

# **ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE UNIDADES DE TRATAMIENTO DE AGUA**

**DAGOBERTO BURGOS FLORES<sup>(1)</sup>, ALEJANDRA MARTÍN DOMÍNGUEZ<sup>(2)</sup>  
e IGNACIO MARTÍN DOMÍNGUEZ.<sup>(1)</sup>**

<sup>(1)</sup>Centro de Investigaciones en Materiales Avanzados, S.C. (CIMAV)  
Miguel de Cervantes 120, Complejo Industrial Chihuahua. 31109  
Chihuahua, Chihuahua. México.

<sup>(2)</sup>Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE)  
Calle Reforma 123, Colonia Palmira. C.P. 62490  
Cuernavaca, Morelos, México

## **RESUMEN**

En este trabajo se comparan tres métodos que utilizan la técnica de trazadores para inferir la presencia de problemas hidráulicos en unidades de tratamiento de agua. Uno de los métodos es de tipo cualitativo (Modelos de flujo) y los otros dos (Modelo Simplificado de Rebhun y Argaman y Modelo de varios reactores en serie) utilizan modelos matemáticos para cuantificar la magnitud de las zonas muertas y de los corto circuitos presentes en los sistemas de mezcla, floculación y sedimentación. Los resultados se analizaron comparando las predicciones de los modelos, contra datos experimentales obtenidos en plantas potabilizadoras y en un modelo a escala de un sedimentador de alta tasa, utilizando la técnica de estímulo-respuesta haciendo uso de NaCl como trazador. Se encontró que los porcentajes de zonas muertas predichos por ambos modelos matemáticos fueron aceptables, cuando el sistema en estudio no presentaba recirculaciones ni tiempos de retraso, de igual forma el método cualitativo coincide con ambos métodos matemáticos en el tipo predominante de flujo en la unidad.

## **ABSTRACT**

A comparison is presented between three methods that uses the tracer technics for characterizing and analyzing the hydraulic behaviour of treatment plants which rather than being perfectly agitated, present stagnation zones, shortcircuits and/or internal recirculation. One of the methods used for the analysis is a qualitative method (Flow methods) and the other two are quantitative mathematical models such as the Reh bun & Argaman Simplified Model (R&A) and the Several Reactors in Series with Stagnant Zones and Short-circuit (SRS). In order to evaluate these models, their predictions were compared against tracer flow through experimental data, obtained at actual water treatment plants and a model of high rate sedimentation unit, with NaCl as tracer. It is found that there exists a good agreement between the results of both mathematical methods concerning stagnation zones when the studied system does not have short-circuited flows or internal recirculation flows, and the graphic methods shows a very good characterizing of the fluid flows.

## INTRODUCCIÓN

Una de las consideraciones prácticas más importantes que intervienen en el diseño de un reactor, es como conseguir las condiciones ideales supuestas en el comportamiento hidráulico. En la práctica, siempre hay alguna desviación de las condiciones ideales, y lo importante son las precauciones tomadas para minimizar estos efectos.

La existencia de zonas muertas y corto circuitos en las unidades de tratamiento pueden afectar considerablemente la operación y la eficiencia de los mismos. En el primer caso, el líquido que entra sale casi inmediatamente sin cumplir con el tiempo de residencia requerido por el proceso (1). Un ejemplo de esto es la presencia de corrientes de densidad ocasionadas por diferencias de temperaturas en la columna de agua sobre todo en climas cálidos y tanques de gran volumen (2). El uso ineficaz del volumen del reactor por zonas muertas causadas por una inadecuada mezcla o falta de mantenimiento de las unidades, puede también constituir un problema serio de funcionamiento que disminuye la eficiencia de los tratamientos de agua (3), ya que un porcentaje del agua que entra tiene un fuerte retardo al salir, o incluso nunca llega a hacerlo (4).

Adicional a los problemas hidráulicos antes mencionados, se tiene el de recirculación, mismo que origina un retardo en la salida “normal” del líquido, ya que al chocar el flujo con la pared cerca del orificio de salida, hay una devolución de una parte de éste al interior del reactor (5).

Las pruebas con trazadores denominadas también técnicas de estímulo-respuesta (5), (6), son de gran utilidad para conocer el comportamiento hidráulico de mezcladores, floculadores y sedimentadores (7), sin necesidad de sacar las unidades de operación. El objeto de las pruebas con trazadores es el de determinar la proporción de flujo pistón y mezclado, así como el porcentaje de cortocircuitos y zonas muertas, agregando al flujo sustancias llamadas trazadoras. Estas se inyectan en el flujo de entrada al tanque que se quiere analizar, en concentración conocida, y se determina a la salida del mismo como dicha concentración se distribuye a través del tiempo.

La concentración inicial del trazador, suponiendo que este se distribuye perfectamente en todo el volumen de estudio, se puede calcular mediante el área bajo la curva de respuesta a la salida del reactor

$$C_o = \frac{\int_0^{\infty} Q C(t) dt}{V} = \frac{Q}{V} \int_0^{\infty} C(t) dt = \frac{1}{\tau} \int_0^{\infty} C(t) dt \approx \frac{\sum C \Delta t}{\tau} \quad [1]$$

O mediante la cantidad de trazador agregada al inicio de la prueba

$$C_0 = \frac{W}{V} \quad [2]$$

Donde:

$C_0$  = Concentración inicial del trazador

$Q$  = Gasto ( $m^3/s$ )

$V$  = Volumen de la unidad ( $m^3$ )

$\tau$  = Tiempo teórico de residencia (s)

$C(t)$  = Concentración del trazador en el tiempo  $t$  (mg/l)

$W$  = Cantidad de trazador utilizado (mg)

El tipo de respuesta que se puede obtener al utilizar la técnica de trazadores, considerando un comportamiento hidráulico ideal, se muestran en la Fig. 1 para un flujo pistón y en la Fig. 2 para una unidad de mezcla completa. (6) .

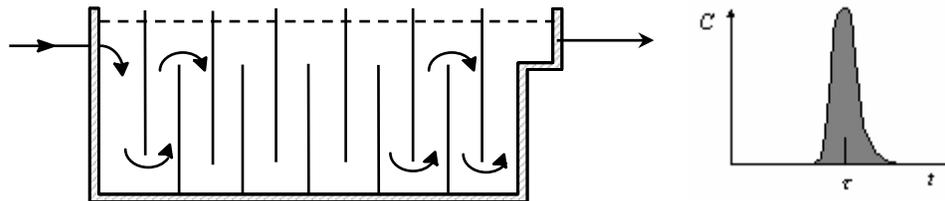


Figura 1. Respuesta del trazador a la salida de una unidad con comportamiento de flujo pistón ideal

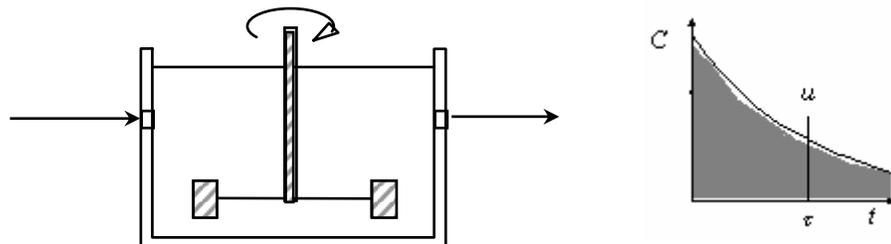


Figura 2. Respuesta del trazador a la salida de una unidad con comportamiento de mezcla completa ideal

Donde

El tiempo medio de residencia real  $\mu$ , representado por el criterio de Reynolds (6), se calcula cómo:

$$\mu = \frac{\int_0^{\infty} t C(t) dt}{\int_0^{\infty} C(t) dt} = \frac{\sum t C(t)}{\sum C(t)} \quad [3]$$

Y el tiempo de retención hidráulica (5) mediante:

$$\tau = \frac{V}{Q} \quad [4]$$

Dado que la idealidad es sumamente difícil de conseguir, se ha llevado a cabo una caracterización (5), (6) de algunos de los flujos anómalos que pueden presentarse en unidades de tratamiento mismas que se muestran a continuación.

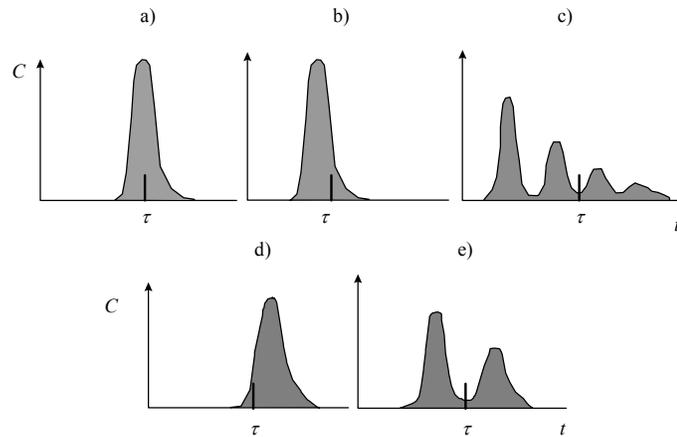


Figura 3. Caracterización de flujos anómalos cuando el flujo tiende a pistón

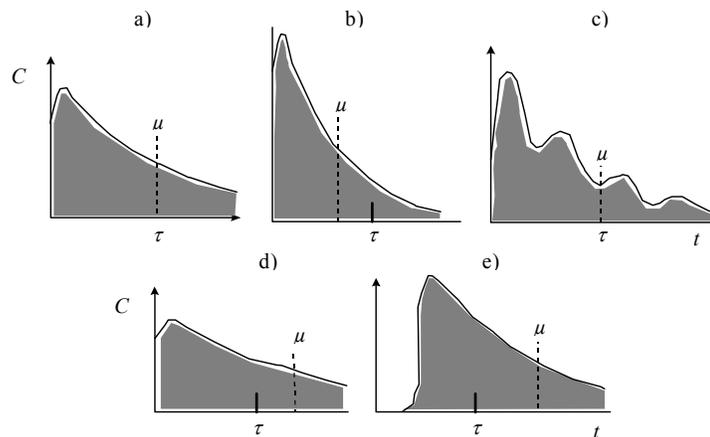


Figura 4. Caracterización de flujos anómalos cuando el flujo tiende mezcla completa

Donde:

- a) Sin ninguna anomalía,
- b) El flujo pasa a través de canalizaciones y/o hay zonas muertas,
- c) Problemas de recirculación dentro del tanque,
- d) Indica errores en la medición del gasto o el volumen
- e) Con canalizaciones por caminos paralelos a diferentes velocidades.

En estudios precedentes (8), se utilizó la técnica de trazadores con NaCl para evaluar el comportamiento hidráulico de plantas potabilizadoras. En ese estudio se observó que diferentes metodologías para interpretar la respuesta del trazador podían dar resultados distintos, lo que ponía en duda la veracidad de los valores obtenidos. Como continuación a ese estudio, se decidió comparar la información obtenida por tres de los métodos utilizados en la interpretación de la respuesta del trazador, pero bajo condiciones controladas de comportamiento hidráulico a nivel laboratorio.

Una manera de interpretar estos resultados, es mediante consideraciones de tipo cualitativo que se basan en la posición y en la forma de la curva con respecto al tiempo de residencia hidráulico(5).

Otra forma de hacer este mismo análisis, pero obteniendo valores cuantificables de los problemas hidráulicos presentes en las unidades, es el uso de modelos matemáticos que describan estos comportamientos

Los dos modelos utilizados en el presente estudio son el simplificado de Rebhun y Argaman (7), y el de varios reactores en serie (8).

### **Modelo simplificado de Rebhun y Argaman**

Consideraciones principales:

1. Modelo que asume que en las unidades de tratamiento, parte del flujo se comporta como pistón y parte como mezcla completa
2. Se basa en la función acumulativa de los tiempos de residencia
3. Considera que parte del volumen del tanque tiene zonas muertas

Tomando en cuenta estas consideraciones, la fracción de agua que permanece en la unidad más de un tiempo “t” dado, puede ser descrita por la siguiente relación:

$$1 - F(t) = e^{-\left[\frac{1}{(1-p)(1-m)}\right] [\theta - p(1-m)]} \quad [5]$$

Donde:

$\theta$  =  $t/\tau$  (“t” tiempo y “ $\tau$ ” tiempo de retención hidráulica)

p = % flujo pistón

1-p = % mezcla perfecta

1-m = % zona muerta

$$F(t) = \frac{\sum C(t)}{C_{total}} \quad [6]$$

Fracción acumulada de la totalidad del trazador que ha salido de la unidad.

Aplicando logaritmos se obtiene una ecuación lineal del tipo  $y = ax + b$  (7).

$$\log(1-F(t)) = \frac{-\theta \log e}{(1-m)(1-p)} + \frac{p \log e}{(1-p)} \quad [7]$$

Donde:  $y = \log(1-F(t))$ ,  $x = \theta$ ,  $b = \frac{p \log e}{(1-p)}$  y  $a = \frac{-\log e}{(1-m)(1-p)}$

Graficando el logaritmo de  $1-F(t)$  con respecto a  $\theta$  se obtiene una curva decreciente que presenta una tendencia recta, en la cual se buscan dos puntos adyacentes para calcular la pendiente y la ordenada al origen de la tangente que pase por ellos. De esta forma se obtienen los valores de  $m$  y  $p$  mediante el despeje de las ecuaciones  $a$  y  $b$ .

### **Modelo de varios reactores en serie con zonas muertas y cortocircuitos (8)**

El modelo de varios reactores en serie asemeja una unidad de volumen  $V$  a una serie de  $N$  unidades en serie perfectamente agitadas de volumen  $V/N$ , y tiempo de retención  $t/\tau$ .

Consideraciones

1. El desarrollo del balance de materia de cada reactor, establece que lo que sale de uno entra al siguiente.
2. El Modelo se basa en la función de transferencia.
3. Se toma en cuenta la presencia de zonas muertas y cortocircuitos.
4. A mayor número de reactores en serie, más tiende a flujo pistón el comportamiento hidráulico de la unidad

El modelo matemático resultante tomando en consideración que el trazador se aplica como un pulso es la siguiente:

$$E(\theta) = \frac{Nn}{M} \sum_{i=1}^N \frac{N! e^{\frac{-nN\theta}{M}} \left(\frac{Nn\theta}{M}\right)^{i-1} (1-n)^{N-i} n^i}{(N-i)! i! (i-1)!} \quad [8]$$

Donde:

$\theta = t/\tau$ ; (" $t$ " tiempo y " $\tau$ " tiempo de retención hidráulica  $N$  = Número de reactores en serie

$M$  = Fracción del volumen sin zonas muertas

$1-n$  = Fracción del flujo con cortocircuito

$1-M$  = Fracción del volumen con zonas muertas

Para determinar los parámetros  $n$ ,  $N$  y  $M$ , que caracterizan este modelo, se hace uso de mediciones experimentales, y de algún método numérico iterativo que haga variar los valores de los parámetros, hasta que exista el menor error posible entre los valores reales y teóricos:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\sum \left[ \left( \frac{C}{C_0} \right)_{\text{calculado}} - \left( \frac{C}{C_0} \right)_{\text{teórico}} \right]^2}}{(\text{Número de mediciones} - 1)} \quad [9]$$

Donde:

$C$  = Concentración del trazador a la salida de la unidad en el tiempo  $t$ .

$C_0$  = Concentración inicial del trazador, considerando que este se reparte uniformemente en el volumen ( $V$ ) de estudio (o solo agregar la sal y calcular la concentración mediante el área bajo la curva; ecuación 1).

Los criterios para interpretar y analizar las curvas resultantes de acuerdo al modelo anterior se muestran en la Tabla I.

Tabla I. Criterios del modelo de varios reactores en serie

Condición	Criterio
$\mu = M\tau$	Media
$\sigma^2 = \frac{M^2(2-n)}{nM}$	Varianza
$0 \leq \frac{\sigma^2}{\mu^2} \leq 1$	El cero indica que el reactor trabaja como flujo pistón y la unidad como mezcla completa.
$\frac{\sigma^2}{\mu^2} = \frac{1}{N}$	Varianza Relativa; criterio para determinar el número de tanques en serie.

### Resultados de datos experimentales de plantas potabilizadoras:

Los modelos presentados se aplicaron a unidades de plantas potabilizadoras con comportamiento hidráulico de mezcla completa, flujo pistón, con zonas muertas y cortocircuitos (9).

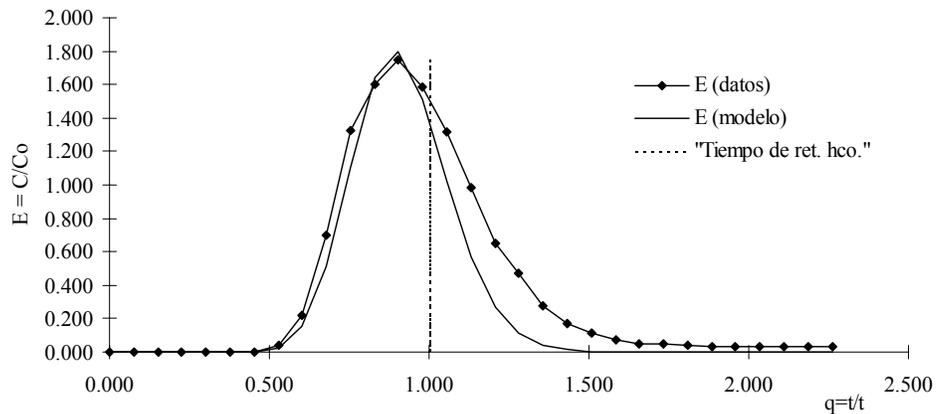


Figura 5. Modelo de varios reactores en serie con zonas muertas y cortocircuitos. Floculador de la planta de Matamoros:  $N = 40$ , Zonas muertas = 10%, Cortocircuitos = 3%; con  $\varepsilon = 0.029$   $\therefore$  Tiende más a flujo pistón

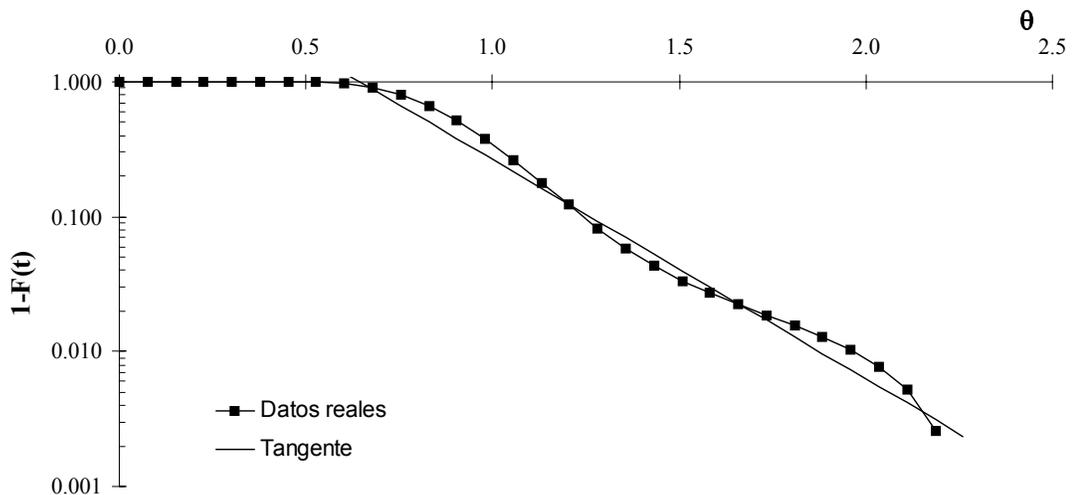


Figura 6. Modelo Simplificado de Rebhun y Argaman: Zonas muertas = 9% y flujo pistón = 71%.  $\therefore$  Tiende más a flujo pistón

Tanto el modelo de varios rectores en serie (Fig. 5) como el de Rebhun y Argaman (Fig. 6) reflejan la misma magnitud de zonas muertas. Los tres métodos coinciden que el flujo predominante en la unidad es de un comportamiento pistón; Figs, 5, 6 y 3b (el flujo pasa a través de canalizaciones y/o hay zonas muertas). Considerando estos resultados, además que la magnitud de cortocircuitos que calcula el modelo de varios reactores en serie, es de solo 3%, se puede inferir que en unidades con comportamiento de baja magnitud de flujos anómalos, los modelos coinciden en sus predicciones.

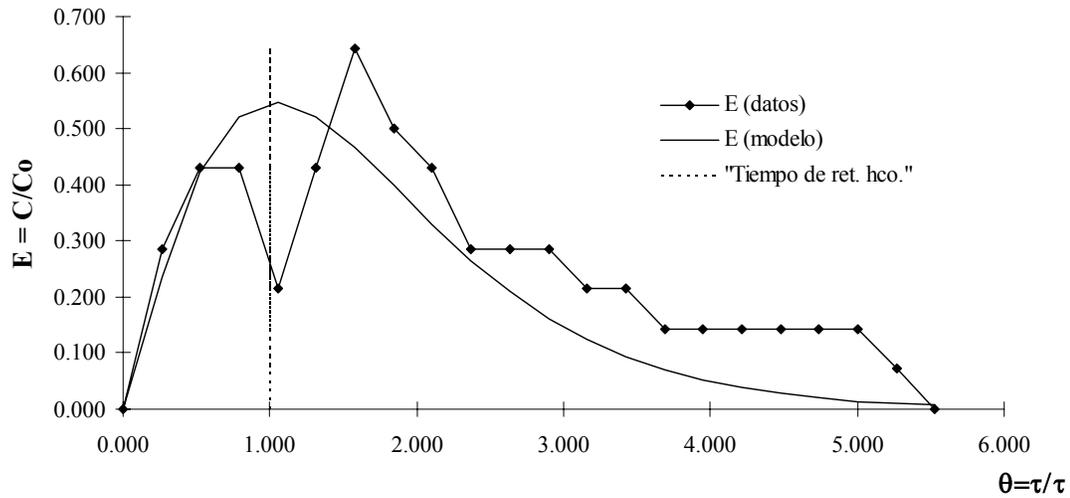


Figura 7. Modelo de varios reactores en serie con zonas muertas y cortocircuitos. Sedimentador de la planta de Nuevo Laredo:  $N = 3$ , Zonas muertas = -75%, Cortocircuitos = 4%; con  $\varepsilon = 0.027$   $\therefore$  Tiende más a mezcla completa

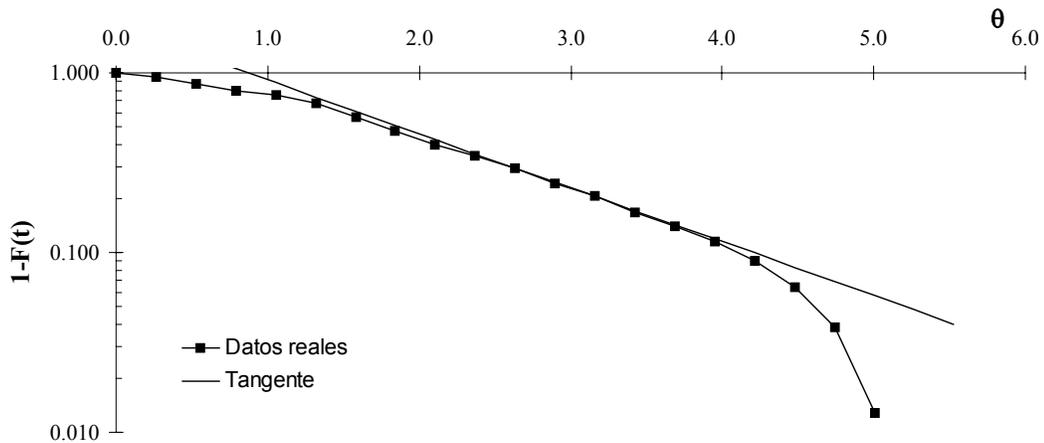


Figura 8. Modelo Simplificado de Rebhun y Argaman: Zonas muertas = -131% y flujo pistón = 37%.  $\therefore$  Tiende más a mezcla completa

Tanto el modelo de varios rectores en serie (Fig. 7) como el de Rebhun y Argaman (Fig. 8) reflejan una fuerte presencia de zonas muertas, sin embargo la magnitud entre ambos modelos es altamente discrepante, con signo negativo, lo cual podría ser una indicación de flujos de recirculación interna o errores en el cálculo del gasto o del volumen. Los tres métodos coinciden que el comportamiento del flujo la unidad tiende más a mezcla completa; Figs. 7, 8 y 4c (problemas de recirculación dentro del tanque). Considerando estos resultados se puede inferir que en unidades con

comportamiento de magnitudes considerables de flujos anómalos, los modelos discrepan en sus predicciones en lo referente a la magnitud.

## METODOLOGÍA

En el siguiente esquema se muestra el montaje hidráulico realizado para sostener condiciones de flujo constante al modelo del sedimentador mediante el tubo de alimentación.

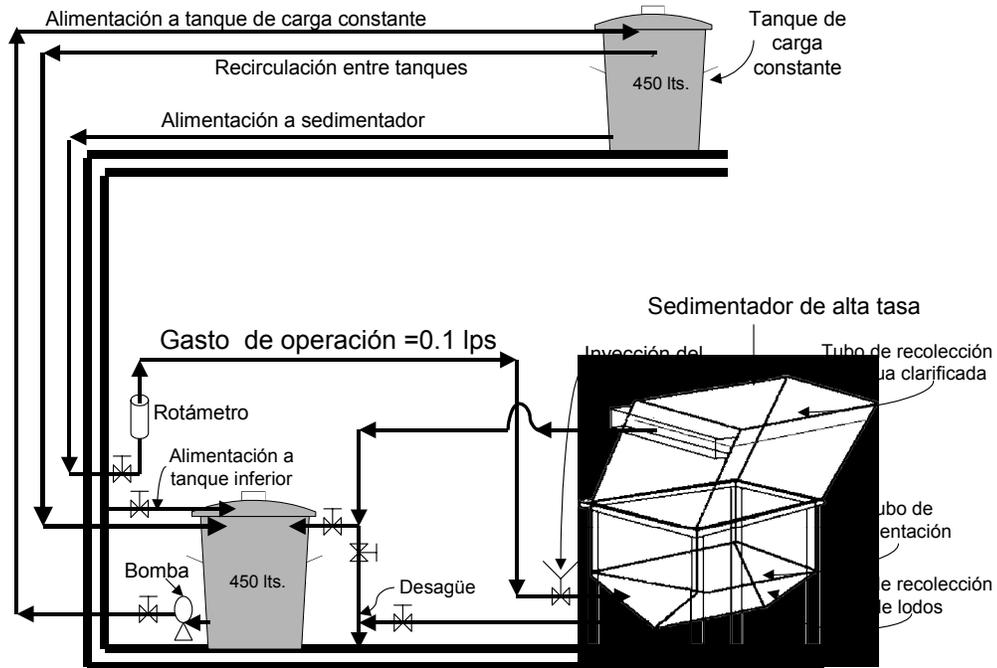


Figura 9. Montaje experimental para mantener condiciones de flujo constantes a modelo de sedimentador de alta tasa.

El tanque inferior se alimenta de una toma local de agua (red interna del laboratorio), de éste se bombea al tanque superior del cual se suministra agua con carga constante al sedimentador, y mediante un rotámetro colocado en esta línea, se controla el gasto de entrada al sedimentador. En el tubo de alimentación a centímetros del sedimentador, se lleva a cabo la inyección (como pulso) del trazador mediante una jeringa. El sistema que soporta el tubo alimentación está dado mediante un sistema de bridas que permite colocar distintos tubos con arreglos varios para controlar tanto la velocidad de ingreso como la posición y forma de los orificios de entrada. Para el diseño del modelo del sedimentador se llevó a cabo una similitud geométrica de acuerdo los prototipos a escala real. Las similitudes dinámicas y cinemáticas se controlan mediante los arreglos en el tubo de alimentación y variando la cantidad de mamparas.

### Datos de operación:

Gasto de operación ( $Q$ ) = 0.1 lps

Volumen del líquido del sedimentador ( $V$ ) = 144.91 lts.

Concentración de entrada del trazador; NaCl ( $C_0$ ) = 30 mg/l (ecuación [2])

Tiempo de residencia hidráulico ( $\tau$ ) = 24.15 segundos (ecuación [4])

Total de mamparas = 25 (se puede disminuir esta cantidad colocándolas en forma alternada en función de las condiciones de flujo deseadas).

Velocidad de entrada ( $Vel$ )  $\leq 1$  m/s (se controla mediante arreglos en cantidad, disposición y diámetro colocados en el tubo de alimentación).

A la fecha se han llevado a cabo 14 pruebas con distintas condiciones de flujo y arreglo entre mamparas, a continuación se presentan resultados de dos de ellas.

### RESULTADOS DE DATOS EXPERIMENTALES DE MODELO A ESCALA DE SEDIMENTADOR

Condiciones de trabajo durante la prueba:  $Q = 0.1$  lps,  $\tau = 24.15$  segundos,

$C_0 = 30$  mg/l,

$Vel = 1.033$  m/s (un solo orificio al centro del tubo), 25 mamparas (separación promedio entre cada una = 3.7 cm).

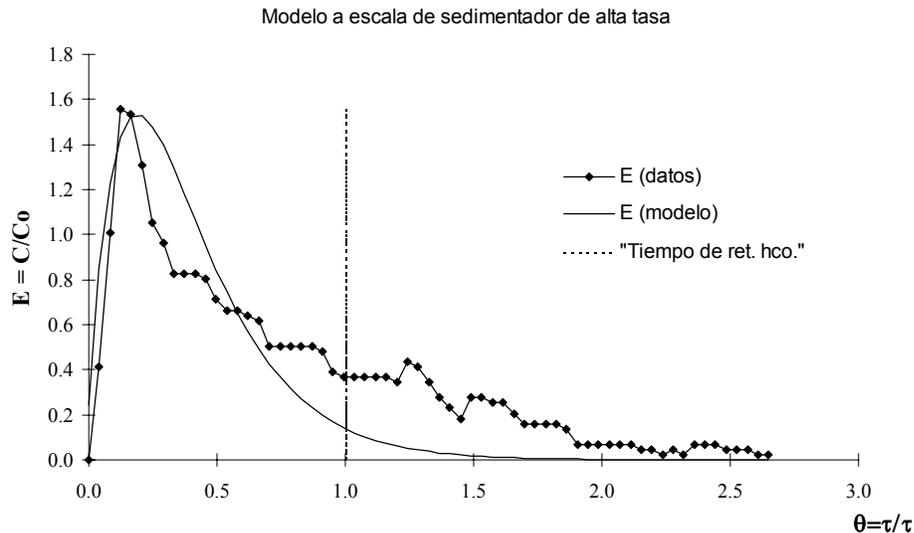


Figura 10. Modelo de varios reactores en serie con zonas muertas y cortocircuitos;  $N = 2$ , Zonas muertas = 64%, Cortocircuitos = 11%; con  $\varepsilon = 0.027$ .  $\therefore$  Tiende más a mezcla completa

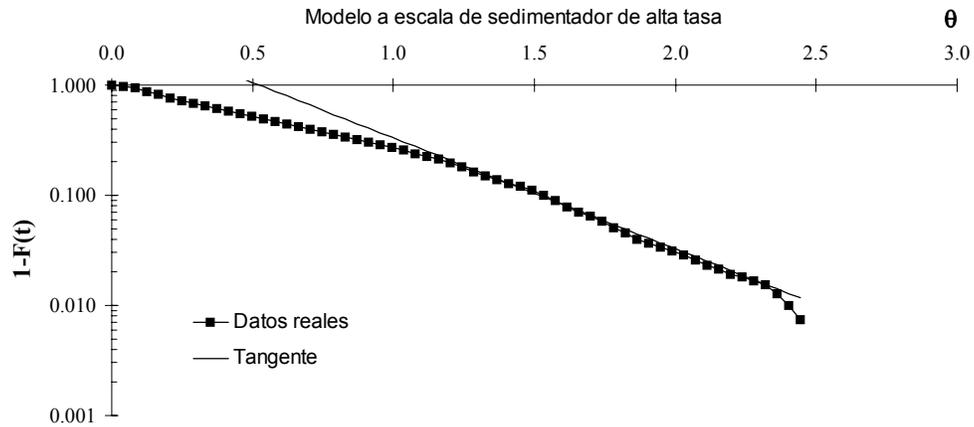


Figura 11. Modelo Simplificado de Rebhun y Argaman: Zonas muertas = 5% y flujo pistón = 55%. ∴ Tiende más a flujo pistón

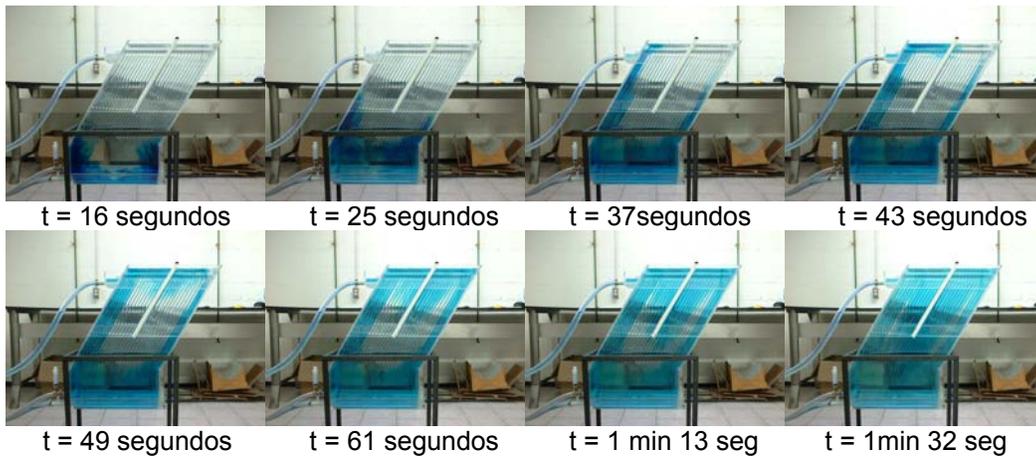


Figura 12. Secuencia fotográfica de las condiciones anteriores, utilizando colorante (azul de metileno) como trazador: Condiciones de trabajo durante la prueba:  $Q = 0.1$  lps,  $\tau = 24.15$  segundos,  $C_0 = 30$  mg/l,  $Vel = 0.1973$  m/s (difusor de 4 vías al centro del tubo), 25 mamparas (separación promedio entre cada una = 3.7 cm).

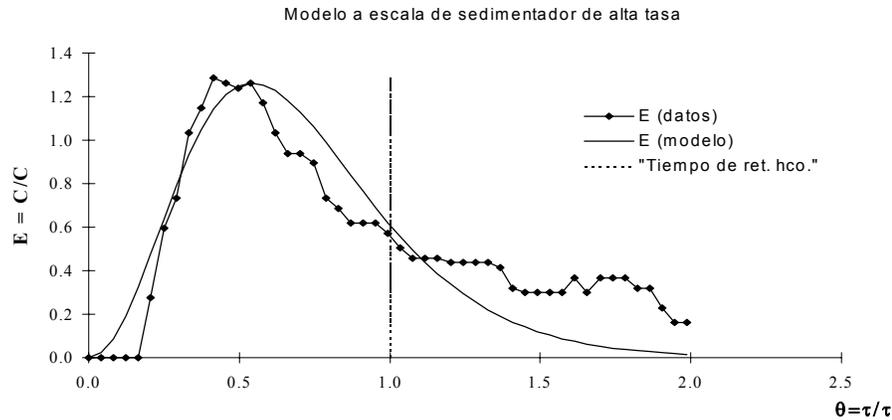


Figura 13. Modelo de varios reactores en serie con zonas muertas y cortocircuitos;  $N = 5$ , Zonas muertas = 30%, Cortocircuitos = 12%; con  $\varepsilon = 0.027$ .  $\therefore$  Tiende más a mezcla completa

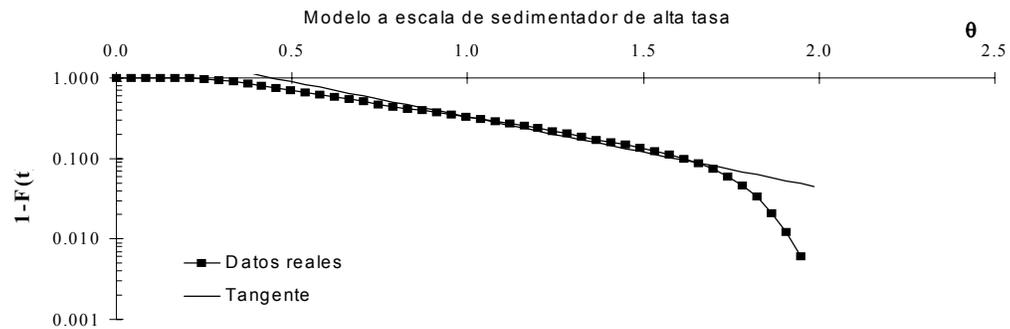


Figura 14. Modelo Simplificado de Rebhun y Argaman: Zonas muertas = 6% y flujo pistón = 47%.  $\therefore$  Tiende más a mezcla completa

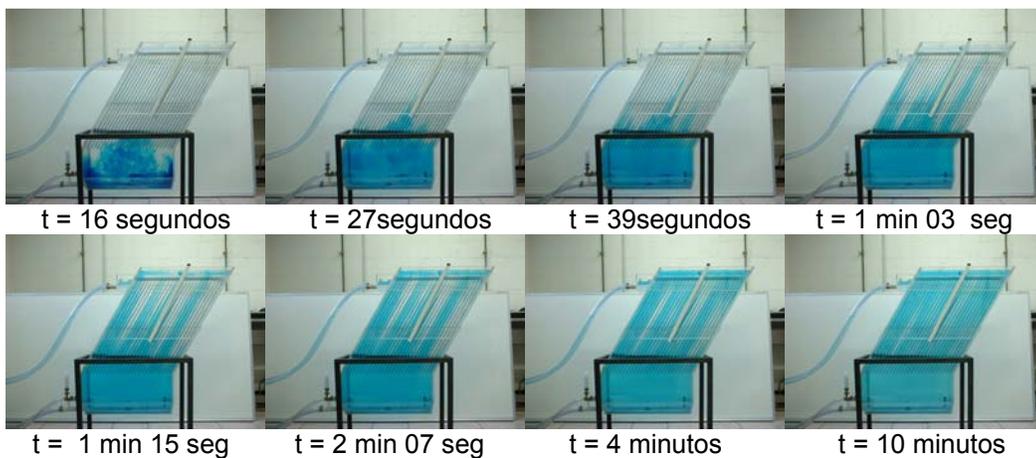


Figura 15. Secuencia fotográfica de las condiciones anteriores, utilizando colorante (azul de metileno) como trazador.

En el primer caso puede observarse que tanto el modelo de varios reactores en serie (Fig. 10) como el de Rebhun y Argaman (Fig. 11) reflejan una fuerte discrepancia en la magnitud de zonas muertas, ya que mientras el primero calcula un 64%, el segundo determina un 5%, así mismo se tiene una discrepancia entre ambos modelos matemáticos ya que el de varios reactores en serie muestra una tendencia a mezcla completa y el de Rebhun y Argaman indica un comportamiento de flujo pistón, y al comparar la gráfica resultante con las curvas tipo del método cualitativo se tiene una aproximación a la curva "b" de la Fig. 4, es decir una tendencia a mezcla completa (el flujo pasa a través de canalizaciones y/o hay zonas muertas), lo cual concuerda con el modelo de varios reactores en serie. Al analizar el comportamiento de esta prueba con el colorante, se aprecian canalizaciones y zonas muertas, pero también se puede apreciar una recirculación interna provocada por dichas canalizaciones. Ninguno de los modelos matemáticos contempla el fenómeno de recirculación en su concepción.

Tomando en cuenta el segundo caso, tanto el modelo de varios reactores en serie (Fig. 12) como el de Rebhun y Argaman (Fig. 13) concuerdan en el tipo de flujo predominante, mismo que tiende levemente a mezcla completa ya que en ambos casos están casi en la frontera con un comportamiento de flujo pistón, incluso al considerar el método gráfico, es difícil clasificarlo en forma categórica como mezcla completa (Fig. 4b), ya que bien podría equipararse al comportamiento de la Fig. 3b la cual indica un flujo pistón (el flujo pasa a través de canalizaciones y/o hay zonas muertas), por lo que se puede inferir que existen los dos tipos de flujos. Sin embargo la secuencia fotográfica revela una tendencia a flujo pistón con canalizaciones y zonas muertas. Por lo que se podría considerar que tal frontera es más cerca al flujo pistón que mezcla completa.

## CONCLUSIONES

Los tres métodos funcionan adecuadamente para unidades con comportamiento hidráulico de flujo pistón y mezcla completa, de igual forma tanto el modelo de varios reactores en serie con zonas muertas y cortocircuitos como el modelo simplificado de Rebhun y Argaman determinan porcentajes de zonas muertas similares cuando el sistema no presenta tiempo de retraso ni recirculación.

Dado que ninguno de los tres métodos contempla el fenómeno de recirculación en su concepción, y es posible que las discrepancias entre los resultados de éstos, podría deberse a este tipo de flujos, se recomienda continuar con la etapa de experimentación en condiciones controladas, y probar los modelos con un problema de flujo a la vez, y posteriormente determinar el modelo que se acerque lo más posible a las condiciones reales de flujo, y desarrollar en éste un complemento matemático que incluya todos estos fenómenos hidráulicos.

## BIBLIOGRAFÍA

- (1) A. Cholette and L. Cloutier. Mixing Efficiency Determinations for Continuous Flow System. The Canadian Journal of Engineering, Vol. 37, pp 105-112, 1959.
- (2) Metcalf-Eddy, 1994. Ingeniería Sanitaria; tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales. Tercera edición. Editorial Labor, S.A. pp 4:133-134, 5:162-195.
- (3) Young H.W. and Young J.C. Hydraulic characteristics of upflow anaerobic filter. Journal of Environmental Engineering. Vol. 114, No. 3 pp 1128-1136. June, 1988.
- (4) Grobicki A. And Stuckey D.C. Hydrodynamic characteristics of the anaerobic baffled reactor. Water Research. Vol. 26, No. 3, pp 371-378, 1992.
- (5) OPS/EHP/CEPIS. Caracterización de Flujos y Análisis de Periodos de Retención. Manual de Instrucción preparado por José M. Pérez Carrión. Abril de 1998.
- (6) Levenspiel O. Ingeniería de las Reacciones Químicas, segunda edición, Editorial Reverté, S.A.. 1997
- (7) Jorge Arboleda Valencia. Teoría y Práctica de la Purificación del Agua. Tomo 1, Tercera edición. McGraw-Hill. Bogotá, Colombia. 2000
- (8) Martín Domínguez A., Velitchko G. Tzatchkov, Mercado Escalante J.R. Modelación del Flujo en Unidades de Tratamiento de Agua Potable. Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 12; Morelia, 21-24 mar. CEPIS, 2000.
- (9) Martín Domínguez A., Avilés Flores M., Flores Ordeñana L. M., González Herrera A., Montellanos Palacios L., Piña Soberanis M., Rivera Huerta M. L., Sandoval Yoal L. y Tirado Montiel M. L. Manual de Evaluación de Plantas Potabilizadoras, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México. 1998.



# XIII CONGRESO INTERNACIONAL DE METALURGIA EXTRACTIVA

Guaymas, Sonora, México – 2003



## EDITORES:

Dr. Salvador Aguayo Salinas

M.C. Martín A. Encinas Romero

Ing. Alejandro Valenzuela Soto

*Avances en Metalurgia 2003*

*Esta publicación fue realizada en la Universidad de Sonora a través de la División de Ingeniería y el Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia.*