

## VENTAJAS DEL EMPLEO DE REACTORES UASB EN EL TRATAMIENTO DE RESIDUALES LÍQUIDOS PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS

Rosa Catalina Bermúdez Savón, Suyén Rodríguez Pérez, Mirna de la C. Martínez Abreu,  
Adis I. Terry Brown.

Centro de Estudios de Biotecnología Industrial, Universidad de Oriente

*En el presente trabajo se abordan las ventajas del uso de reactores de alta velocidad como es el caso de los reactores UASB para el tratamiento de aguas residuales. También se evalúa la digestión anaerobia como método eficiente para la biodegradación de residuales y para la obtención de biogás como una forma de energía renovable. Son descritas estrategias para evaluar diferentes residuales y las posibilidades para el uso de la digestión anaerobia empleando un reactor UASB, lo cual puede ser usado por diferentes grupos que trabajan esta temática.*

**Palabras clave:** residuales líquidos, biogás, reactores UASB.

*The work is about the advantages of the use of high rate reactors such as UASB reactors to wastewater treatment. It is also evaluated the anaerobic digestion as method that is efficient to waste biodegradation and to obtain biogas as renewable energy. Strategies to evaluate different residuals and the possibilities for the use of anaerobic digestion employing UASB reactor is described, which can be used for different groups that are working on topic.*

**Key words:** residual liquids, biogas, reactors UASB.

### Introducción

En nuestra sociedad actual es un imperativo restaurar la calidad del agua usada y descargada por las industrias, para la protección del medio ambiente. Todas las posibilidades para encontrar tratamientos económicos y prácticos deben ser consideradas, en particular los tratamientos biológicos, por la capacidad de biodegradar los compuestos contaminantes a intermediarios sencillos. Dentro de ellos, el tratamiento anaerobio es el más ventajoso.

Debido a su capacidad de degradar ciertos compuestos tóxicos, así como contaminantes orgánicos comunes en aguas residuales industriales, la biotecnología anaerobia ha avanzado a niveles elevados de aplicación, y se ha establecido como una opción viable en el tratamiento y restauración de muchos efluentes de las industrias. El tratamiento anaerobio de aguas residuales con niveles de contaminación medianos y altos, es en el presente aceptado como una tecnología probada. /16/

La digestión anaerobia es un proceso microbiológico complejo que se realiza en ausencia de oxígeno, donde la materia orgánica es transformada a biomasa y compuestos orgánicos, la ma-

yoría de ellos volátiles. Aunque es un proceso natural, sólo en los últimos veinticinco años ha llegado a ser una tecnología competitiva en comparación con otras alternativas. Esto ha sido posible gracias a la implementación de sistemas que separan el tiempo de retención hidráulico (TRH), del tiempo de retención celular (TRC), los cuales han sido denominados reactores de alta tasa. Durante este proceso también se obtiene un gas combustible (biogás) y lodos con propiedades adecuadas para ser usados como bioabonos.

Las tecnologías del tratamiento anaerobio como el reactor de flujo ascendente anaerobio de lecho de lodos (UASB) y el filtro anaerobio, están siendo rápidamente aceptados para tratamiento industrial de aguas residuales, que no cumplen con las regulaciones ambientales para descarga directa a cuerpos receptores por su elevada DQO, bajo pH y presencia de sólidos en suspensión, además de sus grandes volúmenes /6/. La tecnología de la digestión anaerobia se encuentra firmemente establecida a nivel mundial y en América Latina, y puede ser adaptable a las características del residual por tratar y el lugar donde se quiera implementar. En Cuba, se ha trabajado en el tratamiento anaerobio de vinazas provenientes de

melazas, fundamentalmente en el ICIDCA empleando reactores UASB, a escala piloto /9/ y en el tratamiento de residuos de centros porcinos, mediante el empleo de filtros anaerobios. /11/

Existen numerosas aguas residuales industriales las cuales resultan buenas candidatas para el tratamiento anaerobio, pero en cuya composición existe uno o algunos compuestos que resultan tóxicos para la biomasa anaerobia. Es raro actualmente encontrar un agua residual industrial libre de compuestos tóxicos, por lo que se hace necesario el estudio desde nivel de laboratorio, de cada residual en particular. Afortunadamente ambos procesos, aerobios y anaerobios, han demostrado consistentemente su capacidad para la remoción eficiente de varios contaminantes de aguas que contienen tóxicos, si las condiciones favorables son establecidas.

El presente trabajo tiene como objetivo valorar las ventajas del empleo de reactores UASB en el tratamiento de residuales líquidos, estableciendo estrategias que permitan la asimilación de esta tecnología y su explotación eficiente para la obtención de biogás.

## Desarrollo

Teniendo en cuenta que en nuestra región existen una serie de industrias, las cuales generan residuales líquidos en diferentes volúmenes y cuyas composiciones afectan en mayor o menor medida a los ecosistemas donde son vertidos; se seleccionaron para este trabajo dos residuales, los que se generan en grandes volúmenes, representativos de industrias contaminantes de nuestra región. Éstos son, la vinaza de destilería y las aguas de despulpe y lavado del beneficio húmedo del café.

Ambos residuales, según caracterización realizada en la tabla 1, contienen elevada carga orgánica, son fácilmente acidificables por contener compuestos fermentables como azúcares sencillos y/o ácidos grasos volátiles. En el caso de la vinaza, obtenido del proceso de fermentación de las mieles finales para obtención de alcohol, es liberada a temperaturas de 80-110 °C y contiene concentraciones elevadas de algunos iones que pueden ser tóxicos al proceso de digestión anaerobia. En el caso de las aguas residuales del beneficiado del café, se adiciona a sus caracte-

Tabla 1  
Caracterización físico-química de los residuales del beneficio húmedo del café

Parámetros	Agua de despulpe	Agua de lavado
pH	4,6	4,6
Carbohidratos totales (g/L)	0,83	0,72
Azúcares reductores (g/L)	0,94	0,12
Taninos (mg/L)	0,16	0,05
Fenoles (mg/L)	80,0	10,0
Cafeína (mg/L)	23,0	10,0
DQO (mg/L)	2 532,32	2 904,72
AGV (mg HAc/ L)	6,96	50,37
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	15,0	10,0
Sólidos totales disueltos (mg/L)	3 660,0	2 287,0

El agua de lavado se analizó a las 24 h de fermentación.

rísticas la presencia de compuestos que pueden ser tóxicos o inhibitorios al proceso de tratamiento (cafeína, fenoles y taninos), además de ser un proceso agroindustrial estacional.

Analizadas las características de los residuales y teniendo en cuenta nuestro objetivo de tratamiento de estas aguas y mayor eficiencia en la producción

de biogás con mayor contenido de metano, con vistas a su empleo como gas combustible u otros usos, en las comunidades aledañas a estas industrias, se procedió a la elaboración de una estrategia de tratamiento de estos residuales empleando reactores UASB. En la figura 1 se expone la estrategia de trabajo.

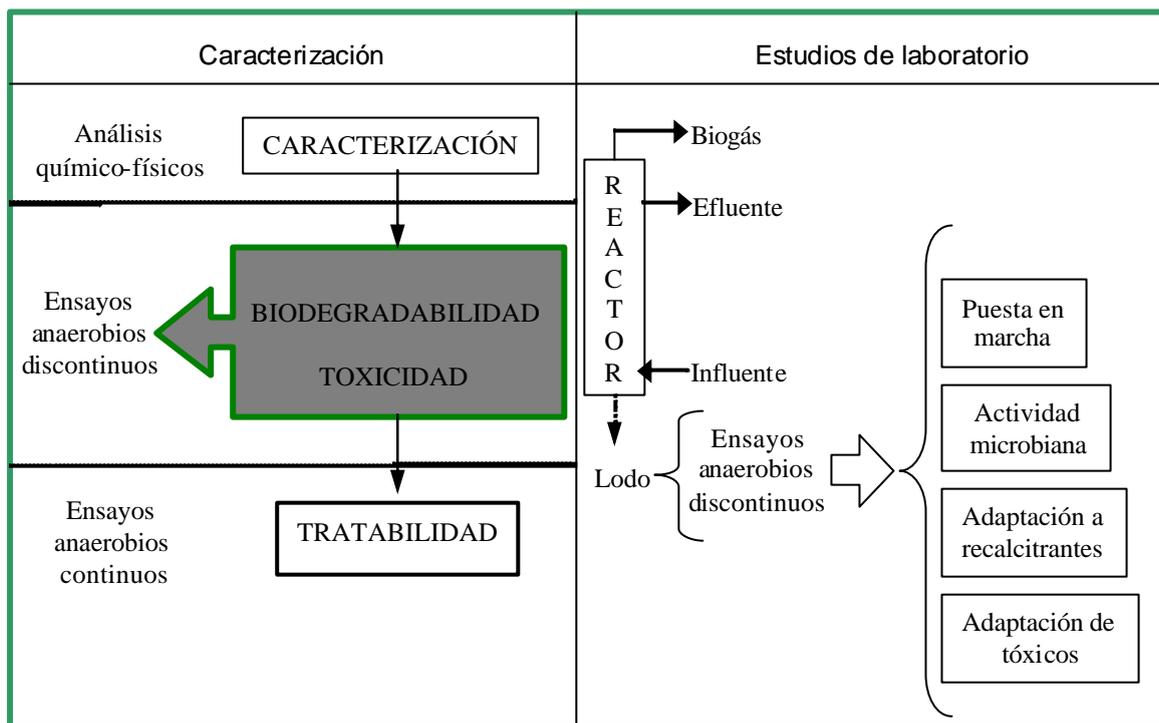


Fig. 1 Ensayos anaerobios en la caracterización de efluentes residuales y su tratamiento en los digestores.

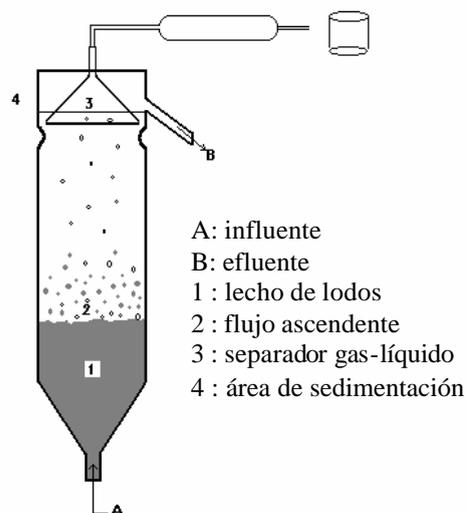


Fig. 2 Esquema de un reactor UASB con sus diferentes partes.

Se emplearon prototipos de laboratorios de reactores UASB los cuales se esquematizan en la figura 2 donde se desarrollaron estudios de selección de inóculos, de adaptación del mismo y seguimiento de estrategias de tratamiento, con el fin de poder seleccionar las mejores condiciones para una mayor producción de biogás, lo que se corresponde con una mejor descontaminación. En todos los casos se hicieron a la par ensayos discontinuos, para la determinación de biodegradabilidad de los diferentes residuales, actividad metanogénica de los lodos ensayados y la evaluación en ensayos en lotes de la toxicidad de algunos de aquellos compuestos que se preveía que podrían ser tóxicos o inhibitorios al proceso como la cafeína y los fenoles. Estos ensayos se realizaron en botellas serológicas conectadas a recipientes conteniendo NaOH al 3 %, permitiendo la determinación de metano por un sistema de desplazamiento líquido.

## Resultado y discusión

Atendiendo a las características de los residuales mostradas en las tablas 1 y 2, se puede plantear que el tratamiento anaerobio empleando

Tabla 2.  
Composición de la Vinaza.

DQO (g/L)	62,7-112,5
SST (g/L)	4,50- 7,30
ST (%)	5,0-7,0
pH	4,2-4,7
Alcalinidad (g/L)	0,7-5,0
AGV (g/L)	2,2-6,3
Densidad (g/L)	1,02-1,04
Sodio (Na <sub>2</sub> O) (g/L)	8,8
Potasio (K <sub>2</sub> O) (g/L)	3,2
Calcio (CaO) (g/L)	0,106

reactores de alta tasa como el UASB, resulta apropiado, pues los residuales contienen valores de carga orgánica por encima de los 1 000 mg/L. Se tuvo mucho cuidado en la selección de la estrategia por seguir, poniendo énfasis en reducir los efectos posibles de iones tóxicos o el hecho de ser residuales con facilidad para acidificarse. Para esto se neutralizaron ambos residuales para su tratamiento a valores alrededor de pH 7 con la adición de sosa o cal. Se aconseja el empleo de la sosa, pues la adición de cal incrementaría la concentración de calcio en el medio, que aunque es reportado como un promotor de la granulación de los lodos, también a concentraciones elevadas se convierte en inhibitorio del proceso, además de traer aparejado fenómenos de formación de costra.

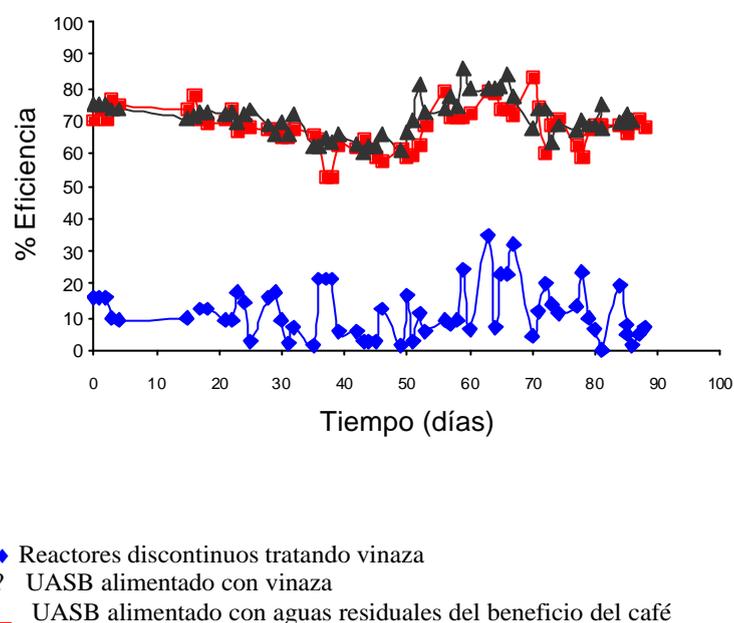
El estudio de fenómenos de granulación en los reactores UASB es importantísimo, porque el lodo granular constituye la base del funcionamiento de estos reactores. El lecho de lodos debe poseer excelentes cualidades de sedimentación, lo que le permite ser considerado como una fase separada del fluido con características específicas, y puede resistir fuerzas de mezclado relativamente altas, por lo que la selección de inóculos con características apropiadas que pueden dar surgimiento a lodos granulares, es un aspecto crítico de este estudio. Se evaluaron diferentes fuentes de inóculo de la región, seleccionando fundamentalmente, aquellas provenientes de digestores discontinuos en explotación con residuales similares a los tratados o de lagunas anaerobias. Éstos presentaron actividades específicas por encima de 0,1 gDQO/gSSV\*d, no siendo considerados los óptimos, pero sirviendo de punto de partida para la adaptación de las "semillas" de los reactores UASB. No obstante, con la implementación de estos lodos específicos se llega a producciones de biogás de 1 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>\*d, siendo favorables para su uso como combustible.

Para los compuestos definidos como tóxicos o posibles inhibitorios, se estudió su toxicidad y se determinó que en las concentraciones en las cuales se alimenta (junto al influente) no resultan perjudiciales para el proceso de tratamiento. Se hace hincapié en el monitoreo de las concentra-

ciones de ácidos grasos volátiles, pues en algunas etapas del funcionamiento del reactor hubo tendencia a la acidificación, por lo que se sugiere en ambos residuales, la digestión anaerobia en dos etapas.

El tratamiento de la vinaza y las aguas de despulpe y lavado del beneficiado de café, mostraron que éstas resultaron ser tratadas de forma efectiva mediante la digestión anaerobia, pues al determinar el nivel de remoción de la DQO /1/, éste se encontraba por encima del 60 % (Figura 3). Ambos residuales permiten mediante su tratamiento la conversión de gran parte de su carga orgánica contami-

nante en metano, promoviéndose la conversión de alrededor de  $0,30 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg DQO}$  removido. Hay que señalar que en estos tratamientos anaerobios con los reactores propuestos de segunda generación (UASB) se garantiza que alrededor del 80 % de la carga orgánica contaminante sea convertido a productos volátiles, como es el caso del metano (principal componente del biogás), que se lograron concentraciones de éste en la fase gaseosa por encima del 70 %, garantizándose la capacidad combustible del biogás. Solamente alrededor de un 3 % de la materia orgánica es empleada para



**Fig. 3 Comportamiento de la eficiencia de remoción de la DQO.**

la producción de biomasa, reduciéndose los problemas de disposición final de los lodos, que generalmente requiere de otro tratamiento. Otra ventaja significativa de este tratamiento anaerobio es el ahorro de energía por concepto de no requerir de aireación, que es uno de los principales gastos que se incurren en procesos ingenieriles.

### **Importancia y ventajas económicas del tratamiento anaerobio con reactores UASB**

De manera general, la elección de una determinada modalidad tecnológica depende de las características específicas del residual por tratar y de los beneficios económicos que se derivan de ésta.

La factibilidad económica de emplear pretratamientos anaerobios antes de los tratamientos aerobios, fueron evaluados para aguas residuales de altas cargas orgánicas por Eckenfelder /2/. Los resultados de modelamientos económicos indican que los pretratamientos anaerobios son factibles desde el punto de vista económico con efluentes de cargas superiores a los  $1\,000 \text{ mg/L DBO}$ .

Sustanciales costos-beneficios son logrados cuando los criterios de diseño son tenidos en cuenta. A esto se suman las ventajas tecnológicas que cada diseño implica por sí mismo.

Ahorros económicos asociados con los procesos anaerobios. /14/

Los reactores del tipo UASB presentan una serie de ventajas sobre los sistemas aerobios conven-

◆ Niveles de síntesis reducida	◆ \$ 50/1 000 kg DQO utilizado o \$ 1 000/ton
◆ Bajos requerimientos de nutrientes	◆ \$ 50/1 000 kg DQO destruida
◆ Ahorro eléctrico (no transferencia de O <sub>2</sub> )	◆ \$ 50/1 000 kg DQO removida o \$ 0,05/kwhr
◆ Beneficios de productos como el metano utilizado como energía.	◆ \$ 60/1 000 kg DQO destruida o \$ 5/10 <sup>6</sup> BTU

cionales, la inversión principalmente es menor (costos de implantación y manutención), producción pequeña de lodos excedentes, consumo pequeño de energía eléctrica y simplicidad del funcionamiento /8/. Ellos son económicos energética y ecológicamente.

Estudios desarrollados por Lettinga /4, 5/, muestran los bajos costos de inversión y operaciones relativas a la implementación de esta tecnología. Más recientemente, estudios de oportunidad realizados por Santiesteban /12, 13/ y Pérez /7/, para la aplicación de los UASB al tratamiento de vinazas de destilería, indican una rápida amortización de la inversión inicial con saldos económicos atractivos, cuando se consideran alternativas para el uso del biogás y de los lodos como biofertilizantes. Similares resultados han sido reportados por Viñas /15/ en el tratamiento de residuales agropecuarios con reactores UASB. Estos autores plantean que el costo de producción de 1 m<sup>3</sup> de metano oscila entre \$ 0,06 y \$ 0,13 (USD), pudiéndose recuperar la inversión inicial en un período de 2-3 años.

Los costos de inversión de una planta UASB dependen de su tamaño, las características del residual por tratar, el equipamiento auxiliar, las facilidades del postratamiento, entre otros aspectos. En el costo también influye notablemente la situación local. Los costos de inversión de una planta industrial del tipo UASB están en el orden de 300 000-750 000 USD para una capacidad de tratamiento de 1 000 m<sup>3</sup>.

Teniendo en cuenta que el consumo energético es bajo y que la operación no es compleja, los costos totales de operación son bajos; esto, unido

a nuestro clima tropical donde la producción de metano se maximiza, hace que la digestión anaerobia con estos reactores se convierta en una alternativa atractiva desde el punto de vista técnico-económico-social.

Además de las ventajas intrínsecas de los procesos anaerobios, a través de estos procesos se obtienen subproductos los cuales pueden ser utilizados posteriormente, alcanzándose beneficios apreciables de su aprovechamiento. Éstos son:

- **Biogás:** Producto gaseoso que puede ser empleado como combustible. Según los reportes energéticos 1 m<sup>3</sup> de biogás equivale a 0,55 L de fuel-oil. Éste puede sustituir parte del combustible (60 %) que se consume en las calderas de las propias plantas de destilación.
- **Lodo:** Estudios realizados han demostrado que su composición guarda riquezas en cuanto al contenido de materia orgánica y mineral, pudiendo emplearse como biofertilizante y mejorador de suelos /10/. También se ha mostrado que debido a su composición aminoacídica, calidad sanitaria, concentraciones de nitrógeno y proteína bruta, puede ser utilizado como alimento animal /3, 7/
- **Efluente líquido:** Según los resultados obtenidos en investigaciones, se ha demostrado que éste conserva nitrógeno en forma fácilmente asimilable y otros iones, los cuales enriquecen este residuo y lo hacen propicio para su uso en fertirriego.

Los valores de producción anual para cada uno de los subproductos mencionados fueron calculados por Pérez /7/ y se muestran a continuación:

Como puede observarse, el uso integral de la tecnología de la digestión anaerobia para el trata-

---

Beneficios económicos del uso de los productos obtenidos del proceso de digestión anaerobia en una planta procesando 500 m<sup>3</sup>

Producto	Usos	Valor de la producción/ M USD
Biogás	Combustible	299,950
Lodo	Alimento animal	372,456
Efluente	Fertirriego	368,706
Total	-	1 041,112

miento de aguas residuales de elevada carga como la vinaza y aguas del beneficiado, brinda ventajas económicas y tecnológicas que permiten implementarlas tanto a pequeña como gran escala. Esto se suma a los beneficios ambientales y de operación que son propios de esta tecnología, lo cual ha incidido en la aplicación generalizada de ésta para la descontaminación.

## Conclusiones

- La digestión anaerobia de la vinaza y las aguas residuales del beneficiado de café, presenta numerosas ventajas sobre otras formas de tratamientos biológicos, entre las que se destaca la obtención de un gas combustible cuyo uso puede ser una alternativa viable para las comunidades donde se implemente este sistema de tratamiento.
- El empleo de reactores de segunda generación (UASB) para el tratamiento de estos residuos se justifica por los grandes volúmenes de residuales generados, las cargas orgánicas superiores a los 1 000 mg DQO/L y la necesidad de obtener mayores valores de remoción de la contaminación.
- El empleo de estos reactores posibilita eficiencias de obtención de biogás por encima del m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> de digester, obteniendo valores de metano en su composición por encima del 70 %, lo cual habla a favor de la calidad del biogás obtenido y de su empleo en usos más específicos, ya sea combustible para cocción de alimentos o funcionamiento de grupos electrógenos para alumbrado.

## Bibliografía

1. APHA; *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 19<sup>th</sup> ed., Washington D.C, USA, 1995.
2. Eckenfelder, W.; Patoscka J.; Pulliman G., "Anaerobic vs aerobic treatment in the USA", In *Anaerobic Digestion*, Hall E. R. and Hobson P.N. editors, Pergamon Press, 1988, págs. 105-114.
3. Figueroa, V., "La producción porcina en Cuba", en *Rev. ACPA*, vol. I, 1993, págs. 31-33.
4. Lettinga, G., "Design operation and economy of anaerobic treatment", en *Wat. Sci. and Technol.*, vol. XV, No. 8, 1983, págs. 177-195.
5. Lettinga, G. *et al.*, "Use of upflow sludge blanket reactor concept for biological wastewater treatment specially for anaerobic treatment", *Biotechnol. Bioeng.*, vol. XXII, 1980, págs. 699-734.
6. Noyola, A., *Treatment of Distillery Wastewaters*. Proceedings of the Third International Symposium on Waste Management Problems in Agro-Industries. México, 4-6 October 1995.
7. Pérez, J., Análisis de la viabilidad del uso de lodos anaerobios como alimento animal, Tesis de maestría, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba, 1998.
8. Ramírez, O.; Koetz, P., *Evaluación de un reactor UASB para el tratamiento de efluentes de la industria de aceite de arroz*, V Taller y Seminario Latinoamericano de Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales, Viña del Mar, Chile, 1998.
9. Ramos, J.; Obaya, M. C.; Valdés E., "Selección de una microflora acidogénica para un proceso difásico de digestión anaerobia", en *Rev. ICIDCA*, vol. XXVI. No 2, 1992.
10. Rodríguez, S. *et al.*, *Utilización de los lodos de digestión como bioabonos para el cultivo de*

- 
- especies hortícolas*, V Taller y Seminario Latinoamericano de Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales, Viña del Mar, Chile, 1998.
11. Sánchez, E.; Monroy, O.; Cañizares, R.; Travieso, A., "A preliminary study of piggery waste treatment by an upflow sludge bed anaerobic reactor and packed bed anaerobic reactor", en J. Agric. Engng Res., vol. LXII, 1995, págs. 71-76.
  12. Santiesteban, C., Estimado preliminar de inversión de la planta de biogás de la destilería "Heriberto Duquesne", Informe técnico, Centro de referencias, Subdirección de investigación bibliográfica y económicas, ICIDCA, La Habana, 1992.
  13. \_\_\_\_\_, Los residuales como fuente de energía y biofertilizantes en complejos agroindustriales y plantas de derivados, Informe técnico, Centro de referencias, Subdirección de investigación bibliográfica y económicas, ICIDCA, La Habana, 1993.
  14. Speece, R. E., *Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewaters*, 394 pages Archae Press, Tennessee, 1996.
  15. Viñas, M.; Rubio, N. ; García, R., Tratamiento de residuales agropecuarios, II Congreso AIDIS de Norteamérica y el Caribe, Santiago de Cuba, 1995.
  16. Wheatley, A.; Johnson, K. ; Winstanley, C., "The Reliability of Anaerobic Digestion for the Treatment of Food Processing Effluents", en *Anaerobic Digestion*, IAWPRC, 1990, págs. 135-146.

Copyright of Tecnología y Química is the property of Dirección de Información Científico-Técnico. The copyright in an individual article may be maintained by the author in certain cases. Content may not be copied or emailed to multiple sites or posted to a listserv without the copyright holder's express written permission. However, users may print, download, or email articles for individual use.