se ha podido apreciar, cuando se realiza el tratamiento de vinazas en reactores independientes no se alcanza la eliminación del contenido de materia orgánica ni se recupera totalmente la energía contenida en la misma.

Al emplear la combinación de reactores en serie UASB seguido por un FAFA se observa una mayor eficiencia de reducción de la DQO y por consiguiente una mayor calidad de sus efluentes.

CONCLUSIONES

Las vinazas puras pueden ser tratadas de forma más eficiente en un sistema UASB-FAFA sin adición de nutrientes pero con estabilización del pH, obteniéndose que las cargas orgánicas volumétricas aplicadas para las condiciones de operación estable son $10 \pm 1,08$ y $3 \pm 0,66$ kg DQO $m^{-3} d^{-1}$ correspondientes a TRH de 5 y 0,81 d para el UASB y FAFA respectivamente. Con este sistema se logra incrementar significativamente la eficiencia en la reducción de la DQO en más del 90%, permitiendo una mejor disposición de los efluentes anaerobios y mayor recuperación de energía.

REFERENCIAS

- APHA, AWWA, WEF** (2012). “Standard methods for examination of water and wastewater”. 22nd ed., pp. 1360. American Public Health Association, ISBN:978-087553-013-0. Washington, USA.
- Asif M. L., Ghufuran R., Abdul Z W. and Ahmad A.** (2011). “Integrated application of upflow anaerobic sludge blanket reactor for the treatment of wastewaters”, Water Research, Vol. 45, No. 16, pp. 4683 – 4699, ISSN: 0043-1354, Elsevier BV., Netherlands.
- Barros V. G., Duda R. M. and De Oliveira R. A.** (2016). “Biomethane production from vinasse in UASB reactors inoculated with granular sludge”. Brazilian Journal of Microbiology, ISSN: 1517-8382. Elsevier BV., Brazil, extraído de: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bjm.2016.04.021>. en julio 2016.
- Cabrera A. D. y Díaz M. A. M.** (2013). “Tratamiento de vinaza cubana en un reactor anaerobio empacado de flujo ascendente”. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Vol. XXXIV, No. 2, pp. 41 – 49, ISSN: 1815-591X, CIH, Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría (Cujae), La Habana.
- Chen Y., Cheng J. J. and Creamer K. S.** (2008). “Inhibition of anaerobic digestion process: A review”. Bioresource Technology, Vol. 99, No. 10, pp. 4044 – 4064, ISSN: 0960-8524. Elsevier BV., United Kingdom.
- Deublein D. and Steinhauser A.** (2008). “Biogas from waste and renewable resources. An Introduction”. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. ISBN 978-3-527-31841-4. Weinheim, Germany.
- España G. E., Mijangos C. J. O., Hernández Z. G., Domínguez M. J. A. and Alzate G. L. M.** (2012). “Methane production by treating vinasses from hydrous ethanol using a modified UASB reactor”. Biotechnology for Biofuels, ISSN: 1754-6834. BioMed Central, United Kingdom, extraído de: <http://www.biotechnologyforbiofuels.com/content/5/1/82> en marzo 2016.
- Fuess L. T. and Garcia M. L.** (2015). “Bioenergy from stillage anaerobic digestion to enhance the energy balance ratio of ethanol production”. Journal of Environmental Management, Vol. 162, pp. 102-114, ISSN: 0301-4797. Academic Press. USA.

Garrido N. C. y Alonso D. E. (2016). “Aspectos tecnológicos a tener en cuenta en la eficiencia de una destilería”. Centro Azúcar, Vol. 43, No. 2, pp. 57 – 67, ISSN: 2223-4861. Ed. Feijóo. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Cuba.

Lossie U. and Pütz P. (2009). “Targeted control of biogas plants with the help of FOS/TAC”. In Laboratory Analysis, Titration FOS/TAC; Hach Lange, pp. 1–4. Germany, extraído de: www.hach.com/asset-get en enero 2012.

Moraes B. S., Junqueira T. L., Pavanello L. G., Cavalett O., Mantelatto P. E., Bonomi A. and Zaiat M. (2014). “Anaerobic digestion of vinasse from sugar cane biorefineries in Brazil from energy, environmental, and economic perspectives: profit or expense?”. Applied Energy. Vol. 113, pp.825–835, ISSN: 0306-2619. Pergamon Press Ltd., United Kingdom.

Rajagopal R., Mehrotra I., Kumar P. and Torrijos M. (2010). “Evaluation of a hybrid upflow anaerobic sludge-filter bed reactor: effect of the proportion of packing medium on performance”. Water Science & Technology, Vol. 61 No. 6, pp. 1441 – 1450, ISSN 0273-1223. International Water Association Publishing, United Kingdom.