

## Indices de alcalinidad para el control del tratamiento anaerobio de aguas residuales fácilmente acidificables

Andrea Pérez\*<sup>§</sup>, Patricia Torres\*

\* *Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente (EIDENAR),  
Universidad del Valle, Cali, Colombia*  
§ *e-mail: andreaperezvidal@hotmail.com*

(Recibido: Junio 03 de 2008 - Aceptado: Noviembre 06 de 2008)

### Resumen

La eficiencia del tratamiento anaerobio está determinada por varios factores ambientales, entre los cuales el pH y la alcalinidad son de gran importancia. El arranque de un filtro anaerobio a escala real, utilizado para el tratamiento de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca, mostró la importancia de los índices de alcalinidad (índice tampón, índice AI / AP e índice  $\alpha$ ) para el control del proceso. La estrategia de arranque, que comprendió cinco etapas, consistió en la disminución del tiempo de retención hidráulico a medida que el reactor respondía favorablemente en términos de las eficiencias de reducción de DQO y el comportamiento de los índices de alcalinidad. Debido a la acidez de las aguas residuales, fue necesario su acondicionamiento previo con bicarbonato de sodio. Se encontró que, en condiciones estables, el índice tampón variaba entre 0.20 y 0.35, el índice AI / AP entre 0.40 y 0.55 y el índice  $\alpha$  era superior a 0.65. Adicionalmente, se observó que la eficiencia de reducción de DQO estuvo estrechamente relacionada con la variación en los índices. Debido a la simplicidad asociada al cálculo de los índices, se recomienda su uso para el control del proceso anaerobio, verificando el rango de aplicabilidad de los índices para cada tipo de agua residual.

**Palabras clave:** Alcalinidad, Aguas residuales, Extracción de almidón, Almidón de yuca, Índice tampón, Tratamiento anaerobio.

SANITARY ENGINEERING

## Alkalinity indices for control of anaerobic treatment of readily acidifiable wastewaters

### Abstract

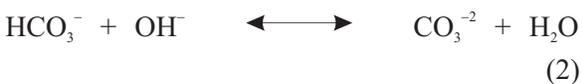
The efficiency of an anaerobic treatment is determined by several environmental factors, among which pH and alkalinity are of great importance. The startup of a full-scale anaerobic filter, used for the treatment of wastewaters from a cassava-starch extraction process, showed the importance of the alkalinity indices (buffer index, AI / AP index, and  $\alpha$  index) for the control of the process. The startup strategy, which comprised five stages, consisted in the decrease of the hydraulic retention time as the reactor responded in a favorable way in terms of COD removal efficiency and behavior of the alkalinity indices. Due to the acidity of wastewaters, their prior conditioning with sodium bicarbonate was necessary. We found that, in stable conditions, the buffer index varied in the range from 0.20 to 0.35, the AI / AP index varied in the range from 0.40 to 0.55, and the  $\alpha$  index was above 0.65. Moreover, we noted that the COD removal efficiency was closely related to the variation of the indices. Because of the simplicity associated with the calculation of the indices, we recommend their use for the control of the anaerobic process, by checking the applicability range of the indices for each wastewater type.

**Keywords:** Alkalinity, Wastewaters, Starch extraction, Cassava starch, Buffer index, Anaerobic treatment.

## 1. Introducción

El desempeño de la digestión anaerobia depende del control riguroso de algunos factores ambientales como temperatura, nutrientes, agentes inhibitorios, pH, alcalinidad y ácidos grasos volátiles (AGV), los cuales afectan principalmente a las bacterias metanogénicas por ser las más sensibles.

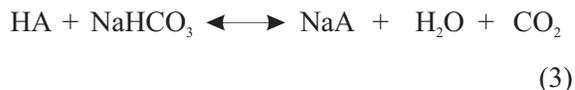
En los procesos anaerobios, los dos principales factores que afectan el pH son el ácido carbónico y los AGV. El pH y la capacidad tampón en un sistema anaerobio son completamente dependientes del equilibrio entre el gas carbónico (CO<sub>2</sub>) y el ion bicarbonato que regula la concentración del ion hidrógeno como lo muestran las Ec. (1) y (2) (Rittmann & McCarty, 2001).



Cuando las condiciones ambientales en el interior del sistema de tratamiento son favorables, las bacterias metanogénicas utilizan los ácidos intermediarios tan pronto como son formados, evitando su acumulación y garantizando que la alcalinidad natural del medio y el pH permanezcan en un rango favorable para las mismas. Si las condiciones son desfavorables, los AGV no serán consumidos a la misma tasa en que son producidos por las bacterias acidogénicas, ocasionando su acumulación en el sistema. Los ácidos libres que no logran neutralizarse ocasionan una rápida disminución de la alcalinidad disponible con el consecuente descenso del pH (van Haandel & Lettinga, 1994; Chernicharo, 1997).

La inestabilidad del proceso puede estar relacionada con una sobrecarga orgánica, presencia de agentes inhibidores o tóxicos en el agua residual o variación de la temperatura. En cualquier caso, ocurre que la producción de los ácidos orgánicos en el reactor se hace superior al consumo de los mismos y en consecuencia,

aumenta en el sistema la concentración de ácidos volátiles y disminuye la de bicarbonatos, que se descomponen en CO<sub>2</sub>, con la respectiva formación de sales de ácidos volátiles como lo muestra la Ec. (3), donde HA representa un ácido genérico que se disocia en H<sup>+</sup> y A<sup>-</sup> (Rozzi, 1986).



Durante cierto tiempo, las sustancias que ejercen un poder tampón impiden la caída del pH. Solamente cuando toda la alcalinidad del medio no es suficiente para la neutralización de los ácidos volátiles, ocurrirá la caída del pH. Por lo tanto, este parámetro se manifiesta muy tarde para poder corregir las fallas del proceso. Por ello, es importante evaluar simultáneamente los parámetros de pH, alcalinidad y ácidos grasos volátiles.

La medición de la relación entre la alcalinidad debida a los AGV y la alcalinidad total es usualmente empleada para el control de la estabilidad del proceso anaerobio (Speece, 1996) y se conoce como el índice tampón (IB); su adecuada variación está en el rango 0.20-0.40, lo que indica que por lo menos el 60 % de la alcalinidad total del sistema tiene que estar en forma de alcalinidad bicarbonática (Rozzi, 1986). En general, se ha encontrado que valores entre 0.20 y 0.30 muestran un buen funcionamiento del reactor, mientras que valores menores a 0.20 indican subalimentación y mayores a 0.35, principios de acidificación (Rojas, 2004).

Otros índices empleados para el control de la capacidad tampón del sistema son los índices  $\alpha$  y AI/AP. El índice  $\alpha$  corresponde a la relación entre la alcalinidad bicarbonática y la alcalinidad total, recomendándose valores de este índice superiores a 0.5 durante el arranque, y alcanzándose condiciones estables en el sistema con valores de 0.7 (Jenkins et al., 1983). El índice AI/AP corresponde a la relación entre la alcalinidad debida a los AGV y la alcalinidad bicarbonática; valores de este índice superiores a 0.30 indican disturbios en el proceso (Ripley et al., 1986). Sin embargo, este índice depende del tipo de agua

residual, por lo que la estabilidad del proceso puede lograrse con valores diferentes del índice, siendo recomendable su verificación (Foresti, 1994).

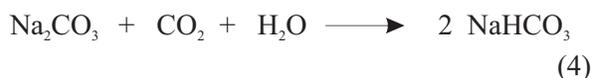
La calidad y cantidad de las aguas residuales generadas en el proceso de extracción de almidón de yuca varían en función de factores como la variedad de la yuca, la edad de la planta, el tiempo de almacenamiento de las raíces y la tecnología empleada para la extracción, entre otros. Los principales puntos de generación de aguas residuales del proceso productivo corresponden a las etapas de lavado-pelado de raíces y sedimentación del almidón, siendo esta última la que genera el 80 % del volumen total de agua residual con la mayor carga contaminante (Torres et al., 2006).

En el norte del departamento del Cauca se descargan a los cuerpos receptores de agua alrededor de 100 kg de DQO por tonelada de yuca procesada diariamente (Colin et al., 2007). En una rallandería de nivel tecnológico medio (producción 5.0–12.5 ton / sem) sin ningún sistema de tratamiento de aguas residuales, se pueden generar por cada tonelada de yuca procesada (CRC, 2005), 9 m<sup>3</sup> de agua residual, 14 kg DBO<sub>5</sub> y 16 kg sólidos solubles totales (SST).

Debido a que las aguas residuales generadas en el proceso de extracción de almidón de yuca son de carácter ácido (por las altas concentraciones de ácido láctico, producto del proceso natural de fermentación que sufre este tipo de desecho, Arroyave et al., 1996; Colin et al., 2007), es entonces fundamental el ajuste de la alcalinidad y la corrección del pH mediante la adición de productos químicos denominados alcalinizantes que permitan generar capacidad tampón. Estos productos químicos pueden ser diferenciados en dos grupos (Chernicharo, 1997):

- Los que ofrecen alcalinidad bicarbonática directamente (NaHCO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub>)
- Los que reaccionan con el gas carbónico para formar alcalinidad bicarbonática [NaOH, CaO, Ca(OH)<sub>2</sub>].

La adición de iones hidroxilos (OH<sup>-</sup>) como los de la cal hidratada y el hidróxido de sodio no puede incrementar la alcalinidad bicarbonática sin reaccionar con el CO<sub>2</sub> soluble como lo muestran las siguientes ecuaciones:



Estas ecuaciones muestran que se requiere sólo una mol de dióxido de carbono para producir dos moles de bicarbonato a partir de compuestos carbonatos, mientras que los compuestos hidróxidos requieren dos moles de dióxido de carbono (Grady et al., 1999), indicando que la adición de hidróxido de sodio y cal hidratada pueden ocasionar una disminución de la concentración de CO<sub>2</sub> en el reactor (Field et al., 1995).

Aunque el hidróxido de sodio no forma sales insolubles, lo que representa una ventaja sobre el uso de la cal hidratada, igualmente disminuye la presión de CO<sub>2</sub> en el reactor, lo que puede promover la formación de una mezcla explosiva de metano y oxígeno que conlleva al colapso estructural del reactor (Grady et al., 1999; Chernicharo, 1997). Adicionalmente, una sobredosificación del hidróxido de sodio ocasiona un incremento súbito del pH por tratarse de una base fuerte, además de requerir de mayor cuidado durante su manipulación (Souza, 1984).

El bicarbonato de sodio (NaHCO<sub>3</sub>) es fácil de manipular, es bastante soluble y no reacciona con el CO<sub>2</sub>, evitando 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).

Torres et al. (2005) verificaron que para el acondicionamiento de la alcalinidad del agua residual del proceso de extracción de almidón de yuca, el bicarbonato de sodio es el producto más apropiado y además de garantizar la capacidad tampón necesaria durante el proceso anaerobio, resulta ser una alternativa económicamente viable.

En este trabajo se analizó el comportamiento de los índices IB, AI / AP y  $\alpha$  durante el arranque de un filtro anaerobio a escala real ubicado en una rallandería al norte del Departamento del Cauca, Colombia y que trata las aguas residuales generadas durante el proceso de extracción de almidón de yuca después de la etapa de sedimentación del almidón.

## 2. Metodología

La investigación se realizó en un filtro anaerobio a escala real que trata las aguas residuales generadas en el proceso de extracción de almidón de yuca de la rallandería Piedras Negras, ubicada en la vereda la Agustina, Municipio de Mondomo, Departamento del Cauca, Colombia. El filtro anaerobio cuenta con un volumen total de 32.4 m<sup>3</sup> y un volumen útil de 29.5 m<sup>3</sup>. La Figura 1 muestra un esquema de la configuración del reactor.

### 2.1 Arranque del reactor

Antes de iniciar el estudio, el reactor se encontraba fuera de funcionamiento y acidificado debido principalmente a la falta de capacidad tampón que ocasionó condiciones de inestabilidad.

Con esta investigación se buscó optimizar el control de la capacidad tampón durante el arranque del reactor, como herramienta fundamental para garantizar su adecuado desempeño. El medio de soporte empleado fue cáscara de coco y estiércol de vaca como inóculo, de acuerdo con las recomendaciones de Pérez et al. (2006).

La estrategia de arranque consistió en la disminución progresiva del tiempo de retención hidráulico (TRH) a medida que el reactor respondía favorablemente en términos de las variables de control: índices de alcalinidad (IB, AI / AP y  $\alpha$ ) y la eficiencia de reducción de la demanda química de oxígeno (DQO).

La Tabla 1 muestra las condiciones operacionales que caracterizaron cada una de las etapas del arranque. Cabe resaltar que existieron periodos en los que el filtro operó de manera discontinua debido a paradas normales del proceso productivo, principalmente por condiciones climáticas, económicas y escasez de materia prima.

### 2.2 Control de capacidad tampón

De acuerdo con las recomendaciones de Torres et al. (2005), se realizó el acondicionamiento de la alcalinidad del agua residual afluente al sistema de tratamiento con el uso de bicarbonato de sodio. Para ello, se adecuó un sistema de dosificación de alcalinizante con capacidad de 1 m<sup>3</sup> y válvulas de regulación de caudal.

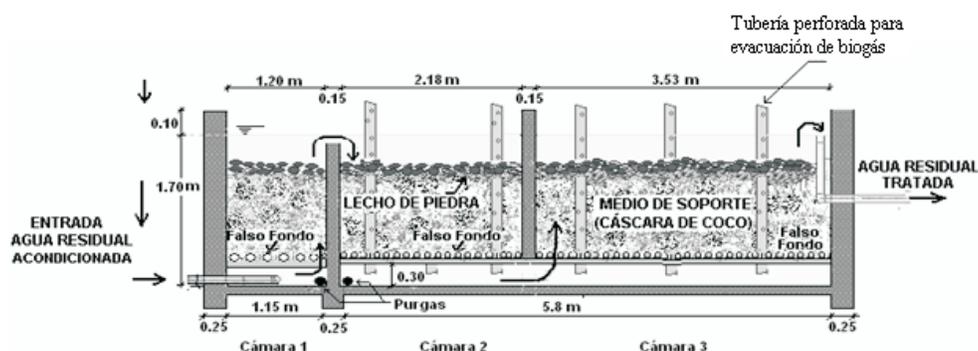


Figura 1. Esquema del filtro anaerobio.

Tabla 1. Etapas del arranque del reactor.

Etapa	COV (kg/m <sup>3</sup> d)	TRH (horas)	Duración (días)	
			Total*	Real**
1	2.0 – 5.1	24	53	23
2	2.3 – 4.6	20	22	13
3	3.7 – 5.8	16	45	17
4	4.6 – 9.2	14	54	11
5	7.0 – 8.8	12	24	16

COV: Carga orgánica volumétrica

\* Incluye los periodos de paradas del proceso productivo

\*\* Sin incluir paradas

Tabla 2. Variables de medición en el afluente y efluente del reactor.

Variable*	Unidades	Aplicación	Método de medición
pH		A y E	Potenciométrico
Alcalinidad total <sup>(1)</sup>	mg CaCO <sub>3</sub> /L	A y E	Titulométrico
Alcalinidad Bicarbonática <sup>(1)</sup>	mg CaCO <sub>3</sub> /L	A y E	Titulométrico
Acidez	mg CaCO <sub>3</sub> /L	A	Titulométrico
Índice tampón (IB) <sup>(2)</sup>	-	E	Titulométrico
Índice AI/AP <sup>(1)</sup>	-	E	Titulométrico
Índice alfa ( $\alpha$ ) <sup>(3)</sup>	-	E	Titulométrico
Ácidos Grasos Volátiles (AGV)	meq / L	A y E	Titulométrico
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg / L	A y E	Digestión / Espectrofotometría

\*APHA et al. (2005)

(1) Ripley et al. (1986)

(2) Rojas (1987)

(3) Jenkins et al. (1983).

El bicarbonato de sodio se disolvió manualmente en el tanque de dosificación en una concentración máxima del 6 % (60 g NaHCO<sub>3</sub> / L) para garantizar su completa solubilización.

La dosis de alcalinizante se definió de tal forma que además de neutralizar la acidez del agua residual, suministrara una concentración adicional de alcalinidad bicarbonática de 298 mg CaCO<sub>3</sub>/L (equivalente a 500 mg NaHCO<sub>3</sub> / L) para garantizar suficiente capacidad tampón durante el tratamiento. Esta concentración adicional de alcalinidad bicarbonática fue determinada en estudios previos (Torres et al., 2005).

### 2.3 Control del proceso anaerobio

El desempeño y control del proceso se realizó con la medición de las variables mostradas en la Tabla 2. La frecuencia de medición de las variables fue diaria con excepción de la DQO que se midió 3 veces / semana.

La toma de muestras del afluente al reactor se realizó antes de la dosificación del alcalinizante debido a que no fue posible caracterizar el agua residual acondicionada con la solución de bicarbonato de sodio (porque la mezcla se preparaba en la tubería de conducción al reactor).

### 2.4 Medición de índices de alcalinidad

La medición de los índices de alcalinidad (IB, AI / AP y  $\alpha$ ) se basó en la determinación de las alcalinidades total y bicarbonática y debida a los AGV. Para estas mediciones, se tomó un volumen de muestra fijo (50 ml) y se tituló con HCl 0.1 N hasta un pH de 5.75; este volumen titulado ( $V_1$ ) correspondía a la alcalinidad bicarbonática. Se continuó la titulación hasta un pH de 4.3; este segundo volumen titulado ( $V_2$ ) correspondía a la alcalinidad debida a los AGV. La alcalinidad total se calculó con la suma de  $V_1$  y  $V_2$ .

El índice tampón (IB) corresponde a la relación entre la alcalinidad debida a los AGV y la alcalinidad total (Rojas, 1987), así:

$$IB = \frac{V_2}{V_1 + V_2} \quad (7)$$

El índice AI / AP es la relación entre la alcalinidad debida a los AGV y la alcalinidad bicarbonática (Ripley et al., 1986), así:

$$AI / AP = \frac{V_2}{V_1} \quad (8)$$

El índice  $\alpha$  es la relación entre la alcalinidad bicarbonática y la alcalinidad total (Jenkins et al., 1983) así:

$$\alpha = \frac{V_1}{V_1 + V_2} \quad (9)$$

### 2.5 Análisis estadístico

El manejo de los datos obtenidos en las cinco etapas del arranque del filtro anaerobio se realizó usando las herramientas de la estadística descriptiva. Se evaluó la distribución de los datos mediante el uso de diagramas de cajas y alambres los cuales permitieron calcular los cuartiles ( $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $Q_3$ ) y los cercos internos que permiten evidenciar puntos atípicos. El cuartil  $Q_2$  es equivalente a la mediana y la diferencia entre los cuartiles  $Q_3$  y  $Q_1$  (ubicación del 50 % de los datos) corresponde al rango intercuartílico.

El cerco interno inferior se calculó como  $Q_1 - 1.5(Q_3 - Q_1)$  y el cerco interno superior como  $Q_3 + 1.5(Q_3 - Q_1)$ . El procesamiento estadístico de los datos se realizó con la ayuda del paquete computacional *R* (que es de libre distribución).

### 3. Resultados y discusión

En la Tabla 3 se resume la variabilidad de los parámetros fisicoquímicos medidos al agua residual afluyente al reactor (sin acondicionamiento con  $\text{NaHCO}_3$ ).

Los datos mostrados evidencian la variabilidad en la composición y concentración del agua residual, ligada probablemente a factores como la variedad de la yuca, la edad de la planta, el tiempo de almacenamiento de las raíces, la tecnología empleada para la extracción, entre otros (Torres et al., 2006). Las características del agua son típicas de un agua residual con elevada concentración de materia orgánica.

El amplio rango de variación de la DQO total puede acreditarse al contenido de mancha (almidón de baja densidad) presente en el agua residual, lo cual afecta directamente la concentración de los sólidos suspendidos totales, que pueden variar entre 127 y 980 mg / L (Pérez, 2007).

La alcalinidad total presentó un elevado coeficiente de variación ocasionado por el comportamiento disperso de los datos y principalmente porque la mayoría de los mismos fue igual a cero.

Tabla 3. Variación de las características fisicoquímicas del agua residual afluyente al reactor durante el arranque.

Variable *	Mín.	Media	Máx.	$\sigma^{(**)}$	Mediana	dM	C.V.
DQO total (mg / L)	1906	3588	5339	694	3684	701	0.19
Alcalinidad Total (mg $\text{CaCO}_3$ / L)	0	37	630	106	0	113	2.85
AGV (meq / L)	9	31	49	9	30	9	0.29
Acidez (mg $\text{CaCO}_3$ / L)	230	1162	2150	350	1150	350	0.30

\*Número de datos = 65  
 Mín. = valor mínimo  
 Máx. = valor máximo  
 (\*\*)= desviación estándar  
 dM = desviación mediana  
 C.V. = coeficiente de variación

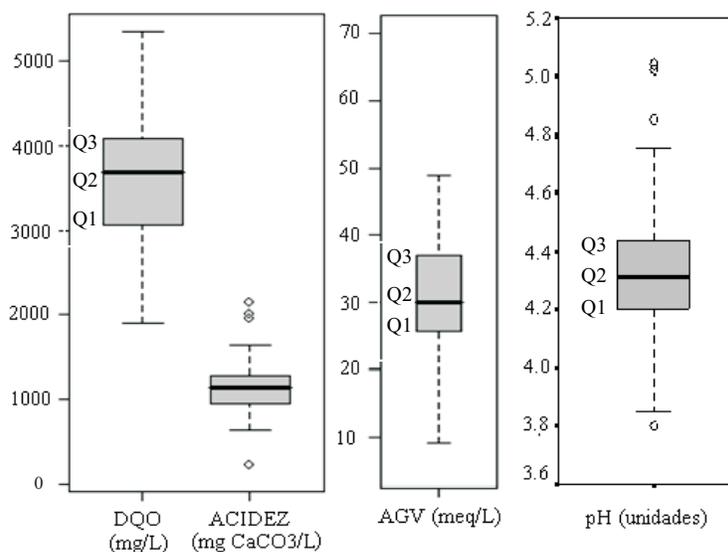


Figura 2. Comportamiento de la DQO, acidez y AGV en el agua residual.

Se presentaron valores atípicos como el máximo de 630 mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$  que se debió probablemente a la elevada presencia de AGV (45 meq/L) en forma de sales, que aunque elevan el contenido de alcalinidad total no aportan alcalinidad bicarbonática (que es la forma en que realmente se favorece la capacidad tampón). La Figura 2 muestra el comportamiento de los datos de DQO, acidez, AGV y pH del agua residual mediante diagramas de cajas y alambres.

Durante todo el estudio no se reportó presencia de alcalinidad bicarbonática en el agua residual, lo que a su vez se reflejó en las elevadas concentraciones de acidez (variación del 50 % de los datos entre 950 y 1290 mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$ ) y los bajos valores de pH registrados (variación del 50 % de los datos entre 4.20 y 4.45 y valor de la mediana de 4.31). El análisis de los datos de acidez mostró la ocurrencia de varios datos atípicos, principalmente en el nivel superior de los diagramas de cajas, debido probablemente a procesos avanzados de acidificación natural del agua residual. El cálculo del percentil 90 indicó que sólo el 10 % de los datos estuvo en el rango 1602–2150 mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$ .

Los AGV presentaron un amplio rango de variación entre 9 y 49 meq/L, concentrándose el 50 % de los datos entre 26 y 37 meq/L.

Los elevados valores de esta variable ratifican el desarrollo de procesos naturales de fermentación o acidificación del agua residual y son consecuentes con la elevada acidez y prácticamente ausencia de alcalinidad.

En términos generales, el agua residual del proceso de extracción de almidón de yuca, se caracterizó por el elevado contenido de materia orgánica (3684 mg DQO / L), elevada concentración de acidez (1150 mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$ ) y AGV (30 meq / L), ausencia de alcalinidad bicarbonática y bajos valores de pH (4.31). La Figura 3 compara la variación del pH afluente (sin acondicionar con  $\text{NaHCO}_3$ ) y efluente durante todo el estudio.

El adecuado rango en que varió el pH del efluente durante todo el arranque (50 % de los datos entre 7.02 y 7.35) con un valor de la mediana de 7.15, permite inferir que el acondicionamiento de la alcalinidad bicarbonática del agua residual resultó adecuado para el tratamiento anaerobio de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca. Aunque no fue posible medir el pH del afluente acondicionado con bicarbonato de sodio, estudios realizados por Torres et al. (2006) han mostrado que el ajuste del pH con dosis similares a las empleadas en este estudio pueden alcanzar valores de pH entre 6.0 y 6.7, dependiendo de la concentración de acidez inicial.

Vale la pena resaltar que la Figura 3 también ratifica la baja sensibilidad del pH medido en el efluente frente a los episodios de inestabilidad que presentó el reactor al inicio de cada etapa, ya que no se observan considerables cambios que indiquen algún disturbio, a diferencia del comportamiento de los índices de alcalinidad (IB, AI / AP y  $\alpha$ ) los cuales registraron evidentes cambios frente a las condiciones de inestabilidad, como se observa en las Figuras 4, 5 y 6. La Tabla 4 resume el comportamiento estadístico de los datos medidos de los índices y

las eficiencias de reducción de DQO en las cinco etapas del arranque, detallándose el inicio y final de cada etapa, los cuales estuvieron asociados a condiciones inestables o estables en el sistema, respectivamente.

La Figura 4 muestra que los valores más elevados del índice tampón se presentaron al inicio de cada etapa del arranque como indicativo de episodios de inestabilidad en el reactor ocasionados por el cambio operacional (disminución del TRH).

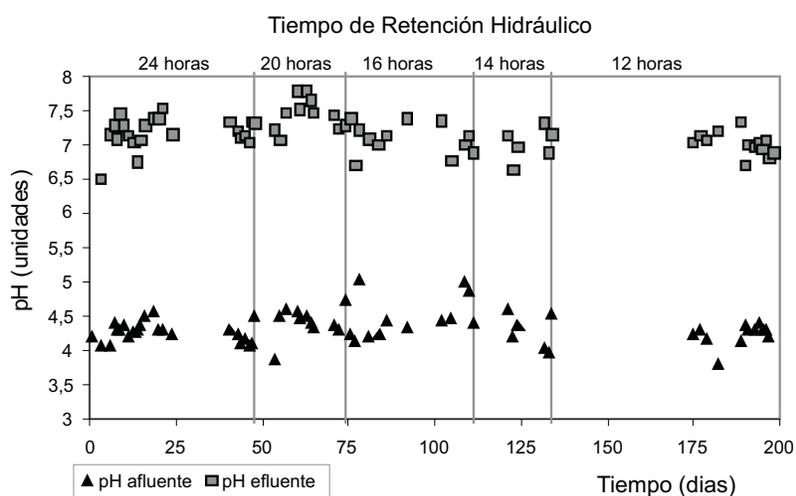


Figura 3. Variación del pH del afluente y del efluente durante el arranque del reactor.

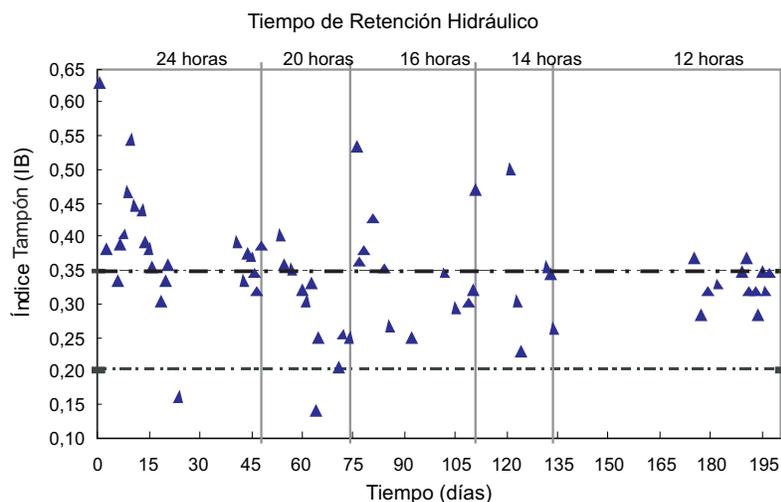


Figura 4. Variación del índice tampón durante el arranque del reactor.

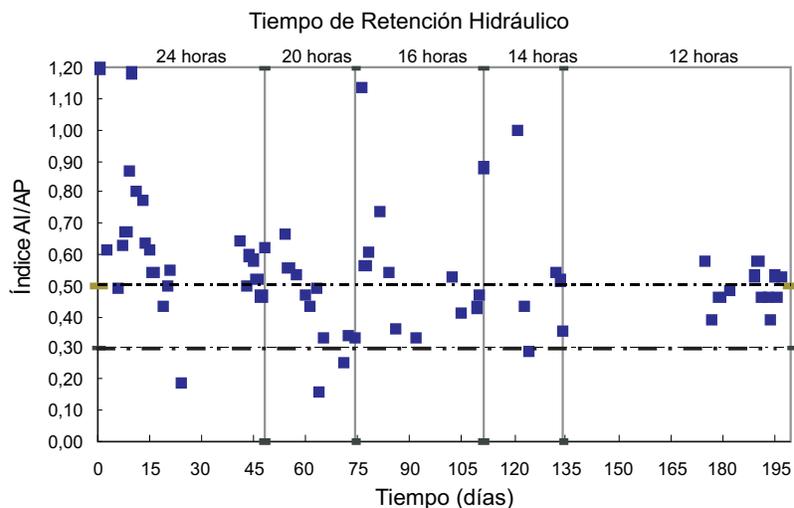


Figura 5. Variación del índice AI / AP durante el arranque del reactor.

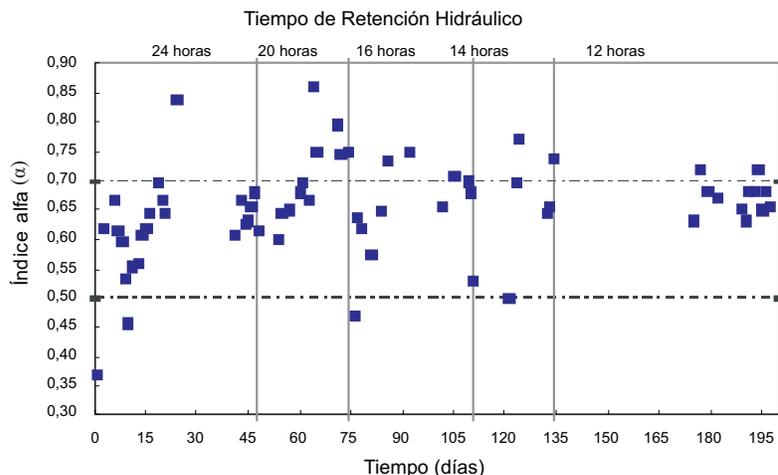


Figura 6. Variación del índice  $\alpha$  durante el arranque del reactor.

Al final de todas las etapas se observó que el índice varió en el rango de 0.20 a 0.35 recomendado en la literatura (Rojas, 2004), lo que evidenció condiciones de estabilidad. Las dos ocasiones en que el índice fue menor a 0.20, estuvieron asociadas a paradas muy prolongadas del proceso productivo que favorecían condiciones de subalimentación en el reactor; y con valores superiores a 0.35, se observó disminución en la eficiencia de reducción de la DQO.

En la Figura 5, los valores más elevados del índice AI / AP también se presentaron al inicio de cada etapa operacional como indicadores de inestabilidad. Aunque la literatura recomienda que este índice sea menor a 0.30, este valor

normalmente está asociado al tratamiento de aguas residuales domésticas por lo que Foresti (1994) recomienda su verificación. Para el tipo de agua residual evaluada en este estudio, se encontró que, bajo condiciones de estabilidad del sistema, el índice presenta valores entre 0.40 y 0.55.

A diferencia de los otros índices, entre más alto sea el índice  $\alpha$  mejor es la capacidad tampón en el sistema. Teniendo en cuenta los valores recomendados por Jenkins et al. (1983) se observa en la Figura 6 que el reactor respondió favorablemente durante el arranque, garantizándose la mayor parte del tiempo valores superiores a 0.50.

Tabla 4. Variación estadística de los índices de alcalinidad y la eficiencia de reducción de DQO.

Etapa		Índice tampón (0.2 -0.35) <sup>(1)</sup>			Índice AI / AP (≤ 0.3) <sup>(2)</sup>			Índice Alfa (>0.5) <sup>(3)</sup>			Eficiencia de reducción DQO (%)		
		Q1	Q2	Q3	Q1	Q2	Q3	Q1	Q2	Q3	Q1	Q2	Q3
1	I	0.38	0.40	0.47	0.63	0.66	0.85	0.54	0.61	0.62	30	46	61
	F	0.32	0.34	0.37	0.46	0.51	0.59	0.63	0.67	0.69	61	65	71
2	I	0.34	0.36	0.39	0.49	0.59	0.66	0.61	0.64	0.67	72	78	88
	F	0.19	0.25	0.31	0.24	0.34	0.45	0.69	0.75	0.82	72	86	90
3	I	0.33	0.37	0.46	0.49	0.59	0.84	0.55	0.63	0.68	44	55	66
	F	0.26	0.30	0.33	0.35	0.42	0.49	0.68	0.71	0.74	70	72	75
4	<sup>(4)</sup>	0.31	0.35	0.44	0.40	0.54	0.91	0.56	0.65	0.69	68	70	76
5	I	0.28	0.33	0.37	0.39	0.49	0.58	0.63	0.67	0.72	72	77	81
	F	0.31	0.32	0.34	0.45	0.47	0.53	0.66	0.68	0.69	77	79	82

<sup>(1)</sup>Rojas, 1987; <sup>(2)</sup>Ripley et al., 1986; <sup>(3)</sup>Jenkins et al., 1983; <sup>(4)</sup>No fue posible diferenciar el inicio y final de la etapa por el bajo número de datos.

I = Inicio de etapa; F = Final de etapa; Q1 = Cuartil 1; Q2 = Cuartil 2 o mediana; Q3 = Cuartil 3

Al final de cada etapa del arranque, se observó que el índice fluctuó alrededor de 0.70 e incluso, en varias ocasiones, fue superior. En términos generales, se observó que, bajo condiciones de estabilidad del sistema, el índice presentó valores superiores a 0.65.

La Figura 7 muestra la variación de las eficiencias de reducción de DQO del reactor durante las diferentes etapas del arranque.

Comparando la tendencia de los tres índices con la variación en las eficiencias de reducción de DQO, se observa que aparentemente existe una relación inversa entre esta variable y los índices tampón y AI / AP y una relación directa con el índice  $\alpha$ . En general, con las diferentes condiciones operacionales evaluadas se observó que las más altas eficiencias de reducción de DQO alcanzadas estuvieron asociadas a valores apropiados de los tres índices (situación que se presentó principalmente al final de cada etapa del arranque).

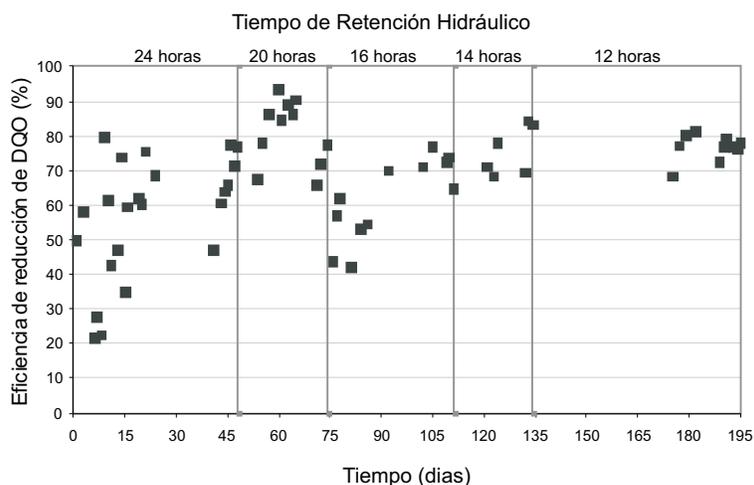


Figura 7. Variación de las eficiencias de reducción de DQO del reactor durante el arranque.

Comparando el comportamiento del pH y de los tres índices de alcalinidad aplicados, se evidenció una mayor sensibilidad de estos últimos frente a condiciones tanto de estabilidad como inestabilidad del proceso anaerobio.

#### 4. Conclusiones y recomendaciones

- Los índices de alcalinidad aplicados mostraron ser una herramienta adecuada para el control del tratamiento anaerobio de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca, debido a que permiten evidenciar condiciones de inestabilidad de manera inmediata, a diferencia del pH. Este control evita la ocurrencia de procesos de acidificación en el sistema de tratamiento.
- Para el agua residual estudiada, caracterizada por ser fácilmente acidificable, se encontró que, en condiciones de estabilidad, los valores de los índices deben variar entre 0.20 y 0.35 para el índice IB, 0.40 y 0.55 para el índice AI / AP y estar por encima de 0.65 para el índice  $\alpha$ . El que presentó mayor aplicabilidad para el control del proceso anaerobio en este caso fue el índice tampón, porque además de ajustarse al rango recomendado en la literatura, mostró una adecuada sensibilidad frente a episodios de inestabilidad del reactor.
- Se recomienda utilizar los índices de alcalinidad como indicadores de control del proceso anaerobio para todo tipo de agua residual, teniendo en cuenta siempre la verificación del rango aplicable en cada caso y el índice que presente mejor sensibilidad para la toma de decisiones operativas.

#### 5. Referencias bibliográficas

APHA (American Public Health Association), AWWA (American Water Works Association) & WEF (Water And Environment Federation). (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater*, Clescerl, L. S., Greenberg, A. E., & Eaton, A. D. (editors).

Arroyave, G., Rojas, O., & Torres, P. (1996). *Depuración anaerobia de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca en sistemas de fases separadas*. XI Simposio Nacional de Fermentações (SINAFERM), Universidade Federal de São Carlos, Brasil, p. 398-403.

Chernicharo, C. (1997). *Principios do tratamento biológico de águas residuárias, Vol. V*. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.

Colin, X., Farinet, J.-L., Rojas, O., & Alazard, D. (2007). Anaerobic treatment of cassava starch extraction wastewater using a horizontal flow filter with bamboo as support. *Bioresource technology* 98 (8), 1602-1607.

CRC (Corporación Autónoma Regional del Cauca). (2005). *Rallandero Limpio* (cartilla informativa y educativa), Popayán, Colombia.

Field, J., Sierra, R., & Lettinga, G. (1995). *Effect Wastewater characteristics and environmental factors*. En Curso Internacional de Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales, Universidad del Valle / Wageningen Agricultural University / International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering, Cali, Colombia, p. 1-36.

Foresti, E. (1994). *Fundamentos do processo de digestão anaeróbia*. III Taller y Seminario Latinoamericano sobre Tratamiento anaerobio de aguas residuales, Montevideo, Uruguay, p. 97-110.

Grady, C. P. L., Daigger, G.T., & Lim, H.C. (1999). *Biological wastewater treatment*. Second edition, New York: Marcel Dekker.

Jenkins, S.R., Morgan, J.M., & Sawyer, C.L. (1983). Measuring anaerobic sludge digestion and growth by simple alkalimetric titration. *Journal of the Water Pollution Control Federation* 55 (5), 448-453.

Pérez, A. (2007). *Evaluación y optimización de un filtro anaerobio en escala real para el tratamiento de las aguas residuales del proceso de extracción de yuca*. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Pérez, A., Torres, P., & Pizarro, C. A. (2006). Arranque de un filtro anaerobio para el tratamiento de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca: influencia del inóculo. *Ingeniería y Competitividad* 8 (1), 47-54.

Ripley, L. E., Boyle, W. C., & Converse, J. C. (1986). Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high-strength wastes. *Journal of the Water Pollution Control Federation* 58, 406-411.

Rittmann, B., & McCarty, P. (2001). *Biología del medio ambiente: principios y aplicaciones*. España: McGraw Hill Interamericana.

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, Cali, Colombia.

Rojas, O. (2004). *Capacidad tampón en reactores anaerobios*. Curso sobre tratamiento anaerobio de aguas residuales, Programa de Posgrado en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Rozzi, A. (1986). *Parámetros de operación y control de los procesos anaeróbicos*. Tercer Seminario sobre depuración anaeróbica de aguas residuales, Valladolid, España.

Souza, M.E. (1984). Fatores que influenciam a digestão anaeróbia. *Revista DAE* (Departamento de águas e esgotos da companhia de saneamento basico do estado) 44 (137), 88-94.

Speece, R. E. (1996). *Anaerobic biotechnology for industrial wastewater*. Nashville, Tennessee: Archae Press.

Torres, P., Cajigas, A., Pérez, A., González, M., & Otero, A. (2005). *Evaluación de diferentes alcalinizantes en el tratamiento anaerobio de aguas residuales fácilmente acidificables. Caso: agua residual del proceso de extracción de almidón de yuca*. En VIII Taller y Simposio Latinoamericano de Digestión Anaerobia, Uruguay, p. 571.

Torres, P., Cruz, C., Marmolejo, L., Cajigas, A., & Pérez, A. (2006). *Producción más limpia aplicada al proceso de extracción de almidón de yuca*. [http://objetos.univalle.edu.co/files/Produccion\\_mas\\_limpia\\_aplicada\\_al\\_proceso\\_extraccion\\_al\\_midon\\_de\\_yuca.pdf](http://objetos.univalle.edu.co/files/Produccion_mas_limpia_aplicada_al_proceso_extraccion_al_midon_de_yuca.pdf)

Van Haandel, A. C., & Lettinga, G. (1994). *Anaerobic sewage treatment: a practical guide for regions with a hot climate*. John Wiley & Sons.