

## PERFILES DE ACTIVIDAD METANOGÉNICA ESPECÍFICA EN UN REACTOR UASB (REACTOR ANAERÓBICO DE FLUJO ASCENDENTE Y MANTO DE LODOS) UTILIZADO PARA EL TRATAMIENTO DE LÍQUIDOS CLOACALES PRE-SEDIMENTADOS

Raquel G. Guerra, Silvia M. González, Aníbal P. Trupiano, María E. Figueroa,  
Lucas Seghezzo y Carlos M. Cuevas

Universidad Nacional de Salta, Consejo de Investigación-INENCO, Laboratorio de Estudios Ambientales,  
Buenos Aires 177, 4400 Salta, Argentina. Email: [lucas@unsa.edu.ar](mailto:lucas@unsa.edu.ar)

### RESUMEN

La actividad metanogénica específica (AME) de un lodo anaeróbico es un parámetro clave que determina la eficiencia del tratamiento en un reactor UASB (Reactor Anaeróbico de Flujo Ascendente y Manto de Lodos). En este trabajo, se determinó la AME a diferentes alturas de un reactor UASB a escala piloto (500 L) durante 9 meses. Se realizaron en total 6 ensayos. Se observó que la AME varía con la altura del reactor, y está inversamente relacionada con la concentración de sólidos volátiles suspendidos del lodo. La AME promedio en el reactor UASB fue de 0.11gDQO/gSSV.d. La diferencia en AME a lo largo del lecho de lodo puede ser una herramienta útil cuando sea necesario realizar “purgas” de lodo, o cuando se requiera lodo activo para la inoculación de nuevos reactores. Se observaron diferencias en la AME a distintos tiempos de retención hidráulica (TRH). Cotejando estos datos con resultados de remoción de sólidos y materia orgánica, sería posible obtener el TRH óptimo para una operación eficiente del reactor bajo las condiciones locales.

### PALABRAS CLAVE

Actividad metanogénica; líquidos cloacales; Reactores UASB; tratamiento anaeróbico.

### INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua pone en peligro la salud pública, complica y encarece los abastecimientos de agua a poblaciones y a la industria, perjudica la pesca, la agricultura, el deporte y anula el valor estético de los cursos superficiales. Los problemas ecológicos y de salud pública originados por las aguas residuales han sido mejor atendidos por países desarrollados en los cuales la población tiene más conciencia y más capacidad para pagar el costo de las obras de ingeniería necesaria para resolverlos. Existen algunas posibilidades de solucionar el problema con las llamadas tecnologías apropiadas. Una posibilidad es combinar el uso de reactores anaeróbicos de flujo ascendente y manto de lodos (UASB) con un post-tratamiento de diseño simple y bajo costo de construcción (Lettinga, 1993). El reactor UASB, desarrollado en la década del 70 por Lettinga y colaboradores (Lettinga et al, 1980; Lettinga y Vinken, 1980), es muy usado para el tratamiento de líquidos cloacales en regiones tropicales. En Argentina, el tratamiento de líquidos cloacales en estos tipos de reactores está poco estudiado. Las bajas temperaturas de las aguas residuales, limitaciones tecnológicas, desinterés político, y problemas empresariales se presentan como impedimentos para su uso en regiones templadas (Seghezzo et al, 1998; Verstraete and Vandevivere, 1999). La aplicación exitosa del tratamiento anaeróbico de líquidos cloacales en climas moderados sería un avance significativo para la protección ambiental en países en desarrollo (Lettinga, 1987; Jewell, 1985). La operación de los reactores UASB se basa en la actividad autoregulada de diferente grupos de bacterias que degradan la materia orgánica y se desarrollan en forma interactiva, formando un lodo o barro biológicamente activo en el reactor. Dichos grupos bacterianos establecen entre sí relaciones simbióticas de alta eficiencia metabólica bajo la forma de gránulos cuya densidad les permite sedimentar en el digestor. La biomasa permanece en el reactor sin necesidad de soporte adicional. Algunas de las ventajas del tratamiento anaeróbico sobre el tratamiento aeróbico es la producción de gas metano como fuente energética y la baja producción de lodo biológico. A pesar de esto, extracción de lodo o “purga” debe realizarse periódicamente en un reactor UASB. Si la actividad del lodo es baja, esta operación puede ser crítica. El lodo a extraer debe ser seleccionado para evitar pérdidas de la parte más activa. La diferencia en Actividad Metanogénica Específica (AME) a lo largo del lecho del lodo podría ser usado como herramienta para la realización de una correcta purga. Asimismo, la inoculación de nuevos reactores anaeróbicos requiere, para una puesta en marcha corta, de lodo activo proveniente de otros reactores. En estos casos, sería deseable extraer lodo de la parte más activa de un manto de lodos. La temperatura del influente tiene una influencia directa sobre la AME, parámetro clave para el control total de la eficiencia del tratamiento. La AME en reactores UASB usados para el tratamiento de aguas residuales es de 0.1 – 1.5 g DQO/gSSV.d (DQO = demanda química de oxígeno; SSV = sólidos suspendidos volátiles) (Dolfing y Bloemen, 1985; Field et al., 1988; Guiot, 1991; Soto et al.,1992). Otro parámetro importante en la operación de un reactor UASB es el tiempo de retención hidráulica (TRH).

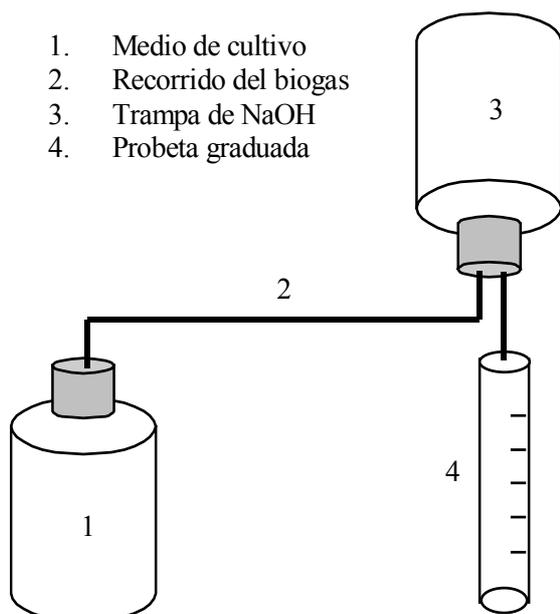
En principio, existiría un TRH donde la DQO y la eficiencia de remoción de sólidos son óptimos. El TRH puede tener un efecto importante sobre la distribución interna de las distintas partes del lodo, y esta variable podría ser usada para “segregar” el lodo en capas con distinta AME. Los objetivos de este trabajo fueron los siguientes:

1. Determinar la AME de lodo formado en un reactor UASB.
2. Determinar el perfil de actividad del lodo y su relación con la altura del reactor.
3. Determinar eventuales puntos de extracción del lodo para purga o para inóculo de nuevos reactores.
4. Evaluar el efecto del TRH sobre la AME.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo fue realizado en la ciudad de Salta, provincia de Salta, en el Noroeste de Argentina (24° latitud Sur). El clima en esta región está definido como *subtropical con estación seca*. La temperatura media ambiental es de 16.5°C (Arias y Bianchi, 1996). El reactor UASB está ubicado en la planta depuradora de líquidos cloacales (PDLC) de la ciudad de Salta, administrada por Aguas de Salta S.A., empresa privada a cargo del servicio de provisión de agua potable y saneamiento en la provincia. Las temperaturas del influente y del reactor fueron continuamente monitoreadas con un termógrafo Novasen 3.752-5-S-C (rango de temperatura: 0-50°C). Desde agosto de 1995 a febrero del 2000 (4.5 años) la temperatura media mensual del líquido cloacal ha sido  $21.56 \pm 0.24^\circ\text{C}$  (los intervalos de confianza se han construido con un nivel de significación  $\alpha = 0.05$ ). La temperatura media mensual de las aguas residuales fluctúa desde un mínimo de 16°C en invierno a un máximo de 25°C en verano. Las temperaturas diarias fluctúan dentro de un rango limitado (menor a 2°C). El líquido cloacal crudo de la ciudad de Salta puede ser definido como diluido (menos de 250 mg DQO/L). Las aguas residuales del sedimentador primario han sido usadas como influente del reactor en todos los experimentos, con un contenido medio de  $153.26 \pm 7.20$  mgDQO/L y  $0.11 \pm 0.09$  grSSV/L.

El reactor UASB a escala piloto usado en los experimentos fue construido en poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV), con un volumen de 500 L (altura de líquido: 2.55 m, diámetro: 0.5m). A lo largo del reactor se colocaron 15 canillas que permiten la toma de muestra de lodo y líquido. El influente es homogéneamente distribuido por abajo del reactor con un dispositivo de 4 boquillas invertidas. El líquido proveniente del sedimentador primario ingresa al reactor mediante una bomba peristáltica Watson Marlow 601 F/R (rango de caudales: 6-960 L/h), cuya velocidad se regula electrónicamente con un variador de frecuencia VLT<sup>®</sup>MICRO Danfoss (1/2 HP; 0.4 KW). El rango de caudal se midió con un medidor Kobold KSK 3500 (rango de medición: 0.83-8.30 L/min). La producción de gas se midió, luego de su almacenamiento transitorio en un gasómetro, con un medidor de gas natural Galileo MGD G2D1. Los análisis del líquido influente y efluente se realizaron según el Standard Methods (APHA et al., 1995) o usando micro-métodos HACH<sup>®</sup>. Se determinaron parámetros tales como: pH, DQO, sólidos sedimentables (10' y 2 h), sólidos suspendidos totales y volátiles (TSS/SSV), alcalinidad, ácidos grasos volátiles (VFA) y demanda biológica de oxígeno (DBO). El contenido de SSV de las muestras de lodo se determinó en muestras centrifugadas (3 veces, durante 3 min, a 3500 rpm); el líquido sobrenadante se filtró en papel de filtro sin contenido de cenizas (diámetro de poro: 4.5 µm) para retener remanentes de SSV. La distribución de los tamaños de partículas de lodo se determinó usando tamices metálicos sedimentológicos (diámetros de poro: 1, 2 y 4 mm). Los tests de AME fueron realizados siguiendo protocolos del Departamento de Tecnología Ambiental de la Universidad Agrícola de Wageningen - Holanda (DET, 1994). El sistema utilizado se muestra en la Figura 1.



**Figura 1.** Esquema experimental para la determinación de la Actividad Metanogénica Específica (AME).

Las muestras de lodo fueron tomadas de las canillas de muestreo 2, 5, 8, 10 y 12, ubicadas a 0.19, 0.64, 1.09, 1.39 y 1.69 m desde la base del reactor (7%, 25 %, 43 %, 55 % y 66 % respectivamente, de la altura total del reactor). Se prepararon los caldos de cultivo en frascos de vidrio de 1 o 0.5 L. Se agregó agua destilada, macro y micro nutrientes, levadura, solución buffer, y la cantidad necesaria de lodo, de acuerdo al protocolo. El sustrato utilizado fue acetato de sodio – ácido acético. Se corrigió el pH de cada solución con HCl ó NaOH, según correspondiere, hasta el rango óptimo (6,8 - 7,8). La atmósfera de las botellas se hizo anaeróbica mediante burbujeo de N<sub>2</sub> durante 5 min, y se cerraron los frascos herméticamente. Se incubó en cámara termostatazada (30 ± 1°C). La producción total de gas CH<sub>4</sub> fué monitoreada por desplazamiento de una solución de NaOH al 5% en la cual se retiene el CO<sub>2</sub> del biogas. La AME se expresa como gDQO-CH<sub>4</sub>/gSSV.d, o sea la cantidad de gas metano producida por día (en términos de DQO) por cada gramo de bacterias presentes en el medio (expresadas en términos de sólidos volátiles suspendidos). Por lo tanto, este ensayo permite evaluar la actividad del lodo en función de la cantidad de metano producido en condiciones ideales. Durante el período estudiado, se aplicaron cuatro TRH diferentes: 3, 4, 6 y 9 h. Cada TRH se aplicó por lo menos durante un mes de operación para garantizar condiciones de estado estacionario. Las muestras de lodo fueron tomadas al final de cada período.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El reactor se encuentra en funcionamiento desde agosto de 1995. La puesta en marcha duró aproximadamente cuatro meses. El reactor fue inoculado con 100 L de barro cloacal semi-digerido (20% v/v) proveniente de los digestores de barros de la PDLC. Más de 30% del lodo desarrollado fue granular, con un diámetro de gránulo > 1 mm (Figura 2). Se observaron gránulos mayores de 5 cm de diámetro, aparentemente formados por la agregación de otros más pequeños. Gránulos de tales dimensiones no han sido citados en la bibliografía. Gránulos de gran tamaño presentaron tendencia a flotar por la presencia de gas en su interior. Durante el período de estudio (diciembre 1999 – julio 2000), el manto de lodos aumentó a razón de 8.6 cm/mes (aproximadamente 5% v/v). Por lo tanto, en condiciones de estado estacionario, la purga de lodos no debería exceder el 5% del volumen total de lodo presente por mes.



**Figura 2.** Gránulos observados en el reactor UASB (08/10/99).

En la Figura 3 se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de actividad metanogénica. El contenido de SSV promedio fue  $31,45 \pm 7,47$  g/L. La AME promedio fue  $0,1074 \pm 0,0269$ . En algunas muestras de las canillas 2 y 12 se registraron valores por encima de  $0.25$  gDQO-CH<sub>4</sub>/gSSV.d.

La relación entre la AME y los SSV se presenta en la Figura 4. Como puede apreciarse, la AME tiende a disminuir a medida que aumenta el contenido de sólidos del lodo. Esto se puede atribuir a falta de acceso al sustrato debido al compactamiento en algunas zonas del reactor, a la existencia de recorridos preferenciales de sustrato a través del manto de lodos (cortocircuitos), o a la presencia de material inerte en zonas con mayor concentración de SSV. Esta característica puede ser de importancia operacional en reactores UASB a escala real: un simple análisis de SSV permitiría determinar la capa menos activa del lecho de lodo y, por lo tanto, la zona más apta para la “purga”. A la inversa, la parte más activa podría ser utilizada para inocular nuevos reactores.

Un análisis más detallado de la Figura 4 sugiere un cambio en la pendiente de la relación entre AME y SSV a partir del dato correspondiente a la Canilla 10. Es lógico pensar que, alcanzado un nivel umbral de concentración de SSV la AME no disminuya a la misma velocidad. Surge claramente de lo expuesto que el punto ideal para la purga sería la Canilla 8, donde se encuentra la máxima concentración de SSV y la mínima AME. La Canilla 8 se encuentra ubicada a una altura correspondiente al 43% de la altura total del reactor, y a 59% de la altura del manto de lodos, considerando en este caso que el lodo alcanza la Canilla 13, ubicada a 1.84 m desde la base.

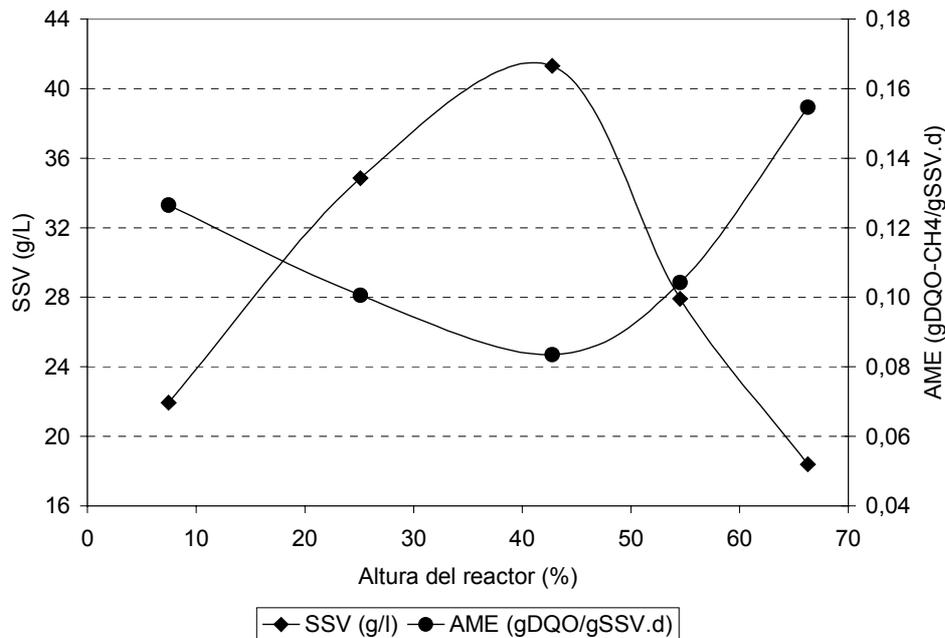


Figura 3. AME y SSV en función de la altura del reactor.

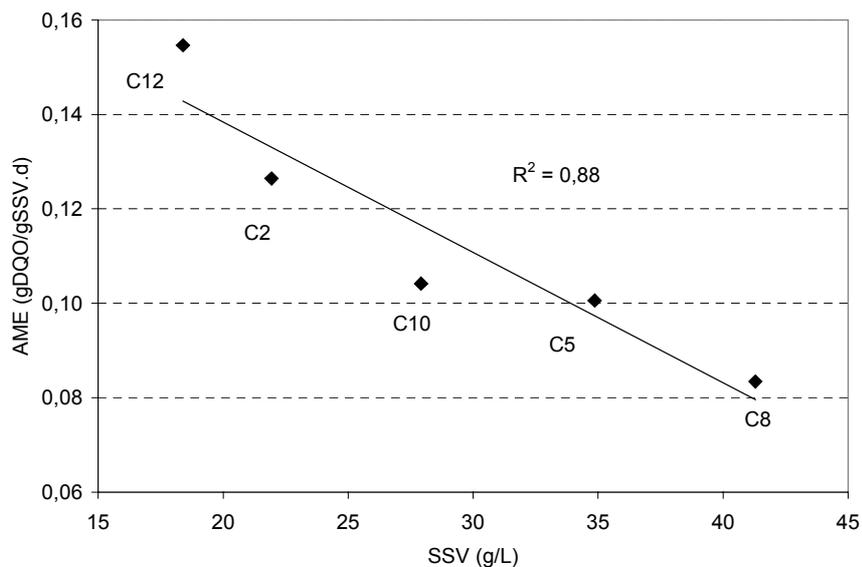
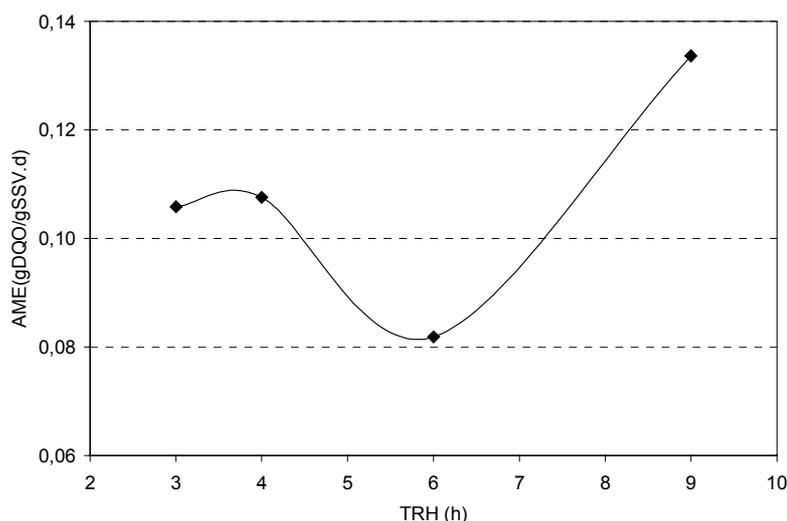


Figura 4. AME en función de SSV. C5, C8, etc. = canillas de muestreo.

Los resultados de este estudio sugieren que la descarga debería realizarse a una altura equivalente al 60% del total de la altura de lodo, y que el lodo de las capas superiores debe preservarse debido a su elevada actividad. El punto de extracción de lodo para inoculación es más discutible, ya que, si bien existe un máximo de actividad en la Canilla 12, como la AME está expresada *por unidad de SSV*, en algunas circunstancias puede ser conveniente extraer lodo con menos actividad pero más concentrado. Eventualmente, se podría reducir el contenido de agua luego de la extracción, aunque esta práctica eliminaría enzimas exocelulares disueltas que también contribuyen a la actividad.

La Figura 5 muestra la relación entre la AME promedio del manto de lodos en función del TRH. Alcanzado el estado estacionario, al cabo de un mes o más de operación a un dado TRH, cambios en la AME pueden atribuirse más a adaptación a las nuevas condiciones hidráulicas que a crecimiento bacteriano. Como puede verse, existiría un TRH para el cual la AME es mínima. Cotejando estos datos con resultados de remoción de sólidos y materia orgánica, sería posible obtener el TRH óptimo para una operación eficiente del reactor bajo las condiciones locales. Los resultados obtenidos en este aspecto no son definitivos, y serán corroborados en ensayos futuros.



**Figura 5.** AME promedio del manto de lodos en función del TRH aplicado.

## CONCLUSIONES

Se observó granulación en el reactor UASB alimentado con líquidos cloacales presedimentados. Más del 30% del lodo fue granular (diámetro > 1 mm). Se observaron gránulos de hasta 5 cm, probablemente formados a partir de la agregación de gránulos menores. Los gránulos más grandes presentaron tendencia a flotar, por acumulación de gas en su interior. Se observó un crecimiento del manto de lodos de aproximadamente 5% mensual.

La Actividad Metanogénica Específica (AME) promedio del lodo estudiado fue de 0.11gDQO-CH<sub>4</sub>/gSSV.d y se encuentra dentro del rango citado en la bibliografía.

Existen diferencias significativas de AME en relación con la altura del reactor. Se observó una AME mínima a la altura de la Canilla 8 (43% de la altura total del reactor y 59% de la altura del manto de lodo). En reactores UASB a escala real, la purga del lodo en exceso se debería realizar a esta altura. Una vez definida la altura óptima de lodo para un funcionamiento adecuado, la purga no debería superar el 5% del volumen total de lodo por mes.

Se observó que la AME es inversamente proporcional al contenido de SSV. Esto podría ser una herramienta operacional, ya que un análisis del contenido de SSV puede llevar a determinar la capa menos activa del lecho de lodo. A la inversa, la parte más activa podría ser extraída para inocular nuevos reactores.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido realizado en el Laboratorio de Estudios Ambientales (LEA), en el marco del Proyecto N°755 del Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta (CIUNSa). Las investigaciones son financiadas por la Universidad de Wageningen (Holanda), la Fundación Holandesa para el Avance de la Investigación Tropical (WOTRO), la empresa Aguas de Salta S.A. y el CIUNSa. El LEA depende del CIUNSa y del INENCO (Instituto de Investigación en Energía No Convencional). Se agradece al personal de Aguas de Salta S.A. por la toma de muestras compuestas y el transporte de dichas muestras hasta el laboratorio.

## REFERENCIAS

- Alphenaar, A. (1994). Anaerobic granular sludge. Characterization, and factors affecting its functioning. PhD Thesis. Wageningen Agricultural University. Wageningen, The Netherlands. 222 p.
- American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) and Water Environment Federation (WEF) (1995). Standards Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19th Edition. Eaton, A.D., Clesceri, L.S. and Greenberg, AE., Eds. APHA, AWWA, WEF. Washington.
- Arias, M. and Bianchi, A.R. (1996). Estadísticas climatológicas de la Provincia de Salta. Dirección de Medio Ambiente y Recursos Naturales de la Provincia de Salta. Estación Experimental Agropecuaria Salta, INTA. 189 p.
- Barbosa, R.A. and Sant'Anna, G.L. Jr. (1989). Treatment of raw domestic sewage in an UASB reactor. Water Research, 23(12),1483-1490.
- DET (Department of Environmental Technology) (1994). Manual laboratory methods and procedures for anaerobic wastewater treatment. Wageningen Agricultural University. 20 pp.

- Elmitwalli, T.A., Zandvoort, M.H., Zeeman, G., Bruning, H. and Lettinga, G. (1999). Low temperature treatment of domestic sewage in Upflow Anaerobic Sludge Blanket and Anaerobic Hybrid Reactors. *Wat.Sci.Tech.* 39(5),177-185.
- van Haandel, A.C. & Lettinga, G. (1994). *Anaerobic sewage treatment. A practical guide for regions with a hot climate.* Chichester, England. John Wiley & Sons Ltd. 226 p.
- Hulshoff Pol, L.W. (1989). The phenomenon of granulation of anaerobic sludge. PhD Thesis. Wageningen Agricultural University. Wageningen, The Netherlands. 122 p.
- van der Last, A.R.M. and Lettinga (1992). Anaerobic treatment of domestic sewage under moderate climatic (Dutch) conditions using upflow reactors at increased superficial velocities. *Wat.Sci.Tech.* 25(7),167-178.
- Lettinga, G., van Nelsen, A.F.M., Hobma, S.W., de Zeeuw, W. & Klapwijk, A. (1980). Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment. *Biotechnology and Bioengineering* 22,699-734.
- Sayed, S.K.I. and Fergala, M.A.A. (1995). Two-stage UASB concept for treatment of domestic sewage including sludge stabilisation process. *Wat.Sci.Tech.* 32(11),55-63.
- Seghezzo, L., Trupiano, A., Castro, L. & Cuevas, C. (1995). Diseño, construcción y puesta en marcha de un reactor anaeróbico de flujo ascendente UASB de planta piloto. Proc. XVII Congress of Solar Energy and Alternative Energy Sources (ASADES). San Luis, Argentina, 7 p. (in Spanish).
- Seghezzo, L. (1997). Kinetics and structure of anaerobic granular sludge from EGSB reactors. MSc. thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.
- Seghezzo, L., Zeeman, G., van Lier, J.B., Hamelers, H.V.M. and Lettinga, G. (1998). A review: the anaerobic treatment of sewage in UASB and EGSB reactors. *Bioresource Technology* 65,175-190.
- Verstraete, M. and Vandevivere, P. (1999). New and broader applications of anaerobic digestion. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 28(2),151-173.
- Wang, K. (1994). Integrated anaerobic and aerobic treatment of sewage. PhD Thesis. Wageningen Agricultural University. Wageningen, The Netherlands. 145 p.
- Zeeman, G., Sanders W.T.M., Wang, K.Y. and Lettinga G.(1997). Anaerobic treatment of complex wastewater and waste activated sludge – Application of an Upflow Anaerobic Solid Removal (UASR) reactor for the removal and pre-hydrolysis of suspended DQO. *Wat.Sci.Tech.* 35(10),121-128.
- Zeeman, G. and Lettinga, G. (1999). The role of anaerobic digestion of domestic sewage in closing the water and nutrient cycle at community level. *Wat.Sci.Tech.* 39(5),187-194.

## ABSTRACT

The sludge specific methanogenic activity (SMA) is a key parameter controlling the efficiency of anaerobic treatment in UASB (Upflow Anaerobic Sludge Bed) reactors. In this work, SMA was determined at different heights in a pilot-scale UASB reactor (500 L) in a 9-month period. Six tests were conducted. Differences in SMA were observed along the reactor height. SMA was found to be inversely proportional to the volatile suspended solids (VSS) concentration of the sludge. Mean SMA over the whole sludge bed was 0.11 gCOD-CH<sub>4</sub>/gVSS.d. Differences in SMA could be a useful operational tool when sludge withdrawal for purging or inoculation purposes is needed. Different SMA values were observed at different hydraulic retention times (HRT). Comparing these data with solids and COD removal efficiencies, the optimum HRT for an efficient operation of the reactor under local conditions could be established.