

Tratamiento de vinaza cubana en un reactor anaerobio empacado de flujo ascendente

Ania Cabrera Díaz

Centro de Estudios de Ingeniería de Procesos, Facultad de Ingeniería Química, CUJAE

email: ania@quimica.cujae.edu.cu

Miguel Ángel Díaz Marrero

Centro de Estudios de Ingeniería de Procesos, Facultad de Ingeniería Química, CUJAE

email: migueld@quimica.cujae.edu.cu

RESUMEN

En la industria azucarera y sus derivados, la producción de etanol por fermentación en las destilerías genera grandes volúmenes de efluentes. La necesidad de disminuir el contenido orgánico de estos efluentes ha llevado a considerar la fermentación anaerobia como alternativa de tratamiento para disminuir el impacto que ocasionaría la incorrecta disposición de este residual a las fuentes receptoras. El presente trabajo tuvo como objetivo lograr un sistema eficiente de digestión anaerobia para el tratamiento de las vinazas. Para ello se evaluó el funcionamiento de un filtro anaerobio empacado de flujo ascendente alimentado con vinaza en régimen continuo a escala de laboratorio, para determinar a diferentes cargas volumétricas los porcentajes de reducción de DQO y la potencialidad de producción de metano en ese tipo de reactor.

Palabras clave: carga volumétrica, filtro empacado, metano, tratamiento anaerobio, vinazas.

Cuban vinasse treatment in an anaerobic packed-up ascending flow reactor

ABSTRACT

In the sugar and sugar-derivatives industry, the production of ethanol by fermentation in distilleries generate large volumes of effluents. The need to reduce the organic content of these effluents has lead to anaerobic fermentation being considered as an alternative treatment to reduce the impact that would be caused by incorrect disposal of this waste to receiving sources. The present work aims to achieve an efficient system of anaerobic digestion for vinasse treatment. To this end the performance of a continuous vinasse fed anaerobic packed-up flow filter at a laboratory scale is evaluated to determine percentages of COD removal and potential methane production in the reactor at different volumetric loads.

Keywords: anaerobic treatment, filter packaging, methane, vinasse, volumetric loading.

INTRODUCCIÓN

Los procesos de digestión anaerobia son una reproducción acelerada y optimizada del ciclo natural de la descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno molecular. En la misma, parte importante de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) puede convertirse en biogás, que se considera un combustible renovable.

El biogás es rico en metano (CH_4) y además contiene dióxido de carbono (CO_2), y pequeñas cantidades de nitrógeno (N_2), hidrógeno (H_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S), vapor de agua, amoníaco (NH_3) y otros compuestos aromáticos. Por la presencia mayoritaria de CH_4 este gas tiene un alto valor combustible (Montalvo 2003).

Se ha comprobado que la digestión anaerobia tiene un uso muy difundido en el tratamiento de las vinazas, que es el residual que se genera en las industrias productoras de etanol. Las vinazas representan un gran problema para su disposición final, por su elevado volumen, alta carga orgánica y color oscuro. La producción de vinaza está estimada a razón de 12 a 15 litros por cada litro de etanol destilado a 100° Gay Lussac (G.L.) (De la Cruz 2002).

La vinaza en general posee un alto contenido de materia orgánica que varía según la materia prima empleada y la eficiencia de los procesos de fermentación–destilación, que expresado como DQO oscila entre 50 y 150 kg de DQO/m³ y como Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) entre 25 y 80 kg de DBO_{5,20}/m³. Además contiene concentraciones por encima de 750 mg/L de sulfatos, 100 mg/L de nitrógeno total, 345 mg/L de potasio, un pH entre 3,5 y 5, color oscuro que puede variar desde carmelita hasta casi negro, de olor fuerte y temperatura de ebullición cercana a los 100 °C (Jiménez et al. 2006; Pant and Adholeya 2007; España et al. 2011).

En la producción de etanol, a partir de caña de azúcar, generalmente se generan residuales con concentraciones de DQO que oscilan entre 50 y 70 kg de DQO/m³ y están compuestos por un 93% de agua, 2% de compuestos inorgánicos (potasio, calcio, sulfatos, cloruros, nitrógeno y fósforo) y un 5% de compuestos orgánicos que combustión a 650 °C (Pérez y Garrido 2008).

Los sistemas de filtros anaerobios (FA) (también llamados sistema de película fija o de lecho fijo) han sido utilizados en el tratamiento de vinazas (Rivera et al. 2002). Los FA se caracterizan porque en ellos la biomasa bacteriana se encuentra, en parte, inmovilizada en un material de soporte fijo en el reactor biológico, y en parte en suspensión entre los espacios vacíos.

Esto propicia que exista alta actividad bacteriana por unidad de volumen del reactor, además proporciona una mayor reducción de DQO para bajos tiempos de retención hidráulicos (TRH). El flujo del afluente es normalmente vertical, bien ascendente o descendente, y el propio material de relleno actúa como separador de gas, que se recoge en la parte superior, proporcionando zonas de reposo para la sedimentación de los sólidos que se encuentran en suspensión. El afluente pasa a través de los soportes y de los microorganismos anaerobios, creando una fina capa de biopelícula (Baez-Smith 2006).

En el presente trabajo se realiza un estudio del tratamiento de la vinaza con un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) a escala de laboratorio, con el objetivo de determinar las posibles cargas volumétricas con que puede trabajarse, expresadas en gramos (g) de DQO/(L.d), así como los tiempos de retención hidráulicos con que deben operarse para las diferentes cargas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Filtro anaerobio: características

Altura filtro = 58 cm

Volumen efectivo = 3 400 mL

Diámetro interior = 9,5 cm

Empaquetadura de PVC corrugada con área específica de 205 m²/m³

Vinazas

Las vinazas empleadas en el experimento fueron suministradas por la destilería “Héctor Molina”. La caracterización de las mismas se muestra en la tabla 1.

TABLA 1. Caracterización de las vinazas empleadas en el estudio

Parámetro	Composición
pH	3,87
Demanda química de oxígeno (DQO) (mg/L)	60 407
Conductividad (mS/cm)	14,22
Nitrógeno (g/L)	0,616
Fósforo (g/L)	0,184
Calcio (Ca ²⁺) (g/L)	1,02
Magnesio (Mg ²⁺) (g/L)	0,264
Potasio (K ⁺) (g/L)	4,28
Sólidos totales (ST) (g/L)	59,356
Sólidos fijos totales (SFT)(g/L)	15,136
Sólidos volátiles totales (SVT)(g/L)	44,22

En la figura 1 se muestra el esquema de la instalación a escala de laboratorio con que se realizó el estudio.

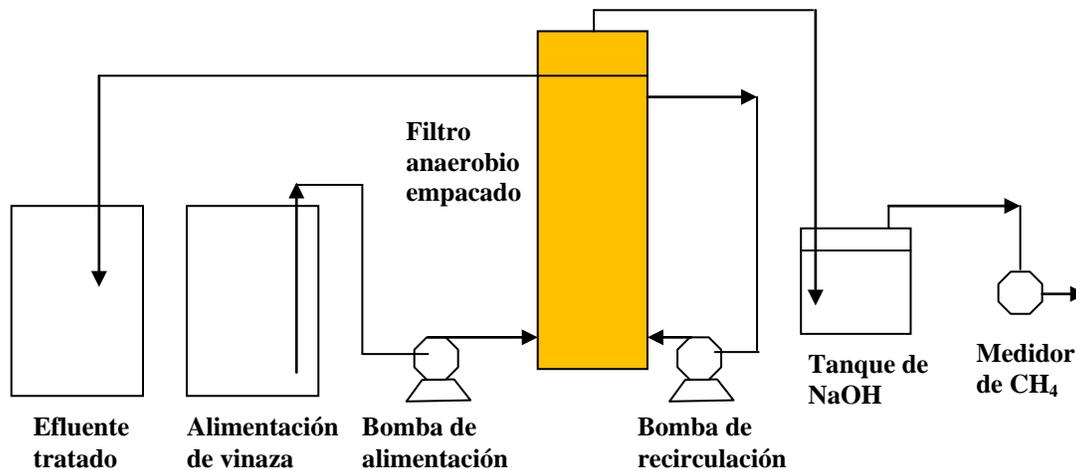


FIGURA 1. Esquema de la instalación a escala de laboratorio

Para iniciar el trabajo el reactor se cargó con un lodo anaerobio aclimatado a trabajar con vinaza. El lodo se estuvo alimentando y recirculando con el objetivo de que la biomasa se fuera

adhiriendo a la empaquetadura. La temperatura de trabajo durante todo el estudio osciló entre 28 y 31 °C.

Cuando el filtro comenzó a trabajar en forma estable, se iniciaron las corridas a cargas promedio de 1,9, 3,8, 6,2 y 9,9 g de DQO/(L.d) con TRH de un día y con cargas de 4,7, 9,9, 15,6 y 19,9 g de DQO/(L.d) con dos días de TRH, teniendo en cuenta la experiencia previa de pruebas realizadas por los autores y los resultados reportados por Rivera et al. (2002). En todos los casos el sistema se dejó que se estabilizara antes de comenzar a tomar los datos.

Métodos analíticos

- DQO a la entrada y salida del filtro, realizado por el método estándar (APHA, AWWA, WPCF 1992).
- pH a la entrada y salida del reactor medido con pHmetro Crisson pH25.
- Método de FOS/TAC (Lossie and Pütz 2009), para determinar en el efluente las alcalinidades de ácidos grasos volátiles (Alc.AGV) y al Hidrógeno Carbonato (Alc. HCO_3^-) y obtener la relación entre ellas.
- Composición del biogás se midió con un analizador de gas portátil de la firma Biogás CDM.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Corridas con vinaza a diferentes cargas y tiempo de retención hidráulico (TRH) de 1 día

Las corridas con vinaza se realizaron alimentando en forma continua sin recirculación a cuatro valores de carga volumétricas diferentes en el intervalo comprendido entre 1,9 y 9,9 g de DQO/(L.d) para 1 día de TRH. En la tabla 2 se reportan los valores promedio de los resultados de cada una de las corridas para 1 día TRH.

TABLA 2. Valores promedio de los resultados de las corridas con 1 día de TRH para diferentes cargas en g de DQO/(L.d) en el reactor

Carga alim (g/Ld)	DQO alim (mg/L)	DQO efluente (mg/L)	DQO rem %	DQO rem (g)	CH ₄ prod (mL)	mL CH ₄ /g DQO rem	Alc AGV (mg/L)	Alc HCO ₃ ⁻ (mg/L)	AlcAGV/AlcHCO ₃ ⁻
1,90	1 988	587	70,5	4,7	1 277	272	195	921	0,22
3,80	4 166	1 357	67,4	8,9	2 449	272	341	1 683	0,21
6,19	6 142	2 614	57,4	11,9	3 211	270	627	1 715	0,37
9,90	10 182	5 097	49,9	16,8	4 582	273	1 423	2 378	0,61

Notación: **alim**: alimentado; **rem**: removido; **prod**: producido
DQO: Demanda Química de Oxígeno
CH₄: metano
Alc AGV: Alcalinidad a Ácidos Grasos Volátiles.
Alc. HCO₃⁻: Alcalinidad al Hidrógeno Carbonato

En la figura 2 aparecen reflejadas la reducción de DQO en masa y en tanto por ciento, en función de la carga volumétrica para 1 día de TRH.

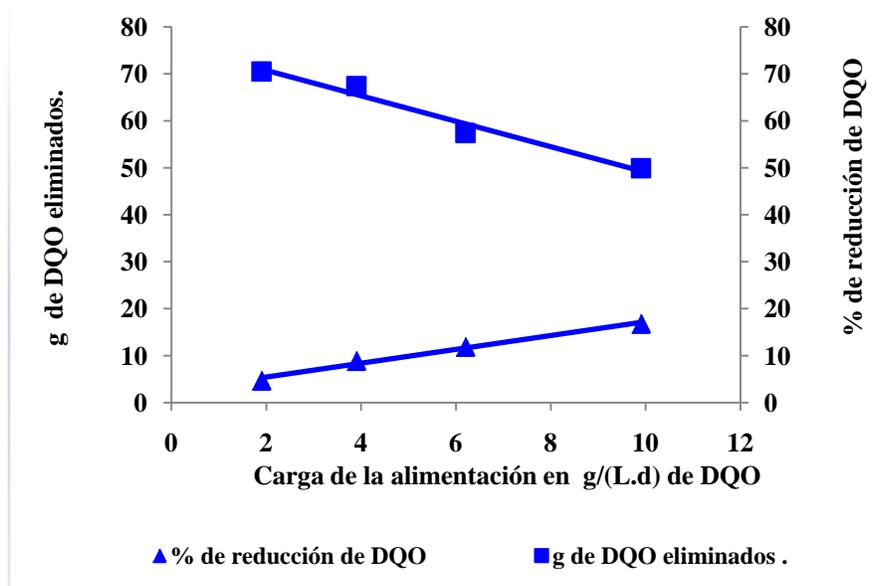


FIGURA 2. Relación del porcentaje de reducción y los g de DQO eliminados contra la carga alimentada con un día de TRH

En dicha figura 2 se aprecia que aunque los g de reducción de DQO másica aumentan con la carga, el porcentaje disminuye desde 70,5 % hasta un 49.9 %, en el intervalo de cargas en que se trabajó.

La relación $\text{Alc.AGV}/\text{Alc.HCO}_3^-$ es uno de los principales parámetros que caracterizan el proceso anaerobio. Este parámetro permite controlar a tiempo cualquier descontrol en el proceso y evitar caídas drásticas de producción de biogás por acumulación de ácidos en el sistema. Las nuevas tendencias en la determinación de la relación $\text{Alc.AGV}/\text{Alc.HCO}_3^-$, tienen su fundamento en los métodos estándar, relación FOS/TAC (Lossie and Pütz 2009).

Por regla general, la relación se encuentra entre 0,3 y 0,4 en el digestor y entre 0,2 y 0,3 en el efluente del digestor.

En la figura 3 se representa la relación entre la Alcalinidad a Ácidos Grasos Volátiles y la debida al Hidrógeno Carbonato ($\text{AGV}/\text{HCO}_3^-$) en el efluente en función de la carga alimentada.

En dicha figura 3 se aprecia cómo la relación de alcalinidades va aumentando con la carga, lo que indica que para valores superiores a 0,3 queda un fracción que no se está degradando (Lossie and Pütz 2009), por lo que con 1 día de tiempo de retención de la vinaza en el reactor, las cargas permitidas para que trabaje el mismo con eficiencia pueden ser de hasta 5 g/(L.d).

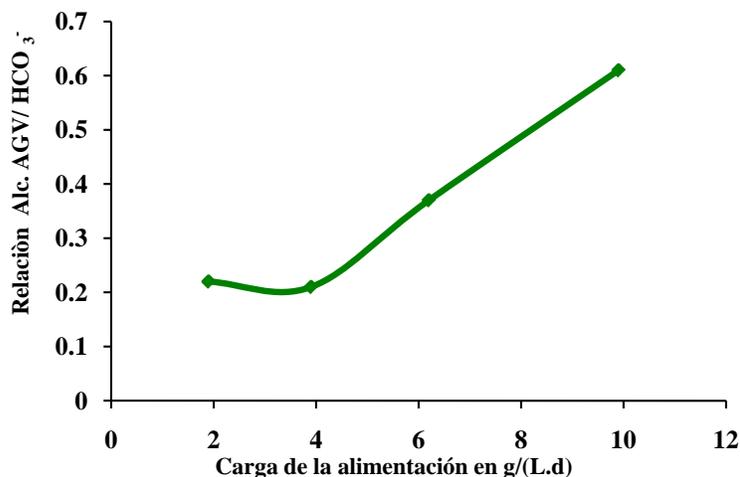


FIGURA 3: Valores de la relación Alc AGV/Alc HCO₃⁻ en el efluente contra la carga alimentada en g/(L.d) de DQO para TRH de 1 día.

Corridas con vinaza a diferentes cargas y tiempo de retención hidráulico (TRH) de dos días

En la tabla 3 se reportan los valores promedios de los resultados de cada una de las corridas para dos días de TRH.

TABLA 3. Valores promedios de los resultados de las corridas con dos días de TRH para diferentes cargas volumétricas

Carga alim (g/Ld)	DQO alim (mg/L)	DQO efluente (mg/L)	DQO rem %	DQO rem (g)	CH4 prod (mL)	mL CH4/g DQO rem	Alc AGV (mg/L)	Alc HCO ₃ ⁻ (mg/L)	AlcAGV/AlcHCO ₃ ⁻
4,7	10 103	2 988	70,4	23,3	6 353	274	578	3 246	0,17
9,9	20 915	6 219	70,3	48,6	12 255	252	714	4 942	0,15
15,6	30 173	9 507	68,5	68,5	19 598	272	949	5 042	0,19
19,9	36 676	15 134	58,7	76,3	21 278	279	3 959	7 248	0,56

En la figura 4 se correlacionan los valores de porcentaje de remoción y los gramos de DQO removidas contra las cargas promedio alimentadas para 2 días de TRH.

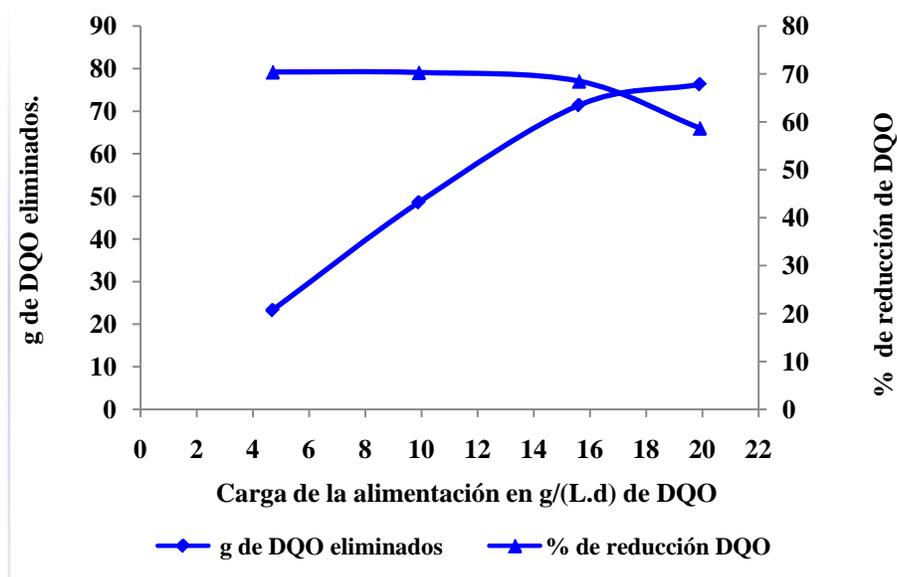


FIGURA 4. Relación del porcentaje de remoción y los gramos de DQO removidos contra la carga real alimentada con 2 días de TRH

Al igual que en el caso de 1 día de TRH en la figura se puede observar que los g de DQO que se eliminan aumentan con la carga alimentada y el porcentaje de reducción se mantiene prácticamente constante, aproximadamente el 70% para cargas menores de 15 g/(L.d) de DQO y cae hasta 58,7% para 19,9 g/(L.d) de DQO.

En la figura 5 se representa la relación entre la alcalinidad a Ácidos Grasos Volátiles y la debida al Hidrógeno Carbonato (AGV/HCO_3^-) en el efluente, contra la carga alimentada para dos días de TRH.

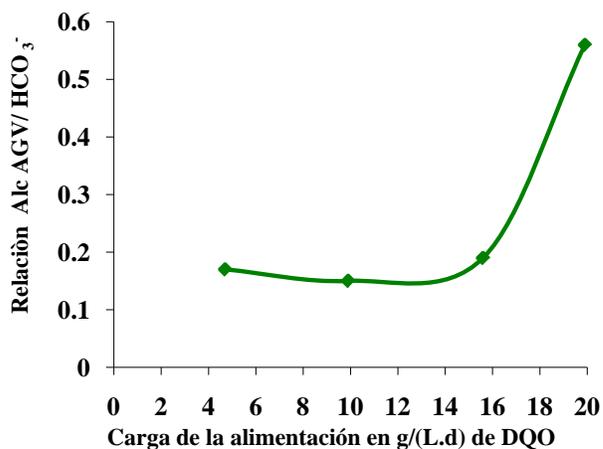


FIGURA 5. Valores de la relación Alc AGV/Alc HCO₃⁻ en el efluente contra la carga alimentada en g/(L.d) de DQO para TRH de 2 días.

En dicha figura 5 se aprecia que con dos días de TRH y con cargas de hasta de 16 g/(L.d) la relación de alcalinidades está por debajo de 0,3, lo que indica que esta carga puede ser tratada y que para valores superiores la relación se eleva por encima de 0,3 indicando que queda una fracción que no se está degradando (Lossie and Pütz 2009).

Este valor de carga de 16 g/(L.d) para 2 días de TRH es superior a la reportada por Rivera et al. (2002), aunque hubo diferencia en la temperatura de trabajo y pudo también influir la vinaza empleada y las áreas específicas y el tipo de las empaquetaduras.

Los análisis realizados al biogás producido dieron como valores promedio los siguientes resultados:

$$\text{CH}_4 = 70,05 \% \quad \text{CO}_2 = 29 \% \quad \text{O}_2 = 0,6 \%$$

La literatura reporta que la composición del biogás en metano de un reactor que esté trabajando de forma satisfactoria debe estar entre un 60 y 80% (Moletta 2005), por lo que el valor obtenido está dentro de los valores establecidos.

La producción metano por gramo de DQO removida en la vinaza para las diferentes cargas dio como promedio 270,5 mL de CH₄ /g de DQO removida, coincidiendo con los valores reportados por Rivera et al. (2002).

CONCLUSIONES

Al trabajar las corridas con vinaza a diferentes cargas y TRH en el rango de temperatura con que se trabajó el reactor se concluye que:

- Para un día de TRH puede trabajarse con cargas de hasta 5 g/(L.d) de DQO en el reactor lográndose porcentajes de remoción de DQO cercanos al 70%.
- Para dos días de TRH la carga puede incrementarse hasta 16 g/(L.d) con similares porcentajes de remoción.

Con respecto al biogás producido, el mismo presenta buenas características con respecto a su composición de CH₄ y la producción promedio específica obtenida de todas las corridas fue de 270,5 mL de CH₄/g de DQO removida.

Se comprobó que cuando la relación de Alc.AGV/Alc.HCO₃⁻ en el efluente es superior a 0,3 queda una fracción que no se está degradando, por lo que debe trabajarse el filtro para las cargas en que esta relación sea aproximadamente igual a 0,3.

REFERENCIAS

- APHA, AWWA, WPCF** (1992). “Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales”, Edición 17, ISBN 84-7978-031-2, España.
- Baez-Smith, C.** (2006). “Anaerobic digestion of vinasses for the production of methane in the sugar cane distillery”, In: SPRI Conference on Sugar Processing, Loxahatchee, Florida, USA, pp. 268-287.
- De la Cruz, S.** (2002). “Aplicaciones del análisis complejo de procesos en el estudio de alternativas de integración de un complejo agroindustrial azucarero con una planta de alcohol”, Tesis de doctorado, Universidad Central de las Villas, Cuba.
- España, E.; Mijangos, J.; Barahona, L.; Domínguez, J.; Hernández, G. and Alzate, L.** (2011). Review: “Vinasses: characterization and treatments”, Waste Management & Research, 29(12): 1235-1250, United Kingdom.
- Jiménez, A.; Borja, R.; Martín, A. and Rasposo, F.** (2006). “Kinetic analysis of the anaerobic digestion of untreated vinasses and vinasses previously treated with *Penicillium decumbens*”, Journal of Environmental Management, 80(4): 303-310. USA.
- Lossie, U. and Pütz, P.** (2009). “Targeted control of biogas plants with the help of FOS/TAC”, Practice report, HACH Lange, Germany.
- Moletta, R.** (2005). “Winery and distillery wastewater treatment by anaerobic digestion” Water Science and Technology, 51 (1): 137-144, United Kingdom.
- Montalvo, S. J.** (2003). “Tratamiento anaerobio de residuos. Producción de biogás”, Registro de la propiedad intelectual 134.186, Universidad Técnica Federico Santa María, Impresión talleres gráficos de Fermín Pastén P., Valparaíso, Chile.
- Pant, D. and Adholeya, A.** (2007). “Biological approaches for treatment of distillery wastewater: A review”, Bioresource Technology, 98: 2321–2334, Netherlands.
- Pérez, I. y Garrido, N.** (2008). “Tratamiento de efluentes de la industria alcoholera ventajas y desventajas”, Revista Ingeniería Química, 455: 148 – 153, Cuba.
- Rivera, A.; González, J. S.; Castro, R.; Guerrero, B. y Nieves, G.** (2002). “Tratamiento de efluentes de destilería en un filtro anaerobio de flujo ascendente”, Rev. Int. Contaminación Ambiental, 18(3): 131-137, México.