

## Estudios preliminares de la evolución de los lodos de un reactor anaeróbico trabajando con vinaza

César F. Molina\*, Rebeca D. V. Montoya\*\*, José H. Pisa\*, Walter D. Machado\*, Eugenio A. Quaia\*

### RESUMEN

Los reactores biológicos tipo UASB (reactores anaeróbicos de manto de lodo y flujo ascendente) son ampliamente usados en el tratamiento de efluentes líquidos de alta carga orgánica. Su diseño, apto para retener biomasa activa, permite mantener elevadas tasas de remoción de materia orgánica. Las principales características de los lodos presentes en estos biodigestores son la actividad metanogénica específica (AME), su concentración -expresada en términos de sólidos suspendidos volátiles (SSV)- y la estructura granular que adoptan en esta clase de biodigestores. Esta biomasa anaeróbica transforma la materia orgánica del efluente en biogás. En el presente trabajo se estudiaron los cambios producidos en la biomasa con respecto a los parámetros citados, en un reactor de 500 m<sup>3</sup> de volumen que opera con vinaza. El monitoreo de los lodos se realizó antes, durante y después del período de funcionamiento del reactor (150 días). El primer muestreo se realizó 59 días antes del arranque, para determinar la actividad (AME) de los lodos que permanecieron en el reactor desde la zafra anterior. Este se consideró el AME inicial y fue de 0,20 gDQO/m<sup>3</sup>.d. Al cabo de 227 días, 18 después de haberse detenido el reactor, la actividad de los lodos fue de 0,61 gDQO/m<sup>3</sup>.d. La biomasa, medida en términos de SSV durante el funcionamiento del reactor (150 días), se incrementó desde 1,27 Kg/m<sup>3</sup> a 6,41 Kg/m<sup>3</sup>, mientras que la granulometría de los lodos, en el mismo período, presentó una disminución de las fracciones de mayor tamaño.

**Palabras clave:** UASB, granulometría, AME, SSV.

### ABSTRACT

#### Preliminary studies of the evolution of the sludge of an anaerobic reactor working with vinasse

UASB (Upflow anaerobic sludge blanket) reactors are widely used in the treatment of wastewater with a high organic load. Its design, able to hold back active biomass, allows achieve high rate of removing organic matter. The main features of these sludge are specific methanogenic activity (SMA), their concentration, expressed as volatile suspended solids (VSS), and granular structure that this sludge take shape in these reactors. This anaerobic biomass is responsible for carrying out the transformation of organic matter into biogas. The present work was conducted to study the changes produced in biomass with respect to the parameters mentioned in a reactor of 500 m<sup>3</sup> volume operating with vinasse. The sludge monitoring was performed before, during and after the period of reactor operation (150 days). First sampling was done 59 days before starting-up, to determine the activity's sludge remaining in the reactor from the previous harvest. This one was considered the initial AME and was 0,20 gCOD / m<sup>3</sup>.d. After 227 days, 18 after the reactor have stopped, the activity of the sludge was 0,61 gCOD / m<sup>3</sup>.d. Biomass, measured in terms of volatile suspended solids (VSS), during reactor operation, increased from 1,27 kg/m<sup>3</sup> to 6,41 kg/m<sup>3</sup>, while the particle size of the sludge showed an decrease of the fraction of high measurement.

**Key words:** UASB, particle size, SMA, VSS.

---

\*Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales, EEAOC.

\*\*Ingenio La Trinidad.

federico.molina@eeaac.org.ar

## INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar es un cultivo estacional que en la provincia de Tucumán se desarrolla generalmente entre los meses de mayo a noviembre. Durante ese período, aunque algunas pocas firmas lo hacen todo el año, las destilerías asociadas a los ingenios azucareros generan altos volúmenes de vinaza, que es el residuo líquido proveniente de la elaboración de etanol. La vinaza es un líquido color caramelo, de olor dulzón, pH en el rango ácido y alta carga orgánica. Por estas características se hace necesario darle un uso apropiado o someterla a un tratamiento antes de disponerla en algún cuerpo receptor.

La biodigestión anaeróbica representa una de las opciones a estudiar para el tratamiento de la vinaza, y los reactores anaerobios de manto de lodos y flujo ascendente (UASB por sus siglas en inglés) constituyen una de las posibles implementaciones de este proceso. Los reactores UASB cuentan en su interior con una flora anaeróbica formada por diferentes grupos de bacterias y arqueas sintróficamente relacionadas, que se encargan de transformar la materia orgánica en biogás aprovechable como fuente de energía. Además, como característica particular de estos reactores, el consorcio microbiano exhibe la capacidad natural de agruparse en forma de gránulos pseudoesféricos bajo ciertas condiciones físicas, químicas y biológicas. Estos gránulos están formados por capas concéntricas donde, en muchos casos, cada capa está asociada a una fase del proceso de degradación (Guiot *et al.*, 1992). Además, poseen una densidad tal que les permite permanecer en suspensión en la corriente del influente que ingresa por el fondo del reactor y se distribuye en toda el área transversal desde la base. El sector superior del reactor cuenta con un sistema separador trifásico, gas-sólido-líquido, diseñado para permitir la salida de líquido (efluente tratado) y retener la fracción de los sólidos que pudieran llegar hasta allí arrastrados por la corriente ascensional. De esta manera se consigue retener y concentrar biomasa de elevada actividad biológica, permitiendo el tratamiento del efluente a elevadas velocidades de carga orgánica (VCO), con buenas eficiencias de remoción de materia orgánica. Si bien se logran las más altas eficiencias cuando la biomasa activa está en forma de gránulos compactos, no resultan despreciables las remociones obtenidas cuando el lodo es disperso, siempre y cuando mantenga una buena sedimentabilidad.

Un aspecto crítico del proceso de degradación se vincula con la naturaleza del consorcio bacteriano presente en los lodos, la concentración de microorganismos activos y su granulometría. La VCO está asociada a la demanda química de oxígeno (DQO) de la vinaza y al caudal de alimentación del reactor, mientras que la eficiencia del proceso es función de la DQO de entrada y salida.

En el presente trabajo se estudia la evolución de los lodos, durante el período de una zafra, en un reactor UASB de 500 m<sup>3</sup> alimentado con vinaza proveniente de una destilería de alcohol, que emplea melaza de caña de azúcar como mosto de fermentación, y se describen los principales parámetros de operación durante su funcionamiento.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Reactor UASB:** el sistema de tratamiento consta de tres tanques. El principal es el reactor propiamente dicho, fabricado en hormigón y recubierto interiormente con fibra de vidrio, de base rectangular de 13 m por 6,5 m, con un volumen real de 546 m<sup>3</sup> y uno útil de 504 m<sup>3</sup> (altura útil de 6 m). El segundo es un tanque pulmón y sedimentador de 125 m<sup>3</sup>, que recibe y permite la sedimentación de los sólidos de la vinaza antes de su ingreso al reactor. El tercer tanque está construido con acero inoxidable y cuenta con una capacidad de 1 m<sup>3</sup>. Allí se mezcla el reciclo que viene del reactor con la vinaza proveniente del equalizador para efectuar la alimentación. En la Figura 1 se muestra un esquema del sistema completo, sedimentador, tanque de alimentación y reactor UASB.

El sistema de tratamiento solo funciona continuamente durante el período de zafra, prácticamente en simultáneo con la generación de vinaza. Al concluir este proceso se detiene su funcionamiento a la espera del siguiente período fabril.

Se estudió la evolución de la biomasa presente en el reactor. Los parámetros operacionales y de control diario (caudales y DQO de la alimentación y reciclo, temperatura, pH, razón alfa, VCO, velocidad ascensional, porcentaje de remoción) fueron determinados por personal técnico del ingenio, encargado del reactor UASB.

Al momento del arranque el reactor contenía la biomasa almacenada desde la zafra anterior, la cual permaneció sin recibir alimentación por cinco meses. Durante el arranque se estableció una velocidad ascensional ( $V_a$ ) de 0,7 m/h para conseguir una desagregación de los lodos y una distribución uniforme de la biomasa en toda la sección del reactor; luego se disminuyó a 0,5 m/h aproximadamente, para evitar las posibles pérdidas de biomasa por el rebalse durante el proceso (Torkian *et al.*, 2001).

**Muestreo:** las muestras de lodos del reactor fueron tomadas de los cuatro tomamuestras, ubicados a distintas alturas en el reactor. El primero se encontraba a 20 cm de altura, mientras que los restantes estaban a uno, dos y tres metros, respectivamente, del fondo del reactor. El quinto punto de muestreo fue el rebalse, situado en la parte superior. Se realizaron nueve muestreos en un período de 227 días. El primer muestreo, tomado 59 días antes del arranque, sirvió para establecer la concentración y el estado de actividad de los lodos previo al inicio de

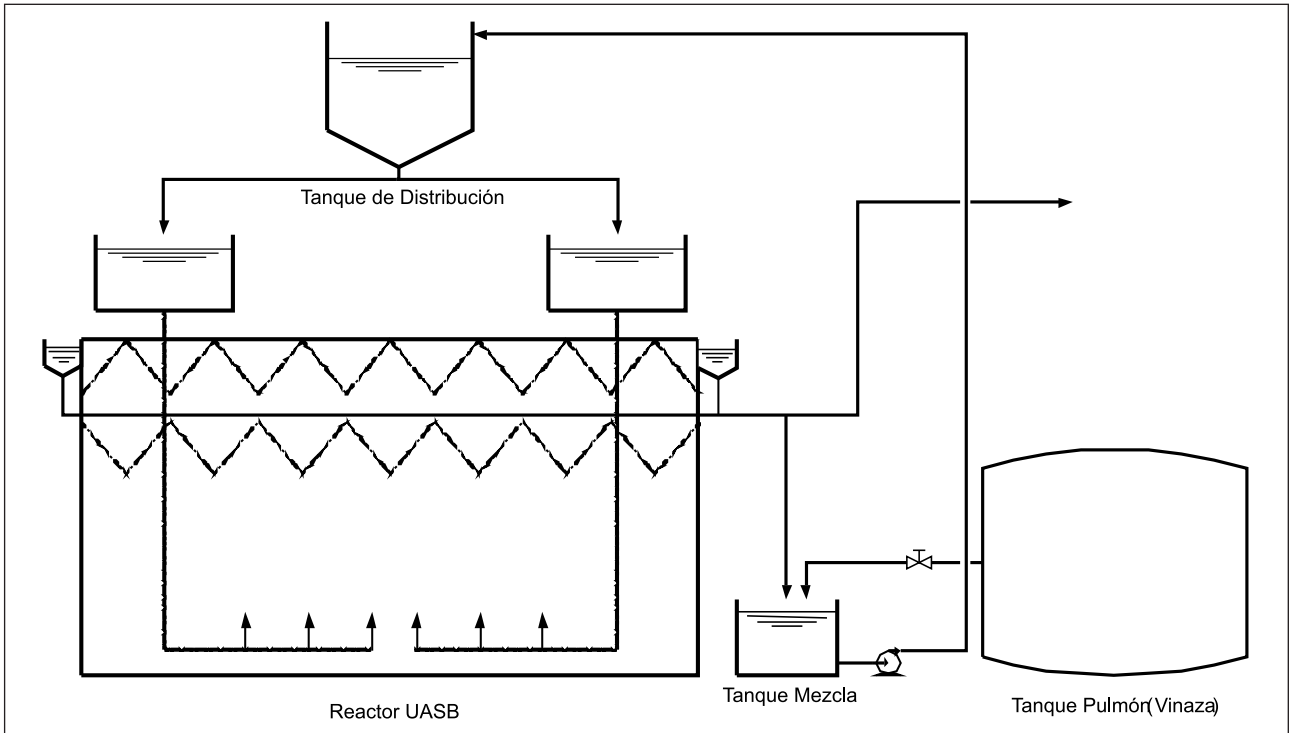


Figura 1. Esquema del reactor UASB.

operaciones. El último se realizó 18 días después del fin de la alimentación. El reactor fue alimentado con vinaza durante 150 días, período durante el cual se realizaron los siete muestreos restantes.

**Determinación de los sólidos suspendidos volátiles (SSV):** se realizó según la norma francesa AFNOR NF T90-105-2 (Asociación Francaise de Normalisation, 1997) modificada. Se tomaron muestras por duplicado y los resultados se graficaron en función de las alturas de los tomamuestras, y por medio de una integración del área debajo de la curva se calculó la concentración de SSV en todo el reactor.

**Determinación de la actividad metanogénica específica (AME):** para hacerlo más representativo se analizaron muestras compuestas por volúmenes iguales de los lodos tomados de los tomamuestras 1 y 3. Las AME se realizaron por quintuplicado, según el método descrito por Field *et al.* (1988).

**Determinación del factor  $\alpha$ :** éste es un parámetro útil para evaluar la capacidad “buffer” del sistema y su estabilidad ácido-base. Se lo obtiene mediante un análisis volumétrico que determina la alcalinidad total del sistema titulando hasta pH 5,75 y pH 4,3 con una solución valorada de ácido sulfúrico, registrándose los volúmenes gastados V1 y V2, respectivamente. Presenta la ventaja de que ambas determinaciones pueden hacerse sobre la misma muestra y es independiente del volumen de muestra usado (Rojas, 1987).

El volumen V1 representa la concentración aproximada de bicarbonato, mientras que el volumen V2

representa la suma de bicarbonato más las sales conjugadas de los ácidos grasos volátiles (AGV).

La relación alfa se define como:

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

**Granulometría y factor de crecimiento:** se realizaron placas de agar al 1,8% (p/v), con una dilución de cada muestra. Se escanearon las placas, y las imágenes obtenidas se analizaron a través de una herramienta informática (Image Tool), que permite contar y clasificar las partículas por rango de tamaño a intervalos preestablecidos. El programa brinda el porcentaje del total de partículas para cada rango de tamaño examinado. El análisis se hizo por duplicado con las muestras de los tomamuestras 1 y 3, considerando que en estas zonas se puede obtener suficiente información sobre el proceso de granulación dentro del reactor.

Para mejor interpretación se compararon los resultados de cada muestreo con el primero obtenido una vez arrancado el reactor. De esta manera se toma como referencia el primer muestreo y se puede visualizar mejor las variaciones de los porcentajes de tamaños de partículas, en igual volumen de muestras. Se propuso un índice, llamado factor de crecimiento (FC), para visualizar las variaciones en los porcentajes de las partículas de diferentes rangos de tamaños y se estableció de la siguiente manera:

$$FC = \frac{X}{X_{ref}} - 1$$

Donde: X es el porcentaje de partículas de un determinado rango, y Xref: es el porcentaje de partículas del mismo rango en el primer muestreo (tiempo cero).

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 muestra los valores medios de los parámetros de control durante el periodo estudiado.

Tabla 1. Valores medios de los parámetros operacionales.

Parámetros operacionales	
Temperatura (°C)	30,50 ± 2,50
pH	8,19 ± 0,23
DQO alim (g/L)	104,60 ± 13,38
DQO reciclo (g/L)	6,75 ± 2,34
Razón alfa	0,33 ± 0,12
Va (m/h)	0,55 ± 0,07
% Remoción	93,77 ± 2,34

El biodigestor contenía una cantidad de biomasa inicial de 1,27 kg SSV/m<sup>3</sup>, muy inferior a la recomendada por la bibliografía de 20 Kg SSV/m<sup>3</sup> para su operación (Hulshoff, 1989), por lo que se arrancó con un valor de VCO muy bajo para un reactor de alta carga, de 0,5 kg DQO/m<sup>3</sup>.día, y se fue incrementando de manera que al final del período operativo la VCO alcanzada fue de 7 kg DQO/m<sup>3</sup>.día.

En la Figura 2 se observa la evolución de los perfiles de distribución de SSV en el tiempo. La concentración de SSV aumenta en los tomamuestras superiores en detrimento de los inferiores, lográndose así que los lodos ocupen un mayor volumen en el biodigestor, es decir una mejor dispersión y, por lo tanto, una mejor performance de este.

En la Figura 3 se ve el incremento de la AME. Al inicio de las mediciones, día 1 del estudio, la AME fue de 0,20 gDQO<sub>CH4</sub>/gSSV.d, que correspondía a la actividad en los lodos almacenados en el reactor durante la interzafra (este muestreo se realizó 59 días antes del arranque del reactor), mientras que en la última medición, realizada a los 227 días del estudio, se arribó a una actividad de 0,61 gDQO<sub>CH4</sub>/gSSV.d. Este incremento presenta un comportamiento exponencial. El aumento en la AME tuvo dos consecuencias: por un lado, permitió aumentar la VCO sin correr riesgo de acidificación del medio, y por otro, condujo a una mayor producción de biogás, lo que generó turbulencia y mejoró la distribución de los microorganismos en el reactor.

Durante el tiempo en que el reactor fue alimentado, se observó un aumento de la concentración de SSV de 1,27 Kg/m<sup>3</sup> a 6,41 Kg/m<sup>3</sup> (Figura 4). Si bien no todo el aumento de la biomasa puede atribuirse al crecimiento microbiano, debido a que parte de esos SSV fueron aportados por el sustrato, se considera despreciable la fracción aportada por la vinaza. En la Figura 4 se observa la evolución de la biomasa dentro del reactor durante el período de operación.

En las Figuras 5 y 6, se muestran los análisis granulométricos de los lodos provenientes de los tomamuestras 1 y 3, respectivamente, durante el tiempo de

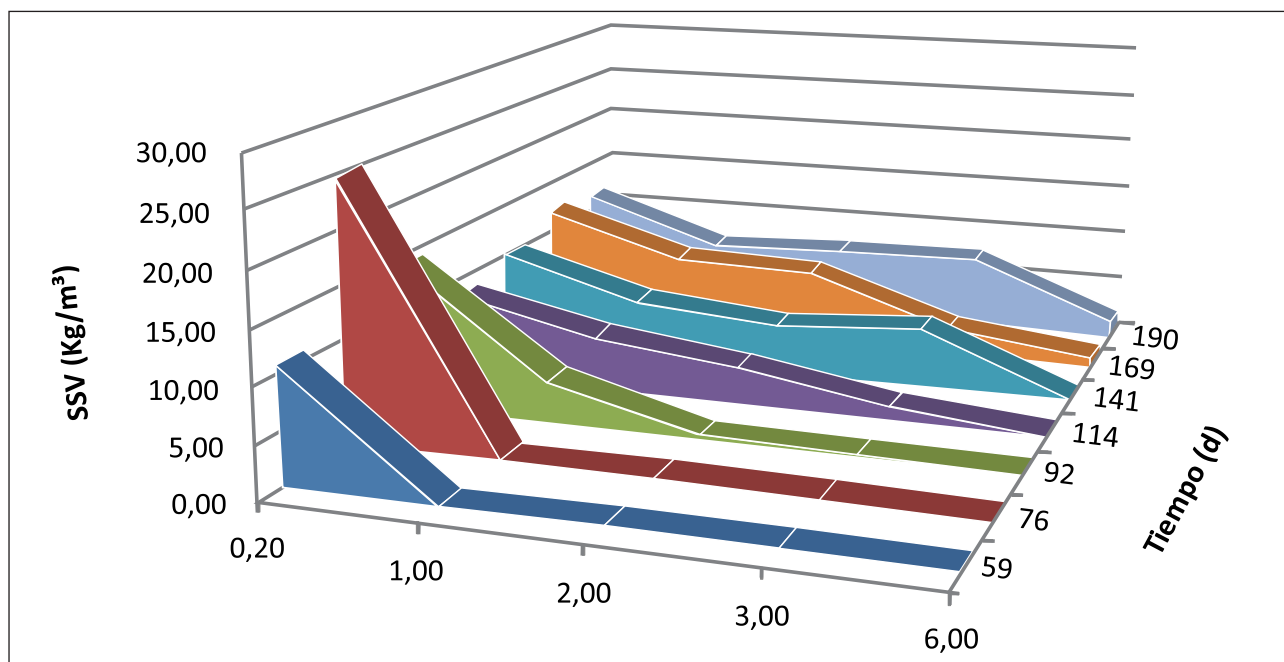


Figura 2. Perfil de distribución de los lodos dentro del reactor en cada muestreo.

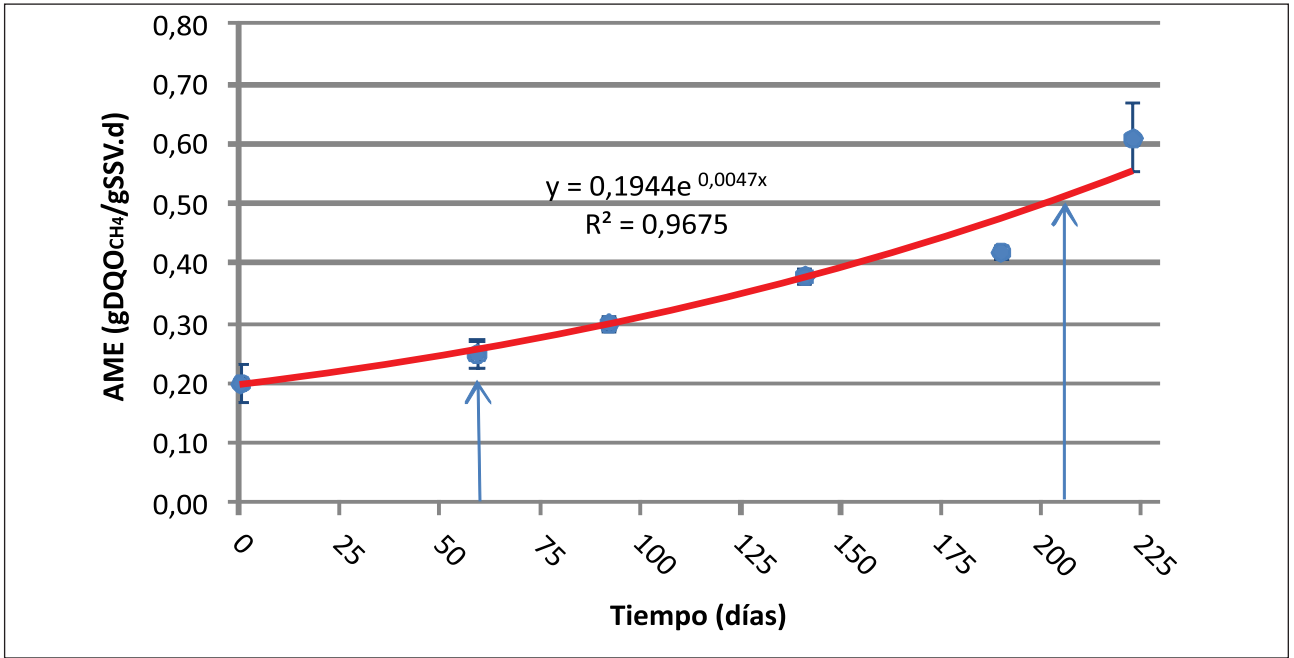


Figura 3. Evolución de la actividad metanogénica específica de los lodos del reactor UASB Entre flechas se indica el período que permaneció operativo el reactor.

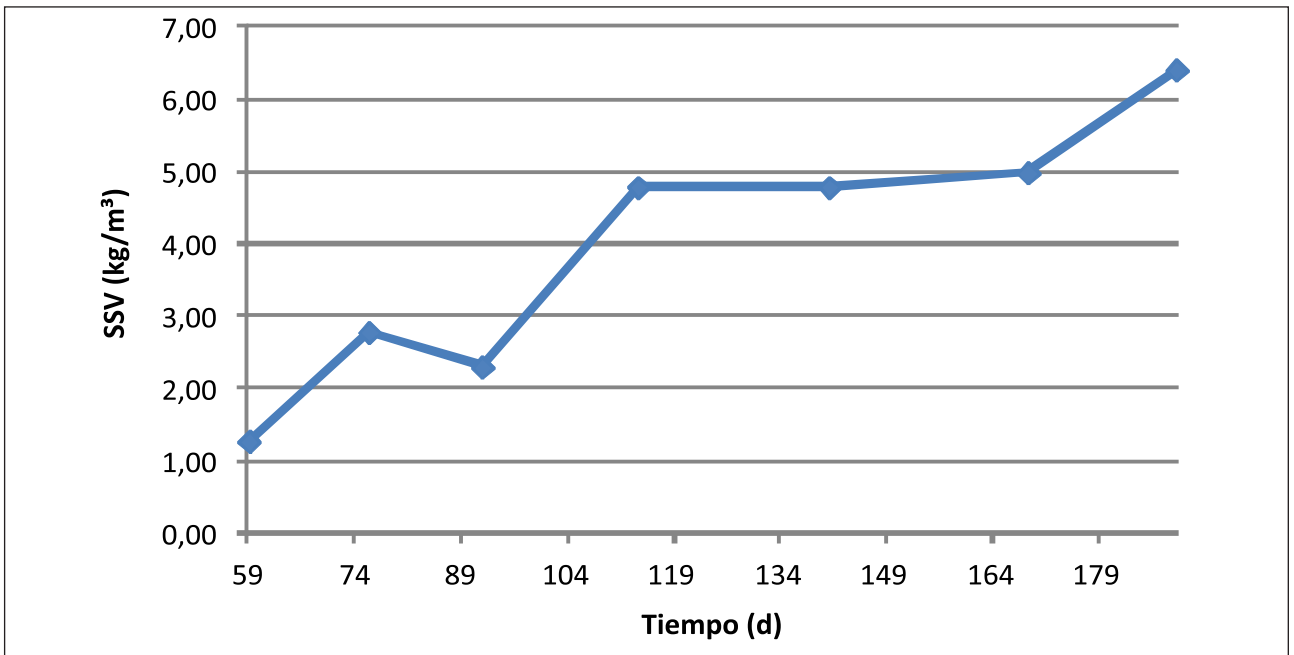


Figura 4. Evolución de la concentración de SSV en el reactor, durante el periodo muestreado.

operación del reactor. En la Figura 5 se puede apreciar un aumento sostenido de la fracción de partículas más pequeñas (<0,2 mm), llegando a alcanzar valores de 0,5 veces el valor inicial, hacia el día 190. Las partículas de entre 0,4 y 0,5 mm presentaron un aumento en la proporción de partículas de casi 2,5 veces su valor inicial durante los primeros 60 días, para luego bajar a los valores iniciales, cercanos al 1% hacia los 190 días. En cuanto a la fracción de gránulos entre 0,6 - 1,0 mm, presentaron comportamiento similar al anterior, mostrando un aumento

en su proporción durante los primeros 70 días de funcionamiento, con valores cercanos a seis veces el valor de referencia. Pero a partir del día 141, los muestreos evidencian una disminución de la proporción de los tamaños entre 0,6 y 1,0 mm, hasta 0,5 veces menores, inclusive al valor de referencia. Esto insinúa una desagregación de las partículas de mayor tamaño.

En cuanto al tomamuestra ubicado a 2 m de altura, en la Figura 6 puede verse la evolución de los tamaños de partículas del tomamuestra 3. Se observa un sostenido

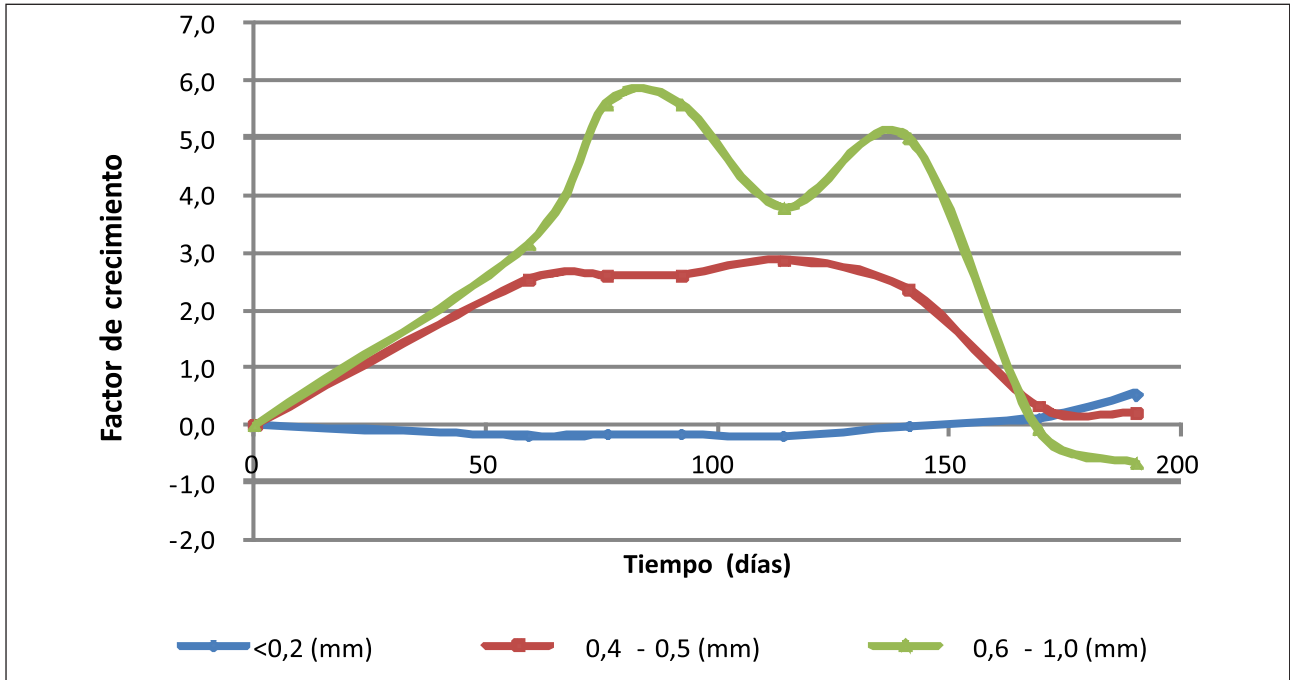


Figura 5. Evolución de la proporción de tamaños de partículas, en las muestras analizadas, de los lodos en el tomamuestra 1.

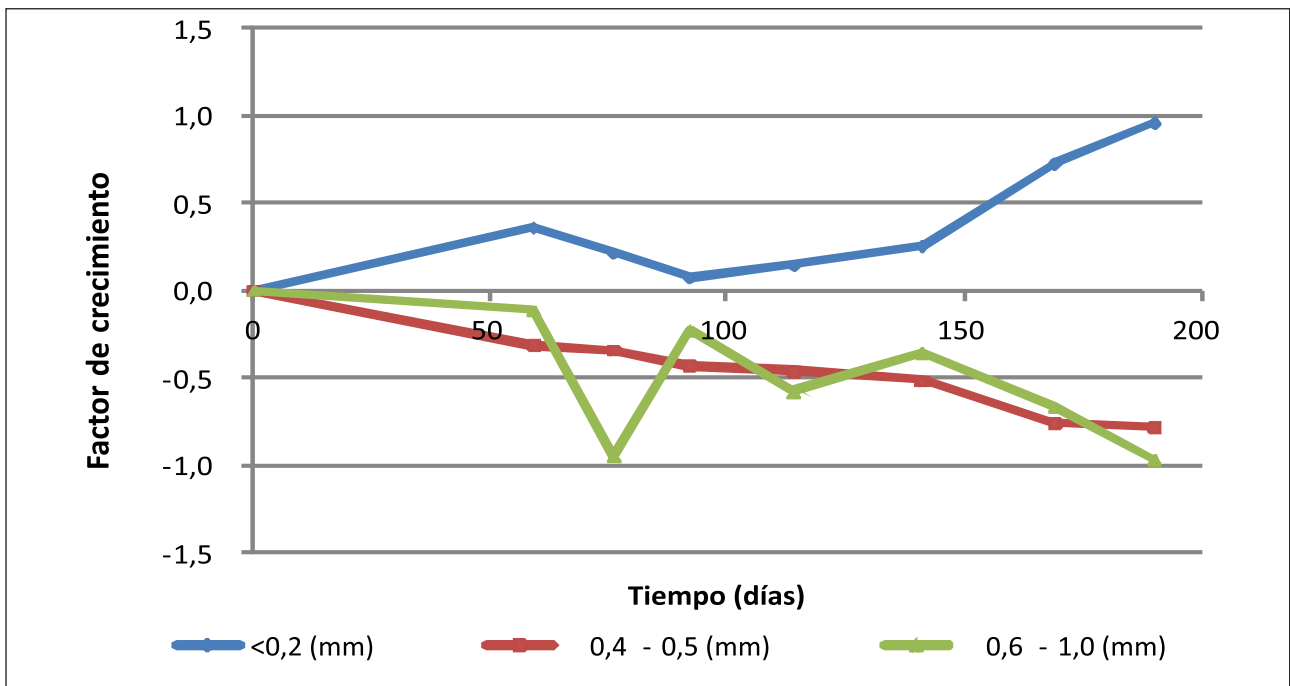


Figura 6. Evolución de la proporción de tamaños de partículas, en las muestras analizadas, de los lodos del tomamuestra 3.

aumento de la fracción de partículas más pequeñas (<0,2 mm), que llega a duplicar el valor inicial a los 190 días de funcionamiento del reactor. Las partículas de entre 0,5 y 0,6 mm presentaron una disminución sostenida en su proporción, llegando a ser a los 190 días de funcionamiento casi un 60% menor al valor inicial. En cuanto a las

partículas más grandes detectadas (0,6 a 1 mm), se observa el mismo comportamiento pero más pronunciado aún, llegando a ser la disminución de la proporción cercana al 97% del valor inicial. Lo que sugiere que en este último muestreo se produjeron la pérdida de las partículas de entre 0,6 y 1,0 mm de diámetro en el toma 3.

## CONCLUSIONES

Las condiciones operacionales del biodigestor fueron satisfactorias, ya que no solo se triplicó la actividad metanogénica específica de los lodos, sino que también se logró una dispersión uniforme de estos en el reactor, con un incremento de biomasa de aproximadamente cinco veces. El marcado aumento de la biomasa junto con el de su actividad fueron indicadores de buen funcionamiento del reactor. Esto permitió alcanzar valores de VCO de 7 KgDQO/m<sup>3</sup>.día, manteniendo una eficiencia de remoción del 93%, aproximadamente. El seguimiento de la granulometría de los tomamuestras 1 y 3 manifiesta un comportamiento desparejo de los gránulos. En el toma 1 se ve un marcado aumento de la cantidad de partículas de mayor tamaño detectado, hasta 1 mm, sobre todo en los primeros tres meses de funcionamiento, tendiendo a desaparecer al final del ciclo (190 días); mientras que en el tomamuestra 3, las partículas de mayor tamaño tienden a desaparecer en forma casi lineal hacia los 190 días de funcionamiento. Para las fracciones de partículas más pequeñas (0,2 mm), el aumento fue mayor en el toma 3 que en el toma 1.

El estudio de la granulometría sugiere que, con el tiempo, hay una tendencia a la desaparición, en general, de las fracciones de partículas de mayor diámetro, a la vez que hay una acumulación de las partículas de mayor tamaño (entre 0,6 y 1mm) en la parte más baja del reactor (tomamuestra 1), y de las partículas más pequeñas (<0,2 mm) en la parte más alta (tomamuestra 3).

Resulta destacable que aun habiéndose iniciado el estudio del reactor después de un período de inactividad,

se logró un desarrollo creciente de la biomasa y fue posible mantener las condiciones operativas, por lo que se recomienda implementar su funcionamiento continuo a lo largo de todo el año, buscando el modo de acumular vinaza para mantener el reactor operativo durante la interzafra.

## BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Association Francaise de Normalisation T90-105-2. 1997** Dosage des matières en suspension. Methode per Centrifugation.
- Field, J.; R. Sierra Alvarez; G. Lettinga. 1988.** Ensayos Anaerobios. En: Actas del 4º Seminario de Depuración Anaerobia de Aguas Residuales. Coordinadores F.Fdz Polanco; P.A. García; S. Hernando. Secretariado de Publicaciones Universidad de Valladolid. Valladolid, España, 1988.
- Guiot R. S.; A. Pauss; J. W. Costerton. 1992.** A structural model of the anaerobic granule consortium. *Water Science and Technology* 25: 1-10.
- Hulshoff Pol, L. 1989.** The Phenomenon of Granulation of Anaerobic Sludge. Tesis doctoral. Universidad de Wageningen, Holanda.
- Rojas, O. 1987.** Relación alcalinidad-ácidos grasos volátiles. En: Curso Arranque y operación de sistemas de flujo ascendente con manto de lodos. Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia, 1987.
- Torkian A.; S. Hashemian; A. Egbali. 2001.** Effect of up flow velocity and temperature on the performance of UASB system treating slaughter effluent. Bridging the gap. *World Water Congress*, pp. 1-10.