



7<sup>mo</sup>  
Congreso de  
Medio Ambiente

Actas 7mo Congreso de Medio Ambiente AUGM  
22 al 24 de mayo de 2012. UNLP. La Plata Argentina

## BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA A ESCALA PILOTO INDUSTRIAL DE RESIDUOS SEMISÓLIDOS GENERADOS EN LA INDUSTRIALIZACIÓN DEL LIMÓN

**Industrial pilot-scale anaerobic biodigestion of semisolid wastes of lemon  
processing**

Walter Daniel Machado\*<sup>1</sup>, Eduardo Melquíades Vera van Gelderen<sup>2</sup>, Martin Alberto  
Alonso<sup>3</sup>, Myriam Raquel Urueña<sup>4</sup>

Estudios ambientales, Sección ingeniería y proyectos agroindustriales,  
Estación experimental agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC).  
William Cross 3150. Las talitas. Tucumán (CP 4101), R. Argentina

<sup>1</sup> [daniel.machado@eeaoc.org.ar](mailto:daniel.machado@eeaoc.org.ar)

<sup>2</sup> [veravangelderren@eeaoc.org.ar](mailto:veravangelderren@eeaoc.org.ar)

<sup>3</sup> [maalonso@eeaoc.org.ar](mailto:maalonso@eeaoc.org.ar)

<sup>4</sup> [raquel.uruena@eeaoc.org.ar](mailto:raquel.uruena@eeaoc.org.ar)

\*[daniel.machado@eeaoc.org.ar](mailto:daniel.machado@eeaoc.org.ar)

*Título abreviado: Biodigestión anaeróbica de residuos industriales del limón*

### ABSTRACT

Lemon is processed to obtain essential oil, concentrated juice and dehydrated peel and this generates different kinds of wastewater. From this wastewater, it is possible to separate a semisolid residue with high humidity through filters or primary treatment. This paper analyzes the anaerobic digestion of these semisolid residues, organic load reduction and biogas production using a complete mix tank.

To degrade citrus residues, a thermally insulated 1000 l complete mix tank was built up, equipped with a system to keep temperature within the optimum range. This tank was inoculated with anaerobic sludge from a citrus wastewater treatment lagoon and semisolid residue was fed into it on a daily basis. Acid-base balance, organic load reductions and biogas production were measured.

Anaerobic digestion could be controlled under the evaluated feeding conditions. A 2 g COD.L<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup> organic load speed rate was thus assayed, with which organic load reduction became higher than 80% and biogas production amounted to more than 1000 l per day.

On a pilot scale, the designed reactor enabled organic load reduction in a contaminant industrial waste, turning it into sludge which can be suitably disposed of on cultivable land or farm paths. Furthermore biogas, which can be used as an energy source, was produced and greenhouse gas emissions diminished. These results allowed us to consider the possibility of designing a larger scale system for treating these wastes.

## **RESUMEN**

La industrialización del limón para obtener aceite esencial, jugos concentrados y cáscara deshidratada, genera diferentes tipos de efluentes. A partir de estos efluentes es posible separar, mediante tamizado o tratamiento primario, un desecho semisólido de alto contenido de humedad. El propósito del presente trabajo fue estudiar la digestión anaeróbica de este desecho, el grado de abatimiento de la carga orgánica y la producción de biogás, empleando un reactor de mezcla completa.

Para llevar a cabo la degradación del desecho cítrico, se construyó un reactor de mezcla completa, de 1000 litros de capacidad, térmicamente aislado y provisto de un sistema para mantener la temperatura en un rango óptimo. Se inoculó con lodos

anaeróbicos provenientes de una laguna de tratamiento de efluentes citrícolas. Se alimentó con el desecho semisólido, en forma de pulsos diarios. Se realizaron las mediciones necesarias para monitorear el equilibrio ácido base y para conocer el abatimiento de la carga orgánica y la producción de biogás.

El proceso de digestión anaeróbica pudo conducirse equilibradamente dentro de las condiciones de alimentación probadas. Se llevó la experiencia hasta una velocidad de carga orgánica de 2 g DQO/L.d. Con esta alimentación, el abatimiento de la carga orgánica superó el 80% y la producción de biogás fue mayor a los 1000 litros diarios.

El sistema construido permitió reducir la carga orgánica de un desecho industrial contaminante en escala piloto, transformándolo en un lodo apropiado para disponer en forma controlada en tierras cultivables o en caminos de fincas. Paralelamente, se obtuvo biogás aprovechable energéticamente y se produjo una reducción de la emisión de gases de efecto invernadero. Estos resultados permiten pensar en un sistema de mayor escala que sirva como alternativa para la disposición de estos desechos.

## **INTRODUCCIÓN**

En la provincia de Tucumán, la industrialización del limón para obtener jugos concentrados, cáscara deshidratada, aceites esenciales y aromas, genera residuos de diversa naturaleza, la mayoría de ellos de tipo orgánico.

Dentro de los residuos orgánicos generados, los más voluminosos son aquellos formados por tejidos y constituyentes originales del limón, que son arrastrados por las aguas del procesamiento industrial.

De esta manera y según el orden de los subprocesos fabriles, se van generando diferentes líneas de residuos con diferentes características.

En la línea de extracción de aceite esencial se genera, como desecho, una emulsión con mayor o menor contenido de restos oleosos, dependiendo de la eficiencia de extracción y del tipo de tecnología que se emplee.

Luego se continúa con el proceso de obtención de jugo. La tecnología más difundida emplea un sistema de copas exprimidoras que permiten extraer el jugo y liberar la cáscara, hollejos y semillas en un solo paso. El jugo obtenido suele contener entre 12% y 14% de pulpa, tenor que debe ser reducido al porcentaje que requieran los clientes. Entre los equipos diseñados para reducir el contenido de pulpa, se pueden mencionar los “finishers”, centrífugas y ultrafiltros. Estos equipos generan residuos acuosos ricos en sólidos en suspensión (pulpa y otros tejidos vegetales).

Las fábricas que producen cáscara deshidratada tienen un subproceso adicional de lavado de cáscara, que genera un efluente con alto contenido de sólidos en suspensión, además de azúcares y otras sustancias disueltas. Por otra parte, este residuo es el más voluminoso de los producidos en este tipo de industria.

Si bien cada subproceso arroja efluentes de características particulares, ellos tienen en común un elevado contenido de sólidos en suspensión.

Estos sólidos conforman un producto de elevada carga orgánica. Las cantidades generadas están en el orden del 6% de la fruta procesada.

Existen empresas que contemplaron el sistema de lagunaje como alternativa de tratamiento para el efluente líquido integral, sin realizar una separación importante de los sólidos en suspensión.

Otras plantas industriales adoptaron la estrategia de separar parte de los sólidos en suspensión de sus efluentes para compostarlos, ingresando el resto del efluente líquido aún con algo de sólidos en suspensión, en biorreactores anaeróbicos de mezcla para reducir su carga orgánica y generar biogás aprovechable energéticamente.

Una firma de la región del Noroeste Argentino implementó un sistema de tratamiento primario profundo para la separación total de los sólidos en suspensión, obteniendo un efluente líquido traslúcido apto para ingresar en biorreactores anaeróbicos de tipo UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket* o manto de lodo anaeróbico ascendente). Los sólidos separados fueron derivados a tratamiento por compostaje, previa concentración en “decanters”.

Una de las alternativas estudiadas para el tratamiento de los residuos semisólidos a escala laboratorio es la biodigestión anaerobia, mediante la acción de consorcios de microorganismos presentes en lodos recolectados en las lagunas de disposición de efluentes, que algunas de las compañías citrícolas emplean como tratamiento (Urueña *et al.*, 2010 a).

Asimismo, en la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) se desarrollaron biodigestores de mezcla completa a escala de laboratorio, para producir la degradación controlada de estos sustratos, en un régimen de alimentación por pulsos o semicontinua (Urueña *et al.*, 2010 b).

El presente trabajo tuvo como objetivo estudiar la biodigestión anaerobia de los residuos semisólidos citados, en un reactor de mezcla completa a escala piloto. Se analizó la estabilidad del proceso, el abatimiento de carga orgánica y su capacidad para generar biogás desde la fase de arranque, hasta la etapa donde la velocidad de carga orgánica (VCO) llegó a  $2 \text{ g DQO.L}^{-1}.\text{d}^{-1}$ .

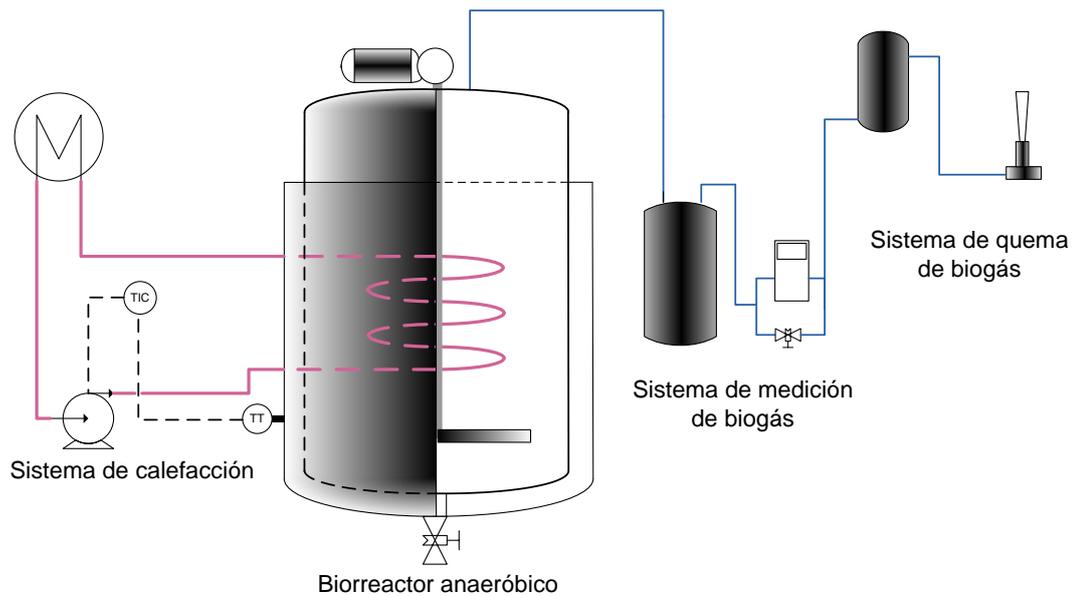
## **METODOLOGÍA**

### **Diseño y construcción de la planta piloto**

Para abordar el objetivo propuesto se planteó, en primer lugar, el diseño de una planta a escala piloto que permita estudiar el proceso de biodigestión anaerobia de los residuos semisólidos generados durante la industrialización del limón.

La planta piloto, cuyo esquema se puede apreciar en la Figura 1, constó de las siguientes partes:

- Un reactor de acero inoxidable donde se llevó a cabo el proceso de biodigestión, de 1000 litros de capacidad, con aislación térmica de lana mineral. El sistema de agitación consistió en un motoreductor y dos paletas planas de acero inoxidable, dispuestas horizontalmente.
- Un sistema para mantener la temperatura del proceso.
- El sistema de medición de producción de biogás constó de un caudalímetro o medidor de flujo másico, conectado a un indicador de proceso universal trabajando en la función de totalizador. Desde la salida del caudalímetro, el biogás fue conducido hacia una botella arrestallama y, posteriormente, hacia un dispositivo para quemar el biogás generado.



**Figura 1.** Representación del biodigestor piloto con su sistema de calefacción, sistema de agitación y circuito de biogás hasta llegar al quemador.

**Figure 1.** Illustration of the pilot biodigester and its heating system, mixing system and biogas circuit.

Como elemento accesorio e independiente del cuerpo del reactor, se diseñó un sedimentador de lodos de 100 l de capacidad.

### Arranque del biodigestor

Se formuló un sistema inicial para el arranque del proceso de biodigestión, constituido de la siguiente manera:

- a) *Inóculo*: 400 litros de lodos con actividad metanogénica, provenientes de lagunas de disposición de efluentes cítricos de una compañía local, los cuales contenían 6 g de sólidos suspendidos volátiles por litro (SSV.L<sup>-1</sup>).

- b) *Sustrato*: residuos semisólidos en una cantidad equivalente a 5 g DQO.L<sup>-1</sup> de volumen de trabajo del reactor.
- c) *Bicarbonato de sodio*: 0.5 gramos de bicarbonato por gramo de DQO.
- d) *Micronutrientes*: 80 ml de una solución que contenía nitrógeno, fósforo y metales esenciales, tales como calcio, magnesio, hierro, zinc, cobalto, manganeso y cobre en cantidades traza.

### **Análisis del sistema inicial**

Para la caracterización del sistema inicial de reacción, del sustrato de alimentación y del seguimiento de los lodos del reactor se realizaron las siguientes determinaciones analíticas empleando metodología oficial (Eaton *et al.*, 2005):

pH (SM 4500–H<sup>+</sup> B)

DQO<sub>T</sub>: demanda química de oxígeno total (SM 5220 D).

ST: sólidos totales (SM 2540 B).

SF: sólidos fijos (SM 2540 E).

SV: sólidos volátiles (SM 2540 E).

SSV: sólidos suspendidos volátiles (SM 2540 E).

SST: sólidos suspendidos totales (SM 2540 D).

Relación alfa: se trata de un parámetro útil para evaluar la capacidad “buffer” del sistema y su estabilidad. Esta relación se obtiene mediante un análisis volumétrico, que determina la alcalinidad total del sistema titulando con una solución valorada de ácido sulfúrico hasta pH 5.75 y pH 4.3 y registrándose los volúmenes gastados V<sub>1</sub> y V<sub>2</sub>, respectivamente.

La relación alfa se define como:

$$\alpha = \frac{V_2 - V_1}{V_2}$$

### **Alimentación**

Se inició la alimentación, una semana después de la puesta en marcha, ingresando diariamente 5 kg de residuo semisólido y 5 kg de agua. El reactor se alimentó bajo esta modalidad hasta completar el volumen de trabajo de 1000 l.

### **Monitoreo del equilibrio ácido base**

Para examinar el equilibrio ácido base del proceso se analizó la relación alfa. Con esta técnica fue posible detectar prematuramente, en forma práctica y eficiente, una potencial acidificación por acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV), lo que brinda la posibilidad de tomar medidas para regularizar el proceso.

### **Proceso en régimen**

Una vez alcanzado el volumen de 1000 l, se consideró que el proceso había ingresado en el período de régimen. Desde ese momento, se procedió a alimentar al reactor con 10 kg de pulpa diarios, lo que representó una VCO de 1 g DQO.L<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup>.

Al cabo de tres meses, se aumentó la alimentación a una VCO de 2 g DQO.L<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup>, es decir, alrededor de 20 kg de sustrato diario.

Se implementaron operaciones diarias sistemáticas a los efectos de conducir el proceso con la mayor eficiencia.

Las principales operaciones realizadas en la planta fueron:

- a) Control de temperatura y agitación.
- b) Extracción, sedimentación y reciclaje de lodos.
- c) Alimentación.
- d) Control de caudal de biogás.
- e) Monitoreo fisicoquímico.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **Elección del tipo de biodigestor**

Dadas las características del sustrato a tratar, cuyo tenor de sólidos estuvo en el orden de los  $100 \text{ g.kg}^{-1}$ , el tipo de biodigestor seleccionado debía poseer un sistema de mezclado energético.

La elevada presencia de sólidos dejó fuera de elección a los biodigestores tipo UASB, los cuales requieren un sustrato de muy bajo contenido de sólidos en suspensión.

Por las razones expuestas, se consideró que el tipo de reactor adecuado era el de mezcla completa con agitación mecánica, térmicamente aislado y termostaticado a  $35^{\circ}\text{C}$ .

Por razones operativas, se estableció que la alimentación de sustrato se realizara en una sola operación diaria.

### **Estabilidad en el arranque del proceso**

No se detectaron las situaciones de inestabilidad química que suelen presentarse en el arranque del proceso, atribuibles a desequilibrios entre los microorganismos generadores y los consumidores de ácidos.

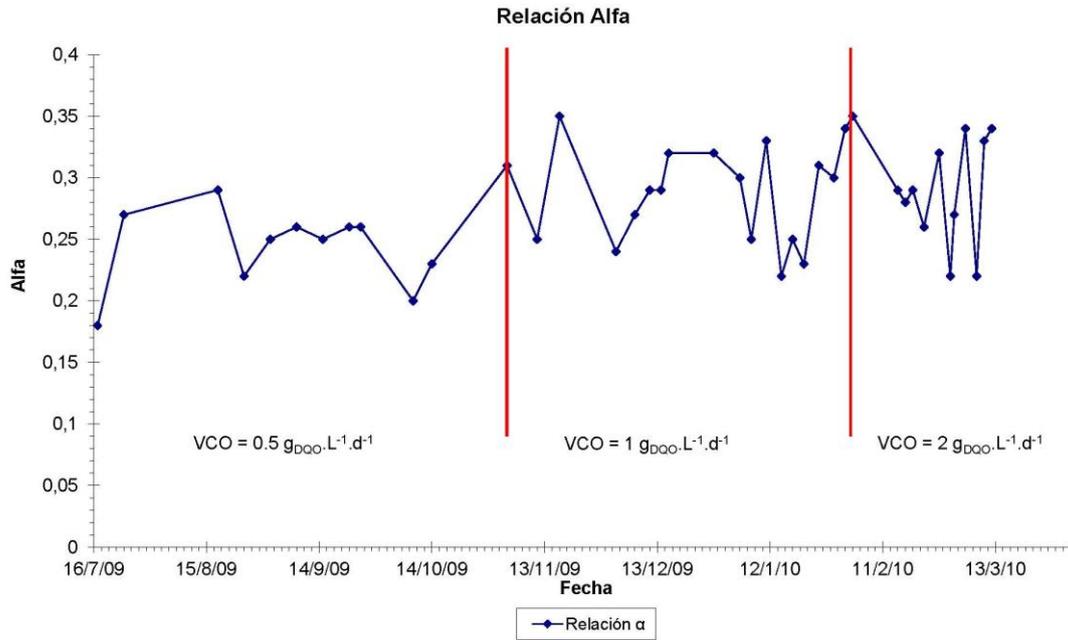
La adición de bicarbonato de sodio en el inicio del proceso permitió dotar al sistema de capacidad de respuesta ante estas potenciales inestabilidades, propias de esta etapa.

### **Estabilidad durante el proceso**

La estabilidad del proceso de biodigestión anaerobia estuvo dado por el equilibrio ácido base que se estableció entre el metabolismo de las bacterias productoras de AGV, el de las consumidoras de AGV y el sistema bicarbonato - dióxido de carbono, los cuales actúan como reguladores.

Se adoptó para el seguimiento de este equilibrio la determinación de la relación alfa. Algunos autores (Rojas, 1987) refieren que un valor de alfa de 0.2 resulta óptimo, mientras que un valor de 0.35 indica un inicio de acidificación, situación en la cual se debe observar y analizar la tendencia de este parámetro a los efectos de tomar medidas, como reducir o suspender la alimentación, en caso de que continúe ascendiendo su valor, hasta que el proceso se equilibre nuevamente en forma natural.

En la Figura 2 se observa la evolución de la relación alfa a diferentes VCO.



**Figura 2.** Evolución de la relación alfa para diferentes VCO.

**Figure 2.** Alpha ratio evolution at different OLR.

### Abatimiento de la carga orgánica

El residuo semisólido (sustrato) a procesar presentó los siguientes datos de caracterización:

DQO (g.kg<sup>-1</sup>): 97.1 ± 5.4 (n= 10)

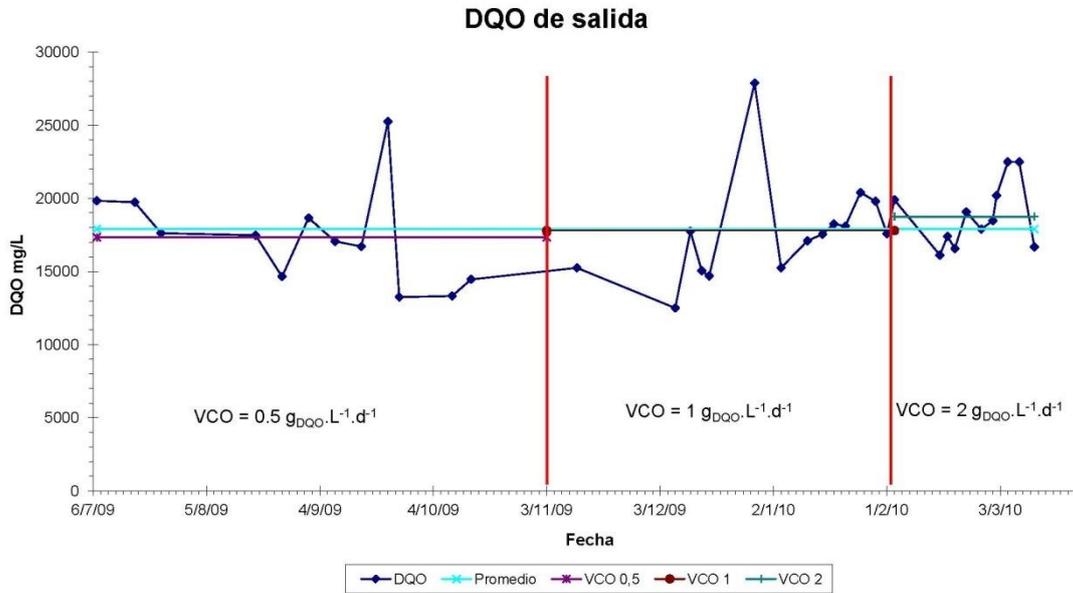
ST (g.kg<sup>-1</sup>): 100.7 ± 4.4 (n= 10)

SF (g.kg<sup>-1</sup>): 2.6 ± 0.4 (n= 10)

SV (g.kg<sup>-1</sup>): 97.7 ± 4.0 (n= 10)

Estos datos revelan que el sustrato a procesar es un material de alta carga y elevada proporción de materia orgánica en sus sólidos. A los efectos de evaluar el abatimiento de la materia orgánica en el proceso de biodigestión, se emplearon las medidas de DQO del sustrato y DQO del lodo de salida.

En líneas generales, se alcanzó un 80% de degradación de la materia orgánica ingresada, medida en términos de DQO.



**Figura 3.** Variación de DQO en lodos de salida del reactor.  
**Figure 3.** Change of COD in outflow sludge.

Los valores promedios de DQO y porcentaje de abatimiento, para cada VCO, se muestran en la Tabla 1.

VCO [ $\text{g}_{\text{DQO}}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ]	DQO [ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ]	Abatimiento [%]
0.5	$17.3 \pm 3.4$	$82.7 \pm 3.4$
1	$17.8 \pm 3.6$	$82.2 \pm 3.6$
2	$17.9 \pm 2.3$	$81.3 \pm 2.3$

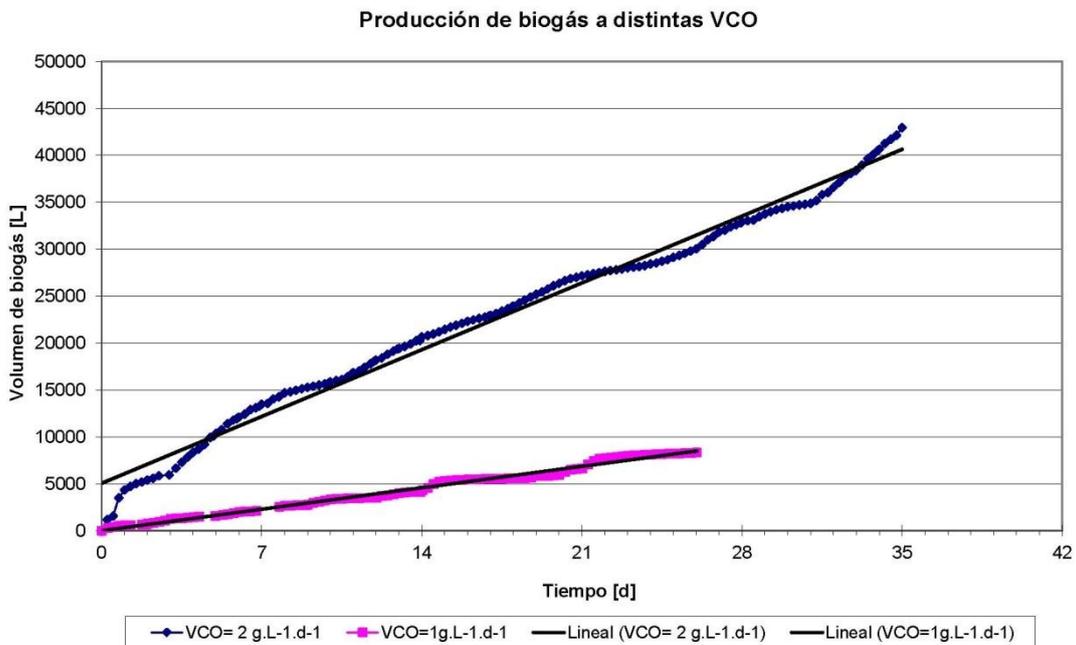
**Tabla 1.** DQO promedio de los lodos y porcentaje de abatimiento de la DQO para distintas VCO.

**Table 1.** Average sludge COD and COD reduction percentages at different OLR.

## Producción de biogás

En base a las lecturas periódicas de volumen de biogás registrado, se realizaron gráficas de producción de biogás para las diferentes VCO en función del tiempo.

En la Figura 4 se grafica la producción de biogás en un determinado período del proceso a VCO de  $1 \text{ g DQO.L}^{-1}.\text{d}^{-1}$  y a VCO de  $2 \text{ g DQO.L}^{-1}.\text{d}^{-1}$ . La producción diaria de biogás está dada por la pendiente de estas gráficas y puede verse el aumento de la producción al aumentar la VCO de 1 a  $2 \text{ g DQO.L}^{-1}.\text{d}^{-1}$ .



**Figura 4.** Producción de biogás trabajando a una VCO de 1 y  $2 \text{ g.L}^{-1}.\text{d}^{-1}$ .

**Figure 4.** Biogas production at 1 and  $2 \text{ g.L}^{-1}.\text{d}^{-1}$  OLR.

Los promedios de las mediciones están resumidos en la Tabla 2.

VCO [ $\text{g}_{\text{DQO}}.\text{L}^{-1}.\text{d}^{-1}$ ]	Producción diaria [ $\text{L}_{\text{biogás}}.\text{d}^{-1}$ ]	Producción específica [ $\text{L}_{\text{biogás}}.\text{g}_{\text{DQO}}\text{ abatida}^{-1}$ ]
1	326	0.39
2	1016	0.61

**Tabla 2.** Producción diaria de biogás y producción específica de biogás a diferentes VCO.

**Table 2.** Daily biogas production and specific biogas production at different OLR.

## CONCLUSIONES

El modelo de planta piloto construido permitió abordar el estudio de la biodigestión anaerobia de los residuos semisólidos provenientes de la industria citrícola, trabajando hasta una VCO igual a  $2 \text{ g DQO.L}^{-1}.\text{d}^{-1}$ .

A los efectos de controlar la estabilidad del proceso de biodigestión, la relación alfa resultó un parámetro adecuado y práctico, dada su simplicidad de ejecución y su escaso requerimiento de equipos y reactivos, en contraste con otras técnicas indicadas para este fin, recomendadas por el “Standard Methods for the examination of water and wastewater”, para la determinación de AGV por cromatografía o por destilación y posterior titulación.

La estabilidad observada indica que es factible continuar con el estudio de este proceso a mayores VCO, de modo de conocer los límites de trabajo exigibles para este diseño.

En líneas generales se alcanzó un 80% de degradación de la materia orgánica ingresada, medida en términos de DQO. Se observa que la DQO de los lodos de salida aumenta con el incremento de la VCO, por lo que el porcentaje de remoción de DQO disminuye.

Como residuo del proceso se obtuvo un lodo acuoso, con un 2% a 3% de ST y de baja peligrosidad, apto para ser dispuesto, de manera controlada, en suelos cultivables o en caminos de fincas.

La producción de biogás fue coherente con los valores teóricamente esperados en base a la materia orgánica degradada.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Eaton A, Clesceri LS, Rice EW & Greenberg AE. 2005. *Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater*. 21<sup>st</sup> edition. American Public Health Association (APHA), USA: 1336.
- Rojas O. 1987. Relación alcalinidad-ácidos grasos volátiles. En: Curso sobre Arranque y operación de sistemas de flujo ascendente con manto de lodos. Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia: D1-D31
- Urueña MR, Machado WD, Vera van Gelderen EM & Alonso MA. 2010a. Estudio de la actividad metanogénica de lodos fermentados como fuente para el tratamiento por biodegradabilidad anaeróbica de residuos de la industrialización de cítricos. *Avance Agroindustrial*, 31(2): 30-35
- Urueña MR, Vera van Gelderen EM, Machado WD & Alonso MA. 2010b. Estudios a escala laboratorio de biodegradabilidad de residuos semisólidos de la industria cítrica mediante la utilización de lodos anaeróbicos. *Avance Agroindustrial*, 31(4): 26-29