
Alternativas de tratamiento biológico aerobio para el agua residual doméstica del municipio de Cali, Colombia

Patricia Torres-Lozada^{1*}, Nancy Vásquez-Sarria², Andrea Pérez-Vidal³,
Carlos A. Madera- Parra⁴, Jenny A. Rodríguez-Victoria⁵
Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, Universidad del
Valle, Calle 13 No. 100 – 00 A.A. 25360 Santiago de Cali, Colombia

*Evaluation of aerobic biological treatment alternatives for the
treatment of municipal wastewater of Cali, Colombia*

*Alternatives de tractament biològic aerobi per a l'aigua residual
domèstica del municipi de Cali, Colòmbia*

Recibido: 18 de agosto de 2011; revisado: 15 de noviembre de 2011; aceptado: 3 de diciembre de 2011

RESUMEN

Con el fin de evaluar el desempeño de diferentes alternativas biológicas para el tratamiento del agua residual doméstica del municipio de Cali, se estudiaron a escala de laboratorio diferentes modalidades del sistema de lodos activados (convencional, aireación extendida, estabilización por contacto y adsorción bio-oxidación - sistema A/B) y un sistema de biodiscos. El estudio mostró la potencialidad de los sistemas de lodos activados y biodiscos como alternativas de tratamiento secundario del efluente primario convencional de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cañaveralejo, perteneciente a la ciudad, ofreciendo eficiencias de reducción promedio de DQO, DBO₅ y SST superiores al 80%, cumpliendo con la normatividad colombiana para el vertimiento de agua residual a cuerpos receptores. Entre los sistemas de lodos activados evaluados, las modalidades convencional y estabilización por contacto mostraron el menor requerimiento de área comparadas con las modalidades de aireación extendida y A/B; adicionalmente, los inconvenientes operacionales presentados con las modalidades convencional y estabilización por contacto fueron minimizados por su flexibilidad y rápida adaptabilidad a los cambios, siendo las opciones más atractivas como alternativa de tratamiento secundario del agua residual doméstica generada en la ciudad de Cali.

Palabras claves: Agua residual doméstica, Biodiscos, Biomasa adherida, Biomasa en suspensión, Lodos activados, Tratamiento secundario

SUMMARY

In order to evaluate the performance of different biological alternatives for the treatment of municipal wastewater of Cali city, it was studied at bench scale, different modalities of the activated sludge system (conventional, extended-

aeration, contact-stabilization, adsorption-bio-oxidation-System -A/B) and a Rotating-Biological-Contactor-system. The study showed the potential of activated sludge and rotating-biological-contactor systems as alternatives for the secondary treatment of the conventional primary effluent from the Wastewater-Treatment-Plant of Cañaveralejo belonging to the city, offering average reduction efficiencies of COD, BOD₅ and TSS over 80%, complying with the Colombian regulation requirements for wastewater discharges to water bodies. Between the activated sludge systems evaluated, the conventional and contact-stabilization process met the lowest area requirement compared with extended-aeration and A/B systems; in addition, the operational difficulties that occurred with conventional and contact-stabilization systems were minimized by their flexibility and rapid adaptability to changes, being the most attractive options as alternatives to secondary treatment of municipal wastewater generated in Cali City.

Key words: Activated sludge, Attached biomass, Municipal wastewater, Rotating Biological Contactor, Secondary treatment, Suspended biomass.

RESUM

Per tal d'avaluar l'acompliment de diferents alternatives biològiques per al tractament de l'aigua residual domèstica del municipi de Cali, es van estudiar a escala de laboratori diferents modalitats del sistema de fangs activats (convencional, aireació perllongada, estabilització per contacte i adsorció bio-oxidació - sistema A / B) i un sistema de biodiscs. L'estudi va mostrar la potencialitat dels sistemes de fangs activats i biodiscs com alternatives de

*autores para la correspondencia: ¹patricia.torres@correounivalle.edu.co; ²navasari1@gmail.com; ³andreapezvidal@hotmail.com; ⁴ carlos.a.madera@correounivalle.edu.co ; ⁵ jenny.rodriguez@correounivalle.edu.co

tractament secundari de l'efluent primari convencional de la Planta de Tractament d'Aigües Residuals de Cañaveralejo, pertanyent a la ciutat, que proporciona eficiències de reducció mitjana de DQO, DBO5 i SST superiors al 80%, complint amb normativa colombiana per a l'abocament d'aigua residual a cossos receptors. Entre els sistemes de fangs activats avaluats, les modalitats convencional i d'estabilització per contacte van mostrar un requeriment de superfície menor, comparades amb les modalitats de ventilació estesa i A / B; adicionalment, els inconvenients operacionals que presenten les modalitats convencional i d'estabilització per contacte van ser minimitzats per la seva flexibilitat i ràpida adaptació als canvis, i van ser les opcions més atractives com alternativa de tractament secundari de l'aigua residual domèstica generada a la ciutat de Cali.

Paraules clau: Aigüa residual domèstica, biodiscs, biomassa adherida, biomassa en suspensió, fangs activats, tractament secundari.

1. INTRODUCCIÓ

Los principales objetivos de los sistemas de tratamiento biológico son la coagulación y eliminación de los sólidos coloidales no sedimentables y la estabilización de la materia orgánica (Metcalf y Eddy, 2003); estos sistemas son concebidos con base en procesos anaerobios, aerobios o anóxicos. Los aerobios se ubican dentro de las alternativas más ampliamente utilizadas, siendo los sistemas de lodos activados los más comunes (Mendonça, 2002; von Sperling, 2007); el sistema de biodiscos también se ha identificado como una opción viable de tratamiento a medida que se han superado los problemas operacionales que lo hacen vulnerable (Mba et al., 1999; Patwardhan, 2003).

En el sistema de lodos activados los microorganismos responsables de la conversión de la materia orgánica y otros constituyentes del agua residual se mantienen en suspensión en el líquido (Grady et al., 1999); este sistema es muy flexible y se puede adaptar para el tratamiento de diversos tipos de aguas residuales, mostrándose eficiente en la reducción de materia orgánica y nutrientes (von Sperling, 2007). Dependiendo del tipo de diseño y modo de operación, se puede clasificar en diferentes modalidades (convencional, estabilización por contacto, aireación extendida, alimentación escalonada, alta tasa, adsorción bio-oxidación (Sistema A/B), zanjas de oxidación, entre otros) (Metcalf y Eddy, 2003), con cuatro factores en común (Grady et al., 1999):

- Presencia de una masa floculenta de microorganismos denominada sólidos suspendidos en el licor mixto (SSLM), que es utilizada para transformar la materia orgánica soluble y en suspensión presente en el agua residual
- Sedimentador para separar los SSLM
- Recirculación de los sólidos sedimentados para mantener una concentración adecuada de microorganismos
- Purga del lodo de exceso para garantizar un tiempo de retención celular (TRC) adecuado

Los sedimentadores secundarios ejercen un papel fundamental en el proceso, permitiendo la salida del efluente clarificado, la concentración de los sólidos suspendidos en el fondo y la recirculación del lodo concentrado al tanque de aireación. Sin embargo, una prolongada perma-

nencia de los sólidos en el sedimentador puede favorecer procesos de desnitrificación, que durante la liberación de nitrógeno gaseoso pueden arrastrar los flocs filamentosos del lodo, perturbando la sedimentación e interfiriendo en la calidad del efluente (Chaves, 2003; Nuhoglu et al., 2005).

La recirculación del lodo (Q_r) afecta el TRC, pero no afecta el tiempo de retención hidráulico (TRH) ya que el balance del caudal de agua residual permanece constante (entrada = salida). Esta condición permite operar a velocidades de dilución mayores que el valor correspondiente a la tasa específica de crecimiento de los microorganismos (TRC superiores al TRH), lo que conlleva a que los sistemas con recirculación presenten mayor eficiencia de reducción de materia orgánica comparado con los sistemas sin recirculación para un mismo volumen de reactor. El Q_r depende fundamentalmente de la calidad del lodo presente en el sedimentador secundario; cuanto más concentrado sea, menor será el valor de Q_r . Los sólidos suspendidos totales (SST) para Q_r varían normalmente entre 8000 y 12000 mg·L⁻¹, se recomiendan relaciones Q_r/Q desde 0.5 para los diferentes sistemas de lodos activados (von Sperling, 2007).

Los biodiscos o contactores biológicos rotatorios (RBC por sus siglas en inglés) son sistemas aerobios de biomasa adherida desarrollados a inicios del siglo XX para el tratamiento biológico del agua residual domèstica; sin embargo, su comercialización, investigación e instalación se presentó en 1970 en Alemania y Estados Unidos (Brazil, 2006) y se ha convertido en una buena opción para el tratamiento de aguas residuales domèsticas de pequeñas comunidades (Droppelmann, 2001). Su configuración consiste básicamente en una serie de discos montados sobre un eje horizontal rotatorio y sumergidos parcialmente en un tanque por donde fluye el agua residual (Patwardhan, 2003).

La secuencia del proceso biológico en el sistema de biodiscos inicia con dos etapas definidas como adherencia y adsorción; en la primera los microorganismos presentes en el agua residual comienzan a adherirse al disco formando la película biológica y en la segunda, el agua residual pasa a través del biodisco, arrastrando los sólidos coloidales y solubles, mediante enlaces físicos y químicos, proporcionando la materia orgánica que será utilizada como alimento por parte de los microorganismos (Ávila y Ramírez, 1989).

Al girar los discos, la película biológica adherida a ellos entra en contacto alternadamente con el agua residual que está en el tanque y con el oxígeno atmosférico, mecanismo que también favorece la oxigenación del sistema por difusión a través de la película líquida que ha sido incorporada a la biomasa debido al arrastre (Castillo y Vivas, 1996), dando lugar a tres etapas adicionales que integran la secuencia del proceso y que involucran la biodegradación aerobia de la materia orgánica, entre otros aspectos: 1) Transformación biológica y oxidación, donde los microorganismos mediante la respiración metabolizan las estructuras orgánicas que han sido adsorbidas en la etapa de Adsorción; 2) Disolución de los productos de oxidación, en la cual los desechos producidos por acción de la oxidación, son disueltos en la capa líquida que rodea la película biológica, de la cual se desprenden compuestos amoniacales, anhídrido carbónico y agua; 3) Descomposición de compuestos amoniacales, desarrollada por la acción de los microorganismos nitrificantes en las etapas finales del sistema, donde la carga orgánica ha sido eliminada considerablemente (Ávila y Ramírez, 1989).

Debido a que en el inicio de la etapa de adherencia se cuenta con cantidad suficiente de nutrientes y de oxígeno, los microorganismos crecen aceleradamente aumentando el espesor de la biopelícula formada. Sin embargo, a medida que ésta crece, el oxígeno y los nutrientes son consumidos por la población microbiana que se encuentra sobre la superficie del disco, sin embargo el oxígeno no penetra todo el espesor de la biopelícula por lo que se establece un ambiente anaerobio en su interior (Castillo y Vivas, 1996). La película biológica llega a tener un espesor de 3 a 4 mm antes de comenzar su desprendimiento o etapa de Regulación de la biomasa, dinámica que favorece el tratamiento, ya que permite una separación entre discos consecutivos no mayor a 2 cm y por consiguiente el manejo de área superficial elevada en una longitud corta (Ávila y Ramírez, 1989). Los biodiscos requieren un pretratamiento o clarificación primaria y debido a la etapa final de autorregulación o desprendimiento de la biomasa, se hace necesario un sedimentador secundario para su separación (Díaz, 2002).

En torno a la problemática de contaminación que presenta el Río Cauca, receptor del efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cañaveralejo (PTAR-C) del municipio de Cali, en este estudio se muestran los resultados obtenidos en la evaluación a escala de laboratorio de cinco alternativas de tratamiento biológico aerobio, cuatro de crecimiento en suspensión (lodos activados) y una de crecimiento adherido (biodiscos) con el objetivo de establecer la potencialidad de aplicación de estos sistemas biológicos aerobios como opción de tratamiento secundario para el efluente primario procedente de la PTAR-C.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Unidades experimentales

El estudio se realizó a escala de laboratorio y se evaluaron cuatro alternativas de crecimiento en suspensión y una de crecimiento adherido: lodos activados convencional, lodos activados por aireación extendida, lodos activados

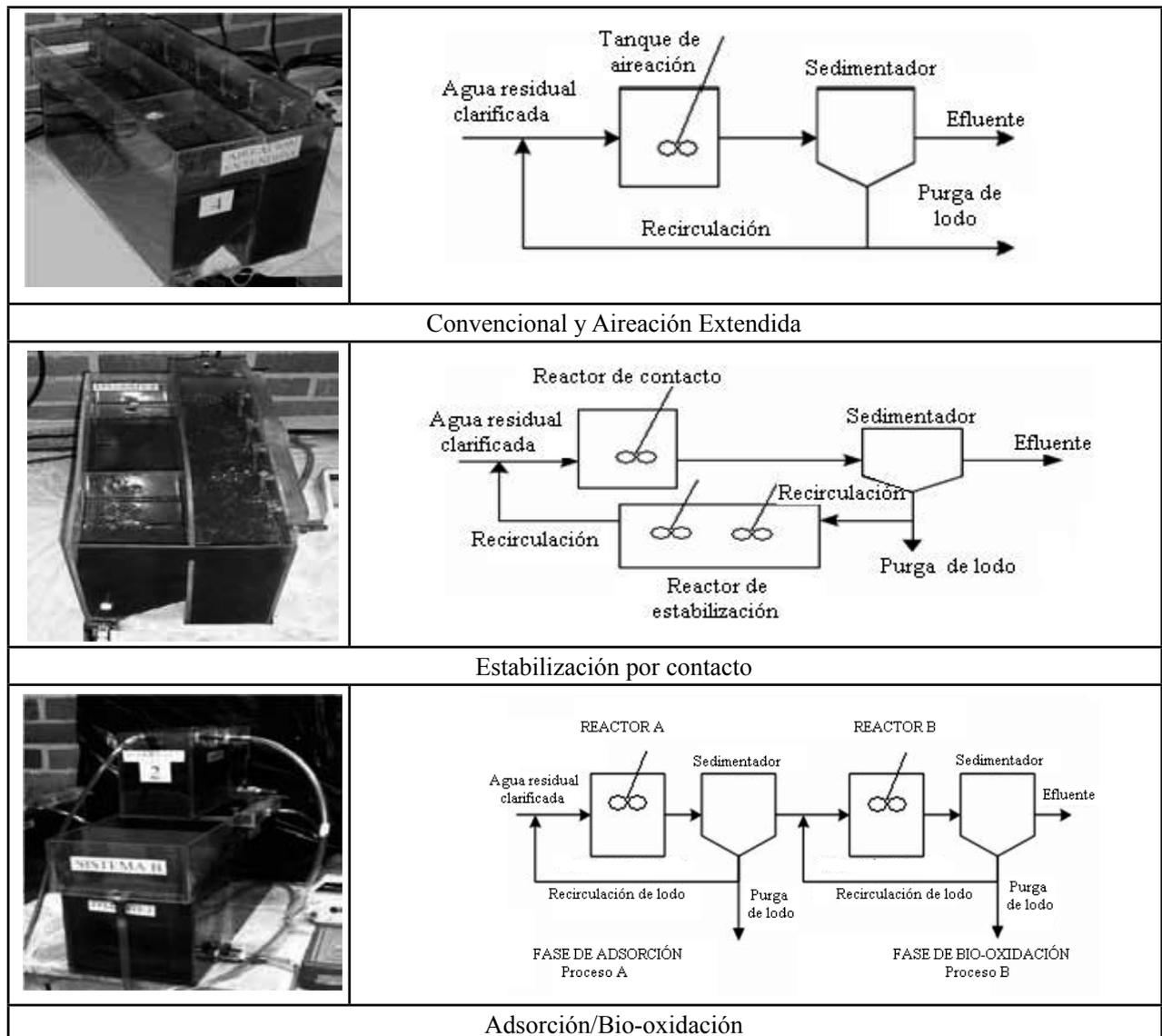


Figura 1. Diagrama general de las modalidades de lodos activados evaluadas a escala de laboratorio

de estabilización por contacto, lodos activados por Adsorción/Bio-oxidación o sistema A/B y Biodiscos.

Los reactores fueron construidos en acrílico transparente de 5 mm de espesor, diseñados con volúmenes entre 10 y 14.5 litros. La Tabla 1 detalla los volúmenes de las unidades que conformaron cada sistema de tratamiento. Se resalta que los reactores fueron alimentados con agua residual previamente clarificada.

2.1.1 Sistemas de lodos activados

La Figura 1 muestra los diagramas generales de los sistemas de lodos activados. Para el sistema de aireación de los reactores, se utilizó un soplador regenerativo de 12 salidas adaptadas con difusores de burbuja fina y válvulas de control de aire para garantizar una adecuada transferencia de oxígeno a las unidades. Los sedimentadores secundarios fueron acondicionados con un dispositivo de forma cónica que mejoró la concentración y recirculación del lodo. Los sistemas de lodos activados en las modalidades convencional, aireación extendida y estabilización

por contacto operaron con una recirculación continua que varió entre el 40 y 100%; para el sistema A/B se empleó recirculación puntual de lodo con una frecuencia de dos veces al día (mañana y tarde), cuyos volúmenes dependían de la cantidad de lodo acumulados en el sedimentador. La alimentación y recirculación de los reactores fue realizada con bombas peristálticas Masterflex® análogas de velocidad variable.

2.1.2 Sistema de biodiscos

El reactor constaba de dos etapas de discos para la operación en serie o en paralelo, cada una con su respectivo sedimentador secundario. Cada etapa contó con 20 discos de 7.5 cm de diámetro, sumergencia del 40% y una separación entre discos de 1.5 cm, los cuales se construyeron en acrílico corrugado para favorecer la adherencia de la biopelícula. La rotación de los discos se realizó mediante un motor de rotación constante a 1 r.p.m. En la Figura 2 se muestra un esquema del sistema de biodiscos.

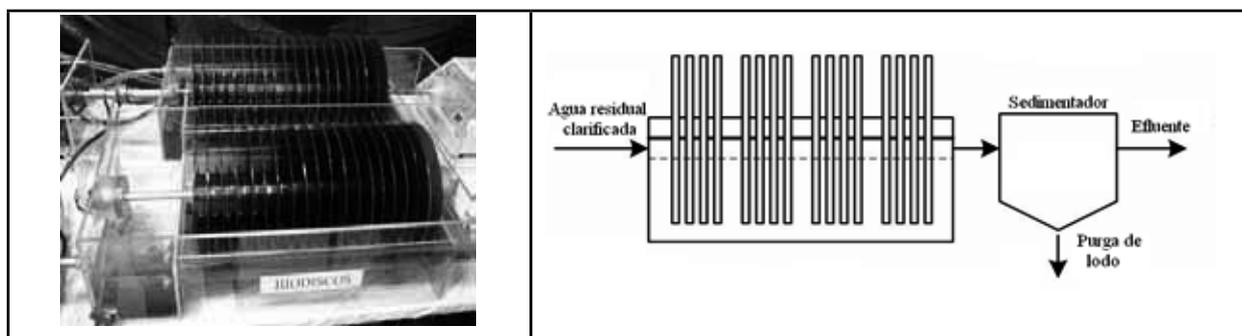


Figura 2. Diagrama general del sistema de biodiscos evaluado a escala de laboratorio

Tabla 1. Volumen de las unidades de los sistemas de tratamiento

Sistema de Tratamiento	Unidades	Volumen (L)
Convencional	Reactor	9.8
	Sedimentador secundario	7.8
Aireación extendida	Reactor	10.0
	Sedimentador secundario	6.3
Estabilización por contacto	Reactor de Contacto	3.5
	Reactor de Estabilización	6.9
	Sedimentador Secundario	6.3
Adsorción-Bio-oxidación (sistema A/B)	Reactor A	2.5
	Sedimentador Secundario 1	1.1
	Reactor B	12.0
	Sedimentador Secundario 2	4.5
Contactor biológico rotatorio – RBC o Biodiscos*	Biodiscos cada etapa	5.0
	Sedimentador secundario	1.0

* Dotado de dos etapas de discos para la operación en serie o en paralelo. En este estudio se operó solo una etapa con su respectivo sedimentador secundario.

2.2 Evaluación de los sistemas de tratamiento

2.2.1 Agua Residual

Se empleó como afluente a los sistemas, el agua residual cruda que ingresa a la PTAR-C, la cual fue sometida a un proceso previo de sedimentación convencional. El proceso de sedimentación se llevó a cabo con un TRH de 2 horas en un tanque de 1 m³ de capacidad; el agua clarificada se almacenaba en un tanque de 0.5 m³ para la alimentación diaria de los reactores.

2.2.2 Inóculo

Se desarrolló una etapa previa de crecimiento del lodo aerobio en batch que tuvo una duración de 30 días. Esta etapa consistió en proporcionar aireación al agua residual de tal manera que se simularan las condiciones de un reactor aireado y se favoreciera el crecimiento de bacterias, protozoos (ciliados, principalmente) y micrometazoarios (rotíferos, nemátodos y anélidos) que son los microorganismos típicos de sistemas de lodos activados (Madoni, 1994; Zhou et al., 2008). Una vez alcanzada la cantidad de inóculo necesaria para el arranque de los reactores (22.6 L de lodo concentrado), se procedió a la inoculación de los mismos. Para los sistemas de lodos activados se garantizó una concentración de sólidos suspendidos volátiles (SSV) en

el licor mixto alrededor de 3100 mg.L⁻¹ (aprox. 50% del volumen útil del reactor), valor que se encuentra dentro del rango promedio recomendado para todas las modalidades de lodos activados, que puede variar típicamente entre 1000 y 4000 mg.L⁻¹ dependiendo de las características del agua residual a tratar (Orozco, 2005). Para el sistema de biodiscos se adicionaron 10 litros de lodo, volumen suficiente para garantizar su contacto con toda el área superficial de los discos, el lodo acumulado en el fondo del sistema era evacuado gradualmente para evitar su descomposición. El lodo de inóculo presentó una concentración de SST de 8197 mg.L⁻¹ y SSV de 6148 mg.L⁻¹, equivalentes a una relación SSV/SST de 0.75.

2.2.3 Operación de los reactores

Se realizó por un periodo de 164 días, la cual consistió en la disminución gradual del TRH, teniendo como control la estabilidad de los sistemas, en términos de las eficiencias de reducción de DQO, DBO₅ y SST para todos los sistemas, carga orgánica volumétrica (COV), relación alimento microorganismos (A/M), sólidos suspendidos volátiles en el licor mixto (SSVLM) y Tiempo de retención celular (TRC) para los sistemas de lodos activados y carga orgánica (C.O) y carga hidráulica superficial (CHS) para el sistema

Tabla 2. Características del agua residual cruda de la ciudad de Cali y el agua clarificada usada como afluente a los reactores

Variable	Agua residual cruda					Agua residual clarificada					
	Min.	Prom.	Máx.	σ	n	Min.	Prom.	Máx.	σ	n	
Intervalo de pH (unidades)	6,0 - 10,0					5,4 - 8,0					118
Alcalinidad (mg.CaCO ₃ .L ⁻¹)	118	169	215	20	234	71	180	290	41	84	
DQO Total (mg.L ⁻¹)	235	490	802	107	243	92	286	755	119	68	
DBO ₅ Total (mg.L ⁻¹)	114	238	463	52	238	71	164	294	60	22	
Relación DBO/DQO	0.3	0.50	0.8	0.1	236	0.3	0.6	0.9	0.1	20	
SST (mg.L ⁻¹)	102	194	402	47	245	18	81	300	52	60	
SSV (mg.L ⁻¹)	74	131	223	52	238	2	74	300	44	49	
Relación SSV/SST	0.4	0.7	0.9	0.1	245	0.1	0.9	1.0	0.2	49	

Min: Mínimo, Prom: Promedio, Max: Máximo, σ : Desviación estándar, n: Numero de datos

Tabla 3. Condiciones operacionales evaluadas en los sistemas

Sistema	Rango evaluado TRH (h)	SSVLM (mg.L ⁻¹)	COV (kgDBO ₅ .(m ³ .d) ⁻¹)	Relación A/M (kgDBO ₅ .(kgSSVLM.d) ⁻¹)	TRC (d)
Convencional	4.0 - 8.0	956 - 1272	0.44 - 2.52	0.78 - 0.96	5 - 7
Aireación extendida	30.0 - 8.0	578 - 1545	0.11 - 0.62	0.16 - 0.43	14 - 45
Estabilización por contacto - Total	13.1 - 2.5		0.30 - 3.40	0.40 - 2.50	1 - 14
- Reactor de contacto	3.3 - 0.5	882 - 2332			
- Reactor de estabilización	9.8 - 2.0	792 - 2871			
Sistema A/B - Total	34.0 - 5.8				
- Reactor A (RA)	4.0 - 1.0	722 - 1816	0.56 - 3.81	0.60 - 2.37	1 - 8
- Reactor B (RB)	30.0 - 4.8	578 - 860	0.004 - 0.12	0.01 - 0.15	16 - 30
Biodiscos	22.0 - 0.8	CHS (m ₃ .(m ² .d) ⁻¹)		CO (gDBO ₅ .(m ² .d) ⁻¹)	
		0.006 - 0.169		1.09 - 36.22	

TRH: Tiempo de retención hidráulico, SSVLM: Sólidos Suspendidos Volátiles en el Licor Mixto, COV: Carga orgánica volumétrica, A/M: Alimento/Microorganismos, TRC: Tiempo de retención celular

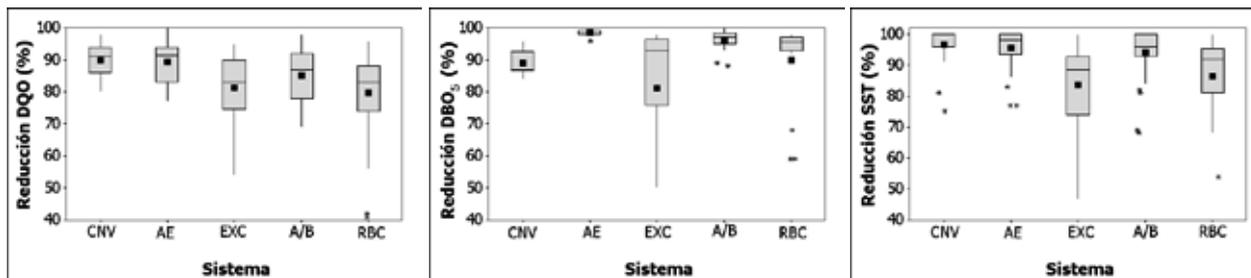


Figura 3. Eficiencias de reducción de DQO, DBO₅ y SST
 CNV: Convencional, AE: Aireación extendida, EXC: Estabilización por contacto

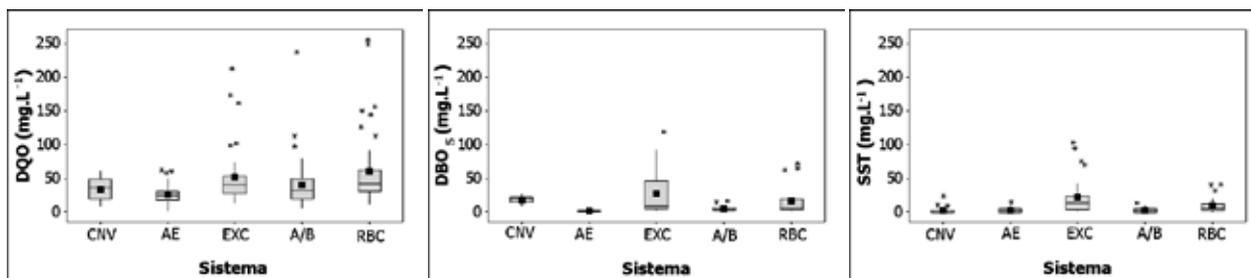


Figura 4. Concentración de DQO, DBO₅ y SST en el efluente de los sistemas
 CNV: Convencional, AE: Aireación extendida, EXC: Estabilización por contacto
 A/B: Adsorción / Bio-oxidación, RBC: Biodiscos

de biodiscos, el cual fue operado con una etapa de biodiscos y un sedimentador secundario al final del proceso.

2.2.4 Seguimiento y control del sistema

Se tomaron muestras puntuales en el afluente y efluente de los reactores, del licor mixto en los tanques de aireación de los sistemas de lodos activados y del lodo recirculado y purgado. Las variables medidas fueron pH, temperatura, alcalinidad, OD, DBO₅ Total, DQO Total, SST y SSV, los cuales fueron realizados según APHA, AWWA y WEF (2005). Para el análisis de los datos se utilizaron herramientas de estadística descriptiva utilizando el programa estadístico Minitab 14®, el cual se ejecutó durante su periodo de libre acceso.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con Metcalf y Eddy (2003), el agua residual presentó una composición típica de agua residual doméstica de mediana a baja concentración, con un alto contenido de materia orgánica biodegradable, reflejado en una relación DBO₅/DQO superior a 0.5 y un adecuado nivel de nutrientes para el desarrollo de procesos biológicos aerobios, indicado por una relación DBO₅:N:P promedio de 100:20:8 (en el agua residual clarificada afluente a los reactores), valor que es superior al mínimo requerido para este tipo de procesos (Rittmann y McCarty, 2001). En la Tabla 2 se presentan las principales características del afluente. Respecto al proceso de clarificación que se realizó al agua residual cruda, se obtuvieron eficiencias de reducción promedio de 42, 31 y 58% para DQO Total, DBO₅ Total y SST, respectivamente, valores que estuvieron dentro del rango de las eficiencias alcanzadas por el proceso de tratamiento primario realizado en la PTAR-C, lo que garantizó la represen-

tatividad de los datos de calidad del agua residual afluente a los sistemas evaluados y además, acorde con los exigencias de un nivel de tratamiento primario (Metcalf y Eddy, 2003).

La Tabla 3 muestra los rangos operacionales evaluados para cada sistema, los cuales en general tuvieron en cuenta las recomendaciones de la literatura. Con relación a los SSVLM, debido a las características del agua residual (mediana a baja concentración), a medida que se estabilizaron los sistemas de lodos activados, las concentraciones fueron bajas y cercanas a 500 mg.L⁻¹, valor que de acuerdo con Grady et al. (1999) es la concentración mínima requerida para que ocurran procesos de biofloculación en un sistema de lodos activados.

Los valores de carga aplicada medida como COV y relación A/M en los sistemas de lodos activados, se basaron en las características de cada modalidad, los cuales pueden variar entre 0.1 y 10 kgDBO₅.(m³.d)⁻¹ y entre 0.05 y 10 kgDBO₅.(kgSSVLM.d)⁻¹, respectivamente. El reactor de biodiscos presentó valores de CHS y CO dentro de los valores típicos recomendados, los cuales se encuentran entre 0.06 y 0.24 m³.(m².d)⁻¹ para CHS y entre 3.1 y 20 gDBO₅.(m².d)⁻¹ para CO (Metcalf y Eddy, 2003; Rittmann y McCarty, 2001).

Durante las diferentes condiciones operacionales se obtuvieron eficiencias de reducción de DQO, DBO₅ y SST del agua residual clarificada alrededor del 80%, tal como puede apreciarse en la Figura 3. Este comportamiento evidencia la potencialidad de aplicación de todas las tecnologías evaluadas para el tratamiento secundario del efluente primario convencional de la PTAR-C, permitiendo garantizar las eficiencias establecidas por el decreto 1594 de 1984 que regula el uso del agua y los vertimientos de residuos líquidos sobre cuerpos receptores.

La Figura 4 muestra las concentraciones promedio de DQO, DBO₅ y SST obtenidas en el efluente de los sistemas de tratamiento, las cuales fueron menores a 50 mg.L⁻¹. De acuerdo con estudios realizados por Oliveira y von Sperling (2008), estas concentraciones representan una buena calidad de efluente, suficiente para cumplir con estándares de calidad adoptados por diferentes estados de Brasil y algunos países en desarrollo donde se han establecido concentraciones máximas para DQO de 200 mg.L⁻¹, DBO₅ de 60 mg.L⁻¹ y SST de 60 mg.L⁻¹.

Aunque los sistemas mostraron un comportamiento similar en cuanto a calidad del efluente y eficiencias de reducción de materia orgánica, cada uno presentó una mejor respuesta frente a determinadas condiciones de operación, lo que representó un aspecto importante para la selección desde el punto de vista operacional de las alternativas más apropiadas para el tratamiento del efluente primario convencional de la PTAR-C.

La modalidad convencional obtuvo el mejor desempeño con TRH de 8 h; sin embargo, en un rango de operación entre 4 y 6 h se pueden obtener resultados favorables, con eficiencias de reducción de DQO, DBO₅ y SST superiores al 80%. Para el TRH de 2 h aunque el sistema logró un buen desempeño; se observó una marcada susceptibilidad del sistema a sobrecargas hidráulicas, razón por la cual no se recomienda esta condición operacional.

La modalidad de aireación extendida presentó respuestas favorables a sobrecargas orgánicas durante todas las condiciones evaluadas y logró operar eficientemente con un TRH de 8 h, el cual es menor al mínimo recomendado para esta modalidad (16 h). El rango óptimo de operación se encontró entre 16 y 12 h, en los cuales las eficiencias alcanzadas en la reducción de DQO, DBO₅ y SST se mantuvieron alrededor del 90%.

El desempeño presentado por los sistemas convencional y aireación extendida, estuvo acorde con los valores reportados por Oliveira y von Sperling (2005) para sistemas de lodos activados en estas modalidades, tratando agua residual doméstica, cuyas eficiencias de reducción promedio reportadas fueron de 81, 85 y 76 % para DQO, DBO y SST, respectivamente.

Para la modalidad de estabilización por contacto el rango óptimo de operación, se encontró para un TRH_{Total} (TRH_{RC}+TRH_{RE}) entre 3.3 y 5.0 horas, lo que en comparación con las otras modalidades evaluadas, representa un menor requerimiento de área. De acuerdo con Sarioglu et al. (2003) respecto a la modalidad convencional esta reducción puede estar alrededor de un 30%, debido principalmente a que en el RE se pueden llegar a manejar elevadas concentraciones de SSVLM que también es una variable que permite reducir los volúmenes de tratamiento. Para esta modalidad se observó un comportamiento favorable frente a sobrecargas orgánicas (valores de COV superiores a 1.2 kgDBO₅.(m³.d)⁻¹), las cuales no afectaron la calidad del efluente. Ante sobrecargas hidráulicas, evidenciadas durante la evaluación del TRH_{Total} de 2.5 h (TRH de 0.5 h en RC y 2 h en RE), se presentó una disminución del desempeño, ya que debido a los bajos TRH, se requería de un mayor control y mantenimiento de los difusores de aire y de las tuberías y mangueras de conducción y descarga. Se observó que cualquier obstrucción en las mangueras o mal funcionamiento de los aireadores ocasionaba que el agua residual sin adecuado tratamiento, saliera con el efluente del sistema, deteriorando la calidad del mismo. Por otro lado, los elevados caudales también

generaban el arrastre de pequeños flocs que incrementaban la materia orgánica en el efluente aumentando los sólidos, lo que generó que se reportaran picos de SST alrededor de 100 mg.L⁻¹.

El sistema A/B obtuvo el mejor desempeño para un rango de TRH_{Total} entre 8.7 y 5.8 horas; en términos de proceso, presentó un comportamiento similar al reactor de estabilización por contacto, puesto que debido a los bajos TRH en RA, se favorecieron procesos de bio-adsorción en este reactor. Por otro lado, de acuerdo con Brazil (2006) esta modalidad tiene la ventaja de favorecer procesos de nitrificación en RB que mejoran la calidad del efluente final; sin embargo, al requerir una línea de sedimentación intermedia entre ambos reactores, incrementa el requerimiento de área y la complejidad de operación del sistema.

Otro aspecto observado para el sistema A/B, correspondió a las eficiencias promedio de DQO, DBO₅ y SST medidas en el efluente del RA, las cuales variaron entre 70 y 90%, mientras que en RB variaron entre 38 y 55%; aunque esto era esperado de acuerdo con la configuración del sistema, se encontró que en términos de reducción del contenido de materia orgánica carbonácea, se estaría subutilizando esta tecnología ya que la mayor parte de la eliminación de materia orgánica ocurre en la primera etapa del proceso y dado los alcances de este estudio no se estarían optimizando las condiciones operacionales para el aprovechamiento de los procesos de transformación de nitrógeno que pueden ocurrir en el sistema.

Para el sistema de biodiscos se obtuvo el mejor desempeño para un TRH entre 2.0 y 4.0 horas, logrando operar satisfactoriamente con TRH menores comparado con los sistemas de lodos activados evaluados, requiriéndose menor área para su implementación; sin embargo, se observó que el sistema es vulnerable frente a los cortes en el suministro eléctrico lo que puede causar el desprendimiento de la biomasa adherida a los discos y la desestabilización del sistema, ocasionando a su vez mayores periodos de adaptación después de este tipo de eventos en comparación con lo observado en los sistemas de lodos activados. De acuerdo con los resultados, se definió que entre las cuatro modalidades de lodos activados evaluados, la convencional y la de estabilización por contacto mostraron la mayor aplicabilidad para el tratamiento del efluente primario convencional de la PTAR-C, debido a que presentaron eficiencias de reducción de materia orgánica superiores al 80% y mostraron ventajas significativas en torno a los requerimientos de área en comparación con las modalidades de aireación extendida y sistema A/B, por lo que se recomienda su evaluación a escala piloto para definir las condiciones operacionales que garanticen el mejor desempeño de estos sistemas.

Respecto al sistema de biodiscos, su desempeño en términos de reducción de DQO, DBO₅ y SST mostró la potencialidad de aplicación para el tratamiento del efluente primario de la PTAR-C; sin embargo, dada la vulnerabilidad del sistema a presentar desprendimiento de biomasa se considera necesario realizar otros estudios que permitan disminuir los problemas operacionales asociados al desprendimiento de la biomasa y desestabilización del sistema y determinar si es una alternativa técnicamente viable para su aplicación en el municipio de Cali.

4. CONCLUSIONES

La evaluación a escala laboratorio de las alternativas de tratamiento biológico aerobio en suspensión y adherido mostraron la viabilidad y potencialidad de su aplicación para el tratamiento del efluente primario convencional de la PTAR-C, lográndose eficiencias de reducción de DQO, DBO₅ y SST superiores al 80%, garantizando un efluente que cumple con la normatividad colombiana vigente para vertimientos de residuos líquidos sobre fuentes superficiales.

Entre los sistemas evaluados, las modalidades convencional y estabilización por contacto resultaron más atractivas como alternativas de tratamiento secundario del afluente de la PTAR-C, ya que alcanzaron eficiencias de reducción de materia orgánica superiores al 80%, con los menores TRH (entre 4 y 6 h para convencional; 3.3 y 5.0 h para estabilización por contacto), lo cual disminuye los requerimientos de área frente a las modalidades aireación extendida y A/B. El sistema de biodiscos, aunque mostró un buen desempeño para el tratamiento del efluente primario convencional de la PTAR-C, su aplicabilidad a escala real podría verse limitada debido a los problemas operacionales evidenciados durante la evaluación del sistema, asociados principalmente al desprendimiento de la biomasa ocasionada por la suspensión ocasional del fluido eléctrico.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo técnico y económico prestado por EMCALI EICE ESP y la Universidad del Valle para el desarrollo del estudio.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Ávila, O. y Ramírez, W. (1989). Diseño, Construcción, Montaje y puesta en marcha de un sistema de discos biológicos rotatorios a escala de laboratorio. *Revista ACODAL*, 142, 35-50
2. Brazil, B. L. (2006). Performance and operation of a rotating biological contactor in a tilapia recirculating aquaculture system. *Aquacultural engineering*, 34, 261-274
3. Castillo, F. y Vivas, F. (1996). Tratamiento de Aguas Residuales, de una Empresa Papelera, con Sistema de Biodiscos. *Revista ACOTEPAC*, 29, 17-23
4. Chaves M. E. A. (2003). Tratamiento de efluentes por processo de lodos ativados. III Fórum de Estudos Contábeis, Rio Claro - São Paulo Brasil
5. Díaz, B. (2002). Estado del arte sobre el tratamiento biológico para los residuales de Punta Periquillo I. *Digestión Aerobia. Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 23(1)
6. Droppelmann, V., López, R. y Wilkes, M. (2001). Evaluación de una Planta de Tratamiento de Aguas Servidas en Base a Biodiscos. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental ABES. Brasil
7. Grady, C. P. L., Daigger G. T. y Lim, H. C. (1999). *Biological wastewater treatment*. CRC Press
8. Madoni, P. (1994). A sludge biotic index (SBI) for the evaluation of the biological performance of activated sludge plants based on the microfauna analysis. *Water Res.*, 28 (1), 67-75
9. Mba, D., Bannister, R.H. y Findlay, G.E. (1999). Mechanical redesign of the rotating biological contactor. *Water Res.*, 33(18), 3679-3688
10. Mendonça, L. C. (2002). Microbiologia e cinética de sistema de lodos ativados como póstratamento de reator anaerobio de leito expandido. Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil, Área de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo
11. Ministerio de Agricultura. Decreto 1594 del 26 de Junio de 1984. Colombia.
12. Metcalf y Eddy. (2003). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*. Fourth Edition. McGraw-Hill. USA.
13. Nuhoglu A., Keskinler B. y Yıldiz E. (2005). Mathematical modelling of the activated sludge process—the Erzincan case. *Process Biochem.*, 40(7), 2467-2473.
14. Oliveira, S. C. y von Sperling, M. (2008). Reliability analysis of wastewater treatment plants. *Water Res.*, 42, 1182-1194
15. Oliveira, S. C y von Sperling, M. (2005). Avaliação de 166 ETEs em operação no país, compreendendo diversas tecnologias. Parte 1-análise de desempenho. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 10(4)
16. Orozco A. (2005). Bioingeniería de aguas residuales. Teoría y diseño. Asociación Colombiana de Ingeniería-ACODAL
17. Patwardhan, A. W. (2003). Rotating Biological Contactors: A Review. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 42, 2035-2051
18. Rittmann B. E. y McCarty, P. (2001). *Biología del Medio Ambiente. Principios y Aplicaciones*. Ed. Mc Graw Hill. España
19. Sarioglu, M., Orhon, D., Görgün, E. y Artan, N. (2003). Design procedure for carbon removal in contact stabilization activated sludge process. *Water Sci. Technol.*, 48(11-12), 285-292
20. Standard methods. (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. (21th edn.). Washington DC: American Public Health Association, American Water Works Association, and Water Environment Federation (APHA, AWWA and WEF)”.
21. von Sperling, M. (2007). *Biological wastewater treatment: Activated sludge and aerobic biofilm reactors*. Volumen 5. IWA Publishing. New Delhi, India
22. Zhou, K., Xu, M., Liu, B. y Cao, H. (2008). Characteristics of microfauna and their relationships with the performance of an activated sludge plant in China. *J. Environ. Sci.(China)*, 20, 482-486