

1

Revista Inge-CUC / Vol. 6 - No. 6 / Octubre 2010 / Barranquilla - Colombia / ISSN 0122-6517

USO DEL SOFTWARE AQUASIM PARA LA ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA ECUACIÓN DE MONOD UTILIZADA PARA EVALUAR LA CINÉTICA DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL EN LA CUC*

13

Por: Faisal Bernal Higuíta**

Fecha de recibido: 5 de julio de 2010 • Fecha de aceptación: 30 de septiembre de 2010

RESUMEN:

Se utilizó el software AQUASIM para establecer los parámetros cinéticos de un humedal artificial de flujo subsuperficial que se encuentra ubicado en la Corporación Universitaria de la Costa, CUC. El modelo cinético utilizado para la evaluación fue la ecuación de Monod, debido a que los resultados de la depuración biológica, medida con Demanda Química de Oxígeno, DQO, se ajustaron mejor a este modelo. Los parámetros obtenidos fueron la constante de mitad de máximo crecimiento, K_s , y la tasa de máximo crecimiento, M_{max} . Se observó en el análisis de sensibilidad que las dos variables están relacionadas o son dependientes por lo que al variar una, la otra se ajusta, es decir, no hay un par de parámetros únicos que resuelvan el modelo; esto tiene implicaciones desde el punto de vista de interpretación de los datos, que hacen que el modelo no sea confiable. Además, se hizo un ajuste analítico y se obtuvieron buenos resultados.

PALABRAS CLAVE:

Ecuación de Monod, Humedal artificial, Software AQUASIM.



* Proyecto de Investigación: Modelación matemática de un humedal artificial de flujo subsuperficial. Investigador Principal Faisal Bernal.

** Ingeniero Químico, Candidato a Maestría en Ingeniería Civil con énfasis en Ambiental, Especialista en Análisis y Gestión Ambiental, Profesor-Investigador. Grupo Biotecnológico Ambiental del Centro de Investigación de Tecnologías Ambientales, CITA. Calle 58#55-66. Barranquilla, Colombia. Teléfono: 5-3362231. Fax: 5-3362270. fbernal@cuc.edu.co





1

USE OF AQUASIM SOFTWARE FOR PARAMETER ESTIMATION OF MONOD EQUATION USED IN THE CINETICAL EVALUATION OF A CONSTRUCTED WETLAND AT CUC*

By: Faisal Bernal Higueta

ABSTRACT:

AQUASIM software was used to establish the kinetic parameters of a subsurface flow constructed wetland that is located in the Corporación Universitaria de la Costa, CUC. Monod equation was used for estimating the kinetic model, because the results of the biological treatment, measured by Chemical Oxygen Demand, COD, adjusted better to this model. The parameters obtained were constant half maximum

growth, K_s , and the maximum growth rate, M_{max} . It was observed in the sensitivity analysis the two variables are related to or dependent so that by varying one fits the other, ie there is not a unique pair of parameters to solve the model, this has implications from the point of view interpretation of data, which make the model unreliable. In addition, an adjustment was made analytical and good results were obtained.

KEY WORDS:

Monod' equation, Constructed wetlands, Software AQUASIM.



INTRODUCCIÓN

Los Humedales artificiales son sistemas de “humedales que se construyen adaptando sus dimensiones para que las propiedades autodepuradoras naturales que se den, permitan un buen nivel de tratamiento del agua residual que circule a través de él”, Bernal, 2009.

De acuerdo a Austin, 2009, el primer diseño de un humedal artificial se encuentra en una oficina de patentes de Estados Unidos desde 1901, sin embargo, no existen referencias de haber sido construido. Las referencias bibliográficas regularmente mencionan a la Dra. Kathe Seidel del Instituto Max Planck como la pionera en el uso moderno de los humedales artificiales.

La primera generación de humedales se diseñó de forma intuitiva y empírica. Estos permitieron desarrollar los primeros modelos que se propusieron para su diseño.

En general, no se ha estandarizado una metodología que sea ampliamente aceptada para el diseño de los humedales artificiales^{1,2}. Las ecuaciones cinéticas de primer orden se han utilizado para diseñar y predecir la eficiencia de remoción de la mayoría de contaminantes de interés, Reed et al., 1995; Reed, 1993; Cooper et al., 1996; Vymazal et al., 1998; Mitchell et al., 1998; Dahab et al., 2001.

Se ha trabajado con cinética de primer orden asumiendo flujo pistón, Meltcaff & Eddy, 1997:

$$C = C_0 e^{-kt}$$

Donde,

C = concentración de salida, mg/l

C₀ = concentración de entrada, mg/l

k = constante cinética de primer orden, d⁻¹

t = tiempo de retención hidráulico, d

Después se hicieron variantes como el modelo k-C* con la siguiente ecuación:

$$C_i - C^* = (C_0 - C^*)e^{(-K^*t)}$$

C_i = concentración en el punto x, mg/l

C* = concentración residual, mg/l

C₀ = concentración de entrada, mg/l

K* = constante de degradación de primer orden.

También el modelo k-b propuesto por Sheperd et al. (2001a) es de primer orden:

$$C_i = C_0 e^{[(-K/b)\ln(b\tau+1)]}$$

Donde b = es el coeficiente de retardación (d⁻¹) y los otros parámetros están previamente definidos.

Sin embargo, lo inadecuado de estas ecuaciones fue descrito (Bavor et al., 1988, Kadlec and Knight, 1996) aunque todavía se usen para diseño a la luz del conocimiento presente. (Kadlec et al., 2000).

Mitchell y McNevin, 2001 sugieren el uso de los parámetros cinéticos utilizados en procesos biológicos, como es la Cinética de Monod. La ecuación cinética de Monod se representa por la siguiente fórmula:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\mu_{max} * C}{K_s + C}$$

Donde:

μ_{max} = máxima tasa de crecimiento.

K_s = Concentración de sustrato a la mitad de la máxima tasa de crecimiento.

El uso de software para la modelación y simulación de procesos ambientales se ha extendido en el mundo en la medida que contribuye a evaluar

1. Legge, Op. Cit. p. 3.

2. EPA 832-R-93-008 “Subsurface Flow Constructed Wetlands for Wastewater Treatment”. July 1993, p. 1-1.



opciones de tratamiento sin mayores inversiones económicas. Contribuyendo a la búsqueda de soluciones para los problemas ambientales en regiones de escasos recursos.

El programa AQUASIM fue diseñado por la Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology (EAWAG) para la identificación y simulación de sistemas acuáticos en laboratorio, en sistemas en funcionamiento y en la naturaleza. La comparación de los datos obtenidos en campo con los modelos matemáticos es el método más importante para evaluar las teorías en las ciencias naturales. La mayoría de los sistemas de modelación ambiental son un conjunto de ecuaciones lineales ordinarias no lineales o parciales. Para encontrar la solución numérica de estos sistemas de ecuaciones se requería de un software que hiciese el trabajo más accesible y eficiente, de esa forma poder hacer modelos de predicción cuando se requería, Reichert, 1998.

AQUASIM es muy flexible ya que permite especificar los procesos de transformación y simular comportamientos para un modelo especificado por el mismo usuario, además, provee los elementos necesarios para estimación de parámetros y análisis de incertidumbre, Reichert, 1998.

El software se ha utilizado para simular el comportamiento de reactores completamente mezclados, sistemas de biopelícula, sistemas de reactores advectivo - difusivo, procesos en columnas de suelo saturado, sistemas de ríos y para sistemas de lagos, Reichert, 1998.

La Corporación universitaria de la Costa, CUC, tiene un humedal artificial de flujo subsuperficial para la evaluación del tratamiento de diferentes tipos de aguas residuales. El presente trabajo se hizo con agua residual municipal del entorno de la universidad. Los datos arrojados en el tratamiento han sido evaluados utilizando el software AQUASIM para adquirir destreza en su uso y construir un modelo confiable de los humedales artificiales de flujo subsuperficial.

La ecuación cinética que se utilizó para modelar el humedal fue la de Monod:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\mu_{max} * C}{K_S + C}$$

METODOLOGÍA

El humedal artificial utilizado tiene las características que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Características del Humedal Artificial

Largo:	4,43 m
Ancho:	1,84 m
Profundidad:	0,65 m
Profundidad del agua:	0,57 m
Tiempo de retención:	4.3 días
Medio de soporte:	GRAVA FINA
Porosidad:	37,7%
Área superficial:	8,15 m ²
Vegetación:	<i>Typha sp.</i>
Pendiente de fondo:	1%
Caudal:	333 L/d
Tipo de agua residual:	MUNICIPAL

Se tomaron datos del humedal artificial en un periodo de arranque de 80 días. El análisis que se tomó para representar la cinética fue la Demanda Química de Oxígeno, DQO, medida de acuerdo al Standard Methods (APHA et al., 1985).

Se utilizó el software AQUASIM 2.0 de la Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology (EAWAG) adquirido por la institución en el año 2009. El programa AQUASIM fue diseñado para la identificación y simulación de sistemas acuáticos en laboratorio, en sistemas en funcionamiento y en la naturaleza.

El software permite realizar tres tareas: simulaciones, análisis de sensibilidad y estimación de parámetros.

De acuerdo a Reichert, 1998, los parámetros de

un modelo pueden ser estimados por AQUASIM por la minimización de la suma de los cuadrados de las desviaciones medias entre los datos medidos y los calculados por el modelo, lo cual resulta en:

$$\chi^2(p) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_{\text{meas},i} - y_i(p)}{\sigma_{\text{meas},i}} \right)^2$$

En esta ecuación $y_{\text{meas},i}$ es la i -ésima medida, $\sigma_{\text{meas},i}$ es su desviación estandar, $y_i(p)$ es el valor calculado de la variable del modelo correspondiente a la i -ésima medida y evaluada en el tiempo y en el lugar de esa medida, $p = (p_1, \dots, p_m)$ son los parámetros del modelo y n es el número de datos. El software ejecuta la minimización del valor de χ^2 sujeta a la restricción: $p_{\text{min},i} \leq p_i \leq p_{\text{máx},i}$, siendo $p_{\text{min},i}$ y $p_{\text{máx},i}$ los valores mínimos y máximos de la variable constante (p_i), respectivamente, que deben ser debidamente especificados. La determinación cuantitativa de la desviación entre los resultados calculados y los medidos, la cual es minimizada por el algoritmo de estimación de parámetros, es útil para evaluar la suficiencia del modelo estadísticamente, Reichert, 1998; Rosa, 2010.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos utilizados para la simulación y la estimación de los parámetros fueron los que aparecen en la Tabla 2.

Se muestran algunos pantallazos del programa AQUASIM cuando se introdujeron los datos y se corrió el programa para determinar los parámetros de la ecuación de Monod.

La Figura 1 muestra la curva que se genera cuando se hace la primera simulación y la segunda muestra la simulación cuando se hizo la estimación de los parámetros como muestra en la Figura 2.

Debido a la dispersión de los datos reales se observó que el ajuste iba a ser complicado como se observa en la primera grafica de la Figura 1,

Figura 1. Datos reales y primera simulación. Ultima simulación

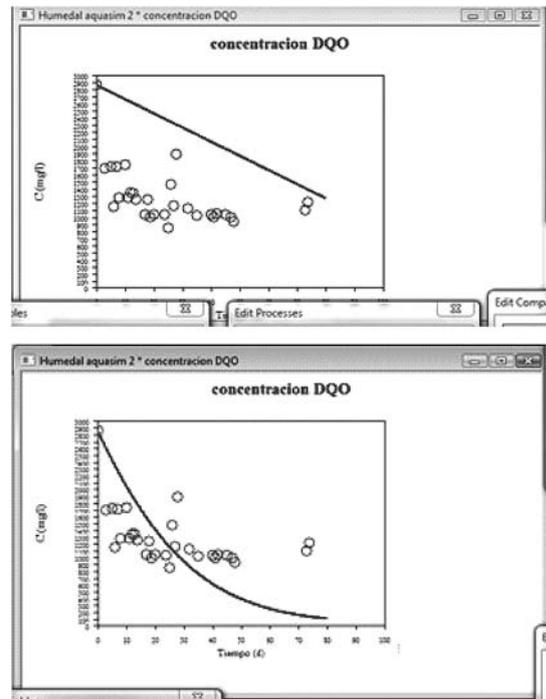


Figura 2. Convergencia de Chi-cuadrado para ajustar los parámetros

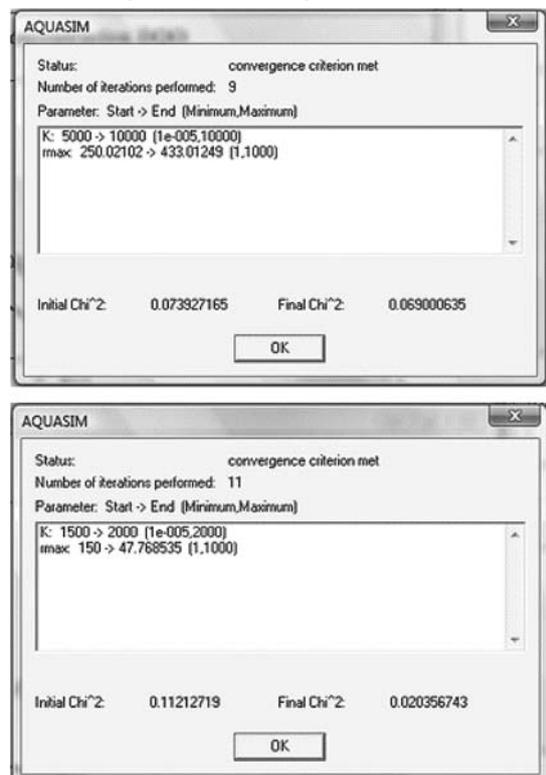


Tabla 2. Datos de DQO vs Tiempo

T, días	0	3	5	6	7	8	10	11	12	13	14	17	18	19	20	24	25	26	27	28	32	35	40	41	42	45	47	48	73	74
DQO, mg/l	2855,4	1702	1132	1698	1265	1725	1265	1332	1325	1236	1026	1231	980	1026	1022	892	1455	1150	1872	1110	1010	1022	980	1030	1020	982	920	1080	1204	1040

sin embargo, cuando se empezó a ajustar los parámetros y a realizar la simulación con los parámetros calculados se observó un mayor ajuste de la curva calculada por el programa a los datos reales. Aunque se empezó con valores aleatorios de K_s y μ_{max} se observó que el sistema se ajustaba a buscar valores de Chi – cuadrado más pequeños, la tendencia era que el valor de K_s aumentaba hasta el límite superior establecido y μ_{max} se ajustaba para compensar el aumento. Este comportamiento de dependencia se confirmó en el análisis de sensibilidad, Figura 3, ya que las curvas generadas por las variables estudiadas muestran una dependencia lineal. Este resultado aporta poca confianza al resultado obtenido ya que el modelo se ajusta dependiendo del valor que asigne a K_s máxima, por lo que no produce un par único de valores de parámetros.

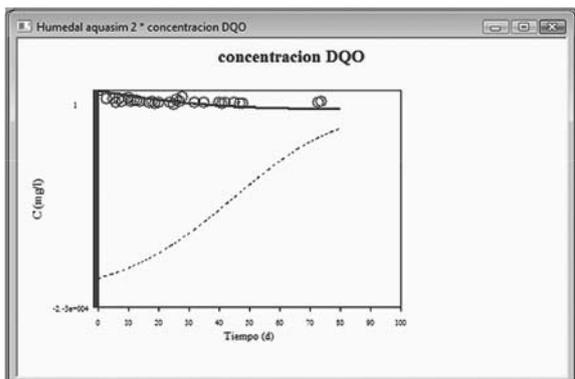
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

No hay confianza en los valores obtenidos para 2000 mg/l y debido a su comportamiento variable dependiendo del valor límite colocado en los cálculos.

Se observó el potencial que tiene el software AQUASIM para evaluar cinéticas de reactores biológicos, y para hacer los respectivos análisis de sensibilidad.

Se recomienda evaluar el impacto de otros factores en el resultado de remoción de DQO, tales como los factores atmosféricos (radiación solar o luminosidad) para ver su impacto sobre los resultados obtenidos experimentalmente.

Figura 3. Análisis de sensibilidad





BIBLIOGRAFÍA

AINSA, (1991). *Tecnologías apropiadas en saneamiento*. Asociación de Ingenieros Sanitarios de Antioquia, Medellín, Colombia.

AUSTIN, David. Advanced Treatment Wetlands: A 4th Generation Technology North American Wetland Engineering. Disponible en: <http://www.jlakes.org/web/FourthGenerationWetlands.pdf>. Agosto 2009.

BEDESSEM, Marjorie E.; FERRO, Ari M.; HIEGEL, Trevor Pilot-Scale Constructed Wetlands for Petroleum-Contaminated Groundwater. *Water Environment Research*; Jun 2007; 79, 6; ProQuest Agriculture Journals. p. 581.

BEHREND, Leslie L. Reciprocating Subsurface-Flow Constructed Wetlands For Treating High-Strength Aquaculture Wastewater. Disponible en: <http://www.bioconceptsinc.com/pdfs/Treating-High-Strength-Aquaculture.pdf>. Diciembre 2009.

BERNAL, Faisal. *Humedales artificiales y su potencial aplicación en el contexto regional*. ISBN: 978-958-8511-50-4. EDUCOSTA 2009.

CENAGUA, OPS, Société Québécoise d'assainissement des eaux, "Sistemas de tratamiento de aguas servidas por medio de Humedales Artificiales". Santa fe de Bogotá D.C., Colombia, Nov. 1999.

Constructed Wetlands Guidance Manual Ontario Rural Applications. 1999.

CORMAGDALENA. Informe de avance. Formulación Plan de Ordenamiento y Manejo Ambiental de la Cuenca Hidrográfica del complejo de Humedales del Rio Magdalena. Disponible en: <http://www.scribd.com/doc/22866309/HUMEDALES-rivera-oriental-Atlantico-pdf>. Noviembre 2009.

CRISTINA, S. C.; Antonio, Calheiros; RANGEL, O. S. S.; Paula M. L., CASTRO. Treatment of industrial wastewater with two-stage constructed wetlands planted with *Typha latifolia* and *Phragmites australis*. *Bioresource Technology* 100 (2009) 3205-3213.

CRITES, R.; TCHOBANOGLOUS, G. (2000). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Edit. McGraw-Hill, Santa Fe de Bogotá.

CHIEMCHASRI, C.; CHIEMCHASRI, W.; JUNSOD, J.; THREEDEACH, S.; WICRANARACHCHI |. P.N. Leachate treatment and greenhouse gas emission in subsurface horizontal flow constructed wetland. *Bioresource Technology* 100 (2009) 3808-3814.

DESBROW, C.; ROUTLEDGE, E. J.; BRIGHTY, G. C.; SUMPTER, J. P.; WALDOCK, M. (1998). Identification of estrogenic chemicals in STW effluent. I. Chemical. *Environ. Sci. Technol.* 32, 1549-1558.

DORNBUSH, J.N. Natural renovation of leachate-degraded groundwater in excavated ponds at a refuse landfill. *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Municipal, Industrial and Agricultural*. Chelsea, MI: Lewis Publishing, Inc. 1989. pp. 743-752.

EPA 832-R-93-008 “Subsurface Flow Constructed Wetlands for Wastewater Treatment”. July 1993, pp. 1-1.

GRISMER, Mark E. Simulation Evaluation of the Effects of Non-Uniform Flow and Degradation Parameter uncertainty on subsurface-flow constructed wetland performance. *Water Environment Research*; Nov/Dec 2005; 77, 7; ProQuest Agriculture Journals. P. 3047.

HAI-LIANG, Song; KAZUNORI, Nakano*; TAKASHI, Taniguchi; MUNEHIRO, Nomura; OSAMU, Nishimura. Estrogen removal from treated municipal effluent in small-scale constructed wetland with different depth. *Bioresource Technology* 100 (2009) 945-2951.

http://www.dgi.unam.mx/boletin/bdboletin/2002_0181.html Documento: “Boletín de la UNAM Febrero 27/2002”.

KADLEC, R. H. & KNIGHT, R. L. (1996). *Treatment Wetlands*. New York: Lewis Publishers.

KADLEC, R. H. (1997a). An autotrophic wetland phosphorus model, *Ecological Engineering*, 8: 145-172.

KRÖPFELOVÁ, Lenka; VYMAZAL, Jan; JAROSLAV, Svehla; JANA, Stichová (2009). *Removal of trace elements in three horizontal sub-surface flow constructed wetlands in the Czech Republic*. República Checa, *Environmental Pollution* 157 (2009) 1186.1194.

LAHORA, A. (1998). Humedales controlados como tratamiento terciario de aguas residuales urbanas. En: RIVERA, J. (ed.). *Conclusiones del Encuentro Medioambiental Almeriense, Recursos Hídricos*. CD-ROM. Consejería de Medio Ambiente (Junta de Andalucía), Instituto de Estudios Almerienses (Diputación Provincial de Almería), Universidad de Almería, Grupo Ecologista Mediterráneo. Almería.

LANGERGRABER, Gunter; SIMUNEK, Jirka (2005). *Vadose Zone Journal* 4:924-938.

LARA B., Jaime (1999). *Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales*. Trabajo final en Maestría de Ingeniería Ambiental y Contaminación Ambiental. Universidad Politécnica de Cataluña y Instituto Catalán de tecnología. España. Disponible en: <http://www.geocites.com/jalarab.html>

LEGG, Raymond (en prensa). *Design and operational considerations for subsurface flow constructed wetland systems*. Universidad de Waterloo, Waterloo, Canada.

MALECKI-BROWN, Lynette M.; WHITE, John R.; REDDY, K. R. Soil Biogeochemical Characteristics Influenced by Alum Application in a Municipal Wastewater treatment Wetland. *Journal of Environmental Quality*; Nov/Dec 2007; 36, 6; ProQuest Agriculture Journals, p. 1904.

MALTAIS-LANDRY, Gabriel; CHAZARENC, Florent; COMEAU, Yves; TROESCH, Stéphane. *Effects of artificial aeration, macrophyte species, and loading rate on removal efficiency in constructed wetland mesocosms treating fish farm wastewater*. *Journal of Environmental Engineering and Science*; Jul 2007; 6, 4; ProQuest Science Journals. p. 409.

MANGA, J.; LOGRIRA, N.; SERRAT, J. "Reuso de aguas residuales: un recurso hídrico disponible". *Ingeniería & Desarrollo*. Universidad del Norte 9:12-21,2001.

MEISEL ROCA, Adolfo; PÉREZ, Gersón (2006). Geografía Física y poblamiento en la costa Caribe colombiana. *Documentos de trabajo sobre Economía Regional* No. 73, Banco de la República. Centro de Estudios Económicos Regionales CEER-Cartagena, junio 2006. ISSN 1692-3715.

METCALF, Leonard; HARRISON, Hedí (1997). *Tratamiento y depuración de las aguas residuales*. Tomo I, tomo II. Barcelona: McGraw-Hill. 837 p.

Ministerio del Medio Ambiente. *Diagnóstico e inventario de los sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales*. (1998).

NECULITA, Carmen-Mihaela; VIGNEAULT, Bernard; ZAGURY, Gérald J. *Toxicity And Metal Speciation In Acid Mine Drainage Treated By Passive Bioreactors*. *Environmental Toxicology and Chemistry*; Aug 2008; 27, 8; ProQuest Medical Library. p. 1659.

ÑIQUE ÁLVAREZ, Manuel. *Humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales*. Sociedad peruana de gestión ambiental.

PILON-SMITS, Elizabeth. Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology*; 2005; 56, ProQuest Medical Library. p. 15.

Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000 (ministerio de desarrollo).

ROCHFORT, Q. J.; ANDERSON, B. C.; CROWDER, A. A.; MARSALEK, J. & WATT, W. E. (1997). Field-scale studies of subsurface flow constructed wetlands for stormwater quality enhancement, *Water Quality Research Journal of Canada*, 32: 101-107.

ROMERO ROJAS, Jairo Alberto (1999). *Tratamiento de aguas residuales: teoría y principios básicos de diseño*. Santa Fe de Bogotá: Edit. Escuela Colombiana de Ingeniería.

ROSA, Miguel. Estimación de Parámetros Cinéticos de la Degradación Aeróbica de Efluentes Lácteos usando AQUASIM v 2.1b. *Información Tecnológica* Vol. 21 N° 3 - 2010. Disponible en: <http://www.scielo.cl/pdf/infotec/v21n3/art06.pdf>

SEOANEZ CALVO, Mariano (1999). *Aguas residuales: Tratamiento por humedales artificiales, fundamentos científicos, tecnología y diseño*. Madrid, España: Mundo Prensa.

Sistemas de tratamiento de aguas servidas por medio de Humedales Artificiales (1999) CENAGUA, OPS, Société Québécoise d'assainissement des eaux, Santa fe de Bogotá D. C., Colombia.

TCHOBANOGLIOUS, George. *Sistemas de manejo de aguas residuales*. Tomo I, Tomo II. Edit. McGraw-Hill.

TILLEY, David Rogers et al. (2002). Constructed wetlands as recirculation filters in large-scale shrimp aquaculture. *Aquacultural Engineering*. Volume 26, Issue 2, June 2002, pp. 81-109.



U.S. EPA (1993). *Subsurface Flow Constructed Wetland for Wastewater Treatment*. PA 832-R-93-008, U. S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.

U.S. EPA (2000). EPA/625/R-99/010. *Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*, September 2000. Dponible en: <http://www.epa.gov/ORD/NRMRL>

VYMAZA, Jan; KRÖPFELOVÁ, Lenka. *Removal of organics in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: A review of the field experience*. *Science Of The Total Environment* 407 (2009) 3911-3922.

ZURITA, F.; DE ANDA, J.; BELMONT, M. A. (2008). *Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface constructed wetlands*. México: Ecological Engineering. pp. 861-869.