

Control and monitoring of anaerobic reactors by partial hydrogen pressures

Julio César Marín L., Magaly Chávez, Altamira Díaz, Lendy Pozo y Nola Fernández A.

Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (DISA), Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, La Universidad del Zulia, Apartado 526. Maracaibo 4001-A, Venezuela. E-mail: nfernand@luz.ve

Abstract

The measurement of H₂ proportion in the biogas is becoming one of the commonly parameters evaluated during the organic matter anaerobic degradation process, which leads to define if it is necessary to evaluate all the operational parameters simultaneously or it is possible to monitoring the all process measuring a single parameter. In this investigation the variability of the P_{pH₂} were studied during the organic matter anaerobic biodegradation, in an anaerobic granular sludge, using glucose as the only carbon source. The tests were conducted using load reactors under mesophilic conditions, in which the following operational parameters were monitored daily: pH, total alkalinity, % COD removal, TSS, VSS, biogas volume, H₂ and CH₄ production. The COD removal percentage showed an average of 91.1%. It was observed a slight increase of hydrogen in the biogas (from 2.76 to 4.25%) and one slight decrease of methane (from 97.08 to 95.64%), as the organic load was increased from 1 to 5 KgDQO/m³.d. The possible decrease of the methanogens population could be the cause of the increase of the H₂ accumulation in the biogas. The change in the hydrogen levels does not have to be taken as the only parameter to study, when the operational conditions of an anaerobic reactor are evaluated.

Key words: Hydrogen, gas partial pressures, anaerobic sludge, anaerobic digestion.

Monitoreo y control de reactores anaeróbicos utilizando presiones parciales de hidrógeno

Resumen

La medida de la proporción de H₂ en el biogás se está convirtiendo en uno de los parámetros comúnmente evaluado durante el proceso de degradación anaeróbica de la materia orgánica, lo cual conduce a definir si es necesario evaluar todos los parámetros operacionales simultáneamente o es posible monitorear el proceso midiendo un solo parámetro. En la presente investigación se estudió la variabilidad de las P_{pH₂} durante la degradación anaeróbica de la glucosa, utilizando reactores por carga bajo condiciones mesofílicas, inoculados con un lodo granular anaeróbico. En estos reactores se monitorearon diariamente los siguientes parámetros operacionales: pH, alcalinidad total, porcentaje de remoción DQO, SST, SSV, volumen de biogás, proporción de H₂ y CH₄. El porcentaje de remoción de DQO mostró un valor promedio de 91,1%. Se observó un ligero aumento de la proporción de hidrógeno en el biogás (de 2,76 a 4,25%) y una ligera disminución de la de metano (de 97,08 a 95,64%), conforme se aumentaba la carga orgánica, desde 1 hasta 5 KgDQO/m³.d. El posible decrecimiento de la población de metanógenos pudo ser la causa del aumento de los valores de H₂ en el biogás. El cambio en los niveles de hidrógeno no debe ser tomado como el único parámetro a estudiar cuando se evalúan las condiciones operacionales de un reactor anaeróbico.

Palabras clave: Hidrógeno, presiones parciales de un gas, lodo granular anaeróbico, digestión anaeróbica.

Introducción

Para optimizar el proceso de degradación anaeróbica de los desechos orgánicos, es necesario monitorear parámetros operacionales a fin de regular su comportamiento. Un parámetro ideal mediría el progreso del sistema y señalaría un inminente cambio antes de que este suceda [1, 2, 3]. Actualmente, los indicadores normalmente utilizados por la industria son la medición de la concentración de ácidos grasos volátiles, proporción de metano, dióxido de carbono producido, pH y porcentaje de remoción de la demanda química de oxígeno (DQO) o reducción de carbono orgánico total (COT) [1, 4]. Sin embargo, la medida de la proporción de H_2 en el biogás, se está convirtiendo en uno de los parámetros comúnmente evaluado. De manera que se hace necesario entender si es preciso evaluar todos estos parámetros simultáneamente o es posible monitorear el proceso midiendo un solo parámetro [1].

Durante la degradación anaeróbica de los desechos orgánicos complejos, la fermentación y la acidogénesis producen la formación de productos intermediarios como: propionato, butirato, lactato, etanol y acetato. Más allá, la degradación del propionato, butirato y etanol es posible si las concentraciones de hidrógeno son mantenidas a niveles muy bajos en el sistema. La existencia e importancia del fenómeno de intertransferencia de las interespecies de H_2 en la digestión anaeróbica ha inspirado a los investigadores para comprender el concepto en función de cómo las variaciones en las presiones parciales de hidrógeno pueden ser usadas como un indicador de falla en un reactor [5, 6].

Los metanógenos litotróficos están entre los microorganismos que crecen más rápidamente en los digestores anaeróbicos, por lo tanto, las acumulaciones de hidrógeno en el biogás y en solución solamente ocurren durante sobrecargas en el sistema o por presencia de compuestos tóxicos, con lo cual se produce la inhibición del proceso. El rápido crecimiento de las bacterias formadoras de ácidos sobre azúcares u otros sustratos fácilmente biodegradables, es capaz de causar largas y rápidas fluctuaciones del contenido de hidrógeno en el biogás, posteriormente, el lento crecimiento de las bacterias acetogénicas utilizadoras de propionato y butirato, producen

sólo pequeños cambios en el contenido de hidrógeno del biogás [7].

Usualmente, en un digestor anaeróbico óptimo y estable, se encuentran presiones parciales de hidrógeno muy bajas en el biogás [8].

En tal sentido, en la presente investigación se estudió la variabilidad de las presiones parciales de hidrógeno, durante la biodegradación anaeróbica de la materia orgánica, utilizando glucosa como única fuente de carbono.

Parte Experimental

Montaje y operación de los reactores anaeróbicos por carga

Se inocularon 3 reactores (réplicas) de 500 mL (matraces erlenmeyers) con 100 mL de un lodo granular anaeróbico procedente de un reactor UASB de una industria cervecera de la localidad. Cada reactor fue alimentado diariamente (TRH = 24 h) con 400 mL de agua residual sintética que contenía glucosa como única fuente de carbono. Los reactores se encontraban acoplados herméticamente a un sistema colector de biogás que contenía un cilindro graduado con agua acidificada (H_2SO_4 0,1 N), para reducir la solubilidad del CO_2 [9], con el cual se registraba el volumen de biogás producido durante la degradación de la glucosa (Figura 1).

La temperatura de experimentación se mantuvo a $37 \pm 1^\circ C$ utilizando un baño de agua GEMMY modelo YCW-03S, sin agitación.

Agua residual sintética

Se empleó el agua residual sintética propuesta por Chacín [10]. La glucosa (MERCK) se utilizó como única fuente de carbono, aplicada a las cargas orgánicas de 1, 2, 3, 4 y 5 $KgDQO/m^3.d$. Estas cargas fueron aumentadas progresivamente según la estabilización del sistema mostrada por los porcentajes de remoción de DQO y metano en el biogás. El recambio del agua residual sintética de los reactores se realizó manualmente, inclinando los erlenmeyers cuidadosamente, sin dejar salir el lodo granular y reponiendo el volumen con una nueva porción de agua residual conteniendo la carga orgánica requerida.

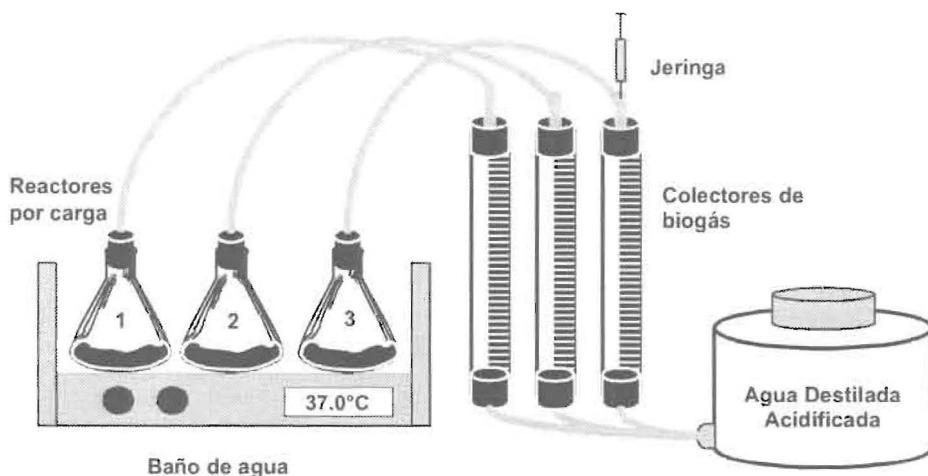


Figura 1. Montaje de los reactores por carga usados para estudiar la biodegradación anaeróbica de la glucosa. Se muestra el lugar de toma de muestras de biogás para el análisis de H_2 y CH_4 (jeringa).

Parámetros operacionales

Diariamente fueron tomadas muestras del efluente de los reactores anaeróbicos por carga para analizar los siguientes parámetros: pH, alcalinidad total (método volumétrico estándar), porcentaje de remoción de la DQO (método volumétrico estándar), sólidos suspendidos totales (SST) y volátiles (SSV) (método gravimétrico estándar), volumen de biogás producido, producción de hidrógeno (H_2) y metano (CH_4) [11].

El porcentaje de metano e hidrógeno en el biogás fue cuantificado simultáneamente utilizando un cromatógrafo de gases Perkin Elmer Autosystem XL, provisto de un detector de conductividad térmica (TCD) y una columna empacada HAYESEP Q de 3 m de longitud, $\frac{1}{4}$ " de diámetro de poro y un diámetro interno de 80/100. Se aplicó el siguiente programa de temperatura: puerto de inyección: $230^\circ C$, horno: $200^\circ C$ y detector: $230^\circ C$. Se utilizó nitrógeno como gas de arrastre a 30 mL/min y un volumen de inyección de 200 μL . La cuantificación se realizó utilizando una mezcla de gases certificada PRAXAIR con la siguiente composición: 89% CH_4 y 11% H_2 , y el software Turbochrom Navigator versión 4.1 (2F12) de Perkin Elmer.

Resultados y Discusión

La Tabla 1 muestra los resultados promedio, máximo y mínimo de los parámetros evalua-

dos durante la degradación de la glucosa en reactores anaeróbicos por carga. De manera general se puede observar un aumento de los valores conforme se aumentaba la carga orgánica, desde 1 hasta 5 $KgDQO/m^3.h$.

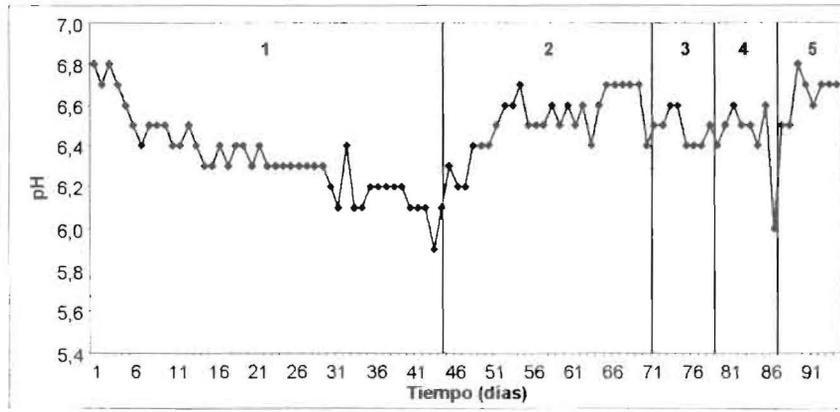
El pH se estabilizó a partir de la carga de 2 $KgDQO/m^3.h$ (día 50 de experimentación) (Figura 2), no mostrando grandes variaciones al aumentar la carga orgánica, encontrándose un valor promedio de 6,7 durante la etapa de experimentación. De manera semejante, la alcalinidad total mostró una tendencia hacia la estabilización cuando se aplicaron las mayores cargas orgánicas ensayadas (3-5 $KgDQO/m^3.h$) (Figura 3). Los valores mínimo y máximo durante el ensayo experimental fueron 200,0 y 2060,0 $mgCaCO_3/L$, respectivamente (Tabla 1).

En la Figura 4 se muestran las variaciones de las concentraciones de DQO final y del porcentaje de remoción de la DQO. Ambos parámetros mantuvieron un comportamiento estable durante la mayor parte del tiempo de experimentación. Estos resultados muestran la alta eficiencia del proceso de degradación anaeróbica de la glucosa, encontrándose la remoción de la DQO en un valor promedio de 91,1%. La concentración de la DQO final estuvo comprendida entre 14,1 y 633,6 mg/L (Tabla 1).

Los sólidos suspendidos mostraron poca variabilidad entre las cargas orgánicas de 1 y 3 $KgDQO/m^3.h$ (Figura 5), a partir de la cual se ob-

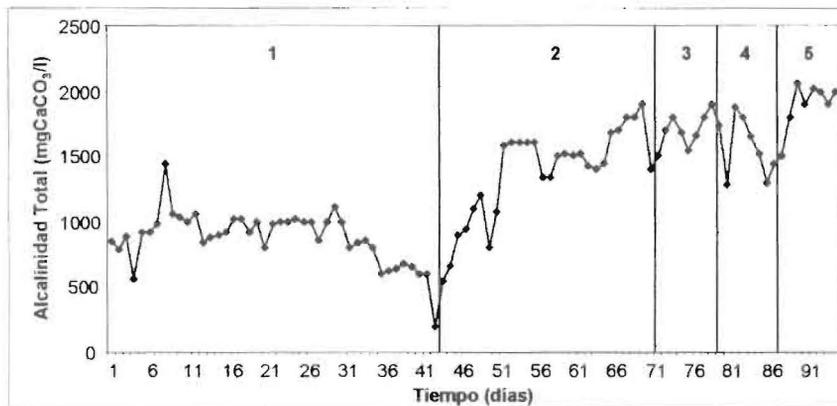
Tabla 1. Valores promedio, máximo y mínimo de los parámetros evaluados durante la degradación de la glucosa en reactores anaeróbicos por carga

Carga Orgánica (Kg/m ³ .d)	Estadística	pH	Alcalinidad Total (mgCaCO ₃ /L)	DQO Final (mg/L)	Remoción DQO (%)	SST (mg/L)	SSV (mg/L)	Biogás (mL)	H ₂ (%)	CH ₄ (%)
1	Promedio	6,3±0,2	864,0±205,9	115,8±70,9	88,4±7,1	64,4±31,4	52,2±26,6	101,1±16,9	3,11±0,94	96,66±1,18
	Máximo	6,8	1440,0	450,6	97,7	160,0	142,0	140,0	5,69	99,06
	Mínimo	5,9	200,0	23,3	54,9	22,0	18,0	80,0	0,77	92,55
	n	45	45	45	45	45	45	45	45	45
2	Promedio	6,5±0,1	1433,1±283,1	185,5±130,3	90,7±6,5	64,0±18,8	57,7±18,1	261,5±24,4	2,40±1,60	97,50±1,60
	Máximo	6,7	9	633,6	97,4	96,0	94,0	310,0	5,46	99,78
	Mínimo	6,2	1900,0	52,9	68,3	8,0	8,0	220,0	0,21	94,53
	n	26	800,0 26	26	26	26	26	26	26	26
3	Promedio	6,5±0,1	1697,5±135,5	97,9±83,7	96,7±2,8	63,9±39,2	54,6±35,5	360,9±72,6	5,08±1,21	94,86±1,22
	Máximo	6,6	0	226,2	99,5	156,0	136,0	480,0	6,80	97,13
	Mínimo	6,4	1900,0	14,1	92,5	26,0	26,0	270,0	2,80	93,10
	n	8	1500,0 8	8	8	8	8	8	8	8
4	Promedio	6,4±0,2	1576,3±226,6	160,9±54,1	96,0±1,4	71,3±9,3	62,4±11,0	730,6±78,9	5,37±0,42	94,49±0,49
	Máximo	6,6	9	239,9	97,2	85,0	85,0	820,0	5,75	95,55
	Mínimo	6,0	1880,0	110,8	94,0	55,0	50,0	610,0	4,40	93,90
	n	8	1280,0 8	8	8	8	8	8	8	8
5	Promedio	6,7±0,1	1897,5±181,5	166,5±46,9	96,7±0,9	123,1±28,6	113,0±26,1	1008,1±43,3	5,00±0,54	94,88±0,60
	Máximo	6,8	2	230,8	97,8	170,0	159,0	1080,0	5,60	95,83
	Mínimo	6,5	2060,0	112,6	95,4	88,0	86,0	850,0	4,13	94,12
	n	8	1500,0 8	8	8	8	8	8	8	8
Valores Generales	Promedio	6,4±0,2	1236,9±437,7	141,4±94,2	91,1±6,8	69,8±31,7	59,9±29,1	296,3±281,8	3,49±1,53	96,40±1,60
	Máximo	6,8	2	633,6	99,5	170,0	159,0	1080,0	6,80	99,78
	Mínimo	5,9	2060,0	14,1	54,9	8,0	8,0	80,0	0,21	92,55
	n	95	200,0 95	95	95	95	95	95	95	95



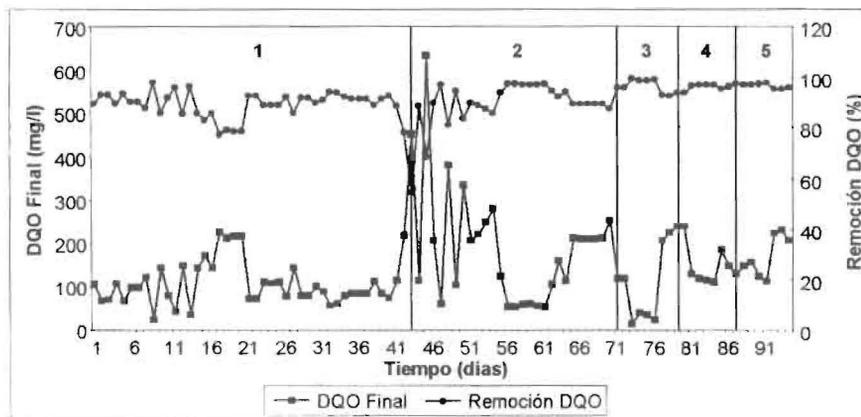
Los números 1, 2, 3, 4 y 5, indican las cargas orgánicas aplicadas (KgDQO/m³.d)

Figura 2. Variación del pH durante la biodegradación anaeróbica de la glucosa en reactores por carga.



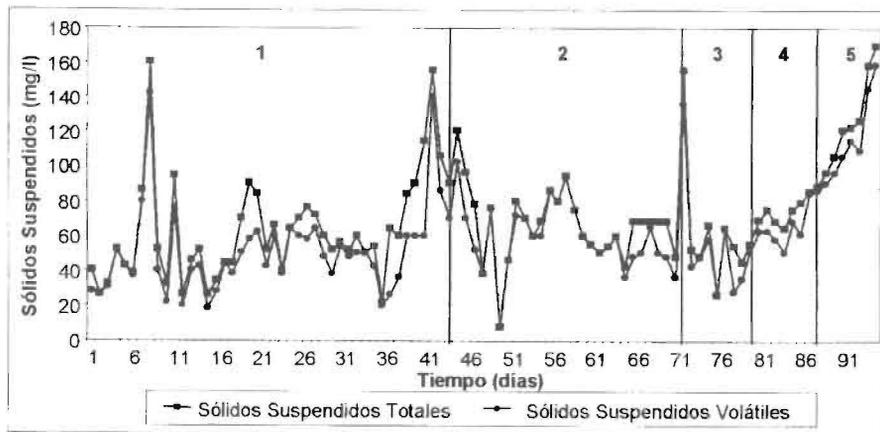
Los números 1, 2, 3, 4 y 5, indican las cargas orgánicas aplicadas (KgDQO/m³.d)

Figura 3. Variación de la alcalinidad total durante la biodegradación anaeróbica de la glucosa en reactores por carga.



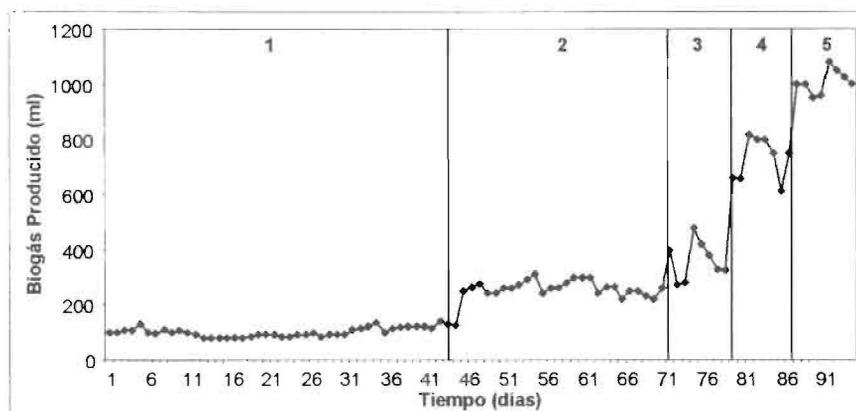
Los números 1, 2, 3, 4 y 5, indican las cargas orgánicas aplicadas (KgDQO/m³.d)

Figura 4. Variación de la DQO final y del porcentaje de remoción de la DQO, durante la biodegradación anaeróbica de la glucosa en reactores por carga.



Los números 1, 2, 3, 4 y 5, indican las cargas orgánicas aplicadas ($\text{KgDQO}/\text{m}^3.\text{d}$)

Figura 5. Variación de los sólidos suspendidos totales (SST) y volátiles (SSV), durante la biodegradación anaeróbica de la glucosa en reactores por carga.



Los números 1, 2, 3, 4 y 5, indican las cargas orgánicas aplicadas ($\text{KgDQO}/\text{m}^3.\text{d}$)

Figura 6. Variación del volumen de biogás producido durante la biodegradación anaeróbica de la glucosa en reactores por carga.

serva un aumento progresivo tanto de los SST como de los SSV. Las máximas concentraciones de SST y SSV se encontraron a la carga orgánica de $5 \text{ KgDQO}/\text{m}^3.\text{h}$, siendo las concentraciones $170,0$ y $159,0 \text{ mg/L}$, respectivamente (Tabla 1). Este aumento de los niveles de sólidos suspendidos es ocasionado por el lavado de la biomasa a consecuencia del incremento de la carga orgánica, lo cual ocasiona que las enzimas extracelulares producidas en exceso actúen taponando los conductos de salida del biogás en los gránulos del lodo, creando una fuerza que finalmente termina por romperlos [12].

El volumen de biogás producido durante la respiración anaeróbica de la glucosa aumentó

conforme se aumentaba la carga orgánica en los reactores por carga (Figura 6), este comportamiento hace suponer que la biomasa del digestor no fue estresada metabólicamente [13]. El volumen máximo de biogás producido fue 1080 mL que correspondió con la máxima carga orgánica aplicada ($5 \text{ KgDQO}/\text{m}^3.\text{h}$). El mínimo volumen de biogás (80 mL) se registró en la carga orgánica de $1 \text{ KgDQO}/\text{m}^3.\text{h}$ (Tabla 1).

Al comparar los resultados obtenidos en la evaluación de los parámetros operacionales durante la biodegradación anaeróbica de la glucosa, con los reportados en otros estudios [14, 15, 16, 17], se puede observar que los valores aquí presentados se encuentran entre los rangos de alta

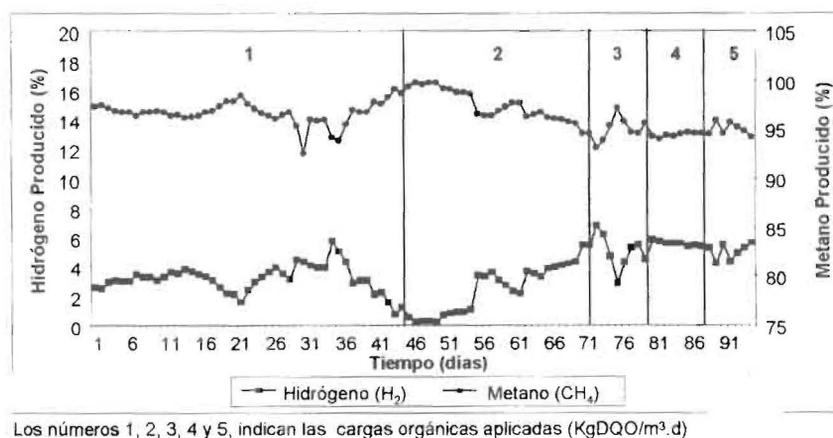


Figura 7. Variación del porcentaje de hidrógeno y metano en el biogás producido durante la biodegradación anaeróbica de la glucosa en reactores por carga.

eficiencia para la digestión anaeróbica, lo cual demuestra que el sistema experimental utilizado es adecuado para la obtención de grados de eficiencia óptimos.

La Figura 7 muestra la variación de los porcentajes de hidrógeno y metano en el biogás producido en los reactores anaeróbicos. La proporción de metano estuvo siempre por encima de 92,55%, siendo el valor máximo de 99,78% obtenido a la carga orgánica de 2 KgDQO/m³.h (Tabla 1). En general se observa un comportamiento estable de la proporción de metano, con una pequeña tendencia a la disminución conforme se aumentaba la carga orgánica. Esta ligera disminución de la proporción de metano en el biogás estuvo acompañada de un aumento de la proporción de hidrógeno, la cual obtuvo su máximo valor a las mayores cargas orgánicas ensayadas. La proporción de hidrógeno en el biogás se presentó en un valor promedio de 3,49% (Tabla 1). Esta disminución de la proporción de metano y aumento de la de hidrógeno puede ser considerada como un indicador de la disminución en la población microbiana metanogénica puesto que se produce un aumento de la intensidad del mezclado como resultado de un aumento de la producción de biogás, perturbando el manto de lodo en el reactor por carga, lo cual supone una pérdida de metanógenos [12].

La remoción del hidrógeno disuelto en los digestores anaeróbicos se produce durante la conversión del ácido propiónico (y presumible-

mente de otros ácidos) a ácido acético. Se ha demostrado que el hidrógeno puede inhibir la degradación del propionato a presiones parciales de 0,002-0,015 atm (equivalente a 2000-15000 vpm de H₂ en el biogás) [7].

El hidrógeno generado a partir de la degradación de carbohidratos como la glucosa, actúa como un "marcador de acontecimientos", produciendo una clara señal cuando la carga orgánica del afluente presenta fluctuaciones en su concentración, permitiendo de esta manera un monitoreo remoto para la operación de los sistemas de digestión [7], aspecto destacado durante esta investigación. Sin embargo, otros autores reportan que los cambios en las P_{pH_2} están más relacionados con la calidad del efluente que con la inestabilidad de la carga orgánica del afluente. De manera que usar los niveles de H₂ del biogás como un parámetro control es cuestionable, especialmente cuando se acidifica el afluente, lo cual provoca la disminución de su producción [8]. Igual sugerencia hacen Voolapalli & Stuckey [18], debido a la baja acumulación del H₂ en los reactores. Estos autores demostraron que el papel del hidrógeno como una herramienta de monitoreo en los reactores metanogénicos ha sido sobre-enfatizada en la literatura, sin las consideraciones de la cinética de utilización del H₂ en comparación con la degradación de los ácidos grasos volátiles, especialmente los niveles de acetato [18].

Cuando los valores de pH son > 5,5, la producción de H₂ se detiene y se inicia la formación

de butanol. Este mismo comportamiento experimentan las bacterias productoras de H_2 cuando convierten azúcar en H_2 . De esta manera, la producción de H_2 queda determinada o regulada por ciertos factores como el pH, limitación por hierro y la fuente de carbono [19].

La proporción de metano encontrada en esta investigación fue mucho menor que la reportada por Lay *et al.* [19], la cual fue de 60% y la de metano no fue significativa, sin embargo, es importante destacar que estos investigadores utilizaron un agua residual doméstica enriquecida con harina de soya como afluente [19].

Se ha demostrado que la producción de H_2 está influenciada principalmente por la fuente de los acidógenos (inóculo), pH y concentración de HCO_3^- [18]. De manera que los relativamente bajos valores de pH encontrados en este estudio (Tabla 1, Figura 2) favorecen la producción de hidrógeno, especialmente cuando su valor es cercano a 5,6 [19]. El incremento en los niveles de H_2 inhibe la degradación de los ácidos grasos volátiles como el propiónico y el butírico. En consecuencia, bajo condiciones extremas de acumulación de H_2 , se provoca un incremento en las concentraciones de ácidos grasos volátiles y la acidificación del licor mezcla, lo cual puede producir una ruptura de la capacidad amortiguadora del sistema [13].

Los resultados del análisis de regresión múltiple entre las variables estudiadas durante la biodegradación anaeróbica de la glucosa en reactores por carga, tomando $n=95$ y el valor teórico $r=0,205$ para un nivel de significancia de $p<0,05$, mostraron los siguientes valores significativos de correlación: la alcalinidad correlacionó significativamente con el porcentaje de remoción de DQO ($r=0,699$), SST ($r=-0,473$), SSV ($r=0,500$), proporción de H_2 ($r=0,501$) y CH_4 ($r=0,324$). Mientras que el porcentaje de remoción de DQO correlacionó con SST ($r=-0,825$), SSV ($r=0,676$), producción de biogás ($r=0,266$), proporción de H_2 ($r=0,596$) y CH_4 ($r=0,228$). Estos resultados evidencian la alta eficiencia del sistema de digestión anaeróbica en cuanto a la biodegradación de la glucosa utilizando diferentes cargas orgánicas. La producción de biogás mostró alto grado de correlación con el porcentaje de H_2 ($r=1,000$) y CH_4 ($r=0,575$), debido al aumento progresivo en sus concentraciones. Por otra parte, la proporción de

H_2 correlacionó inversamente con la producción de CH_4 ($r=-0,976$), debido al aumento progresivo de las concentraciones de H_2 y a la disminución de las de CH_4 en el biogás (Figura 7).

Conclusiones

Se observó alto grado de eficiencia durante la biodegradación anaeróbica de la glucosa en reactores por carga, para las cargas orgánicas de 1 a 5 KgDQO/ m^3 .h.

Las mediciones de la proporción de hidrógeno (H_2) en el biogás mostraron un incremento conforme se aumentaba la carga orgánica (de 2,76 a 4,25%). Si bien los mecanismos de formación/utilización de hidrógeno durante la digestión anaeróbica son bastantes complicados, la disminución de la proporción de metano y aumento de la de hidrógeno puede ser considerada como un indicador de la disminución de la población microbiana metanogénica.

Un cambio en los niveles de hidrógeno debe ser interpretado correctamente con el fin de aplicar acciones apropiadas cuando se decida actuar sobre un digestor. Por esta razón, las mediciones de hidrógeno deben ser tomadas como un suplemento para indicadores convencionales de los procesos de digestión anaeróbica, ya que se requiere investigar si un cambio en los niveles de hidrógeno puede ser responsable de cambios dentro del reactor.

Agradecimiento

Al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de La Universidad del Zulia (CONDES-LUZ) por su valiosa colaboración en el financiamiento de este proyecto.

Referencias Bibliográficas

1. Bhattacharya, S., Sluder, J. and Uberoi, V.: Effects of 4-Nitrophenol on H_2 and CO levels in anaerobic propionate systems. *Wat. Res.* Vol. 29, No. 5 (1995) 1249-1258.
2. Hickey, R. and Switzenbaum, M.: The response and utility of hydrogen and carbon monoxide as process indicators of anaerobic digesters subject to organic and hydraulic overloads. *Res. J. Wat. Pollut. Control Federation.* Vol. 63 (1991) 129-140.

3. Hickey, R. and Switzenbaum, M.: Thermodynamics of volatile fatty acid accumulation in anaerobic digesters subject to increases in hydraulic and organic loading. Res. J. Wat. Pollut. Control Federation. Vol. 63 (1991) 141-144.
4. Collins, L. and Paskins, A.: Measurement of trace concentrations of hydrogen in biogas from anaerobic digesters using an exhaled hydrogen monitor. Wat. Res. Vol. 21 No. 12 (1987) 1567-1572.
5. Bryant, M., Wolin, E., Wolin, M. and Wolfe, R.: Methanobacillus omelianskii, a symbiotic association of two species of bacteria. Arch. Microbiol. Vol. 39 (1967) 20-31.
6. Lannotti, E., Kafkewitz, D., Wolin, M. and Bryant, M.: Glucose fermentation products of *Ruminococcus albus* grown in continuous culture with *Vibrio succinogenes*: changes caused by interspecies hydrogen transfer. J. Bact. Vol. 114 (1973) 1231-1240.
7. Mosey, F. and Fernandes, X.: Patterns of hydrogen in biogas from the anaerobic digestion of milk-sugars. Wat. Sci. Tech. Vol. 21 (1989) 187-196.
8. Guwy, A., Hawkes, F., Hawkes, D. and Rozzi, A.: Hydrogen production a high rate fluidized bed anaerobic digester. Wat. Res. Vol. 31 No. 6 (1997) 1291-1298.
9. Fernández, N.: An examination of anaerobic treatment of wastewater from coffee industries. PhD thesis. University of Birmingham. England. 1993.
10. Chacín, E.: Treatment characteristics of two phase anaerobic system using an UASB reactor. PhD thesis. University of Birmingham. England. 1993.
11. American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Environment Federation (WEF): Standard methods for the examination of water and wastewater. 20th Edition. American Public Health Association 1015 Fifteenth Street, N.W. Washington, D.C. 20005-2605. USA. 1998.
12. Jawed, M. and Tare, V.: Methanogenic activity and performance of UASB, DSFF reactors. Wat. Sci. Tech. Vol. 34 No. 5-6 (1996) 483-487.
13. Archer, D., Hilton, M., Adams, P. and Wiecko, H.: Hydrogen as a process control index in pilot scale anaerobic digester. Biotechnology Letters. Vol. 8 (1986) 197-202.
14. Escorihuela, A.: Caracterización de las bacterias del lodo en reactores anaeróbicos por carga. Trabajo especial de grado. La Universidad del Zulia. Venezuela. 1999.
15. Escorihuela, A., Chávez, M., Rangel, Z., Martínez, D., Díaz, A., Rincón, N., Behling, E., Marín, J., Chacín, E. y Fernández, N.: Caracterización de bacterias del lodo en reactores anaeróbicos por carga. Bol. Centro Invest. Biol. Vol. 35 No. 3 (2001) 259-271.
16. Lettinga, G.: Anaerobic digestion and wastewater treatment system. Antonie Van Leeuwenhoek. Vol. 67 (1995) 3-28.
17. Rangel, Z.: Estudio del crecimiento de la biomasa en un sistema de digestión anaeróbico utilizando glucosa como sustrato. Tesis de maestría. La Universidad del Zulia. Venezuela. 1999.
18. Voolapalli, R. and Stuckey, D.: Hydrogen production in anaerobic reactors during shock loads-Influence of formate production and H₂ kinetics. Wat. Res. Vol. 35 No. 7 (2001) 1831-1841.
19. Lay, J., Lee, Y. and Noike, T.: Feasibility of biological hydrogen production from organic fraction of municipal solid waste. Wat. Res. Vol. 33 No. 11 (1999) 2579-2586.

Recibido el 13 de Marzo de 2002

En forma revisada el 02 de Noviembre de 2002