
SELECCIÓN DE ACONDICIONADORES QUÍMICOS PARA EL TRATAMIENTO ANAEROBIO DE AGUAS RESIDUALES DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN DE YUCA



Patricia Torres Lozada, Ph.D.

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

Andrea Pérez Vidal, M.Sc.

Estudiante de Doctorado
Grupo de Investigación Estudio y Control de la
Contaminación Ambiental-EIDENAR,
Universidad del Valle Cali-Valle Colombia.

Álvaro A. Cajigas, M.Sc.

Grupo de Investigación Estudio y Control de la
Contaminación Ambiental-EIDENAR,
Universidad del Valle Cali-Valle Colombia.

Ana María Otero, Ing.

Grupo de Investigación Estudio y Control de la
Contaminación Ambiental-EIDENAR,
Universidad del Valle Cali-Valle Colombia.

Magally González, Ing.

Grupo de Investigación Estudio y Control de la
Contaminación Ambiental-EIDENAR,
Universidad del Valle Cali-Valle Colombia.

RESUMEN

La agroindustria de extracción de almidón de yuca genera aguas residuales con una alta carga orgánica que afecta los cuerpos receptores. La tecnología anaerobia

*Recibido : agosto 10 2008 *Aceptado: Octubre 25 2008

ha sido estudiada para tratar estas aguas residuales obteniéndose resultados satisfactorios; sin embargo, una de las principales limitantes del proceso ha sido la elevada acidez del agua residual. En este estudio se presentan los resultados de la evaluación de tres alcalinizantes comerciales: cal hidratada - $\text{Ca}(\text{OH})_2$, hidróxido de sodio - NaOH y bicarbonato de sodio - NaHCO_3 , empleados para neutralizar la acidez del agua y garantizar capacidad buffer a costos accesibles para este sector productivo. De los tres alcalinizantes evaluados, el que presentó mejores resultados fue el bicarbonato de sodio seguido del hidróxido de sodio.

PALABRAS CLAVES

Alcalinidad Bicarbonática; Bicarbonato de Sodio; Cal Hidratada; Capacidad buffer; Hidróxido de Sodio

ABSTRACT

The agro-industry of casaba starch extraction produces wastewaters with high organic charge that affects reception bodies. Anaerobic technology has been studied for the treatment of these waste waters with good results. Nevertheless, one the main constraints of the process has been waste water's high acidity. The present study shows the results of the evaluation of three commercial alkalinizers: hydrated lime – $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sodium hydroxide – NaOH and sodium bicarbonate – NaHCO_3 , used to neutralize water and assure buffer capacity at accessible costs for the productive sector. From the three alkalinizers studied, the one with the best results was sodium bicarbonate followed by the sodium hydroxide.

KEYWORDS

Bicarbonate alkalinity, sodium bicarbonate, hydrated lime, buffer capacity, sodium hydroxide.

1. INTRODUCCIÓN

En el departamento del Cauca se concentra gran parte de la agroindustria rallandera del país; el desarrollo de esta actividad conlleva un alto grado de contaminación hídrica por la elevada carga orgánica que aportan las aguas residuales generadas. De acuerdo con Colin et al. (2007), se descargan diariamente 100 kg de DQO por tonelada de yuca procesada a los cuerpos receptores y una rallandería de nivel tecnológico medio, como las que predominan en esta región, procesa entre 5 y 12,5 ton/semana (CRC, 2005).

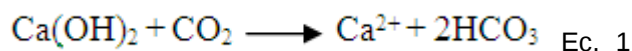
El agua residual del proceso de extracción de almidón de yuca contiene carbohidratos fácilmente hidrolizables que favorecen la fermentación natural y, por consiguiente, la formación de ácidos grasos volátiles- AGV, incidiendo en los bajos valores de pH, prácticamente ausencia de alcalinidad y elevada acidez (Pérez, 2007).

Existen diferentes estudios realizados a escala de laboratorio y real para el tratamiento anaerobio de estas aguas residuales; debido a su carácter ácido, los reactores anaerobios evaluados han evidenciado la inestabilidad en los sistemas a causa de la fácil acidificación del agua residual y la ausencia de capacidad buffer, siendo fundamental el ajuste de la alcalinidad y la corrección del pH mediante la adición de acondicionadores químicos, denominados alcalinizantes, que permitan generar capacidad buffer.

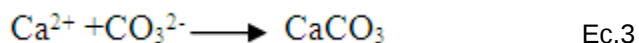
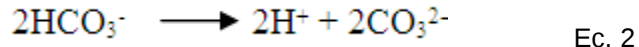
La eficiencia del proceso está determinada por diferentes factores ambientales, entre los cuales el pH y la alcalinidad son de gran relevancia. Las bacterias metanogénicas tienen un crecimiento óptimo en un rango de pH entre 6,6 y 7,6 unidades (Rittmann y Mc Carthy, 2001); sin embargo, pueden conseguir estabilidad para la formación de metano en un rango más amplio (6,0 - 8,0 unidades); valores menores a 6,0 y superiores a 8,3 deben evitarse para prevenir la completa inhibición de las bacterias metanogénicas (Chernicharo, 2007).

Existen varios productos que pueden emplearse para proporcionar alcalinidad, los cuales pueden ser diferenciados en dos grupos: los que reaccionan con el gas carbónico para formar alcalinidad bicarbonática (Ej. $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH , CaO ,) y los que ofrecen alcalinidad bicarbonática directamente (Ej. NaHCO_3 , NH_4HCO_3) (Chernicharo, 2007).

La **cal hidratada** (Ca(OH)_2) es una base fuerte comúnmente empleada por su bajo costo y facilidad de adquisición, pero requiere de cuidado en la manipulación debido a la insolubilidad de algunas sales que se forman generando precipitados de CaCO_3 . La producción de bicarbonato se realiza exclusivamente por la presencia del dióxido de carbono como lo muestran las ecuaciones 1 y 2; estas reacciones químicas pueden ocasionar vacío al interior del reactor por presiones negativas, debido a la disminución de la presión del CO_2 (Ritmann y McCarthy, 2001); adicionalmente, cuando la presencia de CO_2 en el medio es insuficiente para reaccionar internamente con la cal puede ocasionar que el pH final sea demasiado bajo o alto, perjudicando el proceso anaerobio (Chernicharo, 1997).



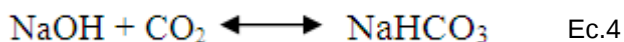
Al continuar con la adición de cal se forma el carbonato de calcio insoluble, debido al acentuado consumo de CO_2 de los gases, como se observa en las ecuaciones 2 y 3:



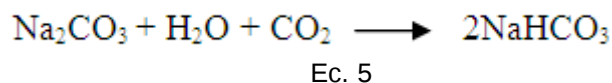
Este precipitado forma costras duras en las paredes del reactor o en el medio de soporte para el caso de reactores de película fija. Generalmente las reacciones indeseables empiezan a producirse una vez el pH ha aumentado a 6,8 unidades (Ritmann y McCarthy, 2001).

El **Hidróxido de sodio** (NaOH), es una base fuerte y no forma sales insolubles, neutralizando eficientemente los ácidos fuertes, siendo, por lo tanto, una solución más satisfactoria para el problema de la neutralización; sin embargo, también disminuye la presión de CO_2 en el reactor, lo cual puede ocasionar una mezcla explosiva de metano y oxígeno que conllevaría al colapso estructural del reactor (Leslie, 1999; Chernicharo, 1997); adicionalmente, una sobredosisificación del producto ocasionaría un incremento súbito del pH por tratarse de una base fuerte, además de requerir de mayor cuidado durante su manipulación (Souza, 1984).

Algunos factores adicionales que se deben tener en cuenta al usar hidróxido de sodio es que da una falsa idea de la capacidad buffer del sistema, ya que una vez ingresen al sistema ácidos producto de las reacciones microbiales, el pH descenderá rápidamente (Foresti y van Haandel, 1998). El consumo de CO_2 puede observarse en la ecuación 4:



El **bicarbonato de sodio** (NaHCO_3) es una sal formada por una base fuerte, hidróxido de sodio (NaOH), y un ácido débil, ácido carbónico (H_2CO_3), y, como todas las demás sales así formadas, presentan características de sustancias buffer. El ion bicarbonato sirve de buffer en valores del pH cercanos a 6,8 unidades (Moraes *et al.*, 2000). La ecuación 5 muestra la reacción del bicarbonato (Field *et al.*, 1995):



El bicarbonato de sodio es fácil de manipular, bastante soluble y no reacciona con el CO_2 , evitando problemas de presiones negativas en el sistema; además, ejerce una excelente acción amortiguadora. Este compuesto es considerado el principal suplemento de alcalinidad bicarbonática y es el único producto que cambia suavemente el equilibrio del medio para lograr un valor deseado, sin alterar el balance fisicoquímico de la delicada comunidad biológica (Field *et al.*, 1995). Sin embargo, presenta como desventaja su mayor costo frente al de la cal hidratada y el hidróxido de sodio.

La Figura 1 ilustra el comportamiento de la presión del CO_2 al interior de un reactor anaerobio con la adición de bicarbonato de sodio y el uso de productos con grupos hidróxidos, talos como la cal hidratada y el hidróxido de sodio. El cuadrado gris delimita las condiciones adecuadas de operación en un proceso anaerobio.

En la figura se observa que para la condición inicial del reactor, representada por el **Punto 1** (40% CO_2 , 500 mgCaCO_3/l y pH 6,3 unidades), si se adiciona bicarbonato de sodio (NaHCO_3) para incrementar la alcalinidad hasta 2100 mgCaCO_3/l (**Punto 2**), el pH se eleva a 6,9 unidades sin reducir la concentración de CO_2 .

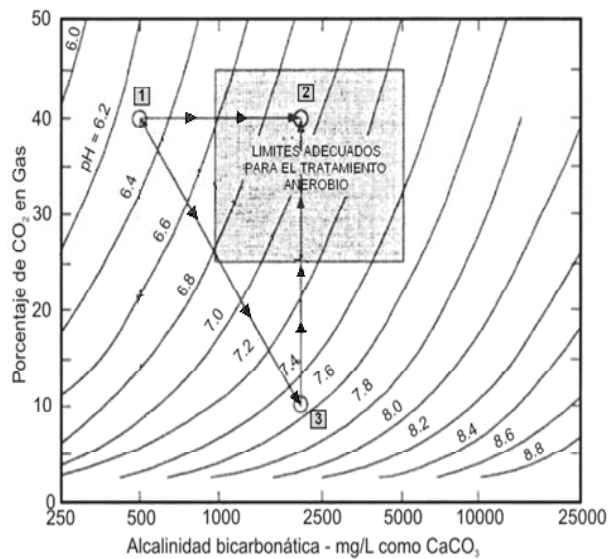


Figura 1. Efecto de la alcalinidad bicarbonática en la fase líquida sobre el contenido de CO_2 en la fase gaseosa

Por el contrario, si se adicionara un producto con grupos hidróxidos, además de incrementar la alcalinidad a 2100 mgCaCO_3/L y elevar el pH a 7,5 unidades, ocurriría la disminución del contenido de CO_2 por su consumo para producir bicarbonato (HCO_3^-) (**Punto 3**); la cantidad de gas consumido dependerá del volumen en estado gaseoso y líquido ocupado en el reactor. A manera de ejemplo, la figura muestra una disminución de CO_2 hasta un 10%; sin embargo, la biomasa producirá nuevamente CO_2 con el fin de equilibrar la concentración inicial del gas hasta el 40%, ocasionando nuevamente la disminución del pH de 7,5 unidades a 6,9 unidades correspondiente al **Punto 2**.

Esta variación de pH puede afectar la población metanogénica que se caracteriza por su elevada sensibilidad frente a este factor ambiental.

En este estudio se evaluaron tres alcalinizantes: cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), hidróxido de sodio (NaOH) y bicarbonato de sodio (NaHCO_3) para el acondicionamiento de la alcalinidad bicarbonática del agua residual del proceso de extracción de almidón de yuca procedente de una rallandería ubicada en el departamento del Cauca, con el objetivo de mejorar la capacidad buffer durante el tratamiento anaerobio.

2. METODOLOGÍA

El estudio se dividió en dos etapas: 1) Neutralización de acidez del agua residual y 2) Ensayos de Actividad Metanogénica Específica – AME, para determinar el rango de alcalinidad bicarbonática necesaria para garantizar capacidad buffer.

El sustrato usado en el estudio fue agua residual de una pequeña industria de extracción de almidón de yuca, el cual fue caracterizado al inicio y al final de cada ensayo con las variables mostradas en la Tabla 1.

Tabla 1. Caracterización del sustrato al inicio y al final de cada ensayo

Variable ^a	Unidades	Técnica de Medición ⁽¹⁾
pH	Unidades	Potenciométrico
Alcalinidad total (AT) y Bicarbonática (AB) ⁽²⁾	mg/L CaCO_3	Titulación
Acidez	mg/L CaCO_3	Titulación
Ácidos Grasos Volátiles (AGV) ⁽²⁾	meq/L	Titulación
Demanda Química de Oxígeno Total (DQO_{OT})	mg/L	Digestión / Espectrofotometría
Demanda Química de Oxígeno Filtrada (DQO_f)	mg/L	Digestión / Espectrofotometría
Sólidos totales (ST), suspendidos totales (SST) y disueltos totales (SD)	mg/L	Gravimetría

(1) (APHA *et al.*, 2005); (2) (Rypley *et al.*, 1986)

2.1 Neutralización de la acidez

Se utilizaron como acondicionadores químicos la cal hidratada (0,025N), el hidróxido de sodio (0,05N) y el bicarbonato de sodio (2 g/L). Considerando la variación de la calidad del agua residual en términos de la acidez, se realizaron ensayos por duplicado con los tres alcalinizantes y siete concentraciones de acidez típicas en este tipo de agua residual (280 - 990 mgCaCO_3/L).

En cada ensayo, a un volumen de 50 ml de agua residual se le midió el pH inicial, el cual fue elevado con el respectivo alcalinizante hasta alcanzar un valor de 5,75 unidades, valor a partir del cual el alcalinizante ha reaccionado con los Ácidos Grasos Volátiles –AGV y puede iniciarse el suplemento de alcalinidad bicarbonática

(Chernicharo, 1997).

Una vez alcanzado el valor de 5,75 unidades, se registró el consumo del respectivo alcalinizante y se monitoreó la variación del pH durante aproximadamente 2,5 horas, con mediciones cada 20 minutos, para verificar la permanencia de este valor en el tiempo.

2.2 Ensayos de actividad metanogénica específica – AME

Con los resultados obtenidos de la etapa anterior, se realizaron montajes por duplicado de AME, usando la técnica de desplazamiento de líquido (Field, 1987). La Figura 2 muestra un esquema del montaje utilizado.

Los ensayos se realizaron en un cuarto con temperatura controlada de 30±1°C, usando como sustrato agua residual del proceso de extracción de almidón de yuca, y como inóculo un lodo granular proveniente de un reactor UASB que trataba las aguas residuales de una industria papelerera de la región; el inóculo fue caracterizado previamente con las variables mostradas en la Tabla 2 (APHA et al., 2005).

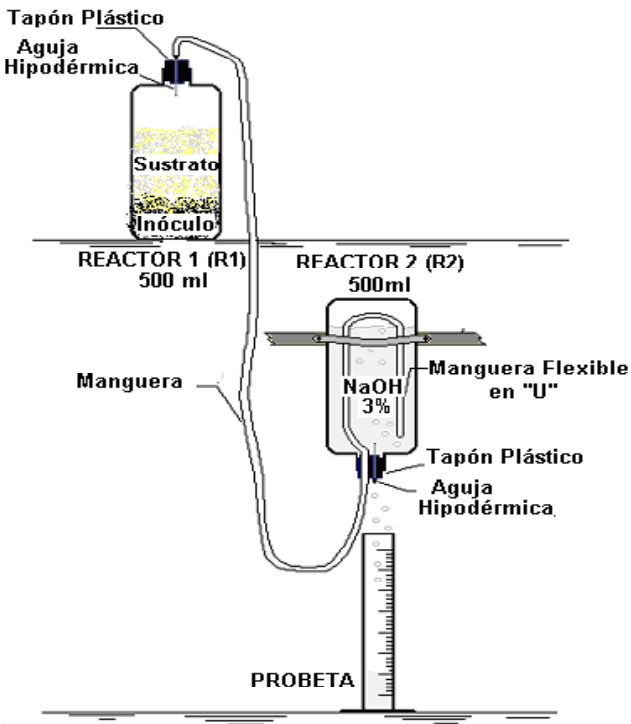


Figura 2. Equipos de desplazamiento de líquido para determinación de la AME

Tabla 2. Tipo de medición en el inóculo para los ensayos AME

Variable ¹	Unidades
Sólidos Totales (ST) y volátiles (STV)	g/Kg
Relación STV/ST	-----
Actividad Metanogénica Específica y Estabilidad del lodo	gDQO _{CH4} /gSSV.día

La cantidad de lodo adicionado se determinó con base en la concentración recomendada de 2,5/L (Chernicharo, 2007) y el volumen de sustrato adicionado fue 300 ml, valor estimado de tal forma que la mezcla inóculo-alcalinizante-sustrato no sobrepasara el 90% del volumen total de cada reactor.

El objetivo de esta etapa del estudio fue evaluar la influencia de la adición de alcalinidad bicarbonática en la generación de capacidad buffer y el desempeño en la digestión anaerobia.

Para ello, se emplearon muestras de agua residual cuyo pH fue ajustado previamente hasta 5,75 unidades con el respectivo alcalinizante y teniendo en cuenta las dosis evaluadas en la etapa anterior; posteriormente se le adicionó al sustrato neutralizado, alcalinidad bicarbonática (usando NaHCO₃) en seis concentraciones (500, 1000, 1500, 2000, 2500 y 3000 mgNaHCO₃/l).

Una vez neutralizada el agua residual y acondicionada con alcalinidad bicarbonática se mezcló con el inóculo y dio inicio a los ensayos de AME.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Neutralización de la acidez

La Tabla 3 resume los resultados obtenidos en los ensayos de neutralización de la acidez, en la cual se detalla el pH del agua cruda y el consumo de alcalinizante para los diferentes valores de acidez del agua residual evaluados.

Tabla 3. Consumo de alcalinizante durante el acondicionamiento del pH a 5,75 unidades.

Acidez mg CaCO_3/L	pH Agua cruda	Consumo de alcalinizante para alcanzar pH de 5,75 unidades (g/L)		
		$\text{Ca}(\text{OH})_2$	NaOH	NaHCO_3
280*	4,02	0,28	0,20	0,44
510*	3,94	0,36	0,30	0,64
550*	3,97	0,42	0,32	0,74
620**	3,84	0,62	0,50	1,18
720**	4,31	0,60	0,46	1,00
880**	3,88	0,74	0,52	1,40
990**	3,72	0,78	0,60	1,44

* Valores presentados cuando se empleó agua residual fresca o con máximo 8 días de almacenamiento

** Valores presentados cuando se empleó agua residual entre 8 y 23 días de almacenamiento o la yuca procesada no era fresca.

Se observa que la cal hidratada y el hidróxido de sodio presentan un consumo menor con relación al bicarbonato de sodio debido a que los dos primeros son bases fuertes que aportan directamente grupos hidroxilos OH^- elevando el pH rápidamente, a diferencia del bicarbonato de sodio que es una sal que eleva suavemente el pH. La Figura 2 muestra la variación del pH en el tiempo para los tres alcalinizantes evaluados.

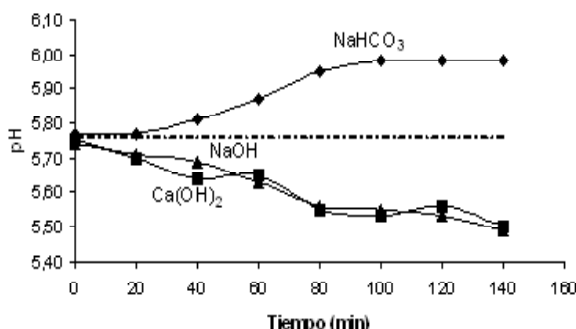


Figura 3. Curvas de variación del pH en el tiempo

Se observa que el pH de 5,75 unidades disminuye en el tiempo cuando se neutraliza la acidez con cal hidratada o hidróxido de sodio indicando que no garantizan suficiente capacidad buffer para lograr la neutralización de todos los ácidos grasos formados, a diferencia del bicarbonato de sodio, el único de los tres productos evaluados que garantiza esta condición; esto ratifica lo encontrado por Field *et al.*, (1995), quienes afirman que el bicarbonato de sodio es el único producto que suavemente cambia el equilibrio para lograr un valor deseado, garantizando condiciones estables a los microorganismos,

siendo el principal suplemento de alcalinidad bicarbonática.

3.2 Ensayos de actividad metanogénica específica –AME

Las características del agua residual empleada para los ensayos AME se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Características del agua residual empleada para el ensayo AME

Variable	Unidades	Valor
pH	Unidades	4,6
AT	mgCaCO_3/l	140
AB	mgCaCO_3/l	0
Acidez	mgCaCO_3/l	990
AOV	meq/l	29,8
DQO_T	mg/l	6267
DQO_f	mg/l	5014
ST	mg/l	1820
SST	mg/l	45
SD	mg/l	1775

El carácter ácido del agua residual se evidencia en el bajo valor de pH, prácticamente ausencia de alcalinidad bicarbonática y elevada acidez, lo cual ratifica la necesidad de su acondicionamiento para el proceso anaerobio. El elevado contenido de materia orgánica se refleja en los valores de la DQO total y filtrada y se observa que los sólidos se encuentran principalmente en forma disuelta.

Las características del inóculo usado para los ensayos AME se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Características del inóculo

Variable*	Unidades	Valor
ST	g/Kg	46,7
STV	g/Kg	30,3
Relación STV/ST	---	0,65
AME	gDQO _{CH4} /g SSV.día	0,20
Estabilidad	gDQO _{CH4} /g SSV.día	0,13

La relación STV/ST se encuentra dentro del rango común para lodos granulares (0,45 – 0,90) (Hulshoff Pol, 1989), además de indicar de forma indirecta que el inóculo presentaba una adecuada proporción de biomasa activa (Von Sperling, 1996).

Los resultados obtenidos en los ensayos AME se resumen en la Figura 4.

Se observa que a pesar de que el rango de variación de la alcalinidad bicarbonática adicionada (500-3000

mgNaHCO₃/l) fue el mismo para los ensayos con los tres alcalinizantes usados inicialmente para neutralizar la acidez (ajuste pH a 5,75), hubo diferencias en los valores de AME en función del tipo de alcalinizante usado.

En los ensayos en que se usó la cal hidratada se observó un ligero incremento en el valor de AME a partir de 2000 mg/l de alcalinidad bicarbonática. El hidróxido de sodio, aunque presentó el mayor valor de AME de todos los ensayos, con una dosis de 1500 mg/l, muestra también una disminución para concentraciones superiores a este valor, lo que indica probablemente un efecto inhibitorio.

En cuanto al bicarbonato de sodio se observa un comportamiento relativamente estable, indicando que cualquier concentración podría ser apropiada para el desarrollo del proceso anaerobio sin existir inconvenientes de inhibición por sobredosisificación; los valores de AME obtenidos para las dosis más altas ratifican lo mencionado por Rittmann y McCarty (2001), quienes afirman que dosis de bicarbonato de sodio superiores a 5000 mg/l no ocasionan ningún efecto positivo adicional o adverso al proceso anaerobio, sin embargo, repercute en costos de tratamiento.

En general, todas las combinaciones de alcalinizantes

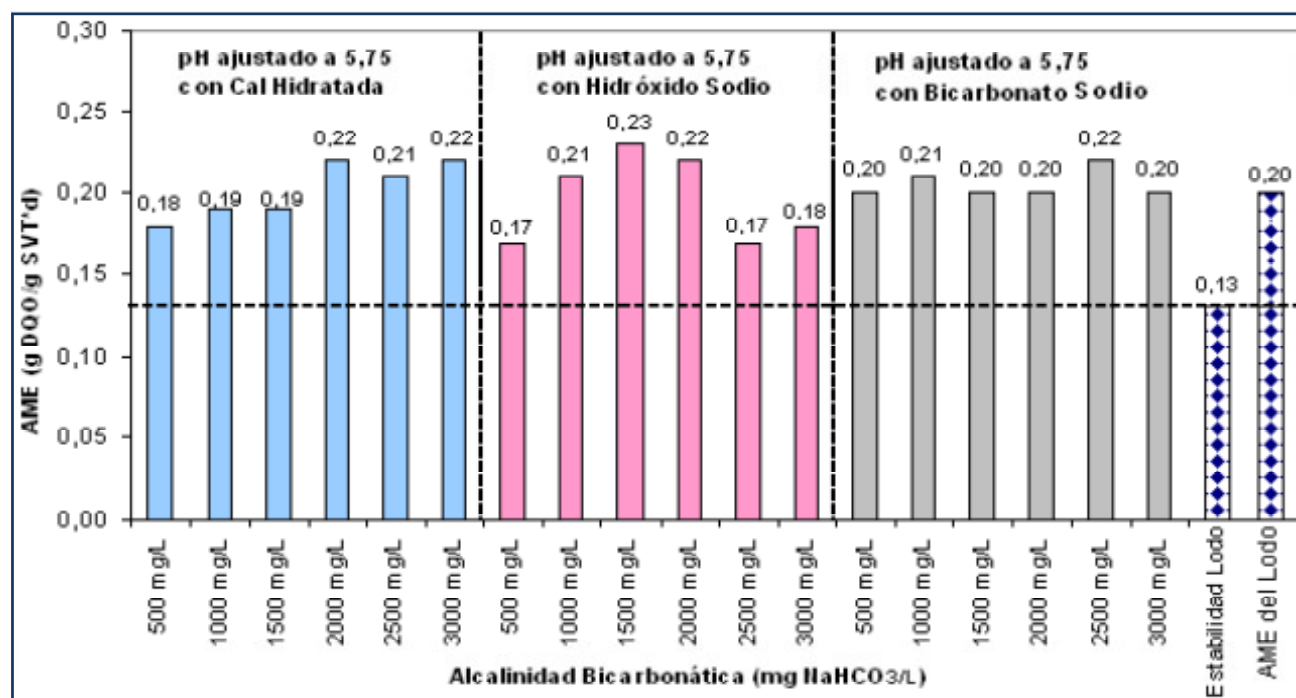


Figura 4. Ensayos de Actividad Metanogénica

evaluadas presentaron valores superiores a la estabilidad del lodo, indicando que el proceso anaerobio presentó un desempeño adecuado, lo que permite confirmar que el acondicionamiento químico del agua residual favorece el proceso. Teniendo en cuenta el valor de AME inicial del lodo (0,20 gDQO/gSVT.d) y los valores de AME obtenidos para los tres alcalinizantes, los rangos de alcalinidad bicarbonática apropiados para garantizar capacidad buffer están entre 2000 y 3000 mg/l para $\text{Ca}(\text{OH})_2$, entre 1000 y 2000 mg/l para NaOH y entre 500 y 3000 mg/l para NaHCO_3 .

La Tabla 3 muestra una comparación económica teniendo en cuenta el consumo de los tres alcalinizantes para la neutralización del pH a 5,75 unidades y el consumo de bicarbonato de sodio para garantizar capacidad buffer, cuya dosis se definió a partir del mínimo consumo que aseguró un valor de AME igual o superior a 20gDQO/gSVT.d, siendo estos valores: 2000 mg/l para $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 1000mg/l para NaOH y 500mg/l para NaHCO_3 .

La cal hidratada, aunque presenta el menor costo para la neutralización de la acidez (\$320/m³), requiere de un mayor aporte de bicarbonato de sodio para garantizar capacidad buffer al proceso, lo que al final eleva el costo total de acondicionamiento del agua con relación a los otros dos alcalinizantes (\$1520/m³). El costo total para el hidróxido de sodio (\$1080/m³) es similar al obtenido con el bicarbonato de sodio (\$1160/m³). Teniendo en cuenta las ventajas del bicarbonato de sodio (alta solubilidad, fácil de manipular y evitar problemas de vacío en el sistema) se recomienda el uso del bicarbonato de sodio, tanto para neutralizar la acidez como para garantizar capacidad buffer.

Tabla 6 Costo requerido para neutralización de acidez y garantizar capacidad buffer

Alcalinizante	CaOH_2	NaOH
Costo de Alcalinizante (\$/Kg) ⁽²⁾	400	800
Dosis de alcalinizante para neutralizar La acidez (pH 5.75) (Kg/m ³) ⁽³⁾	0,78	0,60
Dosis de NaHCO_3 para garantizar capacidad buffer (Kg/m ³) ⁽⁴⁾	2,00	1,00
Costo Neutralización Acidez (\$/m ³) ⁽⁵⁾	320	480
Costo Capacidad buffer (\$/m ³) ⁽⁶⁾	1200	600
Costo Total (\$/m ³) ⁽⁷⁾	1520	1080

4. CONCLUSIONES

- Debido al carácter ácido del agua residual del proceso de extracción de almidón de yuca es fundamental su ajuste con acondicionadores químicos que garanticen condiciones ambientales adecuadas para el desempeño del proceso anaerobio.
- Los resultados obtenidos indican la potencialidad del uso de bicarbonato de sodio tanto para neutralizar la acidez como para garantizar capacidad buffer durante el tratamiento anaerobio, a diferencia del hidróxido de sodio el cual, aunque resulta un poco más económico, puede llegar a causar problemas de vacío en el sistema de tratamiento y riesgos por sobredosificación y manipulación.
- La cal hidratada, aunque mostró ser más económica en la neutralización de la acidez, requirió un mayor aporte de bicarbonato de sodio para garantizar capacidad buffer, lo incrementa el costo total de acondicionamiento de la alcalinidad del agua y la convierte en un solución más costosa, además de causar problemas por la formación de insolubles, riesgos por sobredosificación y vacío en el sistema.
- La acidez del agua residual varía en el proceso de extracción de almidón de yuca, siendo necesario determinar experimentalmente la dosis de alcalinizante requerida para ajustar el pH hasta un valor de 5,75 unidades para neutralizarla; adicionalmente, debe garantizarse capacidad buffer mediante la adición de un suplemento de alcalinidad bicarbonática con una dosis de al menos 500 mg/l de bicarbonato de sodio.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APHA, AWWA y WPCF (2005). Standard Methods for the examination of water and wastewater.
- Colin, X., Farinet, J.L., Rojas, O. y Alazard, D. (2007). Anaerobic treatment of cassava starch extraction

-
- wastewater using a horizontal flow filter with bamboo as support, J. Bioresource Technology, 98(8), 1602-1607.
- CRC. (2005). Rallandero Limpio. Cartilla informativa y educativa. Popayán, Colombia. Corporación Regional del Cauca.
- Chernicharo, C. A. (2007). *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Reactores anaeróbios*, Vol V. Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Brasil.
- 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, Corporación Autónoma Regional del Cauca, Universidad Agrícola de Wageningen.
- Field J, Sierra R., Alvarez, Lettinga, G. (1995). Effect Wastewater characteristics and environmental factors. En: Curso internacional de tratamiento anaerobio de aguas residuales. Universidad de Wageningen.
- Foresti, E. y Van Haandel, A. (1998). Fundamentos do Tratamento Anaeróbio. En: Tratamento de Esgotos Sanitários por Processo Anaeróbio e disposição controlada no solo. PROSAB, Brasil.
- Hulshoff Pol, L.(1989). The phenomenon of granulation of anaerobic sludge. Doctoral Thesis, Wageningen Agricultural University. Wageningen - Netherlands.
- Leslie, C.P., Daigger, G.T. y Lim, H.C. (1996). *Biological wastewater treatment*. 2ª ed. U.S.A, New York.
- Parkin, G.F. y Owen, W.F. (1986). Fundamentals of anaerobic digestion of wastewater sludges. Journal of the environmental engineering division, ASCE 112:867-920.
- Pérez, A. (2007). Optimización de un filtro anaerobio en escala real para el tratamiento de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca. Tesis Maestría. Cali, Colombia: Universidad del Valle, Posgrado en Ingeniería Sanitaria y Ambiental.
- Rittman, B. y McCarty, P. (2001). *Biotecnología del medio ambiente Principios y aplicaciones*. McGraw Hill, España.
- Souza, M.E. (1984). Fatores que influenciam a digestão anaeróbia. Revista DAE, v. 44, p. 88-94.
- Von Sperling, M. (1996). *Princípios basicos do tratamento de esgotos*. Departamento de Engenharia Sanitaria e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais. 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.