

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE REACTORES ANAERÓBICOS DE PLACAS VERTICALES PARALELAS EN ACRÍLICO

WASTEWATER TREATMENT BY ANAEROBIC REACTORS OF VERTICAL PARALLEL PLATES IN ACRYLIC

TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS POR REACTORES ANAERÓBIOS DE PLACAS VERTICAIS PARALELAS EM ACRÍLICO

Guillermo Chau F.¹, Napoleón Zambrano A.¹

RESUMEN

Algunos filtros anaeróbicos con lecho de piedra construidos en el departamento del Cauca (Colombia), están presentando problemas de colmatación. Si se reemplaza la piedra por placas verticales paralelas, se elimina el problema de obstrucción. Este documento presenta el desarrollo y resultados de una investigación que evaluó a escala de laboratorio el potencial de los reactores anaeróbicos de pla-

Recibido para evaluación: 27/04/2010. **Aprobado para publicación:** 18/04/2011

¹ Docentes Grupo de Investigación en Ingeniería Ambiental Universidad del Cauca.

Correspondencia: gchaux@unicauca.edu.co

cas verticales paralelas en acrílico para remover contaminantes (materia orgánica y sólidos suspendidos). El reactor anaeróbico de placas paralelas en acrílico se desempeñó como tratamiento secundario; se alimentó con agua residual efluente de un Tanque Imhoff con concentraciones medias de 156 ± 14 mg/L de DBO5, 438 ± 32 mg/L de DQO y 98 ± 22 mg/L de sólidos suspendidos totales. Las remociones de DQO y DBO5 en el reactor sobrepasan el 50% y la remoción de sólidos suspendidos sobrepasó el 60% para tiempos de detención de 24 horas. La facilidad en la operación del reactor lo hace viable como tratamiento biológico anaeróbico de aguas residuales previamente decantadas.

ABSTRACT

Some anaerobic filters with bed stone built in the department of Cauca (Colombia), are presenting problems of obstruction. If the stone is replaced by vertical parallel plates, it eliminates the problem of obstruction. This paper presents the development and results of a study performed in laboratory scale that evaluated the potential of anaerobic reactors of vertical parallel plates in acrylic to remove pollutants (organic matter and suspended solids). The anaerobic reactor of parallel plates in acrylic served as secondary treatment; was fed with wastewater effluent of an Imhoff Tank with average concentrations of 156 ± 14 mg/L BOD5, 438 ± 32 mg/L of COD and 98 ± 22 mg/L of total suspended solids. The reductions of COD and BOD in the reactor are over 50% and the reduction of suspended solids exceeded 60% for time of detention for 24 hours. The ease in operating the reactor makes it viable as anaerobic biological treatment of wastewater previously decanted.

RESUMO

Alguns filtros anaeróbios com recheio de pedras construída no departamento de Cauca (Colombia) estão apresentando problemas de obstrução. Se a pedra é substituída por placas verticais paralelas, evita o problema da obstrução. Este artigo apresenta o desenvolvimento e os resultados e no estudo realizado em escala de laboratório que avaliaram o potencial de reatores anaeróbios de placas verticais paralelas em acrílico para remover os contaminantes (sólidos suspensos e matéria orgânica). O reator anaeróbico de placas paralelas de acrílico serviu como tratamento secundário; foi alimentado com água residuária do efluente de um tanque Imhoff com concentrações médias de 156 ± 14 mg/L DBO5, 438 ± 32 mg/L de DQO e 98 ± 22 mg/L de sólidos suspensos totais. A remoção de DQO e DBO5 no reator são mais de 50% ea remoção de sólidos em suspensão superior a 60% o tempo de detenção de 24 horas. A facilidade na operação do reator torna viável como tratamento biológico anaeróbico de águas residuárias previamente decantadas.

PALABRAS CLAVE:

Anaeróbico, Acrílico, Agua residual.

KEYWORDS:

Anaerobic, Acrylic, Wastewater

PALAVRAS-CHAVE:

Anaeróbico, Acrílico, Águas residuárias

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la información reportada por el Sistema Nacional Ambiental (SINA) en el país se han construido aproximadamente 410 plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales, de las cuales casi el 30% se encuentra fuera de operación o registran bajos niveles de eficiencia por múltiples razones de orden técnico, administrativo, financiero o socioeconómico [1]. Mas de 10 municipios del departamento del Cauca (Colombia) tienen filtros anaeróbicos con medio de piedra como sistema de tratamiento biológico de aguas residuales y la mayoría han presentado dificultad para su arranque inicial, problemas de obstrucción, deterioro del medio, dificultad para el retiro de lodos y altos costos del mismo [2]. El desarrollo de tecnologías que minimicen la obstrucción de filtros anaeróbicos, garantizando un mejor funcionamiento hidráulico y facilidad en la operación y mantenimiento constituyen parte de la solución de la problemática planteada. Los reactores anaeróbicos con placas verticales paralelas en acrílico ofrecen una alternativa que puede cumplir con los requerimientos mencionados, razón por la cual es pertinente iniciar su estudio.

En un proceso anaeróbico, la materia orgánica se convierte mediante procesos biológicos en metano y dióxido de carbono. El proceso se desarrolla dentro de un reactor libre de oxígeno. El agua residual cruda o previamente decantada se introduce de forma continua y se retiene dentro del reactor por periodos variables de tiempo, después de los cuales el líquido efluente tiene una carga orgánica reducida y un menor contenido de microorganismos patógenos. Los procesos anaerobios se clasifican en procesos de crecimiento en suspensión y procesos de película bacteriana adherida. En los primeros, el agua residual fluye libremente dentro del reactor y las bacterias suspendidas en el flujo se encargan de consumir la materia orgánica, transformándola en productos más sencillos; en los segundos, el agua fluye dentro de un reactor provisto de un medio inerte (piedra, plástico, cerámica, etc.), donde parte de las bacterias se adhieren al material del medio formando una película biológica donde degradan la materia orgánica y las restantes consumen la materia orgánica presente en los intersticios o vacíos del medio. El proceso de tratamiento de película bacteriana adherida más común es el proceso de filtro anaeróbico de flujo ascendente usado para el tratamiento de desechos carbonáceos donde se incluyen aguas residuales domésticas e industriales [3].

En los filtros anaeróbicos, el agua residual asciende a través de un lecho que habitualmente se compone de roca o material plástico. Los microorganismos se adhieren al medio inerte o quedan suspendidos entre los espacios del mismo. Cuando el agua fluye a través del medio, la masa bacteriana degrada rápidamente los compuestos orgánicos del desecho y el biogás es colectado en la superficie. Aunque el filtro tiene ventajas como: alta remoción de compuestos orgánicos, aplicación en aguas residuales diluidas y concentradas, bajas demandas de área; tiene algunas desventajas entre las que se destacan: dificultad en el arranque, riesgo de obstrucción, restringido a aguas residuales de bajos contenidos de sólidos en suspensión y altos costos del medio soporte [4].

El interés por los reactores anaeróbicos de flujo ascendente, se debe en principio, a las publicaciones de Young y McCarty presentadas entre 1968 y 1969, elaboradas con base en la operación de pequeñas instalaciones de laboratorio a partir de 1963. Tales trabajos tienen un valor histórico, pues demostraron que efluentes con DBO_5 relativamente baja, podían ser tratados anaeróbicamente, contrario a lo que múltiples investigadores pensaban en ese entonces. Una de las primeras instalaciones de filtro anaeróbico a escala real fue construida en 1970, para el tratamiento de aguas residuales provenientes del almidón obteniendo remociones promedio de materia orgánica del 75%. El funcionamiento de esta instalación se interrumpió debido a que se obstruyó el lecho filtrante [5].

Inicialmente se utilizó piedra como material de soporte debido a su bajo costo, pero debido a requerimientos estructurales y a problemas de taponamiento del lecho con algunos residuos líquidos se comenzó a usar material sintético y matrices plásticas de medio cruzado o tubular como medios soporte [6]. Adicionalmente, se han estudiado alternativas como: anillos de guadua, cáscara de coco, residuos de ladrillera [7], bambú [8], etc. El papel del material de empaque en el rendimiento de los filtros anaeróbicos de flujo ascendente ha recibido atención, pero los hallazgos no han sido concluyentes. La superficie específica (área de adherencia por unidad de volumen), la porosidad o volumen de vacíos y el tamaño de poro del medio son considerados como factores importantes que ejercen un efecto favorable; sin embargo, no se ha llegado a un acuerdo sobre su importancia relativa. Estudios previos indican que los medios de alta porosidad tienen ventajas sobre los

medios en piedra, permitiendo gran acumulación de biomasa [9].

En los reactores anaeróbicos de placas verticales paralelas, el medio soporte consiste en placas de acrílico cuya función es brindar una superficie de adherencia para la degradación de la materia orgánica por parte de los microorganismos, con un amplio porcentaje de su volumen ocupado por los espacios entre placas para garantizar, adicionalmente, condiciones para la degradación de materia orgánica en suspensión. En términos de mantenimiento, el reactor ofrece la posibilidad de retirar y reinstalar las placas cuando sea necesario, sin producir lavado substancial de la biomasa presente en el reactor al momento del retiro o colocación de las mismas. En esta investigación se exploró a escala de laboratorio el rendimiento de tales reactores en la remoción de sólidos suspendidos, DBO_5 y DQO para tiempos de detención de 12, 18, 24 y 36 horas y superficies específicas de 284 y 252 m^2/m^3

MÉTODO

Se construyeron dos reactores de iguales dimensiones cuyas partes principales son: una tubería de sección cuadrada en donde se colocaron las placas paralelas entre sí, cada una con longitud de 1,80 m y una serie de placas construidas en acrílico (ver figuras 1 y 2). Se utilizó diferente número de placas en cada reactor para evaluar el impacto de la superficie específica, así: en el reactor 1 se utilizaron 7 placas, separadas 4 mm entre sí; en el reactor 2 se utilizaron 6 placas separadas 6 mm entre sí. La altura de las placas (1,80m) se escogió dentro del rango recomendado para reactores anaeró-

Figura 1. Placas

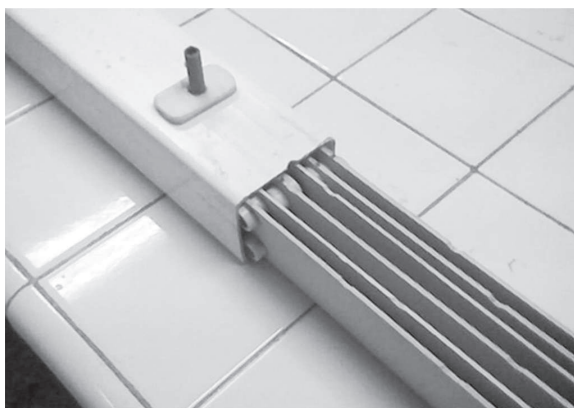
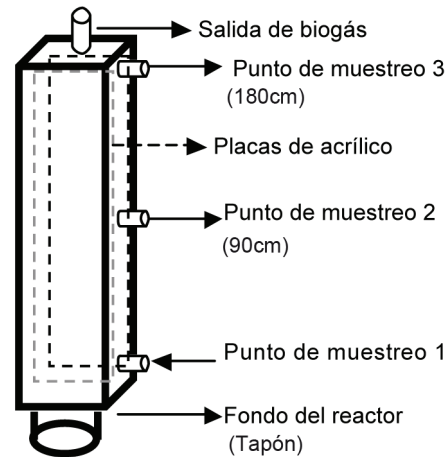


Figura 2. Esquema del reactor (sin escala)

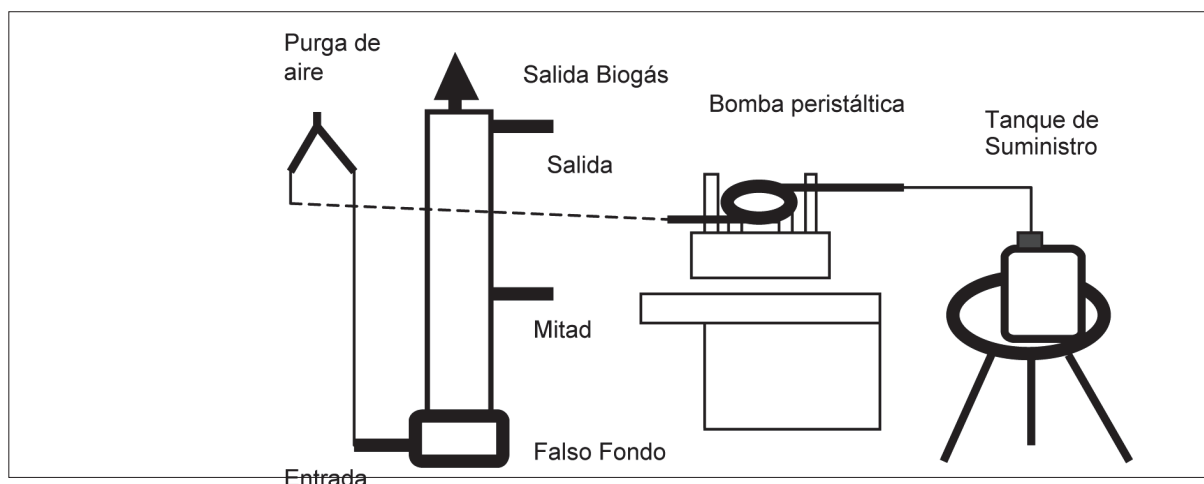


bicos de flujo ascendente (entre 0,8 y 2,0 m) [5]. Las separaciones entre placas (4 y 6 mm) se escogieron al azar, teniendo presente que por razones constructivas y para evitar la obstrucción en el filtro por crecimiento de la biopelícula no son adecuadas separaciones menores de 3 mm y que para garantizar una superficie específica adecuada no deben exceder de 15 mm.

Como alimentación de los reactores se empleó agua residual previamente decantada, proveniente del efluente del tanque Imhoff que se utiliza como tratamiento primario en la planta de tratamiento de aguas residuales de la urbanización Villa del Viento en la ciudad de Popayán. La labor de suministro de agua residual a tratar fue realizada por una bomba de funcionamiento peristáltico con capacidad variable desde de 1 L/día hasta 20 L/día. Para el arranque del reactor no se empleó ningún inóculo diferente a los microorganismos que ya traía el agua residual previamente decantada. La construcción y evaluación del reactor anaerobio de flujo ascendente con placas paralelas se llevó a cabo en el laboratorio de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad del Cauca, con el montaje indicado en la Figura 3.

En los tres primeros meses se suministró agua residual de manera continua a los reactores. Se inició con un caudal pequeño (1,9 L/día) y se fue aumentando lentamente, semana tras semana hasta alcanzar 4,5 L/día en el tercer mes. Se hicieron los aforos y se tomaron las medidas necesarias para garantizar los tiempos de detención hidráulica. El caudal requerido para cada tiempo de detención se calculó dividiendo el volumen útil promedio de los reactores entre el

Figura 3. Montaje del reactor (sin escala)



tiempo de detención deseado y se escogieron los aforos que mas se aproximaran al valor obtenido, seleccionando en cada caso, los tiempos de encendido y parada de la bomba y la posición adecuada de la misma con respecto al nivel inferior del reactor. Durante estos 90 días iniciales no se realizaron pruebas de laboratorio, dejando que el reactor arrancara sin controles ni ayudas adicionales.

En los siguientes cuatro meses se realizaron las pruebas de laboratorio con las que se recolectó la información necesaria para que en el último mes se efectuara la evaluación de los resultados de eficiencia del reactor en la remoción de parámetros físicos y químicos y el estudio de impacto del tiempo de retención hidráulico. Dentro del periodo de pruebas de laboratorio se establecieron dos etapas: la primera de duración igual a 2 meses con tiempos de retención de 24 y 12 horas la segunda de duración igual a 2 meses con tiempos de retención de 36 y 18 horas, con periodos de evaluación un mes para cada tiempo de detención. Las mangueras de succión se revisaron permanentemente y esporádicamente se cambiaron aquellas que registraban acumulación de sólidos en su interior. La evacuación del biogás se realizó mediante orificio dotado de manguera. El gas producido no se cuantificó ni se caracterizó durante el estudio. Todos los análisis de laboratorio fueron realizados, siguiendo las técnicas, recomendaciones y procedimientos del "Standard Methods for the examination of Water and Wastewater", 20 Ed. [10]. La

tabla 1 presenta los métodos utilizados para realizar los análisis. La tabla 2 presenta las características de los reactores construidos.

Como los dos reactores tienen diferente número de placas y por ende diferente superficie específica, en consecuencia tanto el volumen útil como el porcentaje de intersticios son diferentes (estas dos últimas características dependen del número de placas). El volumen útil de cada reactor se calculó como la diferencia entre el volumen total y el volumen ocupado por las placas, mientras que el porcentaje de intersticios se calculó como el cociente entre el volumen útil y el volumen total de cada reactor.

Análisis estadístico de los datos

Los factores más relevantes en el rendimiento del reactor son el tiempo de detención hidráulica y la superficie específica. Se empleó un modelo estadístico de estructura factorial (2 factores), así: factor 1: tiempo de detención hidráulica = τ ; niveles: 12, 18, 24 y 36 horas. Factor 2: superficie específica = b ; niveles: 284 y 252 m^2/m^3 . Número de tratamientos: 8. Variables de respuesta: % de remoción de DBO_5 , % de remoción DQO y % de remoción sólidos. Modelo general: $Y_{ijk} = m + t_i + b_j + (tb)_{ij} + e_{ijk}$, donde, m = media global; t_i = efecto principal del nivel i del factor tiempo de detención hidráulica; b_j = efecto principal del nivel j del factor superficie específica; $(tb)_{ij}$ = efecto de la interacción del nivel i del tiempo de detención hidráulica con el nivel j de la superficie específica; e_{ijk} = error experimental

Tabla 1. Métodos empleados

Parámetro	Método Número	Técnica
pH	4500 H+B	Potenciométrico
Temperatura	2550B	Termómetro manual
Sólidos Suspendidos	2540D	Gravimétrico
DQO	5220D	Digestión y Espectrofotometría
DBO ₅	5210 B	Winkler
Alcalinidad	2320B	Titulación con H ₂ SO ₄

Tabla 2. Características de los reactores

Descripción	Reactor 1	Reactor 2
Espesor de placas	3 mm	3 mm
Altura total del reactor	220 cm	220 cm
Altura de las placas	180 cm	180 cm
Separación entre placas	4 mm	6 mm
Número de placas	7	6
Ancho de placas	5,8 cm	5,8 cm
Área transversal	6,1 cm x 6,1 cm	6,1cm x 6,1 cm
Volumen útil	4,51 litros	4,81 litros
Porcentaje de Intersticios	67,3%	71,8%
Superficie específica	284 m ² /m ³	252 m ² /m ³

correspondiente a la k-ésima observación del nivel i del factor tiempo de detención hidráulica y el nivel j del factor superficie específica; Y_{ijk} = k-ésima observación del nivel i del factor tiempo de detención hidráulica y el nivel j del factor superficie específica (corresponde al % de remoción de DBO₅, DQO y SS respectivamente); $i=1, 2, 3, 4$ $j=1, 2$ $k=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, \dots n$.

Se realizaron análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de comparación de Tukey, de acuerdo con las metodologías descritas por Montgomery [11]. Las expresiones correspondientes al modelo de 2 factores presentadas en [11] se procesaron en hojas de cálculo de Microsoft Excel con los datos de remoción obtenidos en la investigación.

Tabla 3. Resultados de pH (intervalo de confianza 95%)

	REACTOR 1			REACTOR 2		
	Entrada	Mitad	Salida	Entrada	Mitad	Salida
Promedio	7,77±0,211	7,71±0,173	8,04±0,178	7,74±0,155	7,7±0,123	7,9±0,119
Desviación Standard	0,599	0,491	0,504	0,396	0,314	0,303
Número de datos	31	31	31	31	31	31

Las probabilidades (p) de exceder el estadígrafo F del análisis de varianza se obtuvieron al confrontar dicho valor con $F_{\alpha}(0,05, gt, ge)$ siendo 0,05 el nivel de significancia, **gt** el grado de libertad de la interacción entre tratamientos (o tratamientos individuales cuando no hay interacción) y **ge** el grado de libertad del error. Tal cálculo se realizó utilizando la función correspondiente a la distribución F en Microsoft Excel. La hipótesis nula de igualdad entre promedios de remoción, se rechaza cuando la probabilidad de exceder el estadístico F del análisis de varianza ($P > F$) es menor del 5% ($p < 0,05$) y se infiere que el factor afecta significativamente la eficiencia de remoción del parámetro en consideración y se pasan a hacer comparaciones entre promedios mediante la prueba de Tukey; en caso contrario ($p > 0,05$), se establece que el factor en consideración no tiene un efecto significativo sobre la eficiencia de remoción.

RESULTADOS

Condiciones de operación de los reactores.

pH: la Tabla 3 muestra los resultados de pH.

El pH óptimo para llevar a cabo un proceso anaeróbico está entre 6,8 y 7,2 [12]. El pH observado tanto para el agua residual previamente decantada que se utilizó para la alimentación de los reactores como para el agua residual tratada siempre se mantuvo en el rango alcalino, con promedios mínimos de 7,7 y máximos de 8,0 (con valores individuales mínimos de 6,7 y máximos de 8,8). No se presentaron diferencias significativas en los promedios de pH registrados en los dos reactores. Las bacterias formadoras de metano tienen un pH óptimo comprendido entre 6,8 y 7,4, admitiendo valores funcionales entre 6,4 y 7,8 [13], lo que indica que en el reactor se desarrollaron condiciones adecuadas para propiciar la fase metanogénica del proceso anaeróbico. Se observó un incremento de pH, en la salida de los reactores; la misma situación fue reportada por Tonetti

et al. (2005) [14] quienes estudiando filtros anaeróbicos con medio soporte en bambú seguidos de filtros de arena, observaron aumento de pH en los efluentes de los reactores, explicando dicha situación como el desarrollo de un efecto tampón, originado por el consumo de alcalinidad en el reactor, que tiende a incrementar el pH como respuesta a transformaciones químicas propias del proceso anaeróbico como la oxidación bioquímica y destrucción de sales de ácidos orgánicos.

Temperatura: las condiciones ambientales presentes en el laboratorio permitieron mantener temperaturas con valores máximos de 23 °C y valores mínimos de 21 °C con un promedio de 22 °C durante el tiempo de evaluación de los reactores.

Alcalinidad: como parte de esta investigación exploratoria, se hizo un corto seguimiento a la alcalinidad en el reactor 1, en un periodo de observación de 14 días (n= 5 observaciones por punto). Se registraron valores de 339,4± 57,8 mg/L, 342,4± 20,8 mg/L y 309,2± 17,1 mg/L, en la entrada, mitad y salida respectivamente. Pruebas de t pareadas mostraron que no hay diferencias significativas en la alcalinidad entre la entrada y la mitad (p=0,91); sin embargo, se presenta disminución de este parámetro entre la mitad y la salida (p=0,024). La alcalinidad observada es elevada respecto a los reportes en la literatura [15], hecho que contribuyó a evitar la acidificación que es uno de los principales problemas que se presentan en los meses iniciales de funcionamiento de reactores anaeróbicos [16]. En procesos anaerobios de flujo ascendente, la alcalinidad mínima para garantizar una operación estable en la etapa de arranque debe estar por encima del 25% de la DQO [17], condición que se cumplió durante el desarrollo de la investigación.

Nutrientes: en los afluentes a reactores anaeróbicos los nutrientes deben estar presentes en cantidades adecuadas para satisfacer las necesidades de los sólidos biológicos activos. El requerimiento de nitrógeno amoniacal es de cerca del 15% de los sólidos netos, la relación mínima entre DQO nitrógeno y fósforo (como fosfatos) debe ser de 350:5:1 para aguas residuales domésticas [17]. En evaluaciones simultáneas con la presente investigación realizadas sobre las aguas residuales de la planta de tratamiento de aguas residuales de Villa del Viento, que se emplearon como alimentación del reactor, se reportaron los siguientes resultados promedio: fosfatos: 2,4 mg/L y 1,9 mg/L, nitrógeno total: 37,5 mg/L,

nitrógeno orgánico 5,38 mg/L, nitrógeno amoniacal: 32,5 mg/L [18]. El promedio de sólidos suspendidos del afluente registrado en esta investigación fue de 98 mg/L y la DQO de 438 mg/L. Bajo estas condiciones, la relación DQO: N: P, del agua residual empleada es de 438: 37.5: 2.2 y la relación entre nitrógeno amoniacal y sólidos es del 33%, lo que indica que el agua residual empleada como alimentación de los reactores mantuvo un nivel de nutrientes adecuado para el desarrollo del proceso.

Eficiencias de remoción: Los valores promedio (IC 95%) de materia orgánica y sólidos en el agua residual decantada que alimentaba el sistema fueron: 156 ± 14 mg/L de DBO₅, 438 ± 32 mg/L de DQO y 98 ± 22 mg/L de sólidos suspendidos totales. Las cargas orgánicas de alimentación del reactor fueron menores de 1 Kg DQO /m³.día, valores que se pueden considerar bajos cuando se comparan con el máximo recomendado para reactores anaeróbicos de flujo ascendente (10 Kg. DQO/m³. día [4]). Las tablas 4, 5 y 6 muestran los resultados obtenidos con respecto a la remoción de DBO₅, DQO y sólidos suspendidos en los reactores 1 y 2, respectivamente.

Remoción de DBO₅: el análisis de varianza mostró que el mayor impacto en las eficiencias de remoción de DBO₅ lo genera el tiempo de detención hidráulico (p=0,003), y que por el contrario, la superficie específica no afecta significativamente la eficiencia de remoción de la DBO₅ (p=0,8), lo que quiere decir, que prácticamente se obtiene el mismo resultado al utilizar superficies específicas de 284 m²/m³ (reactor 1, con placas a 4 mm) y de 252 m²/m³ (reactor 2 con placas a 6 mm) aunque en el 75% de los casos hay una ligera superioridad del reactor 1 sobre el reactor 2 en la remoción de DBO₅. Esto implica que la superficie específica, no constituye el único parámetro fundamental en el funcionamiento de este tipo de reactores, y que su comportamiento es similar al de un filtro anaeróbico, donde se ha constatado que a pesar de ocurrir adherencia de película biológica al medio soporte, la parte más significativa de los microorganismos se encuentra en los intersticios del lecho [5]. En este caso particular el reactor 2 tiene un porcentaje mayor de Intersticios que el reactor 1, pero menos placas, lo cual explica la similitud de los rendimientos obtenidos. Por lo tanto el reactor analizado remueve materia orgánica conjugando los principios de crecimiento adherido (sobre las placas) y crecimiento suspendido (espacios entre placas). En ambos reac-

Tabla 4. Porcentajes de remoción de DBO₅ (intervalo de confianza 95%)

Tiempo de detención	REACTOR 1				REACTOR 2			
	12 h	18 h	24h	36h	12h	18h	24h	36h
Promedio	44,67 ±11,1	44,51 ±11,4	59,05 ±10,4	57,48 ±12,2	47,67 ±14,1	41,95 ±6,66	56,91 ±9,68	56,49 ±5,79
Desviación Standard	17,95	18,49	16,78	19,81	17,61	10,75	15,61	9,35
Número de datos	10	10	10	10	11	10	11	10

Tabla 5. Porcentajes de remoción de DQO (intervalo de confianza 95%)

Tiempo de detención	REACTOR 1				REACTOR 2			
	12 h	18 h	24h	36h	12h	18h	24h	36h
Promedio	39,88 ±11,07	42,61 ±7,25	54,24 ±9,67	55,10 ±7,27	34,57 ±5,88	34,78 ±3,88	45,18 ±7,53	56,65 ±6,5
Desviación Standard	20,37	14,80	17,78	14,83	11,61	8,63	14,87	14,46
Número de datos	13	16	13	16	15	19	15	19

Tabla 6. Porcentajes de remoción de sólidos suspendidos totales (intervalo de confianza 95%)

Tiempo de detención	REACTOR 1				REACTOR2			
	12 h	18 h	24h	36h	12h	18h	24h	36h
Promedio	63,6± 14,6	69,8± 10,4	79,8± 8,5	80,9± 5,7	50,4± 9,6	52,8± 7,6	64± 11,6	66,5± 7,2
Desviación Standard	27,9	19,9	16,1	10,9	17	18,2	20,4	17,1
Número de datos	14	14	14	14	12	22	12	22

tores las mejores eficiencias promedio de remoción de DBO₅ se obtuvieron para un tiempo de detención de 24 horas (59 y 56,9%), adicionalmente, la prueba de Tukey mostró que no hay diferencias significativas al pasar de 24 a 36 horas, lo cual sugiere que no se deben emplear tiempos de detención por encima de 24 horas.

Remoción de DQO: el comportamiento de los reactores en la remoción de DQO es similar al registrado en la remoción de DBO₅; el análisis de varianza mostró que el tiempo de detención hidráulica afecta las eficiencias de remoción de DQO ($p < 0,01$). Hay incrementos en los rendimientos promedio hasta el tiempo de detención de 24 horas, y la prueba de Tukey mostró que no hay diferencias significativas entre el resultado obtenido con 24 horas y el obtenido con 36 horas, lo que implica que no es pertinente utilizar tiempos de detención por encima de las 24 horas. Las remociones de DQO son ligeramente inferiores a las de DBO₅. Los promedios

de remoción que se obtuvieron con 24 horas de tiempo de detención hidráulico son 54,2% y 45,1% respectivamente para los reactores 1 y 2, lo que sugiere que el comportamiento del reactor 1, fue superior al del reactor 2 en términos de remoción de DQO; sin embargo, en futuros experimentos será necesario probar con superficies específicas mas distantes en su magnitud, para saber el impacto real de la separación entre placas en los rendimientos del reactor.

Remoción de sólidos suspendidos: contrariamente a lo reportado por los análisis de varianza de DQO y DBO₅; el análisis de varianza para remoción de sólidos mostró que tanto el tiempo de detención hidráulico ($p = 0,0014$), como la superficie específica ($p = 0,00003$) influyen en la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos, siendo superior la remoción de sólidos obtenida en el reactor 1, de mayor superficie específica. Esto se explica, porque el reactor anaeróbico de placas para-

lelas, en términos de remoción de sólidos, se puede comportar de manera similar a un sedimentador de alta tasa, en los cuales a menor espacio entre placas se obtienen mayores eficiencias de remoción [19]. Los mejores promedios de remoción se obtuvieron para 24 y 36 horas; sin embargo, la prueba de Tukey mostró que no había diferencias significativas al comparar los promedios con 24 y 36 horas.

Teniendo presente que se utilizó agua residual decantada, las eficiencias por encima del 40% se pueden considerar altas y la remoción de sólidos se da mediante sedimentación de partículas floculentas en el lento movimiento ascensional del agua en el reactor combinado con la adherencia de sólidos biológicos a las placas para formar biopelícula, siendo dominante este fenómeno de adherencia en el reactor 1, con mayor superficie específica. El cambio en la calidad del agua residual por la eliminación de sólidos en los reactores se ilustra en la figura 4.

Trabajos realizados por Villegas *et al.* [8] con aguas residuales previamente decantadas en tanques sépticos, utilizando filtros anaeróbicos con medio soporte de grava y anillos de guadua reportaron remociones de $49,6 \pm 2,6\%$ en DQO de $56,6 \pm 2,1\%$ en DBO_5 y $62,4 \pm 2,3\%$ en SST para tiempos de detención hidráulicos de 8 horas, en condiciones climáticas similares a las registradas en esta investigación ($22\text{ }^\circ\text{C}$), pero con inoculación previa de los reactores. En un filtro anaeróbico de lecho mixto (grava y plástico) que trata las aguas residuales efluentes de un tanque séptico, Cabezas *et*

al. [20] reportaron eficiencias medias de 35% para DBO_5 , 41% para DQO y 54% para sólidos, en tiempos de detención de promedio de 10 horas, para temperatura promedio de $22\text{ }^\circ\text{C}$. En filtros anaeróbicos con medio mixto en piedra y material plástico de polipropileno que tratan efluentes de tanques sépticos, construidos en el Valle del Cauca (temperatura $>22\text{ }^\circ\text{C}$), Osorio [21] reportó eficiencias promedio de 45 a 60% en DBO_5 , y 50 al 60% en sólidos suspendidos para tiempos de detención promedio de 11 a 15 horas. Los resultados obtenidos con el reactor de placas paralelas son: $39,88 \pm 11,07\%$ y $34,57 \pm 5,88\%$ en DQO; $44,67 \pm 11,12\%$ y $47,67 \pm 14,09\%$ en DBO_5 ; $63,6 \pm 14,6$ y $50,4 \pm 9,6\%$ en sólidos suspendidos para tiempos de detención hidráulico de 12 horas, inferiores en algunos casos a las de otro tipo de reactores, pero comparables, teniendo presente que no se adicionó ningún inóculo especial y que las eficiencias reportadas corresponden al periodo comprendido entre el cuarto y séptimo mes de operación. Esto implica, que si se hace inoculación previa del reactor de placas paralelas y un seguimiento controlado por mayor tiempo, se podrán aumentar las eficiencias, de modo que compita con reactores que emplean otros tipos de material de soporte.

CONCLUSIONES

Las eficiencias de remoción de materia orgánica y sólidos suspendidos por parte del reactor anaeróbico de placas paralelas verticales en acrílico son comparables con las obtenidas utilizando otros tipos de material de soporte (grava, plástico, guadua), tanto a escala de laboratorio como a escala real en condiciones similares de temperatura y tiempo de detención. El reactor sin inoculación previa presentó remociones promedio de más del 50% para DBO_5 y DQO y superiores al 60% en sólidos suspendidos, para tiempos de detención de 24 horas. El mayor impacto en la remoción de materia orgánica es ejercido por el tiempo de detención hidráulica, mientras que el incremento de la superficie específica no afectó significativamente el rendimiento de los reactores, salvo en la remoción de sólidos suspendidos que se incrementó al aumentar el número de placas. Se requiere mas investigación, con un control mas riguroso de las condiciones de operación y arranque para determinar la eficacia máxima que pueden tener estos reactores, así mismo, con la misma configuración de placas paralelas, se requiere probar materiales que

Figura 4. Cambio en la apariencia del agua residual por efecto del tratamiento con el reactor (entrada, mitad y salida).



cumpliendo los requisitos para ser medio soporte, sean mas económicos que el acrílico. También se sugiere probar el reactor con otro tipo de efluentes como los de rallanderías o mataderos previamente homogeneizados, dado que al tener mayor carga orgánica es posible que se obtengan rendimientos satisfactorios.

AGRADECIMIENTOS

A la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Cauca, por la financiación y apoyo logístico del proyecto. A los Ingenieros: Danharry Martínez, Dairo Burbano, Yudy Calvache y Jaime Cárdenas, por su colaboración en el desarrollo de este trabajo. Al grupo de Investigación en Ingeniería Ambiental de la Universidad del Cauca, por su aporte académico y positiva crítica en la producción de documentos.

REFERENCIAS

- [1] COLOMBIA, MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Programa de Saneamiento de Vertimientos Municipales. Bogotá, 2008. [Texto de internet]. Disponible: <http://www.minambiente.gov.co/contenido/contenido.aspx>. [Citado 19 de julio de 2009].
- [2] PENAGOS, F. Priorización para implementar proyectos con recursos del fondo de descontaminación hídrica en el Cauca, Unidad de documentación CRC, Popayán, 2002, p. 2- 8
- [3] TCHOBANOGLOUSS, G; CRITES, R. Tratamiento de Aguas Residuales en pequeñas poblaciones. Traducción 1a edición. Editorial McGraw Hill, Bogotá, 2000, p. 445-453
- [4] VEENSTRA, S Y POLPRASERT, C. Waste water engineering. Notes Postgraduate course in Sanitary Engineering, First Edition, IHE, Netherlands, Delft, 1995. Cap. 10, p.1-7
- [5] CAMPOS, J.R. Projeto e operacao de filtros anaerobios para tratamento de efluentes líquidos industriais. Taller regional sobre tratamiento anaerobio de aguas residuales en América Latina-México DF, 1990, p. 133-137
- [6] CAMPOS, J.R. Alternativas para tratamiento de esgotos sanitarios. Memorias primer curso de reciclagem em saneamento, recursos hídricos e meio ambiente. Consorcio Intermunicipal das Bacias dos Rios Piracicaba e Capibari, 1990, p. 45-47.
- [7] 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. *Scientia et Technica*. 9 (23), 2003, p. 75-80.
- [8] VILLEGAS, G; GUERRERO, J; CASTAÑO, J; *et al*. Septic Tank (ST)-Up Flow Anaerobic Filter (UFAF) - Subsurface Flow Constructed Wetland (SSF-CW) systems aimed at wastewater treatment in small localities in Colombia. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*. 29 (3), 2006, p.269-281.
- [9] MANARIOTIS, I.; GRIGOROPOULOS, S. M. Municipal waste water treatment using Up flow-Anaerobic filters. *Water environment research*. 78 (3), 2006, p. 233-242.
- [10] APHA, AWWA, WEF. Standard methods for the examination of water and wastewater. 20 Ed., Washington, 1998, p. 2-27,2-55,2-61,5-3,4-87,5-17.
- [11] MONTGOMERY, D. Diseño y análisis de Experimentos. Segunda Edición. Universidad estatal de Arizona. Editorial Limusa. México, 2004. pp. 96,97, 175-194
- [12] CID, D; NOYOLA, A; MORGAN, J. Tratamiento de agua residual municipal mediante biorreactores anaerobios de membrana a escala piloto. Memorias: XV Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. Instituto de Ingeniería UNAM. Coyoacán, México. Mayo 2006, p. 1-10
- [13] ROMERO, J. Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño.3a edición. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, 2005, 789 p.
- [14] TONETTI, A; CORAUCSI, B. Organic matter and total coliform removal and nitrification in the treatment of domestic wastewater by sand filter. *Revista de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. 3 (10), 2005, p.209-218
- [15] METCALF and EDDY. Wastewater Engineering. Treatment, disposal and reuse. Mc Graw Hill, Third Edition, 1991, p. 134
- [16] PACHECO, J; MAGAÑA, A. Arranque de un reactor anaerobio. *Ingeniería Revista Académica. Universidad Autónoma de Yucatán*. 7 (1), 2003. p. 21-25.
- [17] YOUNG, C.J. and YANG, B.S. Design considerations of full scale anaerobic filters. *Journal of Water Pollution Control Federation*. 61, p. 1576-1587

- [18] REBELLÓN, L; RODRIGUEZ, P. Reuso de aguas residuales domésticas Tratadas con Tanque Imhoff y Filtro anaeróbico. Caso Villa del Viento. Revista Ingeniería Hoy No 25. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad del Cauca. 25, 2006, p. 87-98
- [19] ARBOLEDA, J. Teoría y Práctica de la purificación del Agua. Tercera edición. Tomo 1, Bogotá (Colombia), 2000, p. 239-247
- [20] CABEZAS, C; CAMACHO, D; JIMÉNEZ, A. Evaluación de un filtro anaeróbico con lecho mixto. Revista Ingeniería Hoy. 25, 2006, p. 17-30
- [21] OSORIO, P. Sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas empleados por la CVC en el sector rural del departamento del Valle del Cauca- Colombia. Memorias seminario Internacional sobre métodos naturales para tratamiento de aguas residuales. Cartagena, 2003, p.162-168