

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEPURADOR DE UN REACTOR AEROBIO DE PELÍCULA FIJA A ESCALA DE LABORATORIO

Víctor Manuel LUNA-PABELLO, Oscar Guillermo DAMIÁN-MONTOYA, Rosario RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ y José Octavio PABELLO-MORALES

Programa de Ingeniería Química Ambiental y Química Ambiental (PIQAYQA). Facultad de Química, Edificio "E", Laboratorio 301, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510 D.F. México

(Recibido febrero 1998, aceptado enero 1999)

Palabras clave: sistemas de tratamiento biológico, reactor aerobio, biopelícula, remoción de materia orgánica disuelta biodegradable

### RESUMEN

Se operó un reactor aerobio de película biológica fija, llamado biocinta, con una relación área/volumen de  $273 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . Estructuralmente consta de un contenedor para el agua residual a tratar y del medio de soporte móvil, sobre el cual se desarrolla la biopelícula. El agua residual suministrada fue de  $2000 \text{ mg/L}$ , medida como demanda química de oxígeno soluble (DQOs), equivalente a  $585 \text{ mg/L}$  como demanda bioquímica de oxígeno ( $\text{DBO}_5$ ). Operó con un tiempo de residencia hidráulica de 18 horas y a una velocidad de rotación de  $26 \text{ rpm}$ . Los resultados indican que la biocinta trabajó a  $14 \text{ }^\circ\text{C}$ , bajo condiciones aerobias y pH ligeramente alcalino. La remoción lograda fue de  $80 \%$  como DQOs/L y  $80 \%$   $\text{DBO}_5/\text{L}$ . El comportamiento cinético puede ser descrito mediante un modelo de cinética de primer orden. Comparando su eficiencia con la de un reactor biológico rotatorio que operó bajo las mismas condiciones, la biocinta removió  $86 \%$  más materia orgánica disuelta, medida como DQOs y  $46 \%$  más, evaluada como  $\text{DBO}_5$ .

### ABSTRACT

The main objective the present work was to evaluate a biofilm aerobic reactor, known as biotape reactor, with an area/volume ration of  $273 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . It is composed of two structures: the first one is the waste water container and the second is the biofilm plastic mobile support. The wastewater fed had  $2000 \text{ mg}$  soluble chemical oxygen demand (CODs)/L and  $585 \text{ mg}$  biochemical oxygen demand ( $\text{BOD}_5$ )/L. The hydraulic residence time was 18 hours and the biotape rotational speed was  $26 \text{ rpm}$ . The biotape reactor operated at  $14 \text{ }^\circ\text{C}$ , in aerobic conditions, and alkaline pH. The removal efficiency of the organic matter was  $80 \%$  as CODs and  $88 \%$  as  $\text{BOD}_5$ . The kinetic performance for substrate removal can be described by a first-order equation. Comparing this method with a biological rotating reactor at the same operating condition, the biotape reactor removed  $86 \%$  more organic dissolved matter, measured as CODs and  $46 \%$  more organic matter evaluated as  $\text{BOD}_5$ .

### INTRODUCCIÓN

Un parámetro importante en el diseño de un sistema aerobio de película fija, tipo reactores biológicos rotatorios (RBR), es la existencia de la mayor relación área/volumen posible. Al respecto se recomienda que ésta no sea menor de  $140 \text{ m}^2/\text{m}^3$  (Kornegay y Andrews 1968, Escárcega y Pulido 1986, Pedroza de Brenes y Durán de Bazúa 1987). Asimismo, es importante señalar que en la búsqueda de dicha relación debe tenerse presente que la geometría proporcionada a la superficie sobre la que crecerá la biopelícula, resulte funcional, es decir, que el crecimiento de la misma no provoque la oclusión en el flujo del agua ni promueva condiciones de

anoxia y/o anaerobiosis (Shariff y Hassan 1984 y Rodríguez 1996).

Con el objeto de constatar la conveniencia de contar con una mayor relación área/volumen en los sistemas de película fija (Kincannon y Stover 1982, Stensel 1985), se enfocó el presente estudio a la evaluación de un reactor llamado "biocinta", cuyo diseño estructural proporciona una relación área/volumen de  $273 \text{ m}^2/\text{m}^3$ , la cual equivale a casi el doble de la recomendada para los RBRs. El nombre de "biocinta", se debe a la conceptualización que se hizo para la construcción de la misma. Estructuralmente semeja a un listón o cinta que se enrolla y sobre la cual crecen los microorganismos depuradores. De acuerdo con la geometría del medio de soportes, puede decirse que la biocinta presenta un

arreglo estructural de la película fija en espiral. Este reactor fue conceptualizado y construido como prototipo funcional en las instalaciones de la Facultad de Arquitectura de la UNAM en México y tanto la adecuación estructural como la valoración de su comportamiento depurador, fueron realizados en la Facultad de Química de la UNAM. Cabe señalar que para ponderar la calidad operante de la biocinta, se contemplaron dos aspectos, el primero relativo al seguimiento depurador propiamente dicho de la biocinta y el segundo, realizando la comparación de los resultados obtenidos con los descritos en un estudio previo empleando un RBR que trabajó bajo condiciones similares (Luna-Pabello *et al.* 1992).

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para efectos experimentales se emplearon las aguas residuales provenientes de un molino de nixtamalización de maíz para consumo humano, que son conocidas comúnmente como nejayote (del náhuatl: *nextli*, cenizas de cal, *áyoh*, caldo o cosa aguada y *atl*, agua). Algunas de las principales características fisicoquímicas del nejayote, tanto las reportadas en la literatura (Pedroza-Islas y Durán de Bazúa 1990), como las obtenidas en el presente estudio, pueden observarse en la **tabla I**. Dichos valores son el resultado de 10 evaluaciones practicadas a un número equivalente de lotes de nejayote, que no obstante que tiene la misma procedencia presentan variación en su contenido. Por sus características fisicoquímicas, este tipo de aguas residuales son altamente contaminantes y pueden clasificarse como de tipo carbonoso. Es importante indicar que antes de su incorporación a la biocinta, el nejayote fue convenientemente diluido con agua de la llave para obtener una concentración de materia orgánica disuelta de 2000 mg/L, medida como demanda química de oxígeno soluble (DQOs) y 585 mg/L en términos de demanda bioquímica de oxígeno soluble (DBO<sub>5</sub>). Cabe señalar que esa misma concentración de materia orgánica fue la empleada en los experimentos previos efectuados en el RBR con el que se compararán los resultados obtenidos en la biocinta. El motivo de haber trabajado el RBR con nejayote diluido a 2000 mg DQOs/L y 585 mg DBO<sub>5</sub>/L, se debió a que derivado de su diseño estructural (relación área/volumen = 141.4) y de las pruebas experimentales previas realizadas, esa era la máxima concentración a la que podía trabajar el reactor con 80 % de las cámaras bajo condiciones de operación aerobias (Luna-Pabello *et al.* 1996), es decir con concentraciones de oxígeno disuelto superiores a 2 mg/L.

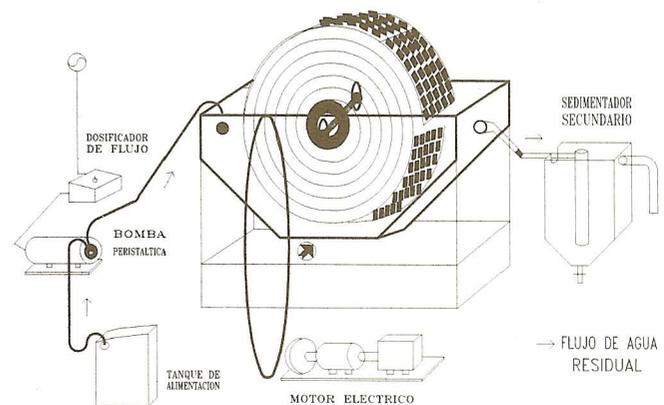
### Características estructurales de la biocinta

Para la construcción de la biocinta, se emplearon materiales plásticos inertes y termoformables, con objeto de disminuir el peso del medio de soporte, facilitar su construcción y la mayor relación área/volumen posible; aumentar su durabilidad y evitar la posible inhibición del crecimiento microbiano (Stewart *et al.* 1996, Damián 1998). Una vista general de la biocinta se puede apreciar en la **figura 1**. Estructuralmente está constituida por dos partes: a. El contenedor del agua residual. Este componente tiene la forma de

**TABLA I.** ALGUNAS CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DEL NEJAYOTE PROVENIENTE DE UN MOLINO DE NIXTAMAL

Parámetro	Pedroza-Islas y Durán de Bazúa (1990)	Este estudio
Demanda bioquímica de oxígeno (mg DBO <sub>5</sub> /L)	7,000 a 10,000	6,000 a 8,000
Demanda química de oxígeno soluble (mgDQOs/L)	20,000 - 30,000	16,000 a 20,000
Oxígeno disuelto (mgOD/L)	0.00	0.00
pH (unidades)	5 a 13	5 a 13
relación promedio carbono: nitrógeno: fósforo	10:1.5:0.9	10:1.1:0.6

un prisma semihexagonal y esta constituida en acrílico. Se seleccionó dicho material con el objeto de aprovechar sus propiedades de transparencia y rigidez. b. El medio de soporte de la biopelícula. Esta parte del reactor constituye el cuerpo de la biocinta, propiamente dicho. Su conformación está basada en un arreglo, a manera de listón enrollado, de tres secciones de placas elaboradas, unas a partir del termoformado de cloruro polivinilo (PVC), otras de polietileno (PE) y unas más de poliestireno (PS) (**Fig. 2**). El arreglo en serie del conjunto de placas permite la conformación de una banda que al enrollarse concéntricamente, sobre un eje metálico, forma una estructura en espiral que proporciona un área de contacto total de 4.1 m<sup>2</sup> (**tabla II**). En esta estructura ocurre el desarrollo de la lama o película biológica depuradora, que se va formando paulatinamente durante la rotación del soporte. La banda o cinta espiralada se forma mediante la superposición de los extremos de placas rectangulares, gracias a la superficie dentada que presentan (**Fig. 2**). Cada "dentadura" tiene como función aumentar la superficie de contacto en el reactor, servir de soporte a la capa superior cuando la cinta se enrolla y para generar una mayor turbulencia en el líquido residual a tratar. En la **tabla II**, puede observarse una relación de los principales parámetros es-



**Fig. 1.** Vista general de la biocinta y de los equipos accesorios

tructurales que forman la biocinta. Información más detallada sobre la estructura de este reactor, puede consultarse en Rodríguez (1996) y Damián (1998).

TABLA II. DATOS COMPARATIVOS DE LOS PARÁMETROS ESTRUCTURALES Y DE OPERACIÓN ENTRE LA BIOCINTA Y EL RBR

Parámetros	Biocinta	RBR
Material del medio de soporte	PVC, PE y PS	Acrílico
Número de etapas	1	7.5
Diámetro del soporte (m)	0.40	0.30
Volumen de trabajo (m <sup>3</sup> )	0.015	0.015
Área superficial total (m <sup>2</sup> )	4.1	2.15
Relación área/volumen (A/V)	273.3	141.4
Porcentaje de área sumergida	40	40
Tiempo de residencia hidráulico (horas)	18	18
Velocidad de rotación (rpm)	26	30

### Condiciones operantes y parámetros fisicoquímicos evaluados en la biocinta

#### a. Condiciones de operación

Una vez realizadas las pruebas preliminares relativas a la no existencia de fugas, evaluación de mezclado homogéneo y adecuaciones para evitar la deformación del medio de soporte, debida a la expansión o a la contracción del mismo (Rodríguez 1996, Damián 1998), se procedió al establecimiento de las condiciones de operación permanente. Para ello se fijó la velocidad de rotación de 26 rpm, un volumen de trabajo total de 1.5 litros diarios y un tiempo de residencia hidráulico, del agua residual a tratar, de 18 horas. Cabe señalar que, para agilizar la etapa de estabilización del reactor, éste se operó, durante la primera semana, con flujo cerrado discontinuo e inoculación diaria de microorganismos, de acuerdo con el procedimiento recomendado para tal efecto (Luna-Pabello 1990). Una vez formada la biopelícula se procedió a la incubación paulatina de agua residual a la concentración de trabajo establecida (2000 mg DQOs/L y 585 mg DBO<sub>5</sub>/L), añadiendo volúmenes crecientes (10 % diario) hasta completar la totalidad del flujo continuo establecido en 15 L/día, que se incorporaba al reactor, mediante una bomba peristáltica, a razón de 10.4 mL/minuto, aproximadamente.

#### b. Parámetros fisicoquímicos evaluados

De los diversos parámetros existentes para evaluar la calidad de las aguas, se seleccionaron aquellos que se consideraron fundamentales para conocer el comportamiento depurador de los reactores aerobios de película fija. En consecuencia se midió temperatura, pH, oxígeno disuelto (OD) y demanda química y bioquímica de oxígeno soluble (DQOs y DBO<sub>5</sub>, respectivamente), siguiendo para ello la metodología descrita en los métodos estandarizados norteamericanos (APHA 1992). Se midieron diariamente temperatura y pH. La primera empleando un termómetro de bulbo de mercurio y el segundo mediante un multímetro Poly-Pram modelo PA-22. Por otra parte, dos veces a la semana se

evaluaron tanto el oxígeno disuelto, como la DQOs existente en el licor mezclado, utilizando para el primer caso un potenciómetro Orión 72-C y, para el segundo, un equipo Behr. Finalmente, la DBO<sub>5</sub> se efectuó una vez por semana con ayuda de un respirómetro Vöith-Sapromat B-6.

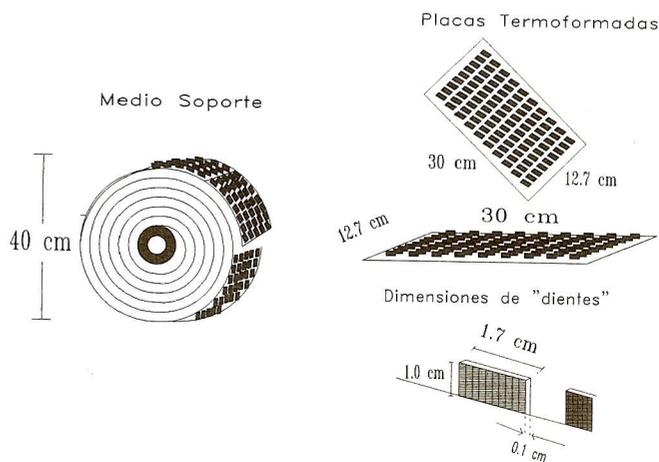


Fig. 2. Vista lateral del medio de soporte y detalle de las placas termoformadas que lo conforman

A continuación se presentan los resultados obtenidos durante la fase experimental realizada con la biocinta. Posteriormente, con el objeto de valorar la bondad operante de la misma, se realizará una comparación del porcentaje de remoción logrado por la biocinta, durante su fase de operación pseudoestable, con el alcanzado por un reactor biológico rotatorio (RBR) manipulado previamente bajo condiciones experimentales similares (Luna-Pabello *et al.* 1992).

## RESULTADOS

En la **tabla III**, se presentan los resultados promedio obtenidos durante la etapa de operación pseudoestable de la biocinta, que duró tres semanas, requiriéndose para ello de cinco semanas desde su arranque, el cual fue posterior a la formación de la biopelícula. Al respecto puede señalarse que la formación de la biopelícula siguió la secuencia descrita en la literatura especializada (Trulear y Characklis 1982, Characklis y Cooksey 1983, Escárcega y Pulido 1986, Luna-Pabello 1990) y que consiste básicamente en tres fases: 1. Inducción, que comprende la adsorción de los compuestos orgánicos sobre la superficie húmeda del medio de soporte, mientras éstos se encuentran en contacto con el agua residual a tratar. Se considera que la adsorción de los compuestos orgánicos en la superficie húmeda del soporte es un requisito previo para el desarrollo de la película biológica y la consecuente fijación de la biomasa (Norouzian y Deloya 1984). Es decir, los microorganismos colonizan las superficies húmedas sólidas (formando la matriz gelatinosa microbiana), cuando es-

**TABLA III.** VALORES PROMEDIO DE LOS PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS DEL EFLUENTE (SEMANAS 1 A 8) Y DEL INFLUENTE, EVALUADOS DURANTE EL TRATAMIENTO DEL NEJAYOTE EN EL REACTOR DE BIOCINTA

Semana	Temperatura (°C)	pH (unidades)	DQOs (mg/L)	% Rem.	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	% Rem.	O <sub>2</sub> (mg/L)
1	10 ± 0.7	6.5 ± 0.1	1860 ± 140	7	550 ± 10	6	7.5 ± 0.10
2	11 ± 0.1	6.5 ± 0.1	1500 ± 220	25	320 ± 10	45	7.5 ± 0.10
3	10 ± 1.0	7.0 ± 0.1	1200 ± 160	40	260 ± 11	56	7.6 ± 0.08
4	13 ± 1.5	7.5 ± 0.1	1000 ± 160	50	220 ± 15	62	7.7 ± 0.05
5	12 ± 0.7	7.5 ± 0.1	800 ± 160	62	160 ± 12	73	7.7 ± 0.15
6	13 ± 0.9	8.0 ± 0.1	400 ± 80	80	70 ± 2	88	7.7 ± 0.11
7	14 ± 1.3	8.0 ± 0.1	400 ± 70	80	70 ± 2	88	7.8 ± 0.15
8	14 ± 0.8	8.0 ± 0.2	400 ± 80	80	70 ± 5	88	7.8 ± 0.15
Influente	10 ± 1.1	5.4 ± 0.3	2000 ± 100	n.a.	585 ± 10	n.a.	0.5 ± 0.20

Nota: semanas 1 a 5 = etapa pre-estable o de aclimatación del sistema de tratamiento; semanas 6 a 8 = etapa de estabilización operante o pseudoestable. La medición de temperatura y pH se hizo 5 veces por semana. La DQO se evaluó dos veces por semana, mientras que la DBO<sub>5</sub>, una vez a la semana. En ambos casos, cada una de las muestras analizadas contó con suduplicado respectivo; n.a. = no aplica

tán disponibles sobre dichas superficies las cantidades adecuadas de nutrientes orgánicos, sales minerales y oxígeno (Hoehen y Ray 1983, Pedroza 1985). 2. Fase de acumulación, durante ésta hay un crecimiento logarítmico de los microorganismos, que se refleja en un engrosamiento progresivo de la biopelícula, continuando así hasta que el soporte está completamente cubierto (Norouzzian y Deloya 1984). Se observa un período de acumulación constante, que termina por el esfuerzo cortante entre la biopelícula y la superficie del líquido. Este proceso previene la acumulación de cantidades mayores de microorganismos. Los substratos disueltos y el oxígeno son suministrados por difusión a través de la película biológica. A medida que el grosor de la película aumenta, se hace más factible la generación, en los estratos más profundos, de zonas con procesos anaerobios (Reiber y Stensel 1985, Famularo *et al.* 1989), que contribuyen eventualmente al desprendimiento de la biomasa adherida. 3. Fase de estabilización o de meseta, en ésta las películas biológicas desprendidas y producidas se encuentran en equilibrio dinámico, manteniéndose un espesor constante. El mantenimiento de la estructura de la biopelícula se debe al efecto combinado de la reproducción celular y la producción extracelular de polímeros de polisacáridos que mantienen la cohesión de la biomasa (Trulear y Characklis 1982). La condición de estabilidad persiste hasta que se terminan los nutrientes difundidos a través de la biopelícula. En ese momento los organismos de las capas basales mueren, originando que se pierda la integridad estructural de la base de la película y ocurra un desprendimiento masivo (Hoehen y Ray 1973, Characklis y Cooksey 1983, Pedroza 1985).

De manera complementaria, es importante resaltar que tanto la temperatura, como el pH y los valores de oxígeno disuelto, presentaron poca variación a lo largo del período experimental evaluado, siendo en todo momento valores no limitantes para la proliferación de los microorganismos (Luna-Pabello *et al.* 1994), lo cual se ve reflejado en los porcentajes de remoción logrados a lo largo del período experimental.

Por otra parte, al procesar los valores de DQOs obtenidos experimentalmente, se observa que el orden de reacción uno es el

que mejor describe el comportamiento depurador presentado por la biocinta. Los valores empleados para determinar el orden de reacción de la biocinta, pueden observarse en la **tabla IV** y la relación del orden de reacción, así como el coeficiente de correlación para cada uno de ellos, pueden observarse en la **tabla V**. En cuanto a los modelos de Kornegay y Andrews (1968), Schroeder (1977) y Stover y Kincannon (1982), empleados para explicar el comportamiento depurativo de la biocinta, ninguno puede considerarse como aceptable ya que los coeficientes de correlación obtenidos resultaron insuficientes para ello.

**TABLA IV.** VALORES UTILIZADOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL ORDEN DE REACCIÓN EN LA BIOCINTA

Semana	DQOs experimental (mg/L)	DQOs calculada orden cero (mg/L)	DQOs calculada orden uno (mg/L)	DQOs calculada orden dos (mg/L)
1	1860	1557	1685	2427
2	1500	1417	1426	1555
3	1200	1277	1207	1144
4	1000	1137	1022	904
5	800	997	865	748
6	400	578	524	492
7	400	438	443	442
8	400	300	375	401

Nota: Los valores de las DQO experimentales de cada semana están dados con base en dos muestras tomadas en días diferentes y analizadas por duplicado

## DISCUSIÓN

La remoción de materia orgánica disuelta lograda por la biocinta, durante la etapa de operación pseudoestable fue de 80 %, en términos de DQOs, mientras que medida como DBO<sub>5</sub>, alcanzó aproximadamente el 88 %. La biocinta operó permanentemente de mane-

ra aerobia, presentando valores de oxígeno disuelto en el licor mezclado (líquido en tratamiento), entre 7.0 y 7.9 mg/L. Esta concentración alta de oxígeno permite suponer que la biocinta puede ser alimentada con aguas residuales conteniendo mayores concentraciones de materia orgánica disuelta siempre y cuando no incluyan elementos tóxicos para los microorganismos y que la concentración no supere la capacidad homeostática de los microorganismos depuradores. Al respecto, en el presente estudio, el nejayote obtenido procedió de un molino de nixtamalización del maíz para consumo humano, por lo cual se descarta la posibilidad de que presente elementos tóxicos que pudieran evitar la proliferación de microorganismos degradadores de materia orgánica, aún cuando el factor de dilución sea menor al empleado en la realización de estos experimentos. Cabe señalar que la existencia de suficiente oxígeno en el licor mezclado permite la proliferación de microorganismos depuradores a mayor concentración de materia orgánica (Sládeček 1973, Anaya-Huertas 1992), lo cual ha sido constatado también con experimentos realizados a menores diluciones de nejayote, esto es mayores concentraciones iniciales, 4600 mg DQO/L y 1000 mg DBO<sub>5</sub>/L, en donde se ha observado que los microorganismos depuradores (bacterias, ciliados y flagelados) continúan tróficamente activos (Luna-Pabello *et al.* 1988, Luna-Pabello 1990). También permite inferir que, bajo circunstancias de operación similares, puede depurar en menor tiempo aguas residuales de igual concentración. En consecuencia, bajo las condiciones de operación experimental empleadas, el oxígeno requerido por los microorganismos para efectuar la biotransformación de la materia orgánica disuelta biodegradable a biomasa microbiana, vía metabolismo aerobio, no constituyó una limitante (Reiber y Stensel 1985).

#### Comportamiento cinético

La determinación del orden de reacción de la biocinta se basó en un balance de materia para el consumo de sustrato. Posteriormente y debido a que no existen trabajos de investigaciones anteriores, se utilizaron los resultados experimentales, para determinar qué modelo cinético se apegaba más al comportamiento de la biocinta (Kornega y Andrews 1968, Schroeder 1977, Kincannon y Stover 1982). La expresión general de rapidez de reacción se utilizó bajo las siguientes consideraciones: operación en régimen pseudoestable, mezclado homogéneo, reacción irreversible, balance realizado sobre el consumo de un reactivo, temperatura de reacción constante y flujo de entrada al reactor igual al flujo de salida.

Cada uno de los valores de materia orgánica, medidos como mgDQOs/L registrados durante la fase experimental, fue respectivamente procesado y aplicado para calcular los diferentes ordenes de reacción, empleando para ello la regresión lineal. Adicionalmente se evaluó, mediante el coeficiente de correlación ( $R^2$ ), la expresión de rapidez de reacción que mejor representa el comportamiento cinético de la biocinta. Como se desprende del análisis de los resultados experimentales, el comportamiento cinético de la biocinta, durante su fase de operación pseudoestable, sigue un orden de reacción uno, cuyo resultado, presenta una confiabilidad en el análisis numérico, de aproximadamente 97 % ( $R = 0.975$ ,  $R^2 = 0.950$ ), siendo inferiores los órde-

nes de reacción cero y dos, como puede apreciarse en la **tabla V**.

**TABLA V.** RELACIÓN DEL ORDEN DE REACCIÓN Y DEL COEFICIENTE DE CORRELACIÓN CALCULADOS PARA LOS VALORES DE MATERIA ORGÁNICA DISUELTA MEDIDA EN TÉRMINOS DE DQO OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE EN LA BIOCINTA

Orden de reacción	Coefficiente de correlación
Cero	$R^2 = 0.886$
Uno	$R^2 = 0.950$
Dos	$R^2 = 0.933$

Con respecto a la aplicación de los tres modelos cinéticos, los coeficientes de correlación ( $R^2$ ) obtenidos fueron 0.233 para Kincannon y Stover (1982), 0.285 para Schroeder (1977) y 0.795 para Kornega y Andrews (1968). De acuerdo con estos resultados ninguno de los tres modelos representa de manera satisfactoria el comportamiento de la biocinta. Dado que cada modelo matemático puede evaluarse mediante la técnica de mínimos cuadrados, el resultado más aproximado lo aporta el modelo de Kornega y Andrews (1968) cuyo coeficiente es el más alto de los tres; no obstante, está muy por debajo del 0.95 requerido para ser considerado como aceptable. Una de las razones para que este modelo sea el que más se aproxime a los resultados experimentales de la biocinta pudiera ser que su planteamiento se basa en la operación de un reactor continuo de tanque agitado, a diferencia de los otros dos modelos evaluados que lo hacen en un reactor de flujo pistón. Estos resultados, a su vez, pueden servir como base para estudios posteriores, los cuales deben ser enfocados al desarrollo de modelos que representen de mejor forma el comportamiento de la biocinta. Los estudios que siguen deben orientarse a evaluar el fenómeno de transferencia de masa y las concentraciones máximas de sustrato que puedan ser mejoradas por este sistema de tratamiento. A su vez, para desarrollar un modelo matemático del comportamiento cinético del reactor de biocinta, debe tomarse en cuenta la respuesta funcional al variar parámetros tales como la temperatura, el tipo y la concentración de sustrato, con el objeto de determinar las condiciones con que se puede modelar con resultados más satisfactorios a este sistema de tratamiento. Por la misma razón no se determinaron parámetros cinéticos y será importante hacerlo cuando se encuentren estas correlaciones.

#### Comparación estructural y funcional de la biocinta con un RBR

Para conocer la bondad depuradora de la biocinta, se procedió a la comparación de los valores medidos durante su fase de operación pseudoestable, con los resultados de Luna-Pabello *et al.* (1992) para un RBR operando bajo condiciones de trabajo similares. Para ello se tomaron como punto de referencia el volumen de agua a tratar, el tiempo de residencia hidráulico, el tipo y la concentración de materia orgánica disuelta alimentada, la velocidad de rotación del medio de soporte y el inóculo microbiano suministrado. Lo anterior con el objeto de restringir, en lo posible, variaciones drásticas en las condiciones experimentales, pro-

**TABLA VI.** COMPARACIÓN DE VALORES PROMEDIO DE LOS ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS REALIZADOS AL EFLUENTE DEL RBR Y DEL REACTOR DE BIOCINTA DURANTE EL TRATAMIENTO DE NEJAYOTE

Reactor	Temp. (°C)	pH (unidades)	OD (mg/L)	DQO (mg/l)	% Rem.	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	% Rem
Influyente Biocinta	10 ± 1.1	5.4 ± 0.3	0.5 ± 0.2	2000 ± 100	n.a.	585 ± 10	n.a.
Efluente Biocinta	14.0 ± 0.8	8.0 ± 0.1	7.8 ± 0.1	400 ± 80	80.0	70 ± 5	88.0
Influyente RBR	9.7 ± 0.4	5.9 ± 0.4	1.0 ± 0.3	2010 ± 80	n.a.	585 ± 20	n.a.
Efluente RBR	9.5 ± 0.5	7.9 ± 0.1	6.9 ± 0.4	1140 ± 60	43	235 ± 5	60

Nota: la fase experimental en el RBR se llevó a cabo en un cuarto frío a temperatura controlada, mientras que los realizados con la biocinta, debido a problemas técnicos, se realizaron a temperatura ambiente. La medición de temperatura y del pH se hizo 5 veces por semana. En cuanto a la DQO ésta se evaluó dos veces por semana, mientras que la DBO<sub>5</sub>, una vez a la semana. En ambos casos, cada una de las muestras analizadas contó con su respectivo duplicado; n.a. = no aplica

curando que únicamente quede como variable de estudio la cantidad de superficie disponible para el desarrollo de la biopelícula. Es importante señalar que la comparación realizada en el presente estudio debe tomarse con las reservas del caso, debido por un lado, a la imposibilidad técnica de regular la totalidad de las variables no controladas existentes y, por otro lado, a que no todas ellas tiene el mismo grado de importancia para el desarrollo del fenómeno en estudio. No obstante, llevar a cabo la comparación entre ambos sistemas permitirá formar una idea más clara del efecto depurador ocasionado por la mayor disponibilidad de superficie de contacto en un mismo volumen de agua a tratar. En este sentido, aunque es de considerar que a mayor relación área/volumen ocurrirá más depuración, se desconoce cuantitativamente la magnitud de tal efecto. En las tablas II y V, se presenta una relación comparativa, tanto desde el punto de vista estructural, como de funcionamiento de ambos reactores. En estas circunstancias y considerando que el RBR empleado en dicha experimentación fue operado a su volumen de trabajo máximo de 20 litros, fue necesario obtener, por interpolación de los resultados analíticos registrados en las cámaras 7 y 8 (14 y 16 L, respectivamente), los valores equivalentes al volumen de trabajo máximo de la biocinta que fue de 15 litros. De los datos presentados en la tabla II, puede obser-

**TABLA VII.** VALORES UTILIZADOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA EXISTENCIA DE DIFERENCIAS ESTADÍSTICAMENTE SIGNIFICATIVAS ENTRE EL COMPORTAMIENTO DEPURADOR, EN TÉRMINOS DE DQOs, DEL RBR RESPECTO DE LA BIOCINTA EN FASE PSEUDOESTABLE

Semana	Influentes (mg/L)		Efluentes (mg/L)	
	Biocinta	RBR	Biocinta	RBR
1	2000	2010	400	1140
2	2100	2090	480	1200
3	1900	1930	320	1080

Nota: los valores de las DQO experimentales de cada semana están dados con base en dos muestras tomadas en días diferentes y analizadas por duplicado

varse que el área superficial total, como de la relación área/volumen que presenta la biocinta es casi el doble de la del RBR.

Al comparar entre sí los valores promedios de los parámetros físicoquímicos evaluados en ambos reactores (Tabla VI), puede notarse que la temperatura, el pH y el oxígeno disuelto presentan relativamente poca variación entre sí lo cual, de acuerdo con estudios previos, no induce el cambio de las poblaciones microbianas existentes (Luna-Pabello *et al.* 1992). Por otra parte, en lo concerniente a la materia orgánica, la remoción de materia orgánica ocurrida en la biocinta fue mayor en aproximadamente 86 %, en térmi-

**TABLA VIII.** VALORES UTILIZADOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA EXISTENCIA DE DIFERENCIAS ESTADÍSTICAMENTE SIGNIFICATIVAS ENTRE EL COMPORTAMIENTO DEPURADOR, EN TÉRMINOS DE DBO<sub>5</sub>, DEL RBR RESPECTO DE LA BIOCINTA EN FASE PSEUDOESTABLE

Semana	Influentes (mg/L)		Efluentes (mg/L)	
	Biocinta	RBR	Biocinta	RBR
1	585	585	70	1235
2	595	605	75	240
3	575	565	65	230

Nota: los valores de las DBO<sub>5</sub> experimentales de cada semana están dados con base en dos muestras tomadas en días diferentes y analizadas por duplicado

nos de DQOs y de 46 %, medida como DBO<sub>5</sub>, respecto de la remoción lograda por el RBR.

La diferencia de remoción encontrada entre ambos sistemas de tratamiento, puede ser explicada en función de la variedad existente en las relaciones área/volumen de los reactores, siendo ésta de aproximadamente el doble para la biocinta, respecto del RBR. Lo anterior puede constatare de la evaluación practicada a los resultados, en términos de DQO (Tabla VII) y de DBO<sub>5</sub> (Tabla VIII), para el influente y el efluente de cada uno de los dos

reactores, durante la fase de operación pseudoestable. Para establecer si hay o no diferencias significativas entre los valores obtenidos, en términos de DQOs, durante la fase experimental pseudoestable de la biocinta y del RBR, se aplicó la prueba de  $\chi^2$ , tomando como valores observados los correspondientes a la biocinta y como esperados los del RBR. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:  $\chi^2$  influente = 0.564,  $\chi^2$  efluente = 1447.16. De acuerdo con el valor de tablas,  $\chi^2_{0.95} = 5.991$ , por lo cual en el caso del influente, no existen diferencia significativas, mientras que para el efluente si las hay.

De igual forma, para establecer si hay o no diferencias significativas entre los valores obtenidos, en términos de  $\text{DBO}_5$ , durante la fase experimental pseudoestable de la biocinta y del RBR, se aplicó la prueba de  $\chi^2$ , tomando como valores observados los correspondientes a la biocinta y, como valores esperados, los del RBR. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:  $\chi^2$  influente = 0.342;  $\chi^2$  efluente = 347.656. Al comparar los valores anteriores con el valor de tablas  $\chi^2_{0.95} = 5.991$ , se puede afirmar que, para el caso del influente no existen diferencias significativas, mientras que para el efluente si las hay.

En este sentido, al tener casi el doble de la superficie de contacto, la cantidad de biopelícula es también el doble. Este fenómeno se traduce a su vez en una mayor actividad microbiana y, consecuentemente, en una más rápida degradación de la materia orgánica disuelta contenida en el agua residual a tratar, lo cual como se mencionó anteriormente era de esperar. Es decir, que al existir más microorganismos disponibles para la biodegradación de determinada cantidad de contaminantes, éste lo hace en menor tiempo (Vavilin 1982). Lo anterior, repercute en un aumento en la capacidad del reactor para depurar mayores volúmenes de agua residuales igualmente contaminadas, o bien, iguales volúmenes de agua con una concentración de contaminantes superior (Tjhuis *et al.* 1995).

Por otra parte, la manipulación del RBR, aproximadamente 4°C por debajo de la temperatura a la que trabajó la biocinta, pudo haber influido en la disminución (entre 5 y 10 %) de la capacidad depuradora de los microorganismos (Rittman *et al.* 1983, Luna-Pabello *et al.* 1992). En consecuencia, puede afirmarse que la mayor capacidad depuradora de la biocinta se debe principalmente a que el RBR presenta mayor relación área/volumen y que dicho incremento observado no guarda una relación directamente proporcional.

## CONCLUSIONES

La biocinta, al ser alimentada con nejayote diluido con agua de la llave a una concentración de materia orgánica disuelta de 2000 mg DQOs/L y 585 mg  $\text{DBO}_5$ /L y operada a 14°C; 26 rpm y un TRH de 18 horas, removió 80 % y 88 % de materia orgánica medida como DQOs y  $\text{DBO}_5$ , respectivamente. A lo largo del período experimental, el agua residual bajo tratamiento presentó un pH ligeramente alcalino y condiciones permanentemente aerobias, superiores a los 7.5 mg de OD/L. Esta última condición permite inferir que la biocinta proporciona un adecuado suministro

de oxígeno. Por otra parte, el comportamiento depurador de la biocinta, puede ser descrito por una ecuación de primer orden dando un resultado, en la confiabilidad del análisis numérico, de aproximadamente un 97 % ( $R = 0.950$ ,  $R^2 = 0.950$ ). Finalmente y de manera comparativa, puede decirse que bajo condiciones experimentales similares, la biocinta ofrece mejores resultados que los obtenidos en un RBR debido a que presenta mayor relación área/volumen, sin que este comportamiento sea de tipo directamente proporcional. Reflejo de ello es que removió 85 % y 46 %, más materia orgánica evaluada como DQOs y  $\text{DBO}_5$ , respectivamente, que la removida por el RBR.

## RECONOCIMIENTOS

Se agradece el apoyo brindado por el Centro de Investigación de Diseño Industrial de la Facultad de Arquitectura de la UNAM, para la utilización del reactor de biocinta. Las aguas residuales empleadas fueron proporcionadas por el I.Q. Vicente Felgueres. El equipo analítico fue donado por el gobierno de la República Federal de Alemania, a través del proyecto BMFT FP/0402-82-01 2280 y por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP Nairobi, proyecto BCT 252).

## REFERENCIAS

- Anaya-Huertas C.C. (1992). Estudio de los protozoarios ciliados presentes en un sistema de tratamiento biológico de un influente industrial petroquímico. Tesis de Licenciatura. Facultad del Ciencias, UNAM. México, 192 pp.
- APHA (1992). *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. 17ª Ed. Díaz de Santos, Madrid, 1134 p.
- Characklis W.G. y Cooksey K.E. (1983). Biofilms and microbial fouling. *Adv. in Appl. Microbiol.* 29, 93-138
- Damián O.G. (1998). Arranque y estabilización de un reactor aerobio de película fija. Tesis de Licenciatura en proceso. Facultad de Química, UNAM. México D.F. México, 120 p.
- Escárcega C.A. y Pulido R. (1986). Modelo cinético para un reactor biológico rotatorio usado en el tratamiento aerobio de efluentes. Tesis de Licenciatura. Facultad de Química, UNAM, México D.F., 210 p.
- Famularo J., Müller J. y Mulligan T. (1978). Application of mass transfer to rotating biological contactors. *JWPCF* 50, 633-671.
- Hoehen R.C. y Ray A.D. (1973). Effects of thickness on bacterial film. *JWPCF* 45, 2302-2320.
- Kincannon D.F. y Stover E.L. (1982). Design methodology for fixed film reactors RBC's and biological towers. En: *Civil Eng. for Pract. and Design Engrs.* EUA Vol.2, p 107.
- Kornegay B.H. y Andrews J.F. (1968). Kinetic of fixed film biological reactors. *JWPCF* 40, 460-468.
- Luna-Pabello V.M. (1990). Efecto de la temperatura en las poblaciones de ciliados en un reactor de biodiscos. Tesis de Maes-

- tría en Ciencias (Biología). Facultad de Ciencias, UNAM, México, 124 p.
- Luna-Pabello V.M., Aladro-Lubel M.A. y Durán de Bazúa C. (1992). Temperature effects on ciliates diversity and abundance in a rotating biological reactor. *Bioresour. Technol.* 39, 55-60.
- Luna-Pabello V.M., Aladro-Lubel M.A. y Durán de Bazúa C. (1994). *Efecto del substrato sobre las poblaciones de ciliados en un reactor de biodisco. Casos tipo: nejayote, vinazas y aguas blancas de papel.* Vol. 3. Programa de Ingeniería Química Ambiental y Química Ambiental. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México, agosto 1993, México, 227 p.
- Luna-Pabello V.M., Aladro-Lubel M.A. y Durán de Bazúa C. (1996). Biomonitoring of wastewaters in treatment plants using ciliates. *J. Ind. Microbiol.* 17, 62-68.
- Luna-Pabello V.M., Durán de Bazúa C., Mayén-Estrada R., Aladro-Lubel M.A., Olvera-Viascan V. y Saavedra-Solá J. (1988). Estudio de los protozoarios ciliados para determinar la calidad depuradora de sistemas rotatorios biológicos para tratamiento de aguas residuales. *Universidad y Ciencia* 5, 109-132.
- Norouzian M. y Deloya M.M. (1984). Estudio del comportamiento de una unidad de biodiscos estructuralmente modificada. *Inst. Ingeniería. UNAM. México*, 170 p.
- Pedroza R. (1985). Estudio de la degradación biológica aerobia de los efluentes de la nixtamalización. Tesis de Maestría. Universidad Iberoamericana. México, 163 p.
- Pedroza de Brenes R. y Durán de Bazúa C. (1987). RBC characteristics for nejayote aerobic treatment. *Environ. Technol. Letters.* 8, 579-588.
- Pedroza-Islas R. y Durán de Bazúa C. (1990). Aerobic treatment of maize processing wastewater in a 50 liter rotating biological reactor. *Biol. Wastes.* 32, 17-27.
- Reiber S. y Stensel D. (1985). Biologically enhanced oxygen transfer in a fixed-film system. *JWPCF* 57, 135-142.
- Rittman B.E., Suozzo R. y Romero B.R. (1983). Temperature effects on oxygen transfer to rotating biological contactors. *JWPCF* 55, 270-277.
- Rodríguez R. (1996). Aspectos microbiológicos de un reactor de película biológica denominado "Biocinta". Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM, México, 90 p.
- Schroeder E.D. 1977. *Water and Wastewater Treatment.* Mc. Graw-Hill, Nueva York, EUA.
- Shariff N. y Hassan R.S (1984). Engineering and nutritional parameters effecting biofilm development. *Effluent Wat. Treat. J.* 25, 423-425.
- Sládeček V. (1973). System of water quality from the biological point of view. *Arch. Hydrobiol.* 7, 1-218.
- Stewart P.S., Hamiton M.A. Brian R.G. y Brian T.S. (1996). Modeling biocide action against biofilms. *Biotechnol. Bioeng.* 49, 445-455.
- Stover E.L. y Kincannon D.F. (1982). Rotating biological contactor scale-up and desing. En: *Proc. First International Conference on fixed film biological process.* Abril 20 a 23, King Island, Ohio, EUA. Vol. 3, pp. 1667-1687.
- Tijhuis L., Van Loosdrecht M.C.M. y Heijnen J.J. (1995). Dynamics of biofilm detachment in biofilm airlift suspension reactor. *Biotechnol. Bioeng.* 45, 481-487.
- Trulear M.G. y Characklis W.G. (1982). Dynamics of biofilm processes. *JWPCF* 54, 1288-1301.
- Vavilin V.A. (1982). The effect of temperature, inlet pollutant concentration, and microorganisms concentration, on rate of aerobic biological treatment. *Biotechnol. Bioeng.* 24, 2609-2625.