

Eliminación de los contaminantes de las aguas de albañal por filtros biológicos con diferentes empaquetaduras

Caridad Ramos, Enrique Sánchez y Mario Cruz.*

División de Estudios sobre Contaminación Ambiental, Centro Nacional de Investigaciones Científicas, Avenida 25 y 158, Playa, Apartado Postal 6990. *Facultad de Biología, Universidad de la Habana, Calle 25 entre J e I, Vedado, Plaza de la Revolución, Ciudad de La Habana, Cuba.

Recibido: 7 de abril de 1997 Aceptado: 30 de septiembre de 1997.

Palabras clave: filtro biológico, aguas residuales, aguas de albañal, tratamiento aerobio.
Key words: trickling filter, wastewater, domestic waste, aerobic treatment.

RESUMEN. El proceso de filtro biológico (FB) es uno de los métodos más antiguos y comúnmente aplicados en el tratamiento de las aguas residuales. Experiencias en instalaciones existentes y en otras desarrolladas hace poco tiempo, así como con el empleo de nuevas empaquetaduras, han incrementado las aplicaciones del FB convencional y de combinaciones FB-lodo activado en el tratamiento de las aguas residuales. El objetivo del trabajo fue comparar diferentes tipos de empaquetaduras para el tratamiento de las aguas de albañal, determinar su funcionamiento en un intervalo de condiciones operacionales de los FB convencionales de baja y alta velocidad y evaluar la eficiencia de eliminación de los contaminantes.

ABSTRACT. The trickling filter process is one of the oldest and most commonly applied methods of wastewater treatment. Recent experiences with existing process options and development of new process options and new media have increased the attractiveness of applying both conventional trickling filter and various combinations of trickling filter-activated sludge processes for wastewater treatment. The purpose of this study was to provide a comparison of media types for municipal wastewater. Specific objectives included: to determine the relative performance of the various types of trickling filter media over a range of loading conditions from conventional low-rate trickling filter to high-rate roughing filter, and to provide a qualitative evaluation of the operating characteristics of the media tested.

INTRODUCCION

La contaminación de las aguas superficiales producida al descargar los líquidos residuales a cuerpos de agua a concentraciones superiores a la capacidad de autopurificación natural y con bajo contenido de oxígeno disuelto, es un problema que requiere de atención. Por otro lado, los ríos contaminados traen consigo consecuencias negativas, por cuanto facilitan la transmisión de enfermedades de origen hídrico a los consumidores, entre otros muchos aspectos.

En las condiciones de Cuba, es de sumo interés el estudio de procesos

para el tratamiento total o parcial a las aguas residuales que sean económicos, factibles de construir y operar los sistemas correspondientes por un personal no especializado y con bajo consumo energético, como es el caso de los FB.

Por más de nueve décadas, han sido empleados los FB para la purificación de las aguas residuales, mayormente las aguas de albañal o municipales, por ser un tratamiento estable bajo ciertas condiciones, con pequeños requerimientos energéticos y de fácil operación. Estos sistemas han presentado algunas limitantes, como las de operar con aguas

residuales de baja carga orgánica, limitada eficiencia de eliminación, obstrucción de la empaquetadura por crecimiento excesivo de la biopelícula y bajos valores de oquedad muy relacionados con los materiales y sus geometrías respectivas.^{1,2}

Hasta los años setenta se empleó principalmente piedra como empaquetadura. Con el desarrollo de materiales de plástico mejoró la eficiencia del tratamiento en aspectos tales como: la capacidad para admitir mayores cargas orgánicas, altas áreas superficiales específicas y oquedades, estructuras constructivas más ligeras, disminución del área del filtro para relaciones diámetro/altura menores, entre otras.^{3,4}

Los parámetros definidos por diferentes autores presentan discrepancias sobre cuáles son los fenómenos que rigen el funcionamiento de los FB y por otro lado, han sido evaluados en su mayoría en países de clima frío. Por esta razón, se han desarrollado ecuaciones empíricas, basadas en la cinética de los procesos, según modelos matemáticos y ecuaciones diferenciales simultáneas.⁵

Hasta el presente, se ha determinado parcialmente la capacidad de eliminación de patógenos y se conocen pocas referencias relacionadas con la bacteriología en los filtros.^{6,7}

En la actualidad, se continúa empleando el FB en el tratamiento de disímiles aguas residuales, como proceso secundario, terciario o ambos, principalmente para la elimina-

ción de nitrógeno. Con mucha frecuencia desde hace algunos años, este proceso se encuentra muy vinculado a los lodos activados en las plantas de tratamiento, identificándose el sistema como filtro biológico por contacto, el cual presenta ventajas que permiten su empleo con residuos más cargados orgánicamente. Se han obtenido eficiencias de eliminación de la materia orgánica que superan el 95 %.⁸

El objetivo del presente trabajo consistió en determinar las relaciones de los tipos de materiales y las áreas superficiales específicas de las empaquetaduras, las concentraciones de la materia orgánica y la de los indicadores de contaminación, así como otros parámetros operacionales relacionados con la eficiencia del proceso de FB. Lo anterior contribuiría a reducir el volumen de los filtros biológicos, sustituir materiales de las empaquetaduras, determinar la biota bacteriana (cuestión no reportada aún), disminuir el tratamiento, así como definir las condiciones operacionales más eficientes.

MATERIALES Y METODOS

Agua de albañal

Como material residual de estudio se empleó el agua de albañal proveniente de las plantas de tratamien-

to de la Ciudad de La Habana. Las características de estas plantas y del muestreo correspondiente han sido descritos en un trabajo anterior.⁹

Filtro biológico a escala de banco

Para la realización de las diferentes experiencias se prepararon los FB a escala de banco, siendo rellenos con diferentes materiales (Tabla 1), los cuales se conformaron de manera tal que aportaran diversas características a las empaquetaduras.⁹ Ellos fueron: piedra, polietileno, poliéster y cloruro de polivinilo.⁹

El agua de albañal se vertió por la parte superior de cada FB de forma tal que garantizara su distribución uniforme sobre la superficie de la empaquetadura.⁹ La carga hidráulica (B_h) de trabajo en cada experiencia, se aseguró con el empleo de bombas peristálticas.

Condiciones de operación de los filtros biológicos empleados en las diferentes experiencias

En todas las experiencias se consideró el estado estacionario, luego de tres veces el tiempo de retención hidráulico (TRH). Cada una de las experiencias se mantuvo de forma continua durante 2 meses, como mínimo.

Las muestras de aguas de albañal se caracterizaron físico, química

y microbiológicamente en cada muestreo. Los afluentes y los efluentes se caracterizaron con una frecuencia de dos a tres veces por semana durante el experimento.

Materiales de empaquetadura, cargas hidráulicas y orgánicas

En la evaluación del funcionamiento de los FB, se emplearon diferentes materiales de empaquetadura, concentraciones iniciales (S₀) de las aguas albañales y cargas hidráulicas (B_h) (Tabla 2)

Análisis físico-químico

La caracterización físico-química de todas las muestras se realizó de acuerdo con los métodos normalizados para aguas y aguas residuales¹⁰ (DQO: demanda química de oxígeno, DBO: demanda bioquímica de oxígeno, SST: sólidos suspendidos totales, P_{ort}: ortofosfato, N_{am}: nitrógeno amoniacal). Las determinaciones de pH y de oxígeno disuelto se efectuaron mediante equipos específicos de campo.⁹

Determinaciones bacteriológicas

Los filtros biológicos, con cinco materiales de empaquetadura diferentes (Tabla 2, experiencias 4 y 5), se emplearon para evaluar la comunidad bacteriana presente en los afluentes y efluentes correspondientes. De acuerdo con los mejores resultados obtenidos, con las cinco empaquetaduras, se continuó un trabajo más profundo con dos materiales: cpv-c y polivinilo, (Tabla 2, experiencias 6 y 7). Se determinó el efecto de la concentración de las aguas de albañal y su carga en organismos patógenos, en la eficiencia de eliminación de este proceso de depuración.¹¹

Se realizó el conteo de coliformes totales y fecales, *Streptococcus faecalis*, *Pseudomonas aeruginosa*. Se empleó la tabla del número más probable (NMP) según Métodos Normalizados conocidos.¹⁰

Tabla 1. Características de las empaquetaduras de los FB.

Material de empaquetadura	Ordenamiento	Area superficial específica (m ² /m ³)	Oquedad (%)	TRH* (min)
Piedra	azar	318	49	66
Polietileno	azar	221	59	38
Poliéster	vertical	1 321	89	28
Cpv-c	azar	1 252	92	72
Cpv-t	vertical	722	53	11

* TRH: Tiempo de retención hidráulico, calculado para R₀ = 1 m³/(m³ · d)

Tabla 2. Condiciones operacionales de las experiencias realizadas.

Efecto estudiado	Material de empaquetadura	S ₀ (mg DBO/L)	B _h (m ³ /m ² · d)	Experiencia
Material de la empaquetadura, concentración inicial del agua de albañal (S ₀) y carga hidráulica (B _h).	Piedra, polietileno, poliéster.	57, 39 y 69	0,4; 0,6 y 1	1, 2 y 3
Material de la empaquetadura, concentración inicial del agua de albañal, carga hidráulica y bacteriología.	Polietileno, cloruro de polivinilo cilindros (cpv-c), cloruro de polivinilo tubular (cpv-t), poliéster y piedra.	97 y 53	1, 0; 2,1 y 3,6	4 y 5
Material de la empaquetadura, concentración inicial del agua de albañal ajustada, carga hidráulica y bacteriología.	Polietileno, cpv-c.	120	4,1 y 8,3	6 y 7

Análisis estadístico de los resultados

El cálculo de las medias, desviaciones estándar, coeficientes de correlación y otros parámetros estadísticos, se realizó utilizando paquetes de programas de computación.¹² Los resultados de las experiencias se compararon estadísticamente mediante las pruebas de Fischer y t Student para un 95 % de confianza.¹³

RESULTADOS

Las aguas albañales utilizadas presentaron (Tabla 3) una concentración de materia orgánica inferior a los 250 mg DQO/L y 120 mg DBO/L, con balance de carbono:nitrógeno:fósforo expresados como DBO: N_{am.}:P_{orto} y una relación DBO/DQO adecuadas para la aplicación de un tratamiento aerobio de depuración.

Las mayores eficiencias de eliminación de la materia orgánica fueron de 72 (DQO) y 87 % (DBO), para las condiciones de mayor concentración de la materia orgánica en el afluente, B_h entre 1 y 4 m³/(m³ · d) en las empaquetaduras de polietileno y cpv-c. En las de poliéster y cpv-t se obtuvieron las eficiencia más bajas. Lo anterior puede ser consecuencia de que las corrientes interiores están menos mezcladas en estas empaquetaduras de ordenamiento tubular vertical y enrejado.

La concentración media en los efluentes fue de 17 mg DBO/L y 56 mg DQO/L. La eliminación de los sólidos puede considerarse despreciable.

Presentaron una buena correlación lineal las cargas orgánicas

aplicadas y las eliminadas, expresadas tanto en DQO como en DBO.

Al aumentar la carga hidráulica, se obtuvo una mayor variabilidad de los resultados en las muestras analizadas. El aumento hasta 8,3 m³/(m³ · d) influyó negativamente en la eficiencia de los FB, lo cual se agudizó cuando la concentración de la materia orgánica (S_o) en los afluentes fue baja.

El oxígeno disuelto aumentó de un 25 % en los afluentes a un 79 % en los efluentes (como valores medios), alcanzándose valores máximos del 99 % de saturación, lo que indicó una efectividad del tratamiento.

Se hizo evidente la utilidad de los FB en la eliminación de los indicadores de contaminación de las aguas de albañal (Fig. 1) al obtener altos porcentajes de eliminación de coliformes totales (99 %), coliformes fecales (99 %) y *Pseudomonas* (99 %), valores no reportados hasta el presente por otros autores. Los materiales de empaquetaduras que presentaron una mayor eliminación fueron: el de cpv-c y el de polietileno.

Se presentó una correspondencia entre los materiales de las empaquetaduras con los que se obtuvieron mayores eficiencias en la eliminación de la materia orgánica y en la de microorganismos indicadores de

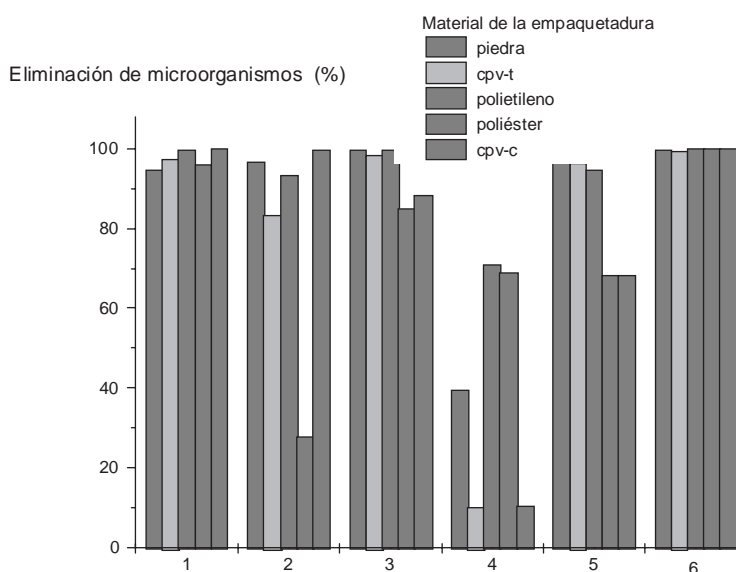


Fig. 1. Eliminación de microorganismos indicadores de contaminación en relación con el material de la empaquetadura y la carga hidráulica (B_h de 1 y 3,6 m³/(m³ · d) del FB.

Microorganismo y B_h: 1. Coliformes totales (1). 2. Coliformes fecales (1). 3. *Pseudomonas* (1). 4. Coliformes totales (3,6). 5. *Streptococcus faecalis* (3,6). 6. *Pseudomonas* (3,6).

Tabla 3. Composición de las aguas de albañal.

Parámetro	Experiencia						
	1	2	3	4	5	6	7
DQO	95	147	144	189	124	250	250
DBO	57	39	69	97	53	120	49
SST	66	88	83	142	187	800	*
P _{orto}	1,2	1,4	2,5	4,7	4,5	15	*
N _{am.}	5,2	10,5	6,7	20,0	29,7	18,1	*
pH	7,7	7,7	7,7	7,2	7,1	7,1	8,2
DBO/DQO	0,59	0,26	0,47	0,64	0,39	0,48	0,1
DBO:N _{am.} :P _{orto}	100:9,1:2,1	100:2,6:3,5	100:9,7:3,6	100:20,7:4,8	100:61,2:9,2	100:15,0:12,5	—

Valores expresados en mg/L, excepto el pH y las relaciones DBO/DQO y DBO:N_{am.}:P_{orto}. * Ensayos no realizados.

contaminación. Las empaquetaduras de polietileno y de cpv-c eliminaron una mayor cantidad de estos organismos.

Se obtuvo que el porcentaje de eliminación de microorganismos resultó directamente proporcional a la concentración de éstos en el efluente. Lo anterior posiblemente se pueda atribuir a que existe una modificación en la población bacteriana presente en la biopelícula del FB cuando varían las concentraciones del afluente.

De igual forma, puede ser que los organismos no encuentren las condiciones necesarias dentro del FB cuando el agua de albañal disminuye la carga orgánica y entonces salen en las corrientes del efluente. En este caso, una disminución del efluente produce, de hecho, una reducción de las fuentes de carbono y energía que requieren los microorganismos presentes en la biopelícula. Esta se tornará más fina, pues carece de alimentos, provocará la depredación entre las especies que las constituyen, la lisis de las capas más cercanas a la empaquetadura o ambas, provocando el desprendimiento de estas capas y la formación de otras nuevas, pero menos eficientes, ya que la limitación considerable de fuentes alimenticias hará que se desarrolle un área de biopelícula activa mucho menor que en las condiciones iniciales de concentraciones altas. Las posibilidades de subsistencia dentro del filtro disminuirán considerablemente y serán aquellas especies más resistentes, de acuerdo con sus requerimientos nutricionales las que se mantengan.

Al relacionar las áreas superficiales de las empaquetaduras con los porcentajes de eliminación de materia orgánica (Fig. 2) fue evidente que un aumento de aquellas no influyó en una mayor eficiencia del proceso. Al parecer, las áreas superficiales específicas superiores a 300 m²/m³, no aportan beneficios en cuanto a la eliminación de la materia orgánica para las condiciones operacionales trabajadas. Este comportamiento puede deberse a que no toda el área específica de la empaquetadura resulta verdaderamente la que cubre la biopelícula activa donde se desarrollan los microorganismos, debido a la mala mojadura de la empaquetadura. Algunos autores^{14,15} han referido que la purificación no aumenta en proporción directa a la superficie específica. En consideración, algunas cons-

trucciones han sido menos eficientes que lo esperado.

Al establecerse una relación entre los tiempos de retención hidráulicos y los porcentajes de eliminación de la materia orgánica, se obtuvieron altos coeficientes de correlación, siendo en las empaquetaduras con mayores tiempos de retención hidráulicos donde se alcanzaron las mayores eficiencias, por lo que resultaron más mezcladas las corrientes interiores en las empaquetaduras de cpv-c y polietileno. La conformación de las empaquetaduras, la hidrodinámica del líquido y el mayor contacto del agua residual con la biopelícula es lo que define el mejor funcionamiento del proceso.

Se correlacionaron la concentración inicial de materia orgánica (S₀) y el porcentaje de eliminación de esta materia orgánica. Se obtuvieron curvas con tendencias a la estabilidad de la eliminación de la materia

orgánica con el aumento de las concentraciones de S₀ para cada empaquetadura y cada carga hidráulica experimentada [Fig. 3, curvas para la B₀ = 1 m³/(m³·d)]. Se establece un ancho de biopelícula activa máxima para cada condición establecida, para la cual un aumento del contenido de materia orgánica del agua residual no favorece la eficiencia de eliminación de los contaminantes, porque estos son incapaces de llegar a las capas más profundas de la biopelícula activa en condiciones aerobias y degradarse.

Se hizo significativa la disminución de la eliminación de la materia orgánica cuando las cargas hidráulicas aumentaron hasta 8 m³/(m³·d), la eficiencia disminuyó a valores menores del 30 %. La correspondencia (Fig. 4) entre ambos parámetros resultó lineal para todas las empaquetaduras. Las altas velocidades del fluido arrastran las capas de la biopelícula activa, la cual se hace más

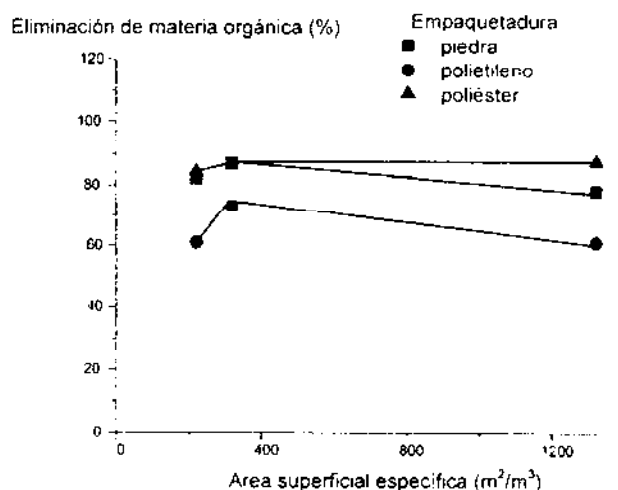


Fig. 2. Área superficial específica en función de la eliminación de la materia orgánica (DBO).

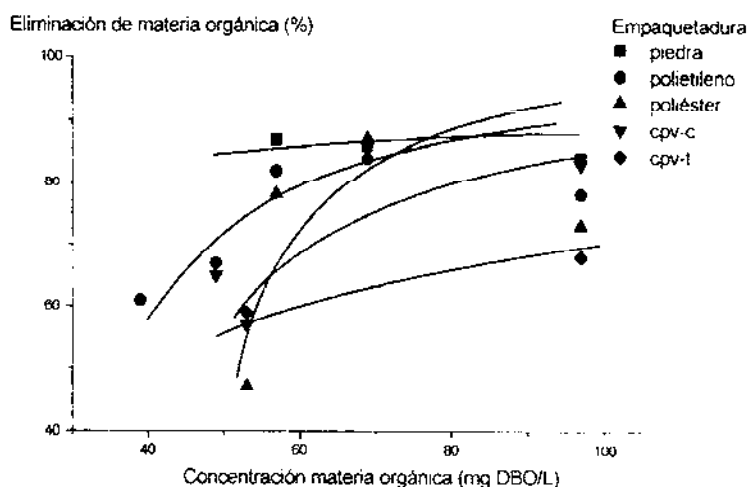


Fig. 3. Influencia de la concentración de la materia orgánica en la eliminación de los FB, en base de la DBO.

fina y menos eficiente a la eliminación de los contaminantes de las aguas residuales. La más alta velocidad del agua residual dentro del FB disminuye el tiempo de contacto con la biopelícula activa y en el efluente salen los contaminantes que no fueron eliminados en una mayor concentración.

El FB como tratamiento biológico aerobio permite la depuración del agua de albañal en las condiciones climáticas de Cuba, con los beneficios del desarrollo de una biota efectiva en la eliminación de compuestos de carbono y de nitrógeno, de bajo consumo energético, la cual presenta factibilidad de construcción, así como de operación por un personal no especializado. El empleo de empaquetaduras de materiales plásticos posibilita la reducción de los costos de construcción por lo ligeros que resultan estos materiales y la reducción del volumen del filtro biológico al aportar áreas superficiales y espacios vacíos superiores en comparación con el material de piedra que se emplea tradicionalmente.

Los datos obtenidos en el presente trabajo permitieron la utilización del filtro biológico en la depuración de otras aguas residuales de origen industrial para las cuales no había sido evaluado con anterioridad, empleando una relación diámetro/altura menores que las tradicionales.

CONCLUSIONES

Las aguas de albañal presentan una concentración de materia orgánica inferior a los 250 mgDQO/L y 120 mgDBO/L, con balance de DBO: $N_{org} : P_{org}$ y relación DBO/DQO adecuados para la aplicación de un tratamiento aerobio de depuración.

Las mayores eficiencias de eliminación de la materia orgánica fueron de 72 (DQO) y 87 % (DBO), para las mayores concentraciones de la materia orgánica en el afluente, B_h entre 1 y 4 $m^3/(m^2 \cdot d)$ en las empaquetaduras de polietileno y cpv-c con los mayores tiempos medios de retención hidráulico.

La concentración media en los efluentes fue de 17 mg DBO/L y 56 mg DQO/L.

El oxígeno disuelto aumentó de un 25 (afluentes) a un 79 % (efluentes), alcanzándose máximos del 99 % de saturación.

No hubo comportamiento lineal de la eliminación de la materia orgánica en relación con las áreas

Eliminación de materia orgánica (%)

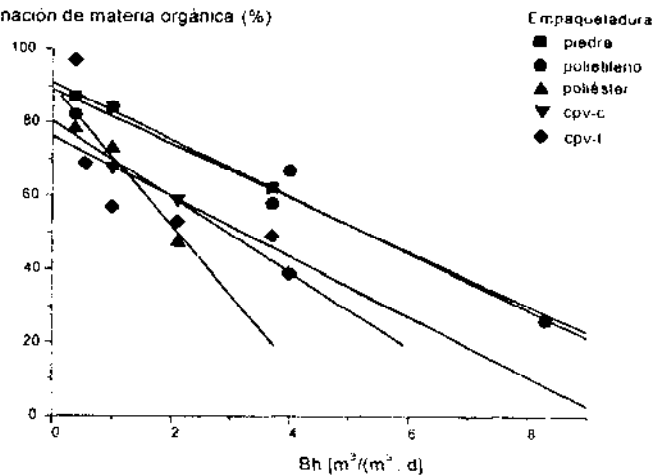


Fig. 4. Efecto del aumento de la carga hidráulica en la eliminación de la materia orgánica (DBO) en los FB.

superficiales específicas de las empaquetaduras.

El aumento de la carga hidráulica hasta 8,3 $m^3/(m^2 \cdot d)$ influyó negativamente en la eficiencia de los filtros biológicos, lo cual se agudizó en los afluentes con gran concentración de materia orgánica baja.

Se hizo evidente la utilidad de los FB al garantizar una elevada eliminación de coliformes totales (99 %), coliformes fecales (99 %) y *Pseudomonas* (99 %).

La conformación de las empaquetaduras, la hidrodinámica del líquido y el mayor contacto del agua residual con la biopelícula, se encuentran entre los aspectos que definen un mejor funcionamiento del FB.

El FB con menor relación diámetro/altura permite la depuración del agua de albañal en las condiciones climáticas de Cuba, con el desarrollo de una biota efectiva en la eliminación de compuestos de carbono, nitrógeno y fósforo, así como de indicadores de contaminación.

Los datos obtenidos en el presente trabajo permitieron la utilización del filtro biológico en la depuración de otras aguas residuales de origen industrial, las cuales no se habían evaluado con anterioridad.

BIBLIOGRAFIA

1. Metcalf and Eddy, Inc. Wastewater Engineering: Treatment, disposal, reuse. McGraw-Hill, New York, 1991.
2. Gray N.E. Encyclopedia of Environmental Biology, 3, Wastewater Treatment Biology. Academic Press, Inc, 463-470, 1995.
3. Parker D.S., Brischke K.V. and Matusci R.N. Upgrading Biological Filter Effluents Using the TF/SC Process. *J. of the*

Institution of Water and Environmental Management, 7, 90, 1993

4. Parker D.S., Romano L.S., Dryman W.R. and Horneck H.S. Making a TF/SC. Process Work Annual WEAQ Conference, Toronto, Ontario, Canada, 550-564, 1995.
5. Logan B.E. Oxygen Transfer in Trickling Filters. *J. of Environmental Engineering*, 119, 6, 1993
6. Askew M.V. High rate biofiltration: past and future. *Water Pollution Control*, 445, 1970
7. Neely A.B. Chemical biological treatment with biological filters. *Water Pollution Control*, 160, 1975.
8. Andersson B., Aspergren H., Parker D. and Lutz M. High rate nitrifying trickling filters. Second International Specialized Conference on Biofilm Reactors, Paris, France, 517-525, 1993.
9. Ramos C. Filtros Biológicos para el tratamiento de aguas de albañal. Tesis en opción al Título de Maestro en Ciencias. Centro Nacional de Investigaciones Científicas, Ciudad de La Habana, 1996.
10. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 15th Edition, New York, 1975
11. Ramos C. and Cruz M. Microbiological assay of trickling filters. *Environmental Biotechnology Principles and Practice*. M. Moo-Young, W.A. Anderson, A.M. Chabrabarty (editors). Kluwer Academic Publisher Canada, 1995.
12. MicroCal Software, Inc. MicroCal Origin Version 3.0, 1993
13. Complete Statistical System with Data Base Management and Graphics, 1986-1990.
14. Joslin J.R., Sidwick J.M., Greene C. and Shearer J.R. High-rate biological filtration: a comparative assessment. *Water Pollution Control*, 70, 383, 1971.
15. Cook E.E. and Fleming M.L. Trickling filter performance as related to media surface area. *Public Works*, 1, 69, 1974.