

TRATAMIENTO ANAEROBIO DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN DE YUCA. OPTIMIZACIÓN DE VARIABLES AMBIENTALES Y OPERACIONALES

ANAEROBIC TREATMENT OF CASSAVA STARCH EXTRACTION WASTEWATER. OPTIMIZATION OF ENVIRONMENTAL AND OPERATIONAL VARIABLES

ANDREA PÉREZ VIDAL

Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental, Universidad del Valle, andraperezvidal@hotmail.com

PATRICIA TORRES LOZADA

Profesora, Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental, Universidad del Valle

JORGE SILVA LEAL

Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental, Universidad del Valle, joasilva@univalle.edu.co

Recibido para septiembre 8 de 2008, aceptado marzo 3 de 2009, versión final marzo 12 de 2009

RESUMEN: La etapa de sedimentación del proceso de extracción de almidón de yuca genera la mayor carga contaminante en términos de cantidad y calidad de agua residual. En el norte del departamento del Cauca existen varios filtros anaerobios para su tratamiento, los cuales han mostrado deficiencias asociadas a factores ambientales y operacionales. La evaluación del arranque y desempeño de un filtro anaerobio a escala real evidenció la necesidad de acondicionar químicamente el agua residual con una dosis mínima de 2180 mg NaHCO₃/L y el Índice Tampón (IB) se mostró como una herramienta simple y eficiente para el control del proceso, pues permitió determinar condiciones de inestabilidad cuando su valor era superior a 0.35. En condiciones estables (TRH_{teórico} 12 horas; TRH_{real} 10.2 horas), con acondicionamiento químico e IB dentro del rango adecuado (0.20 - 0.30), el reactor alcanzó eficiencias de reducción de DQO y SST superiores a 77 y 76% respectivamente.

PALABRAS CLAVE: Aguas Residuales, Arranque de reactores, Extracción almidón de yuca, Índice Tampón, Filtro anaerobio.

ABSTRACT: The sedimentation stage of the cassava-starch extraction process generates the largest pollutant load in terms of quantity and quality of wastewater. In the north of Cauca department, there are several anaerobic filters for wastewater treatment which have shown deficiencies associated with environmental and operational factors. The evaluation of start-up and the performance of full-scale anaerobic filter evidenced the need to adjust chemically the wastewater with a minimum dose of 2180 mg NaHCO₃/L and the Buffer Index (BI) was shown as a simple and efficient tool for process control since allowed to determine instability conditions when its value was higher than 0,35. In stable conditions (TRH_{theoretical} 12 hours; TRH_{real} 10,2 hours), with chemical adjusting and BI inside the appropriate range (0,20 -0,30), the reactor reached COD and TSS removal efficiencies more than 77 and 76% respectively.

KEYWORDS: Anaerobic filter, Buffer Index, Cassava-starch extraction, Start-up reactors, Wastewater.

1. INTRODUCCIÓN

El 10% de la producción nacional de yuca se destina a la elaboración de almidón nativo

(fresco) o fermentado (agrio). El 80% de la producción nacional de almidón agrio se concentra en 150 rallanderías ubicadas en la

región norte del Departamento del Cauca, las cuales procesan entre 5 y 12.5 ton/semana [1] y emplean yuca procedente de diferentes partes del país, predominantemente del Departamento del Cauca, el eje cafetero y en algunas ocasiones del Ecuador. El proceso de extracción de almidón de yuca consiste en una serie de operaciones que por vía húmeda, logra la extracción del almidón que contienen las raíces de la yuca obteniendo almidón fresco (dulce) o agrio [2]. La Tabla 1 resume las etapas del proceso y los residuos (sólidos/líquidos) generados

Tabla 1. Descripción del proceso productivo
Table 1. Description of the productive process

Etapa	Residuos
Recepción de yuca y almacenamiento	-Empaques
Lavado y Pelado: eliminación de tierra, impurezas y cascarilla	-Cascarilla e impurezas -Agua residual
Selección y despunte: operación manual que permite retirar las raíces en mal estado y las puntas de la yuca que contiene fibras y pueden afectar la calidad del almidón	-Puntas de yuca -Raíces en mal estado
Rallado: se desagregan las raíces para romper las paredes celulares y dejar libre los gránulos de almidón, convirtiendo las raíces en una masa conocida como <i>pulpa</i> o <i>masa rallada</i>	-Lámina del rallo*
Colado: el almidón es separado de la pulpa en un tambor giratorio con agua; el producto obtenido es una suspensión denominada <i>lechada</i>	-Afrecho -Agua residual por escurrimiento del afrecho
Tamizado: se retiran las fibras remanentes en la lechada	-Afrecho -Cedazo*
Sedimentación: separación del almidón de la <i>lechada</i> mediante canales o tanques obteniendo almidón dulce o fresco****	-Mancha** -Agua Residual
Fermentación: el almidón dulce o fresco puede ser fermentado en condiciones ambientales y cubierto con una pequeña lámina de agua durante un periodo de dos a tres semanas para obtener <i>almidón agrio</i>	-Agua Residual
Secado: mediante exposición al sol para eliminar el exceso de agua	-Residuos almidón disperso por el aire
Triturado, Empaque y almacenamiento de producto final	-

*Ocasionalmente

** Almidón amarillento de baja calidad

*** Cuando se usan tanques, la separación del almidón y de la mancha ocurre en la misma unidad. Cuando se cuenta con canales, en éstos se retiene principalmente el almidón y la mancha (contenida en el agua residual) es separada en tanques adicionales.

Las principales etapas en las que se generan aguas residuales son: lavado-pelado y

sedimentación; las primeras se caracterizan por contener gran cantidad de material inerte y cascarilla y valores de DQO bajos y las provenientes de la sedimentación presentan un elevado valor de DQO y DBO₅ causando impactos sobre las fuentes receptoras de agua cercanas al lugar [3]. En el norte del Cauca se descargan diariamente 100 Kg de DQO/ tonelada de yuca procesada a los cuerpos receptores [4].

La Figura 1 muestra el balance de masa del proceso de extracción de almidón agrio a partir del procesamiento de 1000 Kg de yuca fresca [5].

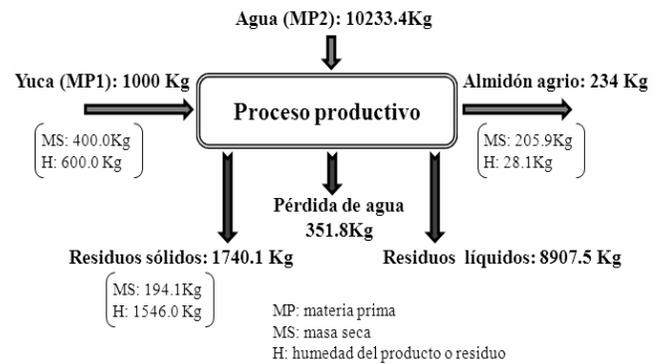
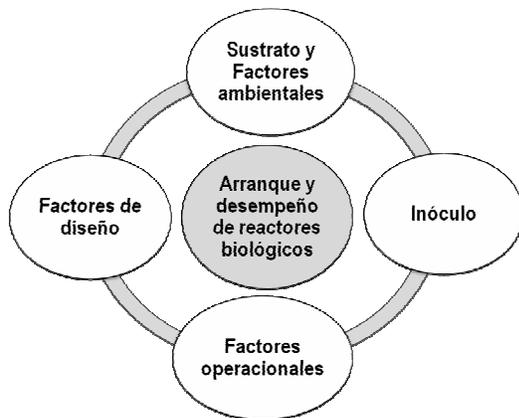


Figura 1. Balance de masa del proceso de extracción de almidón agrio de yuca

Figure 1. Mass balance of cassava starch extraction process

De acuerdo con los valores en base seca (MS) la eficiencia del proceso productivo es del orden del 51%. De los residuos generados, los líquidos representan el mayor porcentaje (84%), de los cuales aproximadamente el 80% corresponde a las aguas residuales provenientes de la etapa de sedimentación [6]. La cantidad de residuos líquidos generados corresponde a lo esperado en una rallandería de nivel tecnológico medio como la evaluada.

Existen diferentes experiencias a nivel nacional e internacional sobre el tratamiento anaerobio de las aguas residuales provenientes de la etapa de sedimentación. El desempeño de este proceso dependerá del control riguroso de diferentes factores (Figura 2), los cuales afectan principalmente a las bacterias metanogénicas por ser las más sensibles [7].



Fuente: Adaptado de [8]

Figura 2. Factores que afectan el arranque y desempeño de reactores anaerobios
Figure 2. Factors that affect the start-up and performance of anaerobic reactors

Los estudios realizados a escala de laboratorio y piloto han permitido definir la tecnología del filtro anaerobio como la más apropiada para las condiciones socioeconómicas del sector ralladero del norte del Cauca y por su facilidad de operación y mantenimiento [9-4]. Los actuales filtros anaerobios construidos en el norte del Cauca han confirmado la factibilidad de su uso; sin embargo, se han evidenciado inconvenientes en el arranque de los sistemas debido principalmente a los factores citados en la Figura 2.

Esta investigación buscó mejorar el arranque y desempeño de un filtro anaerobio a escala real que trata las aguas residuales generadas en el proceso de extracción de almidón de yuca de una rallandería ubicada en el Municipio de Mondomo - Departamento del Cauca, Colombia, el cual se encontraba fuera de funcionamiento.

2. METODOLOGÍA

En este estudio se evaluó la optimización del tratamiento anaerobio de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca procedentes de los tanques de sedimentación de la mancha, usando un filtro anaerobio y analizando aspectos relacionados con los factores ambientales y operacionales.

2.1 Descripción del Sistema de Tratamiento

El filtro anaerobio es enterrado y descubierto, funciona a gravedad y cuenta con dos baffles en su interior que permiten los cambios de dirección del flujo (horizontal y vertical) y dividir el reactor en tres cámaras; fue construido en mampostería reforzada con un volumen total de 32.4 m^3 , un volumen útil de 29.5 m^3 y un Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) teórico de diseño de 12 horas [10-6].

Para realizar la investigación, previamente se realizó la evaluación hidrodinámica del reactor para mejorar su diseño y eficiencia. La Figura 3 muestra la configuración del reactor después de las adecuaciones realizadas [11].

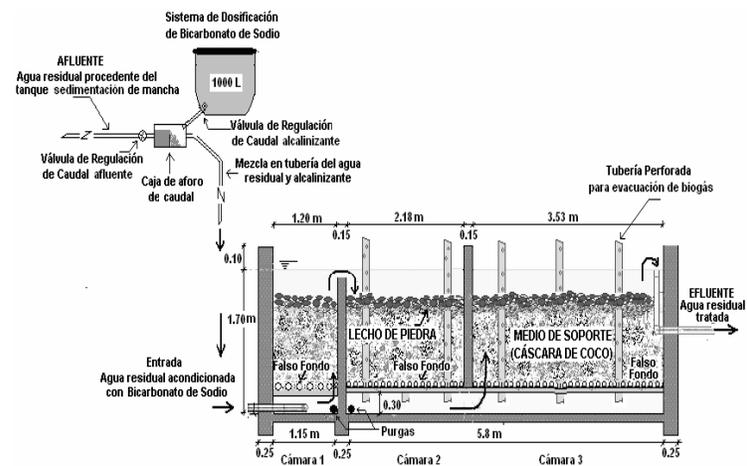


Figura 3. Esquema del sistema de tratamiento de aguas residuales

Figure 3. Scheme of the wastewater treatment system

Se empleó cáscara de coco como medio de soporte por su facilidad y bajo costo de adquisición, eficiente adherencia de la biomasa, difícil degradabilidad y baja densidad que reduce los requerimientos estructurales para la construcción de reactores [12].

2.2 Agua Residual

2.2.1 Caracterización fisicoquímica

Se caracterizó el agua residual a la salida del tanque de mancha durante tres jornadas completas de rallado, dos de seis y una de cuatro

horas, tomando alícuotas cada quince minutos con base en el aforo volumétrico del caudal. La Tabla 2 detalla las variables medidas y las técnicas de medición.

Tabla 2. Variables fisicoquímicas medidas en el agua residual

Table 2. Physiochemical variables measured in the wastewater

Variable	Unidades	Técnica de Medición ⁽¹⁾
pH (in situ)	Unidades	Potenciometría
Acidez, Alcalinidad total (AT) y Bicarbonática (AB) ⁽²⁾	mg/L CaCO ₃	Titulación
Ácidos Grasos Volátiles (AGV) ⁽²⁾	meq/L	Titulación
Demanda Química de Oxígeno Total (DQO _T)	mg/L	Digestión / Espectrofotometría
Demanda Bioquímica de Oxígeno Total (DBO ₅)	mg/L	Oximetría
Sólidos totales (ST), suspendidos totales (SST) y disueltos totales (SD)	mg/L	Gravimetría
Sólidos sedimentables (SS)	ml/L -hora	-
Nitrógeno Total (NTK)	mg NTK/L	Digestión/Titulación
Fósforo Total (P _{total})	mg P /L	Digestión/Titulación
Azufre (S)	mg S/L	Absorción atómica
Hierro Total (Fe)	mg Fe/L	Absorción atómica
Níquel (Ni)	mg Ni/L	Absorción atómica
Zinc (Zn)	mg Zn/L	Absorción atómica
Sodio (Na)	mg Na/L	Absorción atómica
Calcio (Ca)	mg Ca/L	Absorción atómica
Magnesio (Mg)	mg Mg /L	Absorción atómica
Potasio (K)	mg K /L	Absorción atómica
Cianuros (CN ⁻)	mg CN ⁻ /L	Absorción atómica
Fenoles	mg Fenol/L	Absorción atómica

⁽¹⁾ [13] ⁽²⁾ [14].

2.2.2 Acondicionamiento

Debido a que estas aguas residuales son de carácter ácido, es fundamental el ajuste de la alcalinidad y la corrección del pH mediante la adición de alcalinizantes que permitan generar capacidad tampón; el acondicionamiento se realizó con bicarbonato de sodio (NaHCO₃) [15] adecuando un sistema de dosificación de alcalinizante con capacidad de 1m³ y válvulas de regulación de caudal. El bicarbonato de sodio se disolvía manualmente en el tanque de dosificación en una concentración máxima del 6% (60 gNaHCO₃/L) para garantizar su completa solubilización.

Teniendo en cuenta que la acidez debida a los AGV puede ser neutralizada hasta un pH de 5.75

unidades, valor a partir del cual puede iniciarse el suplemento de alcalinidad bicarbonática [7], el caudal de dosificación de la solución de alcalinizante se calculó de tal forma que además de neutralizar la acidez media del agua residual se suministrara una concentración adicional de alcalinidad bicarbonática de 298 mgCaCO₃/L (equivalente a 500 mg NaHCO₃/L); este valor garantiza suficiente capacidad tampón durante el tratamiento anaerobio. Vale la pena resaltar que este alcalinizante, además de aportar directamente alcalinidad bicarbonática no afecta el proceso anaerobio si se presenta una sobredosificación del producto, por el contrario aumenta la capacidad tampón del sistema.

2.3 Inóculo

El estiércol de vaca, seleccionado de acuerdo con [16], fue adquirido en una zona aledaña a la rallería y caracterizado al inicio y al final del arranque, tomando una muestra procedente de la segunda purga del reactor (cámara 2). Las variables medidas según [13] se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Variables medidas en el inóculo y el lodo al final del arranque

Table 3. Variables measure in the inoculum and sludge at the end of start-up

Variable	Unidades	Técnica de medición
Sólidos Totales (ST) y Volátiles Totales (STV) ⁽¹⁾	g/Kg mg/L	Gravimetría
Relación STV/ST	-	-
Actividad Metanogénica Específica (AME) ⁽²⁾	gDQO / gSTV·d	Desplazamiento de líquido

⁽¹⁾Al inicio del estudio se expresó en g/Kg y al final mg/L debido a la consistencia física de los materiales

⁽²⁾ [7], [17]; la muestra de lodo se tomó de la segunda purga

Teniendo en cuenta que la cantidad de inóculo es un factor que influye en el tiempo de arranque y tipo de gránulo formado, se garantizó una concentración alrededor de 15 Kg SSV/m³ [18] y un volumen aproximado del 40% del volumen útil del reactor (equivalente a 7 m³ de inóculo).

2.4 Estrategia de Arranque

Se empleó la disminución progresiva del tiempo de retención hidráulico –TRH a medida que el reactor respondía favorablemente en términos de

las variables de control, principalmente el índice tampón (IB) y la eficiencia de reducción de DQO hasta alcanzar el TRH teórico de diseño (12 horas). Las Tablas 4 y 5 muestran las características del reactor y las condiciones operacionales que caracterizaron el arranque del filtro anaerobio respectivamente.

Tabla 4. Condiciones iniciales para el arranque del reactor

Table 4. Initial conditions for the reactor start –up

Diseño ⁽¹⁾	* Falso fondo * Tuberías perforadas para evacuación de biogás
Medio de soporte ⁽²⁾	* Cáscara de coco
Inóculo ⁽³⁾	* Estiércol de vaca
Condiciones operacionales	* Inicio del arranque con TRH de 24 h ⁽⁴⁾ * Acondicionamiento del agua residual con bicarbonato de sodio ⁽⁵⁾

⁽¹⁾ [11]; ⁽²⁾ [12]; ⁽³⁾ [16]; ⁽⁴⁾ [10]; ⁽⁵⁾ [15]

Tabla 5. Condiciones operacionales del reactor durante las diferentes etapas del arranque

Table 5. Operational conditions of the reactor during the different phases of start-up

Etapa	TRH _{Teórico} (horas)	Duración (días)	
		Total ⁽¹⁾	Real ⁽²⁾
1	24	53	23
2	20	22	13
3	16	45	17
4	14	54	11
5	12	24	16
Total		198	80

⁽¹⁾Incluye los periodos de paradas del proceso productivo por condiciones climáticas, económicas y escasez de materia prima

⁽²⁾Sin incluir paradas

El control del proceso se realizó con la medición de las variables mostradas en la Tabla 6. La toma de muestra del afluente se realizó en la caja de aforo de caudal antes de la dosificación del alcalinizante; en el estudio no fue posible caracterizar el agua residual acondicionada debido a que la mezcla con el Bicarbonato de Sodio se realizaba en el transcurso de la tubería de conducción al reactor; por esta razón en este documento el “afluente” es el agua residual sin acondicionamiento. La toma de muestra del efluente se realizó en la caja de salida del reactor.

Tabla 6. Variables y frecuencia de medición en el afluente y efluente del reactor

Table 6. Variables and measurement frequency in the influent and effluent from the reactor

Variable ⁽¹⁾	Unidades	Frecuencia	Punto de medición
pH	Unidades	Diaria	Afluente Efluente
Alcalinidad total (AT)	mg CaCO ₃ /L	Diaria	Afluente Efluente
Alcalinidad AB y debida a los AGV(A _{AGV}) ⁽²⁾	mg CaCO ₃ /L	Diaria	Efluente
Acidez	mg CaCO ₃ /L	Diaria	Afluente
Índice Tampón (IB) ⁽³⁾	-	Diaria	Efluente
Ácidos Grasos Volátiles (AGV)	meq/L	Diaria	Afluente Efluente
DQO total (DQO _T) y filtrada (DQO _F)	mg/L	3 veces / semana	Afluente Efluente
Sólidos ST, SST y SD	mg/L	3 veces / semana	Afluente Efluente

⁽¹⁾ [13]; ⁽²⁾ [14]; ⁽³⁾ IB = A_{AGV}/AT [17].

2.5 Análisis Estadístico

Todas las mediciones se realizaron por duplicado; se determinaron las medidas de tendencia central, de dispersión y de posición; con las últimas se evaluó gráficamente la distribución de los datos mediante el uso de diagramas de cajas y alambres o boxplot. El procesamiento estadístico de los datos se realizó con la ayuda de los Software Excel y R.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización Físicoquímica del Agua Residual

Las Tablas 7 y 8 muestran las características físicoquímicas medidas en el agua residual obtenidas durante los muestreos integrados. El agua residual del proceso de extracción de almidón de yuca contiene carbohidratos fácilmente hidrolizables [4], lo que favorece la fermentación natural y por consiguiente la formación de AGV, incidiendo en los bajos valores de pH, prácticamente ausencia de alcalinidad y elevada acidez. La relación DBO₅/DQO_T indica la potencialidad de tratamiento biológico de estas aguas residuales y el alto nivel de sólidos disueltos muestra la predominancia de la materia orgánica en forma

disuelta, la cual es difícil de remover por métodos físicos convencionales.

Tabla 7. Características fisicoquímicas del agua residual

Table 7. Physico-chemical characteristics of wastewater

VARIABLES FISICOQUÍMICAS	UNIDADES	RANGO DE VARIACIÓN
pH	Unidades	4.1- 4.4
AT	mg CaCO ₃ /L	0 – 10
AB	mg CaCO ₃ /L	0
AGV	meq /L	12.6 – 31.8
Acidez	mg CaCO ₃ /L	400 – 1500
DQO _T	mg/L	3400 -5400
DBO ₅	mg/L	1876 – 2459
Relación DBO ₅ /DQO _T	----	0.50– 0.60
ST	mg/L	2075- 3500
SST	mg/L	330 - 1180
SD	mg/L	1745 - 2320
SS	ml/L -hora	0.8- 15

Tabla 8. Continuación características fisicoquímicas del agua residual

Table 8. Continuation of physico-chemical characteristics of wastewater

Variable	Rango de variación	Valor recomendado (mg/L) ⁽¹⁾	
		Mínimo*	Exceso deseado sobre el valor mínimo
Macronutrientes			
NTK (mg NTK/L)	136 -196.6	66	50
P _{Total} (mg P /L)	22.2 – 47.8	11	10
S (mg S/L)	37.3 - 54.8	13.2	5
Micronutrientes			
		Mínimo*	Exceso deseado sobre el valor mínimo
Fe (mg Fe/L)	0.4 – 0.7	1.6 ⁽²⁾	10
Ni (mg Ni/L)	<0.1	0.16 ⁽²⁾	0.02
Zn (mgZn/L)	0.7	0.09	0.02
Cationes comunes			
		Mínimo*	Concentración estimulante
Na (mg Na /L)	16.5 - 18.2	40-60	100-200
Ca (mg Ca /L)	21.8-25.8	40-60	100-200
Mg (mg Mg /L)	12.4 -24.4	40-60	75-250
P (mg P /L)	243 - 249	40-60	200-400
Compuestos tóxicos			
		Concentración inhibitoria	
CN ⁻ (mg CN ⁻ /L)	0.1 - 0.4	1 ⁽²⁾	
Fenoles (mg Fenol/L)	0.05 – 0.06	200 -300 ⁽³⁾	

*Valor calculado para el rango de variación promedio de DQO medido en los muestreos (4400 mg/L)

⁽¹⁾ [19], [20]; ⁽²⁾ [17]; ⁽³⁾ [21], [20]

En la Tabla 8 se observa que el agua residual presenta un contenido adecuado de macronutrientes; aunque existe deficiencia de algunos micronutrientes como hierro y níquel y de algunos cationes que podrían limitar el desempeño del proceso, es importante resaltar que existen experiencias que demuestran la viabilidad del tratamiento anaerobio de este tipo de agua residual alcanzando elevadas eficiencias de reducción de materia orgánica [4-12-16]; adicionalmente el agua residual no contiene cianuros y fenoles en concentraciones tóxicas o inhibitorias, condiciones que también favorecen el desempeño del tratamiento anaerobio [19-20].

La Tabla 9 resume el análisis estadístico de las variables fisicoquímicas medidas en el agua residual durante el seguimiento del reactor.

Tabla 9. Variación de las características fisicoquímicas del agua residual durante el arranque
Table 9. Variation of wastewater physico-chemical characteristics during the start-up

Variable	Cuartil 1 (Q1)	Cuartil 2 (Q2)	Cuartil 3 (Q3)
DQO total	3067	3684	4075
DQO filtrada	1150	1881	2400
ST	2540	3050	3491
SST	353	505	610
SD	2055	2537	3050
Acidez	950	1150	1290
AGV	26	30	37
pH	4,20	4,31	4,45

Q1=25% de los datos; Q2= mediana o 50% de datos; Q3=75% de los datos

El agua residual presentó valores de la mediana similares al rango de variación encontrado durante los muestreos integrados (Tabla 7) caracterizándose por el elevado contenido de materia orgánica y sólidos disueltos; adicionalmente la elevada acidez y AGV coinciden con el rango bajo de pH y ausencia de alcalinidad bicarbonática y total.

3.2 Acondicionamiento del Agua Residual

Durante el arranque, la acidez del agua residual varió en un rango de 950 a 1290 mgCaCO₃/L el 50% del tiempo, siendo la mediana de 1150 mgCaCO₃/L, lo que representaría una dosificación de alcalinizante de 2433 mg NaHCO₃/L (equivalentes a 1448 mgCaCO₃/L); valor obtenido a partir de la suma de la acidez

del agua residual y el suplemento adicional de alcalinidad bicarbonática de 298 mgCaCO₃/L (equivalente a 500 mg NaHCO₃/L).

Para facilitar la operación del reactor y reducir costos operacionales, se estableció una acidez constante de 1000 mgCaCO₃/L, la cual demandó una dosificación de 2180 mgNaHCO₃/L (equivalentes a 1298 mgCaCO₃/L) lográndose resultados satisfactorios en el desempeño del filtro anaerobio. Estas dosis representaron caudales medios de alcalinizante durante el arranque de 7.0 a 14 mL/s, equivalentes a 12.5 – 25 Kg de bicarbonato de sodio por día, teniendo en cuenta que un día de trabajo equivale a 8 horas [22].

3.3 Inóculo

El estiércol de vaca es un material de alta disponibilidad y facilidad de adquisición en la zona de estudio; sus características al inicio y final del arranque se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Características del estiércol de vaca al inicio y final del arranque
Table 10. Manure characteristics at the beginning and end of the start-up

Variable	Lodo (estiércol de vaca)	
	Inicio	Final
ST	68.3 g/Kg	51.6 mg/L
STV	51.2 g/Kg	46.5 mg/L
Relación STV/ST	0.75	0.90
AME (gDQO/gSTV·d)	0.16	0.25

La relación STV/ST, que permite evaluar de forma indirecta el contenido de biomasa activa en el inóculo y/o lodo [7,23], indicó la potencialidad de este inóculo para el arranque del reactor; adicionalmente, su incremento al final del estudio evidenció la adecuada presencia y adaptación de biomasa activa, lo que también se observó con el incremento en el valor de la AME al final del estudio, favoreciendo las eficiencias de reducción de materia orgánica alcanzadas en el reactor. Cabe resaltar que el buen desempeño de este inóculo estuvo estrechamente ligado al control de la capacidad tampón del sistema siguiendo las recomendaciones de [16] y [15].

3.4 Desempeño del Reactor

La Tabla 11 muestra la variación del caudal y la Carga Orgánica Volumétrica (COV) durante el arranque del reactor.

Tabla 11. Variación del caudal y la COV durante el arranque del reactor
Table 11. The flow variation and VOC during the start-up

Etapa	TRH _{Teórico} (horas)	Caudal afluente (L/s)	COV (Kg/m ³ d)
1	24	0,20	2,0 – 5,1
2	20	0,24	2,3 – 4,6
3	16	0,30	3,7 – 5,8
4	14	0,34	4,6 – 9,2
5	12	0,40	7,0 – 8,8

Aunque en algunas ocasiones la COV fue baja, bajo la condición del TRH teórico de diseño (12 horas), el reactor operó con valores de COV entre 7.0 - 8.8 KgDQO/m³d lo que permite considerar el filtro anaerobio como un reactor de alta tasa, los cuales operan entre 5 - 40 KgDQO/m³d [24].

La principal variable que se empleó para determinar las condiciones de estabilidad del reactor, además de la eficiencia de reducción de DQO, fue el índice tampón, la Figura 4 muestra el comportamiento del IB y el pH durante el arranque.

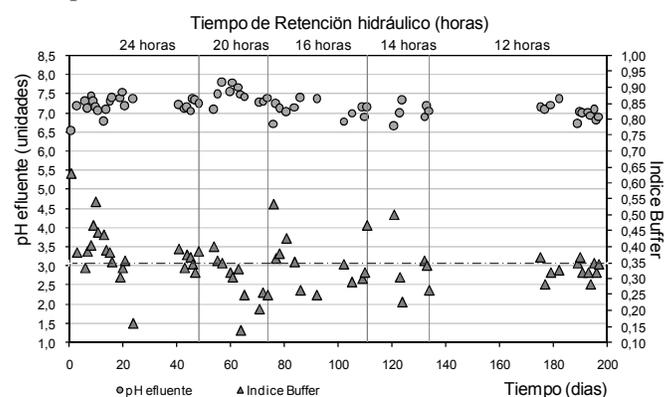


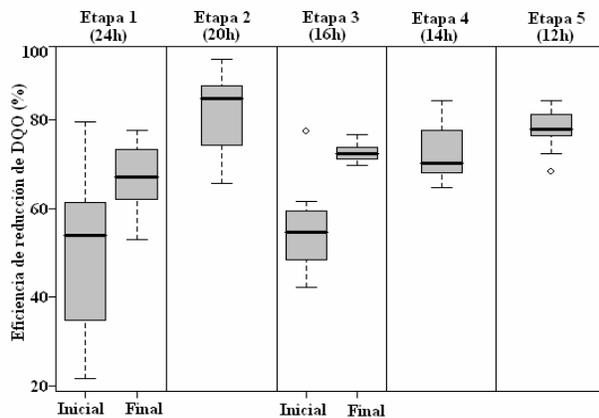
Figura 4. Variación del IB y el pH efluente
Figure 4. BI and pH effluent variation

La mayor parte del tiempo, el IB se mantuvo por debajo de 0.35, presentándose valores elevados hasta de 0.65 asociados a episodios de inestabilidad en el reactor principalmente por cambios operacionales (disminución del TRH) y en dos ocasiones se presentaron valores menores

a 0.20 asociados a paradas muy prolongadas del proceso productivo. [25] recomienda valores del IB menores a 0.35 para evitar eventos de acidificación en el reactor, siendo preferible un rango entre 0.20 – 0.30 pues valores inferiores tampoco son recomendables por estar asociados a condiciones de subalimentación.

El pH efluente varió entre 6.51 – 7.80 unidades durante todo el periodo de arranque, con un valor de la mediana de 7.14 unidades y una variación del 50% de los datos entre 7.02-7.35 unidades, mostrando un comportamiento estable y adecuado para el proceso anaerobio [7]; sin embargo, esta variable no permitió evidenciar los periodos de inestabilidad en el reactor, lo que confirma su baja sensibilidad comparada con la del IB, permitiendo recomendar este índice como una herramienta simple y adecuada para el control del proceso anaerobio.

La Figura 5 muestra la variación de las eficiencias de reducción de DQO en cada una de las etapas del arranque.



Variable	Q1	Q2	Q3
Etapa 1:			
Inicio	37	54	61
Final	63	67	72
Etapa 2:			
Inicio	48	55	59
Final	71	72	74
Etapa 3:			
Inicio	68	70	76
Final	77	78	81

Q1 = Cuartil 1 (25%); Q2 = Cuartil 2 o mediana; Q3 = Cuartil 3 (75%)

Figura 5. Variación de las eficiencias de reducción de DQO durante el arranque del reactor

Figure 5. Variation of COD removal efficiencies during the start- up

Se observa que las etapas 1 y 3 fueron las más inestables, encontrándose comportamientos que diferenciaron el inicio y el final de las mismas. En la primera etapa la inestabilidad del reactor se debió principalmente al proceso inicial de adaptación del inóculo a las características del sustrato y a la falta de capacidad tampón; en la tercera etapa, la disminución del TRH de 20 a 16 horas (21%), ocasionó probablemente una sobrecarga en el reactor afectando las eficiencias de reducción de DQO. Es importante resaltar que al final de ambas etapas, el reactor se adaptó a las condiciones operacionales alcanzando eficiencias de reducción superiores al 70%.

Para la etapa en la que se operó con el TRH teórico de diseño (12 horas), el reactor presentó un comportamiento estable con eficiencias de reducción de DQO del orden de 78% y una variación del 50% de los datos entre 77 – 81%.

Es importante resaltar que la eficiencia de reducción de DQO alcanzada en el estudio (78%) coincide con la eficiencia teórica esperada en el reactor evaluado, el cual presenta un TRH real de 10.2 horas asociado al TRH teórico de 12 horas [11].

Aunque las paradas prolongadas en el proceso productivo no afectaron el desempeño del proceso anaerobio, se observó que a medida que el reactor operaba a menores TRH, era más vulnerable a sobrecargas hidráulicas que ocasionaban pérdida de material disuelto y particulado en el efluente. Los valores medios de las eficiencias de reducción de SST indican que el reactor alcanzó valores de eficiencias de reducción alrededor del 76% para la condición operativa de diseño.

Teniendo en cuenta las características del filtro anaerobio, las condiciones iniciales para el arranque y los resultados de este estudio, la Figura 6 resume los aspectos que deben tenerse en cuenta para el eficiente arranque y desempeño del filtro anaerobio tratando las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca.

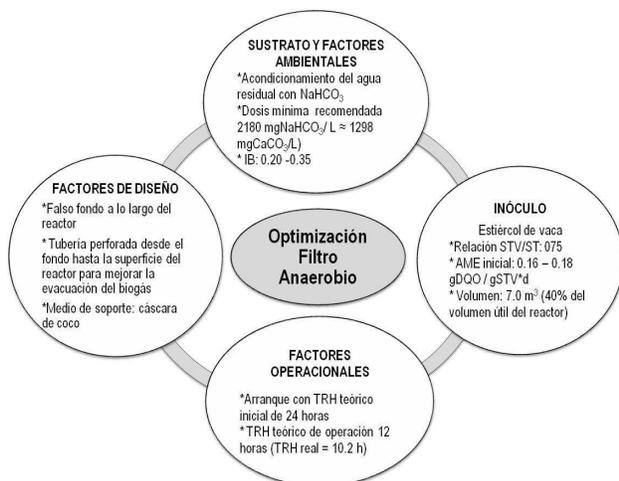


Figura 6. Factores importantes en el arranque y desempeño del filtro anaerobio

Figure 6. Important factors in the start-up and anaerobic filter performance

4. CONCLUSIONES

- Las características ácidas del agua residual de la etapa de sedimentación del proceso de extracción de almidón yuca, hacen indispensable su acondicionamiento químico para permitir el tratamiento biológico anaerobio. El bicarbonato de sodio fue el producto más apropiado para neutralizar la acidez del agua residual y garantizar la capacidad tampón necesaria, en una dosis mínima de $2180 \text{ mgNaHCO}_3/\text{L}$ equivalentes a $1298 \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$.
- El Índice Tampón (IB) mostró ser una herramienta sencilla y adecuada para el control del tratamiento anaerobio de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca, permitiendo 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.
- El arranque del reactor permitió confirmar que el Tiempo de Retención Hidráulico de diseño ($\text{TRH}_{\text{teórico}}=12\text{h}$ y $\text{TRH}_{\text{real}}=10.2\text{h}$) es adecuado para la operación del filtro anaerobio. En estas condiciones y con un estricto control de la capacidad tampón (IB entre 0.2- 0.35), se alcanzaron eficiencias de

reducción de DQO entre 77 - 81% y del orden del 76% para los Sólidos Suspendidos, valores que coinciden con las eficiencias teóricas esperadas.

REFERENCIAS

- [1] CRC. Rallandero Limpio. Cartilla informativa y educativa. Popayán, Colombia, Corporación Regional del Cauca, 2005.
- [2] ALARCÓN, F. Y DUFOUR, D. Almidón agrario de yuca en Colombia. Tomo 1, CIAT – CIRAD, Colombia, 1996.
- [3] CIAT. La yuca en el tercer milenio. Sistemas modernos, procesamiento, utilización y comercialización, Colombia, Centro internacional de agricultura tropical, 2002.
- [4] COLIN, X., FARINET, J.L., ROJAS, O. AND ALAZARD, D. Anaerobic treatment of cassava starch extraction wastewater using a horizontal flor filter with bamboo as support, J. Bioresource Technology, 98(8), 1602-1607, 2007.
- [5] MARMOLEJO, L.F., PÉREZ, A., TORRES, P., CAJIGAS, A. Y CRUZ, C.H. Aprovechamiento de los residuos sólidos generados en pequeñas industrias de almidón de yuca, J. Livestock Research for Rural Development 20, (7), 2008.
- [6] TORRES, P., CRUZ, C., MARMOLEJO, L., CAJIGAS, A. Y PÉREZ, A. Producción Más Limpia aplicada al proceso de extracción de almidón de yuca. Informe técnico final. Colciencias, Universidad del Valle, Cali, 2006
- [7] CHERNICHARO, C. A., Principios do tratamento biológico de águas residuárias. Reactores anaeróbios, Vol V, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Brasil, 2007.
- [8] WEILAND, P. The Star-up, operation and monitoring of high – rate anaerobic treatment systems: Discusee’s report. Internacional Workshop anaerobic treatment technology for

municipal and industrial wastewater, Valladolid, Spain, 1990

[9] ROJAS O. Evaluación del comportamiento de tres sistemas de tratamiento anaerobio para la depuración de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca [MSc Thesis]. Cali, Colombia: Universidad del Valle, Posgrado en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 1999.

[10] PÉREZ, A. Evaluación y optimización de un filtro anaerobio en escala real para el tratamiento de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca [MSc Thesis]. Cali, Colombia: Universidad del Valle, Posgrado en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2007.

[11] PÉREZ, A. Y TORRES, P. Evaluación del comportamiento hidrodinámico como herramienta para optimización de reactores anaerobios de crecimiento en medio fijo, Revista Facultad Ingeniería Universidad de Antioquia, 45, 27-40, 2008.

[12] TORRES, P., RODRÍGUEZ, J. Y URIBE, I. Tratamiento de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca en filtro anaerobio, Influencia del medio de soporte, J. Scientia et Técnica IX (23), 75-80, 2003.

[13] APHA. Standard Methods for the examination of water and wastewater, USA, 2005.

[14] RIPLEY, L., BOYLE, W. AND CONVERSE, J. Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high strength wastes, J. Water Pollution Control Federation, 58, 406-411, 1986.

[15] PEREZ, A. Y TORRES, P. Índices de alcalinidad para el control del tratamiento anaerobio de aguas residuales fácilmente acidificables, Revista Ingeniería y Competitividad, 10 (2), 41-52, 2008.

[16] PÉREZ, A., TORRES, P. Y PIZARRO, C. Arranque de un filtro anaerobio para el tratamiento de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca. Influencia del

inóculo, Revista Ingeniería y Competitividad, 8 (1), 47-54, 2006.

[17] FIELD, J. 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, 1987.

[18] HULSHOFF, R.W, LENS, P.N., STAMS, A.J., AND LETTINGA, G. Perspectives for anaerobic treatment of sulfate-rich wastewaters. Memorias IV Seminario y Taller latinoamericano sobre tratamiento anaerobio de aguas residuales, Bucaramanga 5, 383-391, 1996.

[19] SPEECE, R., Anaerobic biotechnology for industrial wastewater, USA, 1996.

[20] RITTMANN, B. Y MCCARTHY, P., Biotecnología del medio ambiente: Principios y aplicaciones. Editorial Mc Graw Hill, 2001.

[21] BRAILE, P.M. Y CAVALCANTI, J.E., Manual de tratamiento de águas residuarias industriais, CETESB, Brasil, 1993.

[22] GARCÍA, R.E. Y ORDOÑEZ, J.A. Propuesta de mejoramiento en el proceso de extracción de almidón de yuca orientada hacia la aplicación de la producción más limpia. Caso práctico: Rallandería Piedras Negras, región norte del Departamento del Cauca [Tesis Pregrado]. Cali, Colombia: Universidad del Valle, Estadística e Ingeniería industrial, 2006.

[23] VON SPERLING, M., Principios basicos do tratamento de esgotos. Departamento de Engenharia Sanitaria e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, 1996.

[24] LESLIE, C.P., DAIGGER, G.T. AND LIM, H.C., Biological wastewater treatment. 2ª ed. U.S.A, New York, 1996.

[25] ROJAS, O. 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, 1987.