

Physically modeling of an upflow anaerobic sludge blanket reactor (UASB)

Jhonny Pérez¹, Gerardo Aldana²

¹Grupo GISA, Facultad de Ingeniería, Universidad de La Guajira.
Km 5 vía a Maicao, Riohacha, Colombia. *jpemon@hotmail.com.

²Centro de Investigaciones del Agua-CIA, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia.
Maracaibo, Venezuela.

Abstract

Hydraulic studies Wastewater Treatment Plants Works on field are complex and expensive. An alternative to have done these studies is by building a up a calibrated physical model to simulate the conditions of similarity to the prototype. The aim of this study was a physical modeling to simulate flow at UASB pattern and to observe whether or not agreement are found prototype with it. The methodology involved in the design, calculation of relative length relations and construction, using a reduced scale of 1:8 between the prototype and physical model (PM). The reactor was fed with municipal wastewater flooding from collector C of the city of Maracaibo, Venezuela. Tracer study with Li^+ (LiCl) was used either prototype reactor (UASB) located in Ginebra, Colombia. Geometric similarities were achieved with a ratio of relative length (L_r) of 0.1239 and similarity kinematics for a speed and acceleration, dynamic was found by using the Peclet number. Match distribution of residence time (DTR) to a theoretical hydraulic retention time (t_0) for 5 h was found with a coefficient of determination adjusted (R_a^2) to 0.928. Hydraulic efficiencies (β) obtained were ranged from 0.798 to 0.988 in the MF and from 0.902 to 0.943 in the prototype, exceeding that obtained instabilization ponds (0.17 to 67%).

Keywords: physical model, prototype, UASB, geometric similarity, hydraulic retention time.

Modelación física de un reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA)

Resumen

Realizar estudios hidráulicos en plantas de tratamiento a escala real, resulta complejo y costoso. Una alternativa para crearlo, es mediante la construcción de un modelo físico calibrado que representa las condiciones semejantes al prototipo. El objetivo de este estudio fue la modelación física de un RAFA para simular su patrón de flujo. La metodología consistió en el diseño, cálculo de las relaciones de longitud relativa y construcción, empleando una escala de reducción de 1:8 entre el prototipo y el modelo físico (MF). El reactor fue alimentado con agua residual municipal del colector C de la ciudad de Maracaibo, Venezuela. Se utilizó Li^+ (LiCl) como trazador usando como prototipo el reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA) ubicado en Ginebra, Colombia. El MF se logró con una relación de longitud relativa (L_r) de 0,1239 para la similitud física al igual que la similitud cinemática para la velocidad y aceleración; usando el número de Peclet se logró una similitud dinámica con $L_r = 0,1290$ obteniendo una superposición de la distribución de los tiempos de residencia (DTR) a un tiempo de retención hidráulico teórico (t_0) de 5 h con un coeficiente de determinación ajustado (R_a^2) de 0,928. Las eficiencias hidráulicas (β) obtenidas variaron desde 0,798 a 0,988 en el MF y 0,902 a 0,943 en el prototipo, superando a la obtenida en lagunas de estabilización (0,17 a 67%).

Palabras clave: modelo físico, prototipo, RAFA, similitud geométrica, tiempo de retención hidráulico.

Introducción

Modelo físico (MF) es una representación que se hace de un prototipo (escala real) con el propósito de estudiar detalladamente su comportamiento bajo ciertas circunstancias preestablecidas de flujo. Usualmente, el MF es más pequeño, que el prototipo que representa [1]. Los MF en hidráulica son de uso común en la toma de decisiones antes del diseño a escala real. No se puede esperar que las condiciones de un modelo físico siempre representen la del fenómeno en escala real [2]. La investigación desarrollada en un MF, permite un ahorro económico y verificación de los fenómenos que satisfacen las leyes de la conservación de la masa, movimiento y energía [3].

El diseño adecuado de un MF debe incluir las similitudes con el prototipo equivalente al valor de las cifras significativas en su relación homóloga [4]. Para que haya similitud geométrica, las dos estructuras deben ser físicamente semejantes [5] y debe mantenerse una relación fija para todas las longitudes homologas entre el modelo y el prototipo [6]. Si un modelo no conserva la escala geométrica en alguna de sus dimensiones se define como un MF distorsionado [4].

La similitud cinemática envuelve la escala de tiempo y longitudes homólogas [6], la cual se obtiene cuando las líneas de corriente y trayectorias son geoméricamente semejantes [7], lo que se garantiza cuando las velocidades y aceleraciones en puntos correspondientes del flujo son paralelas y guardan una proporción constante a través de todo el campo de flujo [4, 6, 8]. La similitud dinámica se logra cuando existen polígonos de fuerza geoméricamente semejantes [7] y se relacionan en magnitud por un factor de escala constante en todos los puntos correspondientes [4, 9].

Es difícil, y en algunos casos, imposible, determinar los principios y factores de diseño involucrados en un prototipo, sobre consideraciones teóricas, lo que hace necesario realizar estudios a una escala que permita obtener parámetros de diseño confiables y representativos para el diseño del prototipo [10, 11].

Los RAFA fueron desarrollados por Lettinga y sus colaboradores en Holanda en 1970 [12-16]. La reproducción de los patrones de flujo en un RAFA es complicada debido a la diferencia de

densidad específica entre el agua residual del afluente y el lodo presente en el reactor, turbulencia generada por el biogás; esto sin contar con la diferencia de temperaturas entre el MF y el prototipo [17]. Un modelo físico al igual que un modelo matemático debe ser calibrado [18, 19] y de esta manera los resultados obtenidos son confiables.

En este estudio se realizó el diseño, construcción y calibración de un MF a escala reducida 1:8 de un RAFA ubicado en el Valle del Cauca, Colombia (prototipo) a fin de determinar sus similitudes en términos del \bar{t} y patrones de flujo, realizando ensayos con trazador. Para lograr tal similitudes, se tomó como referente el número adimensional de Peclet y número de dispersión obtenido en un MF a escala de laboratorio con reducción a escala 1:90 del mismo prototipo [18].

Parte experimental

Diseño del modelo físico

Las magnitudes envueltas en la geometría entre el modelo y el prototipo involucran la longitud, área y volumen homólogo para lo cual se utilizó la metodología usada por Aldana y Pérez [18]. La similitud dinámica para los RAFA se verificó a través del número de Peclet ($Pe = 1/d$) [20-22] que involucra las fuerzas de turbulencia y de dispersión. Para realizar los ajustes de los datos experimentales de la curva de distribución de los tiempos de residencia (DTR), determinar el coeficiente de dispersión, velocidad ascendente del fluido y el \bar{t} , se usó la ecuación (1) [23] la cual mostró mejor ajuste que los modelos uniparamétricos propuestos por Levenspiel [24] que no incorporan la distancia (x), tiempo de retención hidráulico (\bar{t}) ni volumen (V). El número de dispersión (d) se calculó usando la ecuación (2) [4, 24].

$$C(x, t) = \frac{M}{V} \frac{1}{\sqrt{4\pi \frac{D}{ux} \left(\frac{t}{\bar{t}}\right)^3}} e^{-\left[\frac{\left(1 - \frac{t}{\bar{t}}\right)^2}{4 \frac{D}{ux} \left(\frac{t}{\bar{t}}\right)}\right]} \quad (1)$$

$$d = \frac{D}{ux} \quad (2)$$

donde: C = concentración del trazador (mg/L), M = masa del trazador inyectada (mg), V = volu-

men del reactor (L), D = coeficiente de dispersión axial (m^2/min), v = velocidad ascensional del fluido (m/min), t = tiempo transcurrido después de la inyección (min), \bar{t} = tiempo de retención hidráulico experimental (min), x = altura entre el punto de inyección y recolección del trazador (m), d = número de dispersión (adimensional).

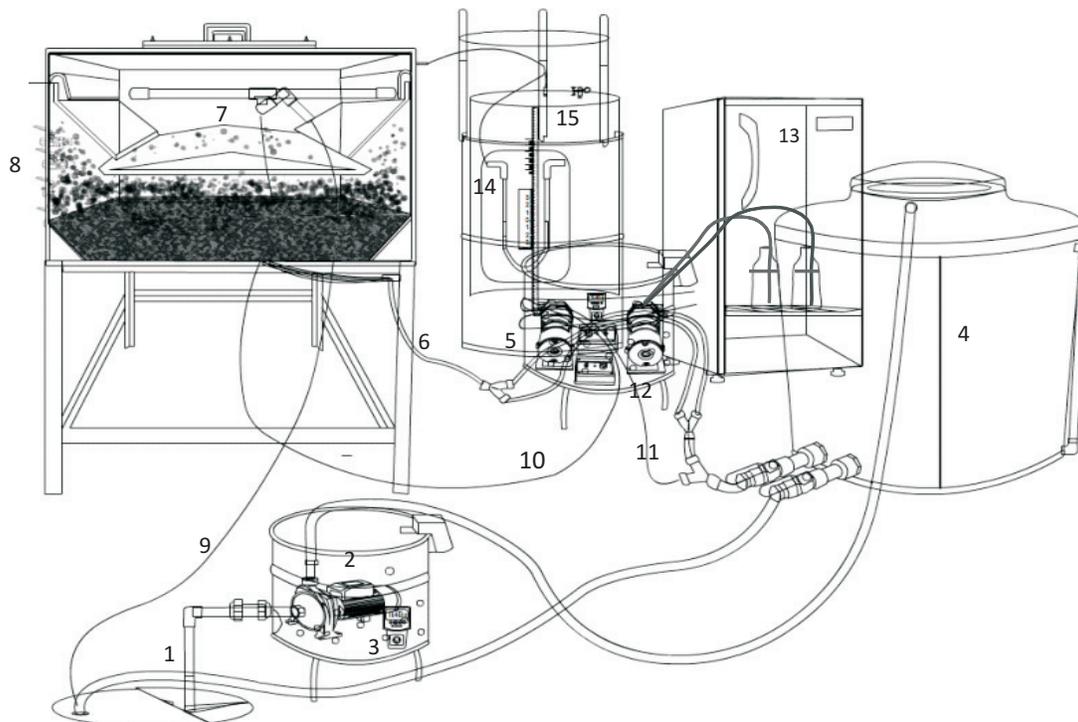
Instalación experimental

El MF fue instalado en el Centro de Investigaciones del Agua (CIA), tomando agua residual municipal (ARM) del Colector C, que recolecta las aguas del sector noroeste de la ciudad de Maracaibo (Venezuela). El agua fue tomada directamente a través de una bomba periférica autocebante de 1 HP que la conducía a un tanque de 1200 L alimentado 10 veces al día con la ayuda un programador horario, seguidamente, fue bombeada al reactor a un caudal constante mediante una bomba peristáltica marca Cole-Parmer modelo 7553-80 de 6-600 rpm. Se utilizó una segunda bomba peristáltica para tomar

muestras compuestas del afluente y efluente, 15 minutos después de alimentado el tanque con la ayuda de otro programador horario para luego introducirlas en un refrigerador para su preservación a 4 °C. Se instaló un recolector y medidor de biogás como se observa en la Figura 1.

Arranque y operación del RAFA

Se inocularon 105 litros de lodo (20% v/v), 62 L proveniente de una cervecería local y 43 L de una laguna facultativa. La operación del reactor se llevó a cabo a tiempos de retención hidráulico teórico (t_r) de 10, 8, 5, 4 y 3 h y se determinaron los siguientes parámetros físico-químicos: Temperatura, pH, alcalinidad, demanda química de oxígeno (DQO), producción de biogás, contenido de metano, de acuerdo a lo establecido en el Método Estándar [25]. Inicialmente, el reactor operó con 3 entradas alineadas y distribuidas en el fondo del reactor por 334 días y luego se modificó el sistema de distribución del flujo operando desde 5-15 entradas por 113 días.



Fuente: Elaboración propia

Figura 1. Diagrama general del experimento. 1. Captación, 2. Bomba periférica, 3. Programador horario, 4. Tanque almacenamiento, 5. Bomba alimentación, 6. Afluente, 7. Reactor, 8. Puntos de muestreo, 9. Efluente, 10. Muestra efluente, 11. Muestra afluente, 12. Bomba para muestreo, 13. Refrigerador, 14. Manómetro, 15. Medidor de biogás.

Similitud entre modelo físico y prototipo

Para determinar la reproducibilidad del flujo se realizaron ensayos hidráulicos utilizando Li^+ (LiCl) como trazador por ser un elemento de poca interacción con el manto de lodo [14, 26, 27]. EL Li^+ fue seleccionado previamente empleando reactores por carga [28] y efectuado a flujo continuo a escala de laboratorio [29]. Se agregaron de forma instantánea 250 mL de una solución patrón de $5000 \text{ mgLi}^+/\text{L}$ ($C_0 = 2,5 \text{ mg/L}$) [30], la inyección se hizo con la ayuda de una bomba peristáltica e inmediatamente se inició la recolección de las muestras en el efluente. La recolección se hizo por un periodo mínimo de 4 veces t_0 , siendo recomendada una duración mínima de 3 veces el t_0 del reactor [21, 27, 30]. Para las mediciones de litio se utilizó un espectrofotómetro de absorción atómica (marca Perkin Elmer, modelo 3110, método de llama gas aire-acetileno a $670,80 \text{ nm}$) con un límite de detección mínimo de $0,01 \text{ mg/L}$. Las muestras fueron preservadas con ácido nítrico, mantenidas en refrigeración y digeradas antes de su medición [25].

Presentación y análisis de los resultados

Diseño del modelo físico

Con los datos básicos del prototipo aplicado por Avella, Peña y Mara [14, 21], se diseñó el MF no distorsionado (Tabla 1) con un volumen útil de 518 L ; dimensiones internas de $88,4 \text{ cm}$ ancho; $118,4 \text{ cm}$ de largo y 55 cm de alto construido en plástico transparente de 8 mm reforzado con una faja metálica.

La similitud física se logró con una relación de longitud relativa (L_r) similar para todas sus dimensiones, las diferencias observadas en L_r para el largo ($0,1239$), ancho ($0,1228$) y altura ($0,1288$) se debieron a errores humanos durante su construcción. La similitud cinemática fue lograda en la velocidad dividiendo la altura del reactor entre el t_0 de 5 h [18] resultando equivalente a un factor de 8 (escala reducida del prototipo), con ella se calculó la aceleración; en el caso de la relación de volumen, no se obtuvo similitud debido al factor de reducción de escala [4]. La similitud dinámica fue lograda con el número de Pelet (Pe_m / Pe_p) =

$0,1936$ [18], en la fuerza y la masa no hubo similitud debido a la diferencia de su magnitud entre modelo y prototipo.

Inoculación y arranque

Después de inoculado el reactor se dejó por carga hasta que se logró una eficiencia de remoción del 70% en términos de la DQO al sexto día, lo que indicó que el sistema podía ser alimentado a flujo continuo. Sin embargo, con la operación del reactor a flujo continuo y 3 entradas, las eficiencias de remoción en términos de remoción de la DQO total (DQO_T) fue de $33,12\%$ y de $24,95\%$ para la DQO soluble (DQO_S), lo que hizo evidente la necesidad de una mejor distribución del afluente por lo que se operó variando número de entradas de 3 a 15 (5, 7, 9, 11, 13 y 15).

Evaluación y control del proceso

El reactor fue operado durante 460 días. Las evaluaciones hidráulicas se realizaron a t_0 de 10, 8, 5, 4 y 3 h. La evaluación del proceso e hidráulica se realizaron cuando el reactor permaneció en estado estable por un tiempo mínimo de 7 días, la cual fue observada por la producción de biogás, contenido de metano, DQO y pH.

La temperatura ambiente promedio fue de $29,63 \pm 2,22^\circ\text{C}$ siendo inferior a la del afluente ($33,93 \pm 1,39^\circ\text{C}$) y efluente ($31,62 \pm 1,83^\circ\text{C}$). El pH del afluente ($7,19 \pm 0,19$ y $7,26 \pm 0,18$) fue ligeramente superior al efluente ($6,92 \pm 0,13$ y $6,90 \pm 0,18$), en ambos casos permaneció cerca del rango de la neutralidad, el cual es recomendado para un buen desarrollo de la digestión anaerobia [16, 31-33]. Lo anterior indica, que la alcalinidad del sistema ($236 \pm 33,64 \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$) fue suficiente para mantener la estabilidad en el pH. La eficiencia de remoción de la carga orgánica permaneció casi constante (cerca al 30%) cuando el reactor funcionó con 3 entradas. Las mayores eficiencias fueron logradas a t_0 de 5 horas cuando se modificó el sistema de distribución del flujo 5 a 15 entradas, llegando hasta $62,49\%$ y $62,22\%$ para la DQO_T y DQO_S respectivamente.

La producción de biogás varió desde $0,165$ a $0,456 \text{ m}^3\text{biogás}/\text{kgDQOr}$, con un promedio de $0,280$ los cuales fueron muy similares a los obtenidos en el prototipo por Peña y Avella [21] de $0,341$ a $0,434 \text{ m}^3\text{biogás}/\text{kgDQOr}$. El porcentaje

Tabla 1
Similitud geométrica, cinemática y dinámica entre el modelo físico y el reactor prototipo

Similitud geométrica					
Variables	L (m)	W (m)	H (m)	Hs (m)	
Prototipo	9,55	7,2	4,0	1,50	
Modelo físico	1,184	0,884	0,515	0,187	
FS	8,07	8,14	7,77	8,00	
Relación $L_m/L_p = L_r$	0,124	-	-	-	
Relación W_m/W_p	-	0,123	-	-	
Relación H_m/H_p	-	-	0,129	-	
Similitud cinemática					
Variables	t_o (día)	v (m/s)	a (m ² /s)	Q (L/s)	V (m ³)
Prototipo	2,14E-1	8,28E-01	1,17E-08	14,90	275
Modelo físico	2,14E-1	1,03E-01	1,51E-09	2,83E-02	5,22E-1
Relación v_m/v_p	-	0,124	-	-	-
Relación a_m/a_p	-	-	0,129	-	-
Relación V_m/V_p	-	-	-	-	1,81E-03
Similitud dinámica					
Variables	d	D (m ² /h)	Pe	F (Nw)	M (Kg)
Prototipo	0,406	1,529	2,463	3,23E-03	275000
Modelo físico	0,260	2,29E-02	3,846	8,29E-07	521,7
$Pe_{mc} = Pe_m * L_r$			0,4768	-	-
Relación Pe_{mc}/Pe_p	-	-	0,1936	-	-
Relación F_m/F_p	-	-	-	2,57E-04	-
Relación M_m/M_p	-	-	-	-	1,897E-03

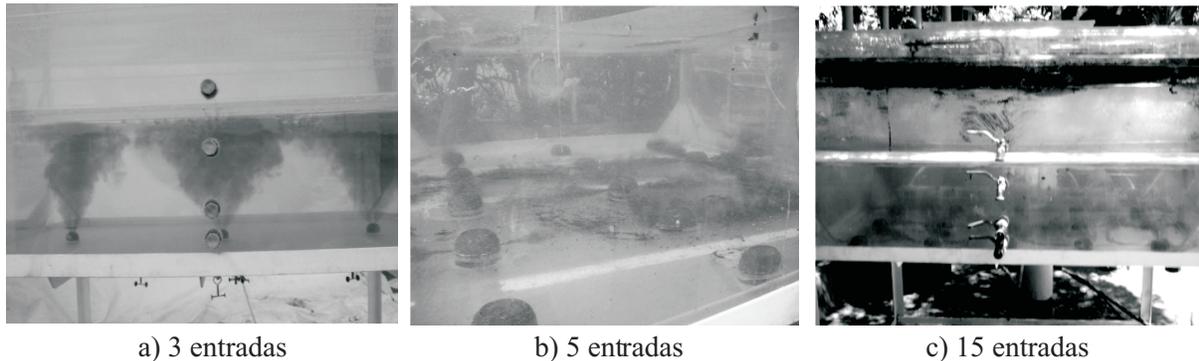
Subíndices: p = prototipo, m = modelo y c = corregido. L = largo, W = ancho, H = altura; FS = factor de escala, Hs = altura del sedimentador. t_o = tiempo de retención hidráulico teórico. v , a , V = Velocidad, aceleración y volumen; Q = caudal; d = número de dispersión; D = coeficiente de dispersión; Pe = Número de Peclet; F = Fuerza de movimiento; M = Masa del fluido; - No aplica.

de metano varió entre 49,4% y 88,92% con un promedio de 72,32%; estos resultados son similares a los mostrados en la fase de laboratorio al igual que en otras investigaciones [34, 35].

Reproducibilidad entre el prototipo y el modelo

La calibración del flujo y reproducibilidad de los patrones de flujo se llevó a cabo a t_o de 10, 8

y 5 h antes y después de modificar el sistema de distribución del flujo. Las evaluaciones preliminares con las modificaciones del sistema de distribución del flujo permitieron observar la homogeneidad de su distribución con el aumento del número de entradas de 3-15 como se muestra en la Figura 2. Es importante anotar, que cuando el sistema funcionó con 3 entradas, las boquillas estaban orientadas verticalmente y cuando se



a) 3 entradas

b) 5 entradas

c) 15 entradas

Figura 2. Imagen de la distribución del flujo a varias entradas.

modificó el sistema de distribución se colocaron con salida lateral. Además, se pudo observar que si se considera el eje del reactor en la dirección vertical (dirección del flujo) el primer cambio de la concentración del trazador ocurrió en la dirección lateral o transversal, hasta que ocurrió la mezcla, seguidamente la concentración principal varió en la dirección longitudinal axial tal como lo expuso Holley [36].

Antes de modificar el sistema de distribución del flujo, la reproducibilidad de los patrones de flujo entre el prototipo y el modelo físico se logró a un t_0 de 5 h tal como se muestra en la Figura 3, a un t_0 de 10 y 8 h se observó poca coincidencia en la distribución de edades del trazador entre el prototipo y el modelo físico. Debido a lo anterior, se tomó el t_0 de 5 h y se varió desde 5 a 15 el número de entradas logrando una mejor reproducibilidad del flujo, lo que se observa en la superposición de las graficas entre el prototipo y el MF (Figura 4). Todo ello indica que se lograron mejores condiciones hidráulicas y por tanto mejor simulación dinámica.

Un análisis de regresión entre la concentración adimensional del prototipo ($E\theta_p$) y modelo ($E\theta_m$) mostró un buen ajuste para todos los casos ($R^2_{aj} > 0,775$), el mejor ajuste se logró con la DTR del ensayo a 5 h (replica) del prototipo y el MF funcionando con 7 entradas ($R^2_a = 0,928$, $SSE = 0,541$, $RMSE = 0,1193$ y $\sigma = 0,0248$) como se puede apreciar en la Tabla 2. Es importante anotar, que estos valores indican una buena reproducibilidad por parte del MF ya que es difícil lograr una mayor reproducción incluso en el mismo reactor debido a factores como la temperatura del medio ambiente o del agua, que ocasiona alteraciones en los resultados al producir corrientes

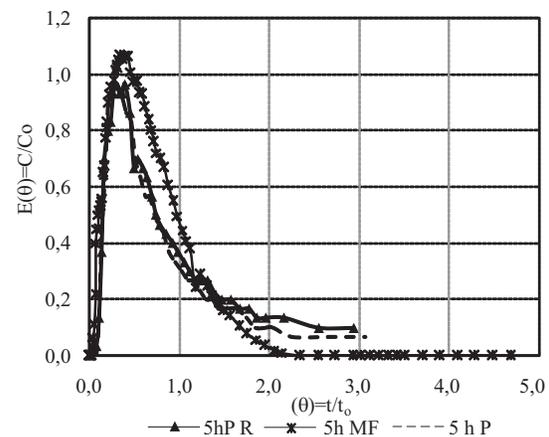


Figura 3. Comparación de la curva de distribución del trazador entre prototipo y modelo físico, t_0 de 5 h con 3 entradas.

térmicas, fenómeno que produce marcadas variaciones en los ensayos con trazadores [37].

Si se verifica la similitud dinámica (con el mejor ajuste realizado entre modelo físico y prototipo), se obtiene la misma longitud relativa (L_r) obtenida para la similitud geométrica $L_m/L_p = L_r = 0,1290$ en comparación a $0,1936$ obtenida a escala de laboratorio ($FS = 8$) en otro estudio [18], indicando que el MF a escala piloto establecido en este estudio, logró simular mejor al prototipo. La velocidad estimada con la ecuación (11) [23] fue mayor que la velocidad teórica, esto puede deberse al volumen ocupado por el lodo que reduce el área de flujo líquido aumentando con ello la velocidad ascensional que de no ser evaluada, lo más común es asumir velocidades uniformes a lo largo del reactor [14, 27, 38-40].

El número de dispersión fue muy similar entre el prototipo y MF en la mayoría de los casos como se puede ver en la Tabla 3, al igual que ocu-

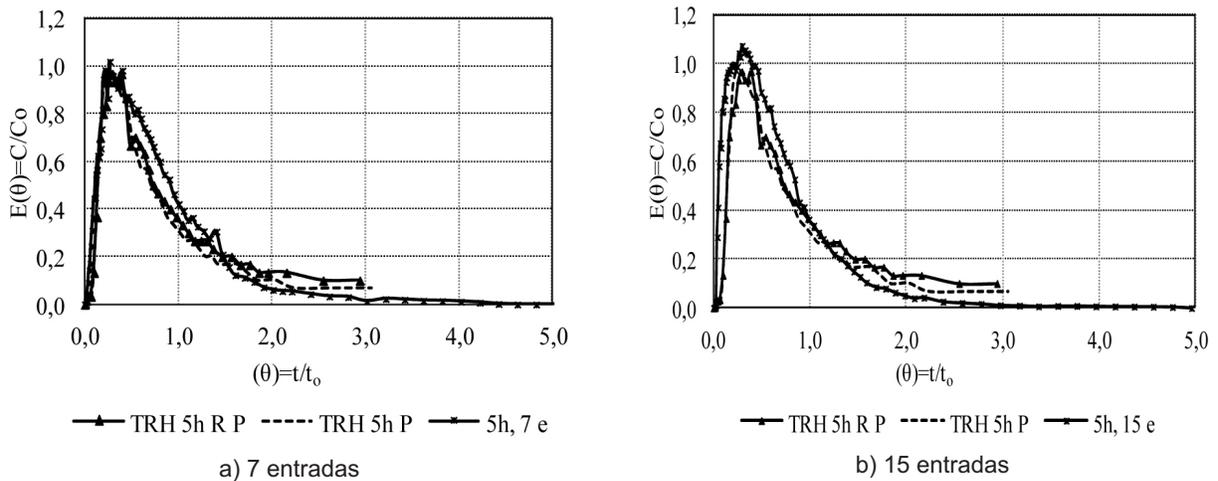


Figura 4. Comparación de la curva de distribución del trazador entre prototipo y modelo físico con modificaciones de 5 a 15 entradas, t_o de 5 h

Tabla 2
Bondades de la simulación física entre el modelo físico y el prototipo

Modelo Físico t_o (h)/entradas	Prototipo $t_o = 5$ h					Prototipo $t_o = 5$ h*				
	R^2	R^2_a	SSE	RMSE	σ	R^2	R^2_a	SSE	RMSE	σ
5/3	0,855	0,852	1,515	0,191	0,037	0,882	0,878	1,186	0,177	0,032
5*/3	0,836	0,831	3,388	0,299	0,031	0,780	0,775	3,563	0,306	0,044
5/5	0,840	0,830	1,342	0,188	0,039	0,845	0,841	1,079	0,169	0,037
5/7	0,900	0,898	0,855	0,150	0,031	0,930	0,928	0,541	0,119	0,025
5/9	0,880	0,881	0,921	0,156	0,034	0,883	0,879	0,729	0,138	0,032
5/11	0,813	0,808	1,506	0,199	0,043	0,868	0,864	1,028	0,165	0,034
5/13	0,924	0,922	1,483	0,198	0,028	0,897	0,894	1,384	0,191	0,030
5/15	0,868	0,868	1,617	0,206	0,036	0,861	0,857	1,409	0,193	0,035

t_o = tiempo de retención hidráulico teórico, * = Réplica, R^2 = coeficiente de determinación, R^2_a = coeficiente de determinación ajustado, SSE = sumatoria de los errores al cuadrado, RMSE = raíz del error cuadrado medio (*Root mean square error*), σ = desviación estándar.

rió la eficiencia hidráulica ($\beta = \bar{t} / t_o$). Esta relación entre el tiempo de retención hidráulico y el teórico indica la cantidad de desviación del flujo real del ideal o teórico lo que ocurre por efecto de flujo advectivo, zonas muertas o flujo reverso, su semejanza entre prototipo y MF corrobora la similitud del flujo. β se mantuvo entre 0,798 a 0,951; valores similares a los reportados en otro RAFA a escala piloto (0,708 a 0,983) y laboratorio

a 0,546 a 0,947 [38]. Esto permite afirmar, que β en los RAFA es mayor que en otros sistemas como las lagunas de estabilización, en la cual varían entre 0,17 a 0,67 [41], en filtro anaerobio optimizado 0,850 [30] e incluso en RAFA a escala real con exceso de lodo 0,378 [39].

Si bien, se logró una alta eficiencia hidráulica con 3 entradas (2,87 entradas/m²), no existió una buena agitación o mezclado del afluente,

Tabla 3
Parámetros hidráulicos obtenidos en los ensayos con trazadores

Datos Generales					Resultados de los ensayos				
Nº de Entradas/m ²	t_o^* (min)	H _L (cm)	Q _g (L/h)	v_t (m/h)	% Li ⁺	\bar{t} (min)	v (m/h)	d	β
MF con 3 entradas									
2,87	624	12,6	1,22	0,051	98,7	560	0,057	0,291	0,897
2,87	484	13,5	2,56	0,065	101,7	461	0,069	0,382	0,951
2,87	308	13,8	3,16	0,103	92,3	289	0,101	0,421	0,938
2,87	300	13,8	3,28	0,106	93,3	260	0,122	0,704	0,866
MF con las modificaciones									
4,78	299	15,5	4,34	0,105	100,7	280	0,111	0,337	0,938
6,69	298	16,1	4,36	0,104	93,0	280	0,111	0,443	0,939
8,60	294	16,7	5,09	0,105	91,1	260	0,119	0,421	0,883
10,51	300	17,1	5,89	0,104	98,1	240	0,130	0,443	0,801
12,42	299	17,8	6,06	0,105	96,8	295	0,106	0,729	0,988
14,33	302	18,9	6,12	0,104	91,8	241	0,131	0,668	0,798
Prototipo									
0,35	292	320a	5700	0,8221	90,0	263	0,912	0,451	0,902
0,35	307	310a	5100	0,7802	87,0	290	0,828	0,462	0,943

t_o = tiempo de retención hidráulico teórico, * = determinado con el caudal promedio aplicado, H_L = altura del lecho de lodo, Q_g = caudal de biogás, v_t = velocidad ascensional teórica, %Li⁺ = trazador recuperado, \bar{t} = tiempo de retención hidráulico experimental, v = velocidad ascensional estimada, d = número de dispersión. β = eficiencia hidráulica, a = corresponde a la altura del lecho y manto de lodo.

para garantizar un contacto adecuado entre microorganismos y substrato, influyendo además la baja velocidad ascensional y por tanto bajos niveles de eficiencia de remoción de carga orgánica obtenida con esta condición.

El número de dispersión del MF ($d = 0,4429$) para 7 entradas (6,69 entradas/m²) fue similar al promedio obtenido en el prototipo (0,4608), lo que indicó que se reprodujo el mismo tipo de flujo. El porcentaje mínimo de recuperación del trazador fue del 91,0% lo que indicó que el Li⁺ es un trazador conservativo por lo tanto los datos obtenidos de la curva de DTR son confiables [42], los valores ligeramente por encima de 100 pudieron deberse a error humano. El valor de d obtenido estuvo por debajo a los reportado en lagunas de estabilización (0,90-1,85) y equivalente a sistema de humedales (0,30-0,42) [4].

Conclusiones

Se obtuvo una superposición de la DTR a un tiempo de retención hidráulico entre el prototipo y el modelo físico lo que indicó una alta reproducibilidad del patrón de flujo por parte del MF, lo cual puede ser aplicado en un diseño a escala real.

Una distribución adecuada del afluente favoreció el mezclado y como consecuencia un mayor contacto entre los microorganismos y el substrato logrando aumentar la eficiencia de remoción de la materia orgánica medida como DQO.

Se logró una alta eficiencia hidráulica cuando el reactor funcionó con 3 entradas (2,87 entradas/m²); a un t_o de 5 horas sin embargo, la eficiencia en la remoción de la carga orgánica (medida como DQO) fue baja justificando la nece-

sidad de una mejor distribución de efluente incrementándose el número de entradas y por consiguiente el contacto entre el substrato y la biomasa presente.

Referencias bibliográficas

1. Escuela de Ingeniería de la Universidad de Antioquia. Mecánica de fluidos y recursos hidráulicos. Modelos físicos. Disponible en: <http://fluidos.eia.edu.co/fluidos/modelos/justificacion.htm>. Consultada 20 de junio de 2010.
2. Chanson H.: "The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction. Physical Modelling of Hydraulics". [On-Line]. Consultada Septiembre 10 de 2010. Disponible en: <http://espace.library.uq.edu.au/eserv/UQ:9400/chap14.pdf>. 1999. Capítulo 14. 261-283.
3. Mahmood B., Wall G. and Russell J.: "A physical model to make short-term management decisions at effluent-irrigated land treatment system". *Agricultural water management*, Vol. 58 (2003) 55-65.
4. Aldana G.: "Hydraulic behaviour and performance improvement of waste stabilization ponds using a computational fluid dynamics and physical model". PhD. Dissertation. Guildford, University of Surrey, England. (2004) 264-290.
5. Fox R., McDonald A.: "Introducción a la mecánica de fluidos". 2^{da} ed. Ed Grupo Impresora S.A de C.V. México. (1993) 315-319.
6. Yabani G.: "A study of the hydraulic behavior of waste stabilization pond using a physical model". MSc. Thesis center for Environment Health Engineering (CEHE). University of Surrey, England. (2002) 180.
7. Martín J.: "Modelos físicos de ríos en lecho fijo y móvil". II Seminario de Potamología José Antonio Maza Álvarez. Tabasco, México (2009). [On-Line]. Consultada el 8 de noviembre de 2010. Disponible en: <http://www.imta.gob.mx/potamologia/images/docs/evento/JuanPedroMartinVide2.pdf>. 1-62.
8. Bolinaga J.: "Mecánica elemental de los fluidos". 1^a ed. Fundación Polar. Venezuela. (1985). 120-340.
9. Roberson J. and Clayton C.: "Mecánica de fluidos". 2^a ed. McGraw-Hill/Interamericana S.A. México. (1991) 285-301.
10. Blanco, H., López E., Pereyra E. y Rincones M. "Uso de un modelo físico a escala laboratorio para el diseño de sistemas de lodos activados". *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad central de Venezuela*, Vol. 16. (2005) 5-12.
11. Dautant R. Herrera L.: "Relación entre resultados en un reactor a escala laboratorio y otra a escala natural (Caso real)". XXV Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. México, D.F. (1995) 1-10.
12. Hálales M., Sawajneh Z., M- Zu B., Zeeman G., Lier J., Fallad M. and Lettinga G.: "Treatment of strong domestic sewage in a 96 m³ UASB reactor operated at ambient temperatures: two-stage versus single-stage reactor". *Bioresource Technology*. Vol. 96 (2005) 577-585.
13. Foresti E.: "Perspectives on anaerobic treatment in developing countries". *Water Science Technology*. Vol. 44 (2001) 141-148.
14. Avella, G. "Evaluación del comportamiento hidrodinámico de un reactor UASB y su influencia en la remoción de materia orgánica". Tesis de maestría en ingeniería sanitaria y ambiental. Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Cali, Colombia. (2001) 136.
15. Ghangrekar M., Asolekar S., Ranganathan K. and Joshi S.: "Experience with UASB reactor start-up under different operating conditions". *Water Science Technology*. Vol. 34 (1996) 421-428.
16. Álvarez J., Ruiz I., Gómez I., Presas M. and Soto J.: "Start-up alternatives and performance of an UASB pilot plant treating diluted municipal wastewater at low temperature". *Bioresource Technology*. Vol. 97 (2006) 1640-1649.
17. Gimenez J., Nassr, S., Maestri, R., Monteggia L. and Van L.: "Physical modelling of an upflow anaerobic sludge blanket reactor: near-field study". *Water Science and Technology*. Vol. 45. (2002) 157-162.
18. Aldana G. y Pérez, J.: "Simulación del patrón de flujo y del tiempo de retención hidráulico en lagunas de estabilización y reactores

- anaerobios de flujo ascendente (RAFA) a través de un modelo físico". Revista Técnica de ingeniería Universidad del Zulia. Vol. 33, N° 1; (2010) 48-58.
19. Berezowsky M.: "Modelación matemática de flujos". II Seminario de Potamología José Antonio Maza Álvarez. Tabasco, Mexico (2009). [On-Line]. Consultada el 8 de noviembre de 2010. Disponible en: <http://www.imta.gob.mx/potamologia/images/docs/evento/MoisesBerezowsky.pdf>
 20. Singhal A., James G., Praveen V. and Ramachandran K.: "Axial dispersion model for upflow anaerobic sludge blanket reactors". *Biotechnology Progress*. Vol. 14. (1998) 645-648.
 21. Peña M., Mara D. and Avella G. "Dispersion and treatment performance analysis of an UASB reactor under different hydraulic loading rates". *Water Research*. Vol. 40. (2006) 445-452.
 22. Zeng Y., Mu S., Lou S., Tartakovsky B., Guiot P. and Wu P.: "Hydraulic modeling and axial dispersion analysis of UASB reactor". *Biochemical Engineering Journal*. Vol. 25 (2005) 113-123.
 23. Pérez J.: Modelo de dispersión axial de un reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA) utilizando aguas residuales municipales. Tesis doctoral. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia. Venezuela (2010) 197.
 24. Levenspiel O., *Chemical reaction engineering*. 2ª ed. Ed. S.A. Wiley. New York (USA). (1999) 253-315.
 25. APHA, AWWA, WEF. "Standard Methods for the examination of water". 20ª ed. American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation. Washington D.C. (1998) 1325.
 26. Van Haandel A. and Lettinga G.: Tratamiento Anaeróbico de Esgotos: Um Manual para Regiões de Clima Quente. Ed. Epgraf. Brasil. (1994) 225.
 27. Lara C., Díaz J. y Bona A.: "Evaluación hidráulica de un reactor UASB de compartimientos. Seminario Internacional: Tratamiento y Postratamiento de Aguas Residuales". Universidad del Valle. Colombia y Universidad de Paraná. [On-Line]. Consultada el 10 de septiembre de 2007. Disponible en: <http://www.uniboyaca.edu.co/tratamaguas13.pdf>. (2000) 255-273.
 28. Pérez J., Rincón N. y Bracho N.: "Evaluación de la adsorción de rodamina WT, litio y cloruro en reactores por carga inoculados con lodo anaerobio". *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*. No. 58 (2011) 74-84.
 29. Pérez J., Aldana G., Useche M., Rincón N., Bracho N. y Mesa J.: "Evaluación del modelo de dispersión axial de un reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA) a escala de laboratorio". *Revista Técnica de Ingeniería Universidad del Zulia*. Vol. 33, N° 3 (2010) 213-222.
 30. Pérez A. and Torres P.: "Evaluación del comportamiento hidrodinámico como herramienta para optimización de reactores anaerobios de crecimiento en medio fijo". *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*. No 45 (2008) 27-40.
 31. Gulnaz O., Kaya A., Matyar F. and Arikan B. "Sorption of basic dyes from aqueous solution by activated sludge". *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 108 (2004) 183-188.
 32. Aiyuk S., Forrez L., De Kempeneer L., Van Haandel A. and Verstraete W.: "Anaerobic and complementary treatment of domestic sewage in regions with hot climates – A review". *Bioresource Technology*. Vol. 97 (2006) 2225-2241.
 33. Satoto E.: "Anaerobic digestion of organic solid waste for energy production". Tesis doctoral. Universitat Fridericiana zu Karlsruhe (TH). Indonesien (2009) 148.
 34. Bermúdez R., Rodríguez S., Martínez M., Adis I. y Brown T.: "Ventajas del empleo de reactores UASB en el tratamiento de residuales líquidos para la obtención de biogás". *Tecnología Química*. Vol. XXIII (2003) 37-44.
 35. Carrillo L.: *Energía de Biomasa*. 1ra ed. July. [On-Line]. Consultado el 20 de septiembre de 2009. Disponible en: <http://www.unsa.edu.ar/matbib/ebiomasa.pdf>. 21/05 / 2009.(2004).
 36. Holley E., "Unified view of diffusion and dispersion". *Journal of the Hydraulics Division*

- proceedings of the American Society of Civil Engineers". Vol. 2 (1969) 620-631.
37. Galvis, G.: "Análisis de flujo y factores que determinan los periodos de retención. Manual N° 4" HPE/OPS/CEPIS de mejoramiento de calidad del agua para consumo humano". Cali, Colombia (1990) 36-92.
 38. Morgan J., Jimenez B. and Noyola A.: "Tracer studies in laboratory and pilot scale UASB reactor". Environmental Technology. Vol. 18 (1997) 817-825.
 39. Arroyave D., González M. y Gallego D.: Evaluación del comportamiento hidráulico en un reactor UASB utilizado para el tratamiento de aguas residuales. VIII Congreso Peruano de ingeniería química. [On-Line]. Consultada el 21 de enero de 2008. Disponible en: http://www.ciiq.org/varios/peru_2005/Trabajos/III/3/3.3.11.pdf (2005) 1-10
 40. Lou S., Tartakovsky B., Zeng Y. and Wu P.: "Fluorescence based monitoring of tracer and substrate distribution in an UASB reactor". Chemosphere. Vol. 65 (2006) 1212-1220.
 41. Aldana G. y Bracho, N. "Simulación y predicción de la hidrodinámica en las lagunas de estabilización de LUZ utilizando un modelo computacional en 3D". Revista Técnica Ingeniería. Universidad del Zulia. Vol. 28, N° 1 (2005) 86-94.
 42. Małoszewski P., Wachniew P. and Czupryński P.: "Hydraulic Characteristics of a Wastewater Treatment Pond Evaluated through Tracer Test and Multi-Flow Mathematical Approach". Polish Journal of Environmental Studies. Vol. 15 (2006) 105-110.

Recibido el 16 de Junio de 2012

En forma revisada el 6 de Mayo de 2013