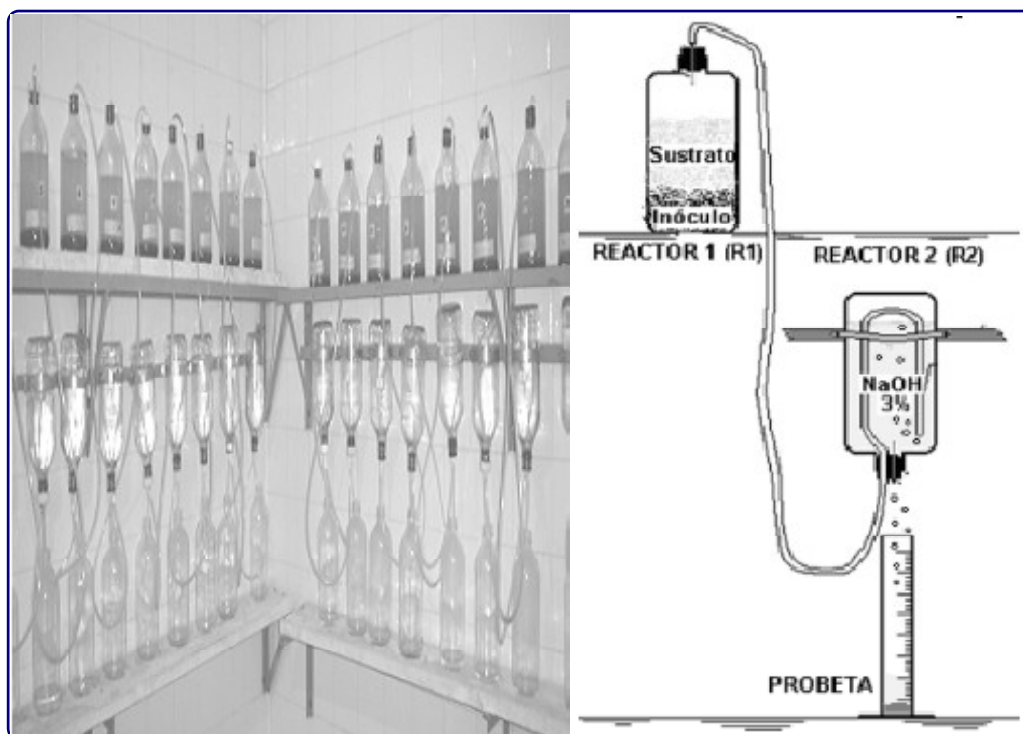


ACTIVIDAD METANOGÉNICA ESPECÍFICA: UNA HERRAMIENTA DE CONTROL Y OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO ANAEROBIO DE AGUAS RESIDUALES



Patricia Torres Lozada, Ph.D.

Profesora Asociada
Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental.
Universidad del Valle, Cali, Colombia.
patoloz@univalle.edu.co

Andrea Pérez, M.Sc.

Estudiante de Doctorado en Ingeniería
Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental.
Universidad del Valle, Cali, Colombia.
andreaperezvidal@hotmail.com

*Recibido: Agosto 10 2010 *Septiembre 3 2010

RESUMEN

La Actividad Metanogénica Específica (AME) permite cuantificar la máxima capacidad de producción de metano por el grupo de microorganismos presente en lodos anaerobios. La AME, además de ser usada para el monitoreo de la calidad del lodo en reactores anaerobios, es una herramienta que evalúa el comportamiento de la biomasa contaminada y determina la carga orgánica máxima que puede aplicarse a un sistema, con el fin de examinar la degradabilidad de los sustratos y la posibilidad de selección de inóculos. Esta herramienta, ampliamente utilizada en diferentes países y desarrollada hace más de dos décadas, no cuenta con un protocolo estandarizado que facilite la comparación de resultados.

El presente artículo hace una reflexión y descripción crítica de la metodología AME, soportada por experiencias nacionales e internacionales, con el objetivo de buscar uniformidad en la aplicación del método a nivel nacional.

maximum organic load that can be applied to a system, in order to examine the degradability substrates and the possibility of selection of inoculants. This tool, widely used in different countries and developed more than two decades, does not have a standardized protocol that facilitates comparison of results. This article is a reflection and critical description of the methodology AME, supported by national and international experiences, with the objective of seeking uniformity in the application of the method nationwide.

PALABRAS CLAVE

Actividad Metanogénica Específica (AME); Aguas Residuales; Inóculo; Tratamiento Anaerobio.

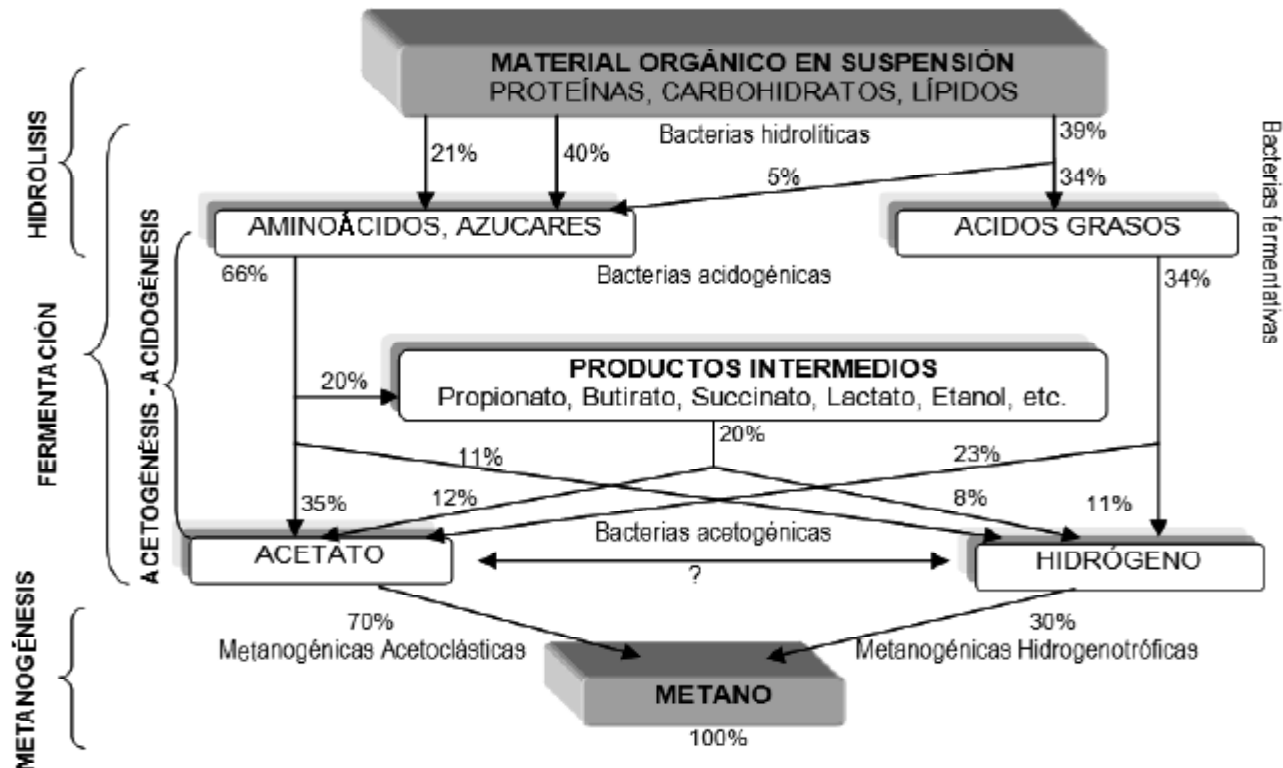
KEYWORDS

Anaerobic Treatment; Inoculum; Specific Methanogenic Activity (SMA); Wastewater.

ABSTRACT

Specific Methanogenic Activity (SMA) allows to quantify the maximum methane producing capacity by the group of microorganisms present in anaerobic sludge. The AME, beside being used for monitoring the quality of the sludge in anaerobic reactors, is a tool that evaluates the behavior of contaminated biomass and determines the

1. INTRODUCCIÓN



Fuente: Adaptado de van Haandel y Lettinga, 1994; Metcalf y Eddy, 2003; Rojas, 1987.

Figura 1. Secuencia metabólica y grupos microbianos que intervienen en la digestión anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso bioquímico en el cual un grupo de diferentes tipos de microorganismos, en ausencia de oxígeno molecular, promueve la transformación de compuestos orgánicos complejos (carbohidratos, proteínas y lípidos) en productos más simples, como metano, gas carbónico, gas sulfhídrico y amonio. Los microorganismos que participan en la digestión anaerobia actúan por medio de reacciones específicas secuenciales, las cuales cuentan con bacterias especializadas en cada una de ellas (Foresti *et al.*, 1999).

El proceso de digestión anaerobia puede ser simplificado considerando cuatro fases principales: Hidrólisis, Acidogénesis, Acetogénesis y Metanogénesis. La Figura 1 detalla la secuencia metabólica y los microorganismos que intervienen en el proceso.

En las fases de hidrólisis y acidogénesis se produce más energía y los organismos responsables crecen con mayor velocidad, por lo que la recuperación de las poblaciones frente a alguna alteración del medio es rápida. En las fases de acetogénesis y metanogénesis los rendimientos de energía son tan bajos que la actividad de las bacterias asociadas es extremadamente lenta y cualquier alteración tarda mucho tiempo en corregirse (Barrera, 1993).

Las bacterias producen metano a partir de H_2 y de acetato, las primeras crecen más rápido por lo que las bacterias metanogénicas acetoclásticas generalmente limitan la tasa de transformación de material orgánico complejo presente en el agua residual a biogás (van Haandel y Lettinga, 1994), además de ser las responsables de cerca del 60 – 70% de toda la producción de metano (Chernicharo, 1997).

En el arranque de reactores anaerobios, el inicio está caracterizado por una baja actividad biológica, relacionada con el crecimiento de las bacterias acidogénicas, acetogénicas y metanogénicas como biomasa dispersa y adherida. Tradicionalmente el arranque es la etapa considerada más inestable y crítica en el proceso anaerobio, por lo que debe iniciarse con Tiempos de Retención Hidráulicos -TRH elevados, para asegurar una buena asimilación del sustrato por parte de las bacterias y mantener una carga orgánica inicial baja, la cual puede ir aumentando a medida que el reactor se estabiliza (Hulshoff, 1987).

Durante el arranque y operación de los reactores anaerobios se recomienda el seguimiento de algunos parámetros fisicoquímicos y el uso de algunas herramientas que permitan evaluar su desempeño. El monitoreo de los sistemas anaerobios puede agruparse en tres tipos (Chernicharo, 2007):

- . **Monitoreo de la eficiencia:** busca establecer el comportamiento de la unidad y su desempeño frente a las especificaciones de diseño. Medición de parámetros como Sólidos Suspendidos Totales, Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (BDO) y organismos patógenos.

- . **Monitoreo de la estabilidad:** tiene como objetivo evaluar la prevalencia de la fermentación acidogénica sobre la metanogénica que puede ocasionar la acidificación del sistema. Medición de pH, Ácidos Grasos Volátiles (AGV), Alcalinidad (Total, Bicarbonática y debida a AGV), Índices de Alcalinidad (Buffer, Al/AP y ?) (Pérez y Torres, 2008), Composición del biogás (incremento del CO_2).

- . **Monitoreo de la cantidad y calidad del lodo:** las características cuantitativas del lodo pueden evaluarse con la medición de Sólidos Totales y Sólidos Volátiles Totales y los aspectos cualitativos con herramientas como la Actividad Metanogénica Específica (AME), Ensayos de sedimentabilidad y Perfil de lodos.

En el tratamiento biológico anaerobio, la AME es una herramienta que se utiliza para determinar la capacidad de asimilación que tienen las bacterias metanogénicas para producir biogás, permitiendo clasificar el potencial de la biomasa para convertir el sustrato en metano y gas carbónico bajo diferentes condiciones ambientales (Penna, 1994).

La AME puede ser usada como análisis de rutina para cuantificar la actividad de la población metanogénica, además de ofrecer otras aplicaciones como son: evaluar el comportamiento de la biomasa bajo el efecto de compuestos potencialmente inhibidores, determinar la toxicidad relativa de compuestos químicos presentes en efluentes, establecer el grado de degradabilidad de diversos sustratos, monitorear los cambios de actividad del lodo debido a una posible acumulación de materiales inertes, determinar la carga orgánica máxima que puede ser aplicada para un determinado tipo de lodo y evaluar parámetros cinéticos (Chernicharo, 2007).

Teniendo en cuenta la importancia de la AME como herramienta de control y optimización de los sistemas de tratamiento anaerobios, en este artículo se hace una reflexión y descripción crítica de su procedimiento y utilidad basada en experiencias propias y reportadas.

2. ACTIVIDAD METANOGÉNICA ESPECÍFICA (AME)

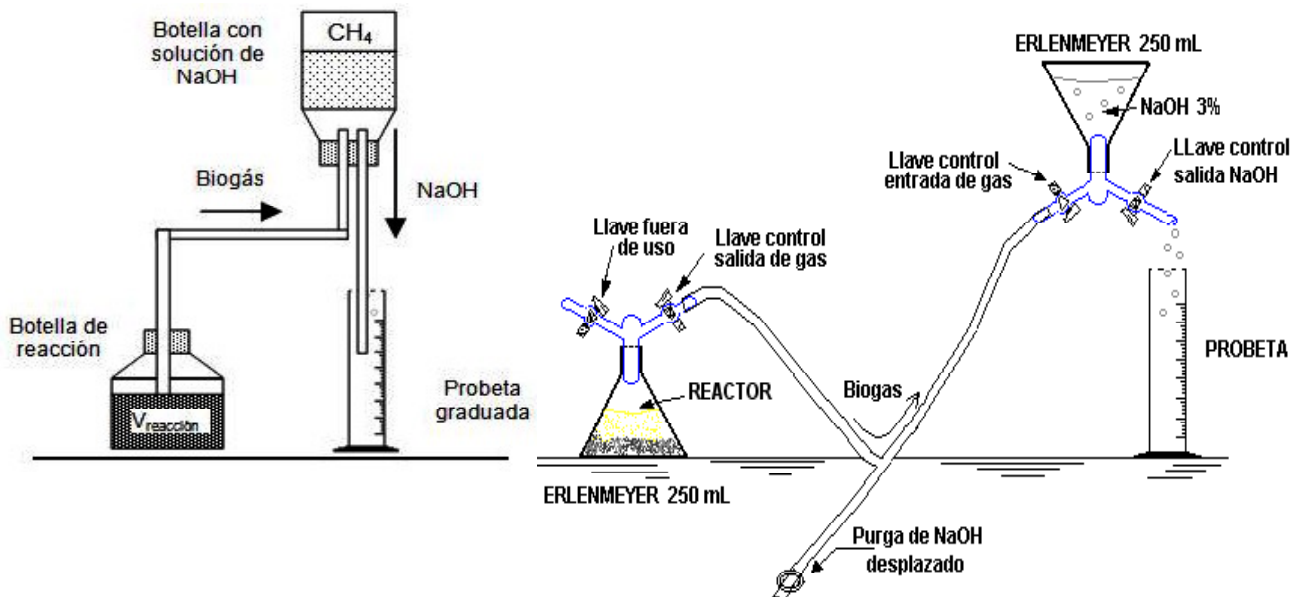
La AME puede definirse como la máxima capacidad de producción de metano por un grupo de microorganismos anaerobios, realizada en condiciones controladas de laboratorio que permita la máxima actividad bioquímica de conversión del sustrato orgánico a metano (Chernicharo, 2007).

El conocimiento de la AME de un lodo permite establecer la capacidad máxima de remoción de DQO de la fase líquida, permitiendo estimar la carga orgánica máxima que puede ser aplicada a un reactor impidiendo su desestabilización; asimismo, la AME también permite determinar la concentración mínima de biomasa requerida en el reactor para garantizar la reducción de la carga orgánica aplicada (Aquino *et al.*, 2007).

Los trabajos de Valcke y Verstraete (1983), De Zeeuw

(1984) y Dolfig y Bloemen (1985) fueron pioneros en el desarrollo de la metodología AME, como herramienta para la caracterización y evaluación de reactores anaerobios; sin embargo, aún existen diferentes protocolos a nivel mundial para la medición de la AME los cuales presentan diferencias en términos de la concentración de inóculo, tipo y concentración del sustrato, relación alimento/microorganismos, tipo y concentración de nutrientes y tiempo de incubación. La ausencia de un método estandarizado dificulta la replicación o comparación de resultados obtenidos en diferentes estudios y limita la aplicación y difusión de la metodología AME como herramienta de control de los procesos anaerobios. Su aplicación resulta más útil en términos comparativos, por ejemplo, entre condiciones o fases operacionales de reactores anaerobios (Aquino *et al.*, 2007; Chernicharo, 2007).

Para cuantificar la producción de metano, existen métodos sofisticados con medición manométrica o cromatográfica o tan simples como el uso de mediciones volumétricas (Amaral *et al.*, 2008). El primero demanda equipos con especificaciones técnicas especiales (Ej. Sistema OXITOP para AME) y el segundo necesita de un montaje sencillo, sin mayores requerimientos. Teniendo en cuenta la facilidad de implementar mediciones de AME por el método volumétrico, se enfatizará en este tipo de medición por su potencialidad de aplicación en nuestro medio.

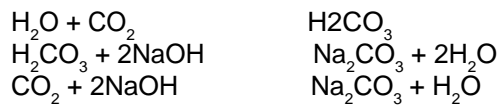


Fuente: Adaptado de Field, 1987; Pérez y Cajigas, 2002; Chernicharo, 2007

Figura 2. Configuración convencional del montaje AME

2.1 ENSAYO AME POR MÉTODO VOLUMÉTRICO

El método volumétrico se basa en la cuantificación del volumen de metano producido mediante el uso de una sustancia desplazante, como el NaOH o el KOH, en un rango de 15 -20 g/L (Field, 1987), por su propiedad de reaccionar con el CO₂ presente en el biogás, permitiendo una medición más aproximada del volumen de metano producido. Se recomienda chequear que el pH del NaOH sea superior a 12 unidades para garantizar que éste secuestre el CO₂ producido. Las reacciones que se presentan son las siguientes (Chernicharo, 2007):



Para el montaje de AME se requiere contar con los siguientes elementos:

- Equipos de actividad metanogénica
- Inóculo o semilla (lodo anaerobio)
- Sustrato
- Control de temperatura

2.1.1 Equipos de AME

En las experiencias reportadas en la literatura se observa el uso de diferentes configuraciones de los equipos de desplazamiento de líquido, siendo clásica la mostrada en la Figura 2.

El estudio realizado por Torres *et al.*, (2006), en el que se realizaron montajes de AME usando sustratos fácilmente acidificables, sugiere el uso de la configuración mostrada en la Figura 3 con el fin evitar el daño del ensayo si se presentan presiones negativas al interior del sistema.

La ubicación del Reactor 1 (R1) en un nivel superior al Reactor 2 (R2) evita que, en caso de ocurrir succión del NaOH por presiones negativas, el Reactor biológico (R1) se vea afectado; adicionalmente, la manguera en forma de "U" ubicada en R2 se ideó con el objetivo de que actuara como un sifón y dificultara el paso del NaOH hacia R1.

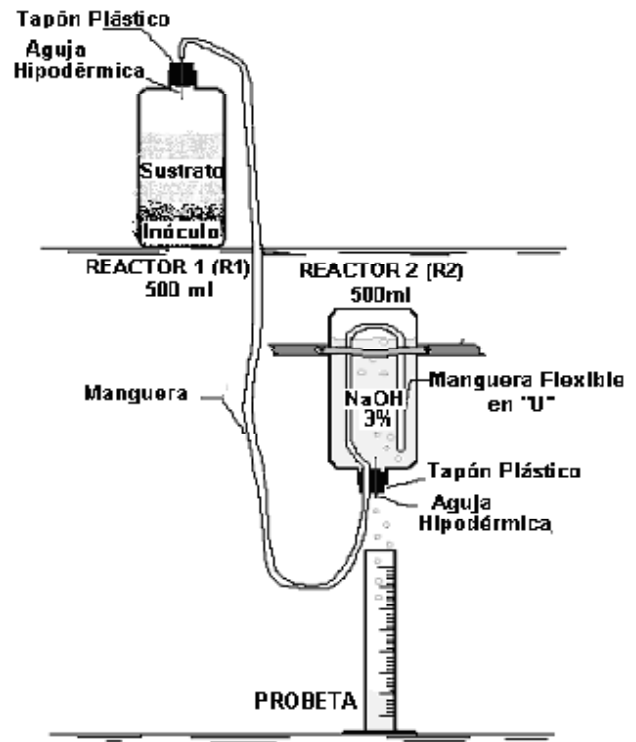


Figura 3. Configuración del montaje de AME adaptada

2.1.2 Inóculo o semilla

Durante el ensayo AME se asume que el sustrato y los nutrientes estarán presentes en exceso, por lo que la concentración inicial de lodo definirá la duración del ensayo (Chernicharo, 2007).

Para ensayos en los que se garantice agitación se recomiendan concentraciones de inóculo entre 2.0 a 5.0 gSVT/L y en ensayos sin agitación la concentración recomendada debe variar entre 1.0 y 1.5 gSVT/L (Díaz *et al.*, 2002) o del orden de 2.0 gSVT/L (Rocha *et al.*, 2001). Es importante resaltar que si el montaje no cuenta con agitación, la concentración seleccionada de inóculo debe garantizar un volumen no muy elevado para poder garantizar el eficiente contacto entre la biomasa y el sustrato.

El inóculo deberá ser caracterizado previamente en términos de los Sólidos Volátiles Totales (gSVT/L). El volumen de lodo a adicionar se calcula considerando que la mezcla de inóculo y sustrato no debe sobrepasar el 90% del volumen útil del reactor biológico (R1). El

volumen del lodo puede calcularse de la siguiente manera:

$$V_{\text{LODO}} = \frac{[V_{\text{MEZCLA}} * C_{\text{fija}}]}{C_{\text{inicialLODO}}}$$

V_{LODO} =Volumen de lodo a adicionar en R1(L)

V_{MEZCLA} =Volumen total de reacción o de mezcla (L)

C_{fija} =Concentración fijada (1.0 – 5.0 gSVT/L)

$C_{\text{inicialLODO}}$ =Concentración de SVT inicial del lodo (g/L)

Los estudios realizados por Torres *et al.*, (2007) evidenciaron la potencialidad de usar los ensayos de AME como herramienta para evaluar diferentes inóculos en la tratabilidad de un agua residual industrial, facilitando la selección del inóculo más adecuado para el tratamiento.

2.1.3 Sustrato

Como se mencionó anteriormente, el ensayo de AME debe ser realizado con exceso de sustrato y nutrientes para lograr que la cinética de degradación se aproxime a una reacción de orden cero, pasando a depender sólo de la concentración de microorganismos presentes en el inóculo.

De acuerdo con Aquino *et al.*, (2007) concentraciones de ácido acético entre 2000 y 4000 mg/L permitirán alcanzar valores máximos de AME. Para ensayos con agitación, la DQO del sustrato puede oscilar en el rango mencionado y para ensayos sin agitación pueden evaluarse concentraciones entre 3500 y 4500 mg/L (Díaz *et al.*, 2002).

Como sustrato se recomienda el uso de una mezcla de ácidos grasos volátiles - AGV (Acético- C_2 , Propiónico- C_3 y Butírico- C_4) y una solución de macronutrientes ($N-NH_4^+$, $P-PO_4^{3-}$, Mg, Ca), micronutrientes (Fe, Ni, Zn, Co), alcalinidad ($NaHCO_3$ o $KH_2PO_4 + K_2HPO_4$) y un agente reductor ($Na_2S \cdot 7H_2O$) como se muestra en la Tabla 1 (Field, 1987; Chernicharo, 2007; Rojas, 1998; Aquino *et al.*, 2007).

Tabla 1. Composición de solución de nutrientes recomendados para el ensayo AME

Solución ^a	Compuesto	Unid.	Concentración
Macronutrientes	NH ₄ Cl	g/L	170
	NaHCO ₃	mg/L	1000
	KH ₂ PO ₄	g/L	37
	MgSO ₄ ·4H ₂ O	g/L	9.0
	CaCl ₂ ·2H ₂ O	g/L	8.0
Micronutrientes	FeCl ₃ ·6H ₂ O	mg/L	2000
	ZnCl ₂	mg/L	50
	CuCl ₂ ·2H ₂ O	mg/L	30
	MnCl ₂ ·4H ₂ O	mg/L	500
	(NH ₄) ₂ MoO ₇ ·4H ₂ O	mg/L	90
	AlCl ₃ ·6H ₂ O	mg/L	50
	CoCl ₂ ·6H ₂ O	mg/L	2000
	NiCl ₂ ·6H ₂ O	mg/L	50
	H ₃ BO ₃	mg/L	50
	Na ₂ SeO ₃ ·5H ₂ O	mg/L	100
	EDTA	mg/L	1000
	HCl 36% ⁽¹⁾	ml/L	1.0
	Indicador de Potencial Redox RESAZURIN ⁽²⁾	mg/L	500
Otros	Agente Reductor Na ₂ S·7H ₂ O ⁽³⁾	g/L	100
	Extracto de Levadura (fuente de Vitaminas) ⁽⁴⁾	g/L	0.2

FUENTE: ADAPTADO DE FIELD, 1987; MONTEGGIA, 1997; CHERNICHARO, 2007; AQUINO ET AL, 2007.

*Al momento de utilizar las soluciones, adicionar 1 mL de esta solución por cada litro de la solución de macronutrientes.

**Evita formación de precipitados

***Una vez se adicione el agente reductor, verificar la coloración final. Incoloro = bajo potencial redox; Rosa o Rojo = alto potencial redox. Rango recomendado: pE = -100 a -200 mV

****Adicionar 0.2 g Levadura/L al sustrato

(A) 1 g/g DQO; (B) adicionado en forma de MgSO₄·7H₂O; (C) adicionada en forma de FeCl₂·4H₂O; (D) adicionada en forma de ZnSO₄·7H₂O; (E) adicionada en forma de CuSO₄·5H₂O.

(1)Penna (1994); (2) Chernicharo (1997); (3) Souza et al, (2005); (4)Alvez et al (2005); (5) Florencio et al, (1993)

La composición de los AGV afectará directamente los resultados de la AME; por lo tanto, la selección de su composición deberá escogerse preferiblemente en función de la composición de AGV del agua residual a ser evaluada. Algunos estudios sugieren una mezcla de AGV en una proporción C₂:C₃:C₄ de 100:100:100 g/L cuya DQO resultante tendría una proporción en porcentaje de 24:34:41 respectivamente. Es importante anotar que estudios realizados con concentraciones mayores de acetato (73:21:04) han presentado mayores valores de AME (Field, 1987; Aquino *et al.*, 2007).

Es importante resaltar que una de las ventajas de los ensayos AME es la posibilidad de evaluar la degradabilidad de diferentes sustratos usando un inóculo fijo, como lo muestran los estudios realizados por Torres *et al.*, (2002; 2008), Nagel et al (1999), Vallecillo et al, (1999). En algunos casos se requerirá del acondicionamiento del pH y la alcalinidad del sustrato para garantizar las condiciones adecuadas durante el ensayo y evitar inhibición del inóculo.

2.1.4 Control de temperatura

Teniendo en cuenta que los microorganismos metanogénicos tienen mejores condiciones de crecimiento entre 30 y 35°C (Chernicharo, 2007) se recomienda el uso de un cuarto de calentamiento con temperatura controlada que garantice una temperatura estable dentro del rango indicado anteriormente.

3.PRODUCCIÓN DE METANO Y CÁLCULO DE LA AME

La producción teórica de metano debe ser calculada teniendo en cuenta las condiciones de temperatura y presión atmosférica bajo las cuales se realicen los montajes de AME.

Considerando la ecuación de combustión del metano, teniendo una oxidación completa de éste, una mol de CH₄ consume dos moles de O₂. Por lo tanto, a condiciones normales de temperatura y presión (T=273°K; P=1atm), 22.4 litros de metano corresponden a 64 g de DQO, es decir, 0.35 litros de CH₄ por gramo de DQO removida. Esta relación permite estimar la fracción de materia orgánica convertida en metano a partir del volumen de metano producido en el reactor, por unidad

de tiempo. Como esta relación es válida para condiciones normales de temperatura y presión, para cualquier otra condición el volumen obtenido debe ser corregido (Foresti,1994). El factor de corrección por temperatura y presión puede calcularse así (Chernicharo, 1997):

$$\text{Donde: } K(t) = \frac{P * K}{R * (273 + t)}$$

K(t) = factor de corrección (g DQO/L)
 P = presión atmosférica (atm)
 R = constante de los gases (0.08206 atm*L/mol*°K)
 K = carga orgánica digerida correspondiente a una mol de CH₄ (64 gDQO/mol)
 t = temperatura operacional del montaje (°C)

El volumen teórico de metano puede calcularse con la siguiente expresión:

$$\text{Donde: } V_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K(t)}$$

V_{CH₄} = volumen teórico de metano producido (L)
 DQO_{CH₄} = carga de DQO removida en R1 y convertida en metano (gDQO)

Teniendo en cuenta la producción de metano, el cálculo de la actividad metanogénica específica (AME) se efectúa a partir de la siguiente expresión:

$$\text{Donde: } AME(gDQO/g STV * d) = \frac{m * 24}{V_{CH_4} * M}$$

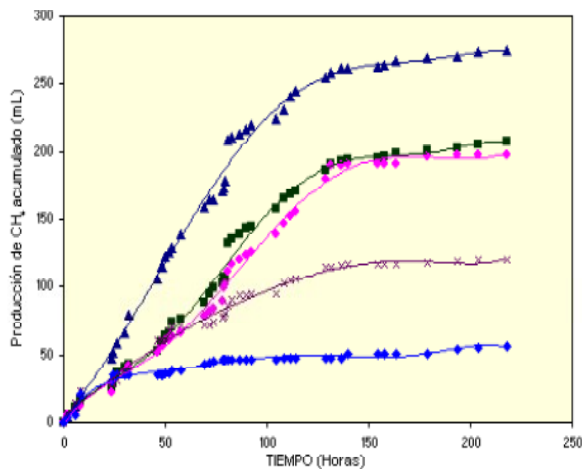
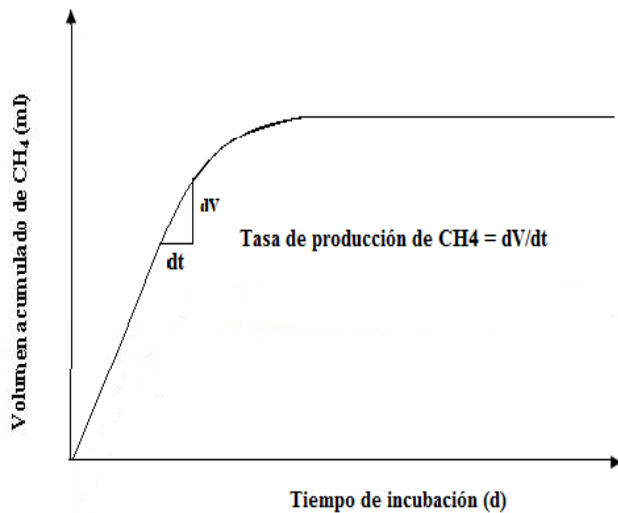
m = pendiente máxima en la curva producción de metano (Vol.acumulado CH₄ vs tiempo po)

M = masa de lodo (Volumen lodo adicionado *Concentración inicial Lodo) (g)

Para el cálculo de la pendiente (m) deberá construirse una curva de "Volumen acumulado de CH₄" vs "Tiempo del ensayo", este último podrá ser suspendido una vez la curva se torne asintótica.

La pendiente deberá ser tomada en el tramo de mayor inclinación de la curva y deberá corresponder a la utilización de al menos el 50% del sustrato adicionado.

La Figura 4 muestra un esquema de la curva teórica con el punto de medición de la pendiente y un ejemplo de curvas obtenidas experimentalmente en un ensayo en el que se evaluaron diferentes sustratos.



AME (gDQO/gSTV*d)	AGUJA RESIDUAL Con ajuste a pH = 7.50				
	BLANCO LODO	BLANCO A.R.	CAL VIVA	CAL HIDRATADA	BICARBONATO
	0,114	0,076	0,150	0,129	0,203

Fuente: Pérez y Cajigas, 2002; Chernicharo, 2007.

Figura 4. Curva de producción acumulada de CH₄

Algunos autores sugieren realizar dos alimentaciones para los ensayos AME, esperándose en la mayoría de los casos que la segunda alimentación sea mayor que la primera por considerar que el inóculo ya se adaptó al sustrato.

Con las dos alimentaciones se busca determinar si el

aumento fue debido principalmente al crecimiento de biomasa, en cuyo caso la actividad de la primera alimentación es la correcta, o se puede encontrar que la mayor parte del aumento se debió a la adaptación de las bacterias al nuevo sustrato, en cuyo caso la actividad de la segunda alimentación es la correcta. Para definir el valor de AME final se deben realizar los siguientes estimativos (Field, 1987):

. Cálculo del incremento teórico esperado de la actividad (ITEAA)

Para T = 30°C

$$\text{Donde: } ITEAA = \left(\frac{0.02 * DQO_{AGV} * 3.0}{SSV * AME_1} \right)$$

0.02 = Producción celular de metano-bacterias (gSSV/gDQO)

DQO_A = DQO debida a los AGV en el sustrato usado durante la primera alimentación (g DQO/l)

3.0 = Actividad celular de las metano-bacterias puras (gDQO_{CH4}/gSSV*d)

AME₁ = Actividad metanogénica específica del lodo medida durante la primera alimentación (gDQO/GSSV*d)

. Cálculo del incremento observado en aumento de actividad (IOAA)

$$\text{Donde: } IOAA = \left(\frac{AME_2 - AME_1}{AME_1} \right)$$

AME₁ = Actividad metanogénica específica del lodo medida durante la primera alimentación (gDQO/GSSV*d)

AME₂ = Actividad metanogénica específica del lodo medida durante la segunda alimentación (gDQO/GSSV*d)

Si IOAA > 2*ITEAA el aumento observado en la actividad se debe principalmente a la adaptación y la actividad de la **segunda alimentación** es la actividad del lodo.

Si IOAA < 2*ITEAA el aumento observado en la actividad se debe principalmente al crecimiento esperado de las bacterias metanogénicas y la actividad de la **primera alimentación** es la actividad del lodo.

4. RECOMENDACIONES PARA EL SEGUIMIENTO DEL ENSAYO

Previo al montaje deberá verificarse si hay fugas en los equipos de AME. La principal desventaja del método volumétrico es la presencia de microfugas en los equipos que pueden interferir en la medición real de CH₄ incrementándola, por lo tanto deben rectificarse posibles fugas en los tapones o mangueras.

Una vez iniciado el ensayo, se recomienda hacer el seguimiento diario de las mediciones de líquido desplazado con una frecuencia de al menos 3 veces/día; antes de cada medición se recomienda agitar el reactor biológico (R1) para que haya evacuación del biogás y sirva de mecanismo para mejorar el contacto biomasa/sustrato.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los ensayos de Actividad Metanogénica Específica, además de ser empleados para la caracterización de lodos en sistemas anaerobios, tienen gran aplicabilidad en ensayos de biodegradabilidad de diferentes sustratos y la selección de inóculos adecuados para el arranque de reactores anaerobios; también permiten optimizar variables operacionales del proceso anaerobio.

La metodología AME por medición volumétrica, además de ser ampliamente aplicada, resulta una técnica precisa y sencilla para la cuantificación del metano, siendo una opción viable en nuestro medio.

La estandarización de un protocolo para medición de AME permitiría una mayor aplicabilidad para la comparación de resultados obtenidos en diferentes investigaciones, siendo necesario precisar aspectos del ensayo, tales como las condiciones de incubación y características del sustrato e inóculo empleados.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amaral, M., Ferreira, C., Lange, L. y de Aquilino, S. (2008). Avaliação da biodegradabilidade anaeróbica de lixiviados de aterro sanitários. Vol. 13 No. 1.

Aquino, S., Chernicharo, C., Foresti, E., Florencio Dos Santos, M. y Monteggia, L. (2007).

Metodologias para determinação da Atividade Metanogénica Específica (AME) EM Lodos Anaeróbios. *Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Vol. 12 –No. 2.

Barrera, S. (1993). Fundamentos del tratamiento anaeróbico. En: Seminario sobre tecnología de tratamiento anaerobio de residuos orgánicos. Universidad de los Andes, Bogotá-Colombia.

Chernicharo, C. (1997). Principios do tratamento biológico de águas residuárias. Universidad Federal de Minas Gerais. Vol V. Brasil.

Chernicharo, C. (2007). Principios do tratamento biológico de águas residuárias. Universidad Federal de Minas Gerais. Vol V. Brasil.

Díaz, M., Espitia, S. y Molina, F. (2002). Digestión anaerobia. Una aproximación a la tecnología. Universidad Nacional de Colombia.

De Zeeuw, W. (1984). Acclimatization of anaerobia sludge for UASB reactor start up. Doctoral Thesis, Wageningen Agricultural University. Wageningen - Netherlands.

Dolfing, J., Blomen, G. B. M. (1985). Activity measurements as a tool to characterize the microbial composition of methanogenic environments. *J. Microbiological Methods*. Vol. 4. 1-12 Pag.

Field, J. (1987). Parámetros operativos del manto de lodos anaeróbicos de flujo ascendente. En: Manual de Arranque y operación de sistemas de flujo ascendente con manto de lodos – UASB. Universidad del Valle, CVC. Universidad Agrícola de Wageningen.

Foresti, E., Florencio, L., Van Haadel, A., Zaiat, M. y Cavalcanti, P. (1999). Fundamentos do tratamento anaeróbico. Capítulo 2. En: Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbico e disposição controlada no solo. PROSAB, Brasil.

Hulshoff POL, L. (1987). Arranque y operación de reactores UASB. En: Manual de Arranque y operación de sistemas de flujo ascendente con manto de lodos – UASB. Universidad del Valle, CVC. Universidad Agrícola de Wageningen.

- Metcalf y Eddy (2003). Wastewater Engineering Treatment and Reuse. Fourth Edition. McGraw-Hill. USA
- Nagel, P., Urtubia, A., Aroca, T., Chamy, R. y Schiappacasse, M. (1999). Methanogenic toxicity and anaerobic biodegradation of chemical products in use in a brewery. Col. 40 No. 8. School of Biochemical Engineering. Catholic University of Valparaiso, Chile. 169-176 Pag.
- Penna, J. (1994). Estudo da metodologia do teste de atividade metanogênica específica. Tese de doutorado. Escola de Engenharia, USP-São Carlos.
- Perez, A. y Cajigas, A. (2002). Corrección de pH en reactores anaerobios tratando aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca. Tesis pregrado. Ingeniería Sanitaria, Universidad del Valle. Cali-Colombia.
- Pérez, A. y Torres, P. (2008). Índices de alcalinidad para el control del tratamiento anaerobio de aguas residuales de fácilmente acidificables. Revista Ingeniería y Competitividad. Vol10. N° 2. Diciembre. Universidad del Valle. 41-52 Pag.
- Rojas, O. (1987). Relación alcalinidad-ácidos grasos volátiles. En: Manual de Arranque y operación de sistemas de flujo ascendente con manto de lodos – UASB. Universidad del Valle, CVC, Universidad Agrícola de Wageningen.
- Rocha, M.A.G. (2001) Avaliação e comparação entre a atividade metanogênica específica de esgotos doméstico e industrial. In: ANAIS 21º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENG. SANITÁRIA E AMBIENTAL, J. Pessoa.
- Torres, P., Cajigas, A., Pérez, A., González, M. y Otero, A. (2005). Evaluación de diferentes alcalinizantes en el tratamiento anaerobio de aguas residuales fácilmente acidificables. IV Taller y Simposio Latinoamericano de Digestión Anaerobia. Uruguay.
- Torres, P., Cruz, C., Marmolejo, L., Cajigas, A. y Perez, A. (2006). Producción Más Limpia aplicada al proceso de extracción de almidón de yuca. Informe final. Colciencias, Universidad del Valle, Colombia.
- Torres, P., Perez, A., Cajigas, A., Jurado, C. y Ortiz, N. (2007) "Selección de inóculos para El tratamiento anaerobio de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca". Revista Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente (EIDENAR). Ejemplar N°6. Enero- Diciembre. ISSN 1692-9918. 105-111 Pag.
- Torres, P., Pérez, A., Cajigas, A., Otero, A. y González, M. (2008). "Selección de acondicionadores químicos para el tratamiento anaeróbico de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de la yuca". Revista Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente (EIDENAR). Ejemplar N°7. Enero- Diciembre. ISSN 1692-9918. 65 – 73 Pag.
- Torres, P., Rodríguez, J., Cajigas, A. y Pérez, V. (2002). "La Actividad Metanogénica como Herramienta para Optimización del Proceso Anaerobio en el Tratamiento de Aguas Residuales Fácilmente Acidificables". XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. AIDIS. Cancún, México.
- Valcke, D. y Verstraete, W. (1983). A Practical method to estimate the acetoclastic methanogenic biomass in anaerobic reactors. J. Water Pollution Control Federation, Vol. 55. 1191-1195 Pag.
- Vallecillo, A., Garcia, P. y Pena, M. (1999). Anaerobic biodegradability and toxicity of chlorophenols. University of Valladolid, Department of Chemical Engineering, Prado de la Magdalena. Spain, Vol 40. No.8, 161-168 Pag.
- Van Haandel, A. y Lettinga, G. (1994). Tratamiento anaeróbico de esgotos. Brasil.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.