

Evaluación de un clarificador secundario en una planta de tratamiento de aguas residuales

Cheikh Fall,^A Jimmy Loaiza Navía,^B
Mario Esparza Soto,^A Laura Martínez García^B

^A Centro Interamericano de Recursos del Agua, UAEMex. Toluca, México

^B Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (SADM)
cfall@uaemex.mx, jloaizan@prodigy.net.mx



RESUMEN

Se presenta la evaluación de un clarificador secundario con alimentación periférica recientemente implementado en una planta de tratamiento de aguas residuales en Monterrey, México. El objetivo fue evaluar su desempeño y obtener los parámetros del modelo de Vesilind. Se realizó el análisis del flujo de sólidos mediante la técnica del punto de estado. Los parámetros del modelo de Vesilind fueron ($V_o=11.5$ m/h y $n=0.38$ m³/kg). Se mostró que el lodo está perfectamente floculado y debería sedimentar bien en cualquier clarificador. Estos datos son básicos para la modelación de la planta y así poder anticipar su comportamiento bajo diferentes condiciones de operación.

PALABRAS CLAVE

Sedimentación, lodos activados, punto de estado, Vesilind.

ABSTRACT

The evaluation of a secondary clarifier with peripheral feed recently implemented in a wastewater treatment plant (WWTP) is presented in this paper. The objective was to evaluate the performance and to obtain the parameters of the Vesilind model. The analysis of solids flux was accomplished by the technique of the State Point. The parameters of the Vesilind model were ($V_o=11.5$ m/h and $n=0.38$ m³/kg). It was shown that the activated sludge is perfectly flocculated and it should settle well in any clarifier. These data are basic for the modelling of the plant and the prediction of its behavior under different operation conditions.

KEYWORD

Sedimentation, activated sludge, state point, Vesilind

INTRODUCCIÓN

La eficiencia del proceso de lodos activados, en el tratamiento de aguas residuales, está determinada por el desempeño adecuado de los clarificadores, los cuales deben producir un efluente con baja concentración de sólidos suspendidos y un lodo suficientemente espeso para su retorno al reactor.¹ De acuerdo con Wanner,² la biomasa que escapa por los clarificadores contribuye del 50 al 80% de la demanda biológica de oxígeno, DBO, del efluente. Por otro lado, la capacidad

para concentrar el lodo de retorno está relacionada con la eficiencia del clarificador.

El diseño tradicional de clarificadores secundarios, se basa en los criterios de carga hidráulica superficial, tiempo de detención y profundidad (para asegurar cierta capacidad de almacenamiento). Su evaluación se hace a partir del índice volumétrico de lodos (IVL). Sin embargo, en la mayoría de los casos, la limitación es la capacidad de espesamiento, descrito con base en la teoría del flujo de sólidos.³ La hidrodinámica y las propiedades de floculación-sedimentación definen el desempeño del clarificador. Algunos índices cualitativos y cuantitativos son: la velocidad de sedimentación zonal (V_s), la calidad del lodo y la presencia de organismos filamentosos. Wilén y colaboradores¹ mostraron que el cambio de la comunidad microbiana no siempre es la causa de un mal desempeño, algunas características del agua residual pueden modificar, en corto plazo, la consistencia de los flóculos y repercutir en el éxito de la separación sólido-líquido. Por esta razón su eficiencia se determina sólo hasta que está en operación (caracterización del influente, perfil diario de variación de flujo, relación F/M, OD, tiempo de retención de sólidos, carga de sólidos, etc).

Los datos básicos para realizar un análisis se obtienen a partir de una serie de pruebas de sedimentación tipo *batch*, midiendo las velocidades de sedimentación zonal a diferentes concentraciones. El procedimiento y los equipos utilizados están descritos en varias referencias: APHA,⁴ Vanrolleghem *et al.*,⁵ Vanderhasselt y Vanrolleghem,⁶ y Kazmi y Furumai.⁷ El modelo más utilizado que relaciona la concentración del lodo (X en mg/L) con velocidad de sedimentación zonal (V_s en m/h), es el de Vesilind:

$$V_s = V_o e^{-nX} \quad (1)$$

Donde V_o es velocidad máxima de sedimentación, (m/h), n es el parámetro de Vesilind (m^3/kg). Vanderhasselt y Vanrolleghem,⁶ consideran que pueden presentarse problemas de dependencia entre los parámetros, por lo cual no es suficiente hallar los valores de las constantes y será necesario evaluar su identificabilidad práctica. Una vez que se tiene un modelo de V_s en función de X , se pueden hacer dos tipos de análisis:

1. Evaluar la capacidad del clarificador a determinadas condiciones operativas utilizando la teoría del flujo de sólidos. Este análisis se puede hacer en su forma tradicional (Dick⁸ y Metcalf y Eddy³) o en su forma más reciente, el análisis del punto de estado.^{1,9}
2. Modelar el clarificador con las ecuaciones de continuidad, como parte de una modelación integral del proceso de lodos activados.^{10,11}

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Noreste es una de las tres plantas del Área Metropolitana de Monterrey (figura 1), desde su arranque (1995), ha experimentado dos ampliaciones, pasando su capacidad de 500 L/s a 750 L/s en 2001,



Fig. 1. Vista aérea de la Planta Noreste, año 2000, sin el clarificador "C".

y luego a 1250 L/s en 2004. Durante la última ampliación destaca la implementación de un tercer clarificador (Clarificador "C"), con una tecnología diferente: alimentación periférica y cabezales de succión. (figura 2). Por lo cual, el objetivo de la presente investigación es doble:

- Evaluar el desempeño y los límites de capacidad del nuevo clarificador instalado en la planta Noreste, vía análisis del punto de estado.
- Obtener los parámetros básicos del modelo de Vesilind para un proyecto ulterior de modelación del proceso de lodos activados de la planta bajo estudio.

La figura 2 muestra el esquema del clarificador "C" recientemente implementado en la Planta Noreste.

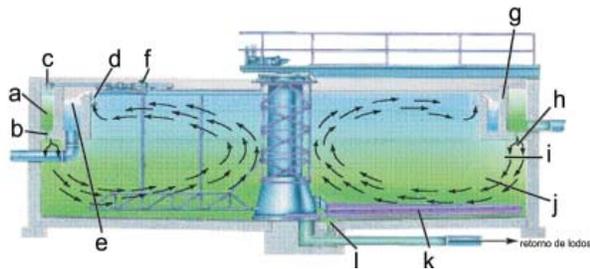


Fig. 2. Esquema del clarificador "C" (Envirex-USFilter)¹², donde: a. Canal Influyente, b. Orificios en el fondo del canal influyente, c. Removedor de espuma (influyente), d. Mampara de natas y vertedor perimetral, e. Canal del efluente, f. Brazo desnatador de la superficie, g. Muro compartido entre ambos canales, h. Bafle deflector en orificios de influyente, i. Bafle tipo faldón perimetral, j. Extensa zona de entrada, k. Cabezal de succión de lodos, l. Dren del tanque.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron las pruebas de sedimentabilidad en columna con el fin de producir suficientes datos cuantificables en diversos escenarios de concentración de licor mezclado, predecir el mejor efluente teórico en que podría trabajar y diagnosticar deficiencias hidráulicas y/o de floculación.

Prueba de sedimentación en columna

Se tomaron muestras de licor mezclado, lodo de retorno y efluente sin clorar y se realizaron las pruebas de sedimentación a diferentes concentraciones en una columna de 1.52 m de altura y 7 cm de diámetro, equipado con un agitador lento (figura 3). La tabla I muestra las proporciones en que fueron combinadas diferentes muestras de licor mezclado (MLSS), lodo de retorno (RAS) y agua tratada (Efl) para producir mezclas de diferentes concentraciones de sólidos (M1 a M6) para las pruebas de sedimentación.

Para cada una de las pruebas, se registró cada 2 minutos la variación de la altura de la interfase sólido-líquido; estos datos sirvieron para calcular

Tabla I. Preparación de mezclas a varias concentraciones.				
Mezcla	MLSS	RAS	Efl	Conc.(mg/L)
M1	45%		55%	1876
M2	60%		40%	2498
M3	100%		0%	4155
M4	70%	30%		6058
M5	50%	50%		7327
M6	0%	100%		10498



Fig. 3. Columna de sedimentación.

la velocidad de sedimentación zonal (V_s) para cada concentración inicial de sólidos, de modo que se dispone de la información necesaria para construir la curva de flujo de sólidos, base del análisis del punto de estado y hallar los parámetros del modelo de Vesilind. El flujo de sólidos (F , $\text{kg}/\text{m}^2\text{-h}$) para cada concentración (X) se calcula con la siguiente ecuación (2):

$$F = V_s \cdot X \quad (2)$$

Medición suplementaria de índices de sedimentabilidad del lodo

Se determinó el índice volumétrico de lodo (IVL) y las diferentes fracciones de sólidos que lo componen (SSF/SSD/SSE) para caracterizar la sedimentabilidad desde el punto de vista de la estructura y nivel de dispersión de los flóculos. Las muestras analizadas provienen de tres puntos:

- 1) Efluente de licor mezclado del reactor.
- 2) Influyente al clarificador.
- 3) Efluente del clarificador.

Sólidos suspendidos floculados (SSF): La muestra se pone en un agitador de laboratorio, se añade un floculante a su dosis óptima, seguido por una mezcla lenta de 30 minutos y una sedimentación de 30 min. Luego se analiza el sobrenadante para determinar sólidos suspendidos totales (SST), representando los SSF. Esto representa el mejor desempeño de

sedimentación teóricamente posible para el licor mezclado dado.

Sólidos suspendidos dispersos (SSD): Se colecta la muestra utilizando un dispositivo especial para minimizar cualquier perturbación en la estructura del *floc* del licor mezclado. Luego se permite sedimentar durante 30 minutos y se toma una muestra del sobrenadante y se analiza para SST; esto representa el posible mejor desempeño de sedimentación sin flocular para el licor mezclado dado.

Sólidos suspendidos del efluente (SSE): Se toma una muestra del efluente del clarificador y se analiza para (SST) sin ninguna sedimentación adicional. Esto es representativo de desempeño del clarificador actual.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Velocidades de sedimentación zonal

La figura 4 muestra los perfiles de variación de la altura de la interfase sólido-líquido para las seis corridas. La leyenda identifica las concentraciones iniciales correspondientes (en mg/L). Se observó una tardancia (latencia) al inicio de todas las corridas, como fue también notado por otros autores. Por lo que, los datos que se consideran para calcular la velocidad de sedimentación son los puntos después de esta primera zona, donde la pendiente ya es lineal (velocidad zonal), excluyéndose la última zona de compactación, pues el modelo está en función de la velocidad zonal.

En la tabla II se presentan los resultados de las regresiones lineales, para obtener las pendientes que proporcionan V_s . Se obtuvieron, para todos los

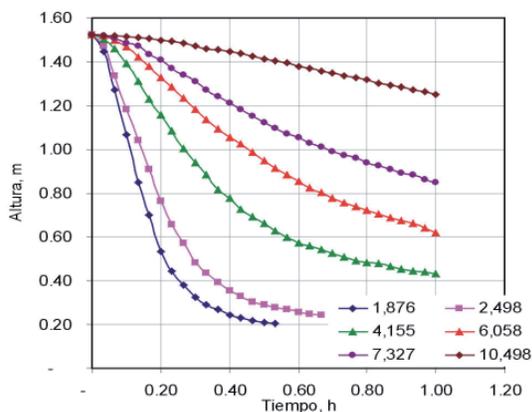


Fig 4. Altura de interfase en función del tiempo (las leyendas son las concentraciones en mg/L).

casos, coeficientes de correlación (R^2) cercanos a la unidad, lo que indica que las mediciones se realizaron adecuadamente.¹³

En un inicio se utilizó el método de regresión exponencial para hallar los parámetros del modelo de Vesilind, (ver tabla III), se puede ver su precisión al ser capaz de describir adecuadamente los datos con un $R^2 > 99\%$.

Como se ha mencionado, se requiere validar estos datos evaluando su identificabilidad, es decir, determinar si contienen la suficiente información que permita afirmar que los parámetros hallados constituyen una solución única. Para responder esta pregunta, fue necesario desarrollar un algoritmo para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales. En este caso particular, se pudo efectuar una simplificación al observar que la forma de la ecuación es similar a la que resulta del balance de masa de una reacción de primer orden en un reactor *batch*; la variable X semejaría al tiempo (t), n correspondería a la constante cinética de primer orden (k), mientras que V_s y V_o serían respectivamente la concentración variable (C) y su valor inicial (C_o). Se identificó el “proceso químico” en *batch* que equivaldría a la expresión de Vesilind, con sustituir V_s , V_o , n y X por C , C_o , k y t .

Se utilizó el programa Aquasim¹⁴ que tiene gran habilidad para evaluar la identificabilidad de los parámetros en reacciones bioquímicas. Con esto se pudo verificar la estimación de los parámetros

X (kmg/L)	V_s , (m/h)	R^2
1.88	5.5245	0.9949
2.50	4.2291	0.9995
4.16	2.3146	0.9993
6.06	1.2954	0.9940
7.33	0.7239	0.9810
10.50	0.1619	0.9897

Parámetros	Unidades	Valor	σ	R^2
V_o	m/h	11.5	0.5	99.7%
n	m^3/kg	0.38	0.02	

y realizar el análisis de sensibilidad (figura 5). La estimación de los parámetros del modelo de Vesilind con Aquasim dio los mismos valores obtenidos ($V_0 = 11.5$ m/h y $n = 0.38$ m³/kg), dando un excelente ajuste de los datos (figura 5a).

En cuanto al análisis de sensibilidad (figura 5b), se observó que los máximos para las curvas de sensibilidad de n y V_0 están ubicados en abscisas (X) muy diferentes, además de presentar valores absolutos muy elevados de la función sensAR comparados al cero. Lo que significa que tanto n , como V_0 , son identificables de forma única. Por tanto, los valores obtenidos podrán ser usados tanto para elaborar la curva de flujo de sólidos, como para la modelación ulterior del proceso de lodos activados.

En general, valores grandes para V_0 y pequeños para n corresponden a mejor sedimentabilidad.¹⁰ Valores obtenidos por Vanderhasselt y Vanrolleghem⁶ para diversos lodos estuvieron entre $0.19 < n < 0.64$ y $5.5 < V_0 < 10.3$. Wilén *et al.*¹ reportaron valores de $0.38 < n < 0.54$ y $7.75 < V_0 < 14.18$ para un lodo a diferentes periodos, cuyo IVL era entre 62 y 86 mL/g.

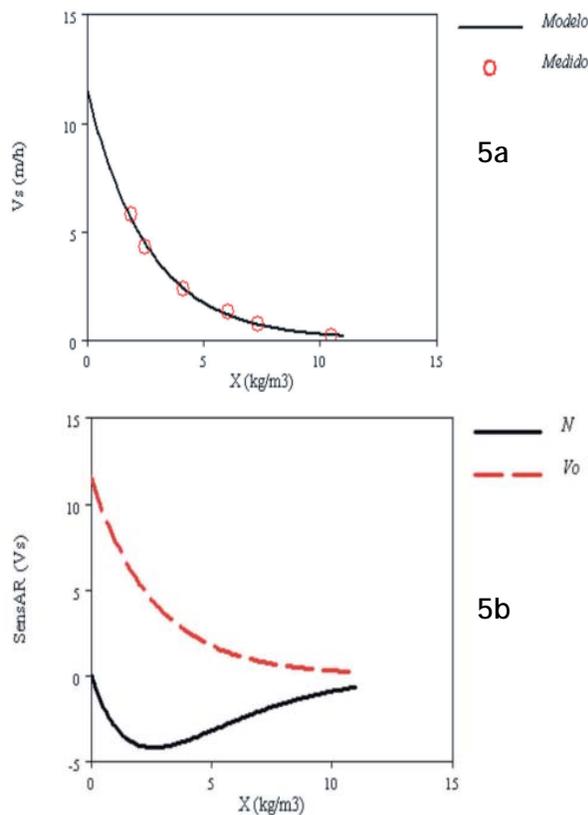


Fig. 5. Estimación de los parámetros de Vesilind y análisis de sensibilidad por Aquasim.

CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LOS LODOS EN LA PLANTA

Se procedió a determinar el índice volumétrico de lodos (IVL) para diferentes mezclas de licor y retorno de lodos (tabla IV), mismas que fueron preparadas para las pruebas de sedimentabilidad en la columna. Los valores obtenidos variaron entre 73 y 105 mL/g, estando dentro de los intervalos considerados (De Clercq *et al.*¹¹ como bueno y aceptable (50-100 y 100-200, respectivamente). De acuerdo a estos datos, el lodo de la planta se prestaría a una buena sedimentación.

La tabla V muestra los resultados de las pruebas de sólidos (SSF, SSD y SSE) según la metodología descrita. La floculación anterior a la prueba de SSF se realizó con polímero catiónico (mismo que se utiliza para desaguado), se determinó previamente que la dosis óptima era de 4 mg/L, misma que fue añadida durante la prueba de SSF.

Los valores casi idénticos de SSF, SSD y SSE (9 a 10 mg/L) indican que el lodo de la planta está perfectamente floculado (comparable con lo que hubiera dado un proceso con ayuda de un coagulante) mientras que el clarificador estaría dando el desempeño ideal esperable de tales unidades (< 10 mg/L, Wahlberg).⁹

Conc. SST (mg/L)	1876	2498	4155	6058	7327	10498
IVL (mL/g)	73.3	76.7	104.3	102.5	100.7	73.3

Licor mezclado (tanque de aeración), pretratado con polímero (SSF)	10
Influyente del clarificador (SSD) sin pretratamiento	10
Efluente del clarificador (SSE) sin pretratamiento	9

ANÁLISIS DEL PUNTO DE ESTADO Y CAPACIDAD DEL CLARIFICADOR

Para determinar el comportamiento del clarificador con el método de análisis del punto de estado, se necesitan sobreponer los datos de operación con la curva del flujo de sólidos, a partir de los datos mostrados en la tabla IV, (detallado en Wahlberg).⁹ El modelo de Vesilind (V_o 11.5 m/h y n 0.38 m³/kg), permite extrapolar y hallar velocidades de sedimentación para un mayor rango de concentraciones (0 a 15,000 mg/L), ver figura 6.

Es importante mencionar que el diseño del clarificador C (50 m Ø) es para 500 LPS con una tasa de retorno hasta del 100%, aunque normalmente opera con una tasa fija del 70% respecto al flujo nominal. El día de la pruebas se tenían 4,155 mg/L de SSLM y la tasa de retorno 70% (350 LPS).

Para este escenario se presenta el análisis del punto de estado que se sitúa en A (figura 6) cuyas coordenadas son: Absisa = concentración del licor mezclado MLSS (4,155 mg/L); Ordenada = carga superficial de sólidos $Q \cdot X/A$ (5.33 kg/m²-h).

La pendiente de este punto con el origen resulta ser la carga hidráulica superficial, Q/A . El segundo punto se localiza sobre el eje de las absisas (Concentración = 0), y considera el flujo total de sólidos, incluyendo el retorno de lodos $(Q+Q_r) \cdot X/\text{Área}$ (9.07 kg/m²-h).

Para considerar que la unidad opera en buenas condiciones, la línea de retorno que une ambos puntos debería quedar debajo de la rama descendente de la curva de flujo de sólidos.

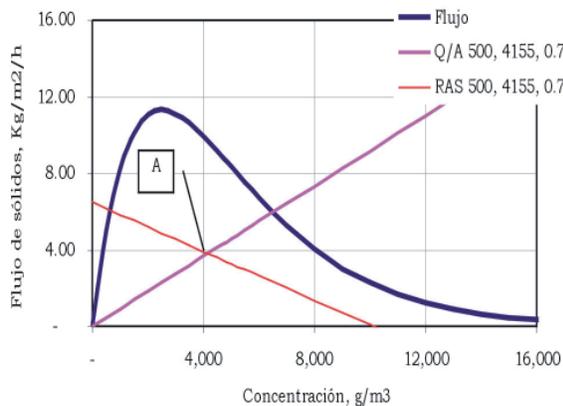


Fig. 6. Análisis del punto de estado (las leyendas corresponden al flujo, concentración y tasa de retorno).

PREDICCIÓN PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD MÁXIMA

El flujo nominal del nuevo clarificador es 500 LPS, y opera con una tasa de retorno de 70% (350 LPS), con una concentración de SSLM de 4,155 mg/L. El lodo sedimenta con una velocidad zonal (V_o) de 11.5 m/h y con $n = 0.38$ m³/kg (ver tabla VI). Si el flujo se incrementara a unos 780 LPS y la tasa del retorno no cambia (350 LPS) la proporción Q_r/Q baja a 45%, por lo que se agrega un segundo juego de líneas a la gráfica (figura 7) para mostrar los efectos del flujo adicional. Esta gráfica muestra algo interesante que puede pasar.

El incremento del flujo causa la inclinación de la línea de sobreflujo (gruesa) que la sitúa tangente a la línea de flujo de sólidos, en el límite de colapso. En el supuesto de que la concentración del licor mezclado se mantuviera en 4,155 mg/L, el nuevo punto de estado para el sobreflujo permanecería en la misma absisa.

Dado que el flujo de retorno es el mismo, la línea es paralela a la original. El punto donde la línea de

Q	500.00	l/s
Q _r /Q	0.70	
SSLM (ordenada del punto de estado)	4,155.00	m ²
Absisa del punto de estado	3.81	mg/L
Pendiente Q/A	0.0009	Kg/m ² /h
Absisa segundo punto	6.48	

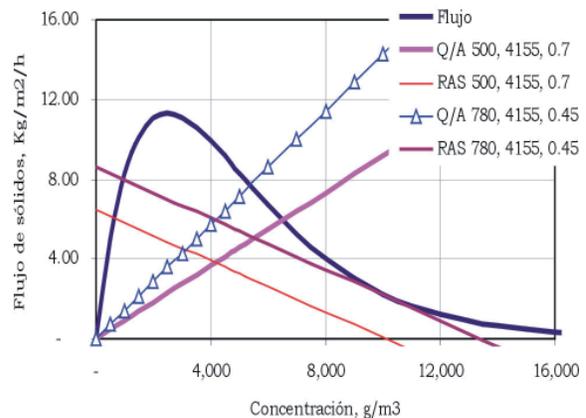


Fig. 7. Condición de incremento de flujo (las leyendas corresponden al flujo, concentración y tasa de retorno).

la tasa de retorno cruza el eje del flujo de sólidos cambia de 6.48 kg/m²-d a 8.61 kg/m²-d.

Por lo anterior, son dos las variables que el operador debe controlar para obtener un buen desempeño del clarificador: la tasa de retorno y la concentración del licor mezclado vía purga. Sin embargo influye también el aspecto tecnológico del mecanismo del clarificador, como la disipación de energía en la entrada, la recolección rápida del lodo hacia el retorno, que evita condiciones anóxicas y el control de corrientes parásitas.

CONCLUSIONES

El estudio permitió hallar los parámetros del modelo de Vesilind (Vo 11.5 m/h y n 0.38 m³/kg), y comprobar que son identificables a partir de los datos experimentales.

Los parámetros de Vesilind, conjuntamente con los índices medidos (70<IVL<105; SSF, SSD, SSE 10 mg/L), mostraron que el lodo de la planta Noreste está perfectamente floculado, por lo cual sedimenta bien.

Estos datos serán básicos para el proyecto posterior de modelación de la planta bajo estudio, cuando se opte por simular el clarificador con capas múltiples o representarlo como punto ideal de separación sólido-liquido. Dicha modelación podrá anticipar el comportamiento para diversos escenarios como incremento de flujo, cambios en la tasa de retorno y consistencia del licor mezclado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Wilén B.M., Lumley D. And Nordqvist A. (2004). Dynamics in maximal settling capacity in an activated sludge treatment plant with highly loaded secondary settlers. *Water Sci. Technol.* 50 (7), 187-194. Wanner J. (1994). Activated sludge population dynamics. *Water Sci. Technol.* 30 (11), 159-169
2. Warner J. (1994). Activated sludge population dynamics. *Water Sci. Technology* 30(11) 159-169.
3. Metclaf & Eddy, (2003). "Wastewater Engineering: Treatment, Disposal & Reuse", Mc Graw Hill, 4rd edition.
4. APHA (1989). *Standard Methods for the examination of Water and Wastewater*, 17th ed, APHA, AWWA y WPCF.
5. Vanrolleghem P., Schueren D., Krikilion G., Grijspeerd K., Willems P. And Vertraete (1996). On-line quantification off settling properties with in-sensor-experiments in an automated settlometer. *Water Sci. Technol.* 33 (1), 37-51.
6. Vanderhasselt A. y Vanrolleghem P.A. (2000). Estimation of sludge sedimentation parameters from single batch settling curves. *Wat. Res.* 34 (2), 395-406.
7. Kazmi A.A. and Furumai H. (2000). A simple settling model for batch activated sludge process. *Water Sci. Technol.* 42 (3-4), 9-16.
8. Dick, R. I. (1970), Role of activated sludge final settling tanks, *Journal San. Div. ASCE*, No. SA2:423-436
9. Wahlberg E. (2002). Unlocking superior performance: Keys to clarifier optimization. *Plant Operations and Maintenance, Water Environment Federation WEF & Missouri Environment Association.*
10. Ekama G.P. and Marais P. (2004). Comparison of the 1D flux theory with a 2D hydrodynamic secondary settling tank model. *Water Sci. Technol.* 50 (7), 195-204.
11. De Clercq J., Devisscher M., Boonen I., Vanrolleghem P.A. and Defrancq J. (2003). A new one-dimensional clarifier model verification using full-scale experimental data. *Water Sci. Technol.* 47 (12), 105-112.
12. Envirex-USFilter, tomado del sitio <http://water.siemens.com/NR/58656DB1612A/ENRIMFLOBR0606.pdf> (Actualmente Siemens Water Tech.), 2006
13. Bureau of Land & Quality Water (2003). Clarifier performance Article 3 of 4, O&M Newsletter, Department of Environmental Protection, State of Maine, 4 p.
14. Reichert P., (1998). AQUASIM 2.0, Computer program for the identification and simulation of aquatic systems, Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology (EAWAG), Switzerland.