

# COMPORTAMIENTO FISICOQUÍMICO E HIDRÁULICO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA CIUDAD DE MONTERÍA – COLOMBIA

## PHYSICOCHEMICAL AND HYDRAULIC BEHAVIOR OF THE TREATMENT SYSTEM FOR WASTEWATER OF THE CITY OF MONTERIA - COLOMBIA

Jhon J. Feria-Díaz, Isabel C. Blanco-Rhenals, Leydis L. Villadiego-Rojas,  
Humberto C. Tavera-Quiroz y Beatriz Rueda-Linares  
Universidad Pontificia Bolivariana, Facultad de Ingeniería Sanitaria y Ambiental,  
Km 8 Vía Cereté, Montería - Colombia  
(e-mail: jhon.feria@gmail.com)

*Recibido: 11/08/2010 - Evaluado: 29/09/2010 - Aceptado: 13/10/2010*

### RESUMEN

En este trabajo se investigó el comportamiento fisicoquímico e hidrodinámico de la laguna facultativa secundaria del sistema de tratamiento de aguas residuales nororiental de la ciudad de Montería-Colombia, con el fin de determinar el tipo de flujo y el valor de la constante cinética de biodegradabilidad de carga orgánica. Se monitoreó pH, temperatura, conductividad, SST, BOD5, COD y alcalinidad total en 12 puntos del espejo de agua, con el fin de observar el comportamiento espacial y temporal en un día. Adicionalmente, se tomaron muestras a la entrada y salida de la laguna facultativa para encontrar el valor de la constante en función del tipo de flujo del reactor. Se construyeron matrices de correlación entre los parámetros físico-químicos siendo las correlaciones entre el pH, conductividad y alcalinidad altamente significativas. Los resultados obtenidos muestran que el tipo de flujo en la laguna es disperso y el valor de la constante cinética es  $K_{20} = 0,0614 \pm 0,0096 \text{ d}^{-1}$ .

### ABSTRACT

In this study is investigated the physicochemical and hydrodynamic behavior of the secondary facultative pond of treatment system for wastewater northeast of the city of Monteria-Colombia, to determine the flow type and the value of kinetic constant of organic load biodegradability. The concentrations of pH, temperature, conductivity, TSS, DBO5, DQO and total alkalinity in 12 points in the water mirror were measured to observe spatial and temporal behavior throughout the day. Additionally, samples were taken at the inlet and outlet of the pond to find the value of the constant depending on the type flow in the reactor. Correlation matrices were constructed between the physicochemical parameters, highly significant correlations between pH, conductivity, alkalinity, and TSS were obtained. The results show that the flow type of the pond is dispersed. The value of the constant obtained was  $K_{20} = 0.06145 \pm 0.0096 \text{ d}^{-1}$ .

Palabras clave: laguna facultativa; patrones de mezcla; constante cinética; materia orgánica  
Keywords: facultative pond; mixing patterns; kinetic constant; organic matter

## INTRODUCCIÓN

Los procesos biológicos son una buena alternativa en el tratamiento de las aguas residuales y tienen como objetivo principal estabilizar la materia orgánica. Sin embargo, es fundamental determinar las constantes cinéticas y estequiométricas propias del agua residual a tratar (Rodríguez et al., 2003).

Entre las diversas alternativas tecnológicas existentes, las lagunas de estabilización son ampliamente utilizadas a nivel mundial ya que representan una tecnología económica y altamente efectiva para el tratamiento de las aguas residuales, siempre y cuando exista disponibilidad de terreno y su costo beneficio lo permita, por esta razón a menudo se consideran como la primera opción para el tratamiento en pequeñas y grandes comunidades en todo el mundo (Short et al., 2010), en especial, en países tropicales y subtropicales donde la intensidad del brillo solar y la temperatura ambiental favorecen una alta eficiencia de los procesos de degradación (Peña, 2003). Por otra parte, las lagunas de estabilización tienen bajos gastos de operación y mantenimiento, no necesitan de operación continua en las instalaciones y facilitan el reciclaje y reutilización del agua (Rolim, 2000). En Colombia el uso de lagunas de estabilización, particularmente en las regiones cercanas al mar Caribe, es muy generalizado, sin embargo no existen investigaciones que permitan definir parámetros de diseño adecuados y se desconoce sus características hidrodinámicas particulares.

Para la modelización de lagunas de estabilización, en particular, para lagunas facultativas existen tres modelos racionales, que son: flujo pistón, donde las concentraciones de la materia orgánica se desplazan uniformemente a través de la masa de agua; mezcla completa, en el cual cualquier volumen de líquido de la laguna tiene la misma concentración de materia orgánica, es decir, es una mezcla homogénea a lo largo y ancho del espejo de agua (Rojas, 2002) y el flujo disperso, que es una combinación entre los dos anteriores. La mayoría de los investigadores aceptan y utilizan la hipótesis que estos modelos involucran constantes cinéticas de primer orden para la biodegradación de la materia orgánica en función de la temperatura (Kehl et al., 2009).

Con este proyecto se propone una metodología que permita definir el patrón de flujo y la constante cinética de biodegradabilidad de la laguna estudiada, de tal forma que se aporten valores de referencia que satisfagan las condiciones del medio regional y local. Adicionalmente, se realizó una descripción de la dinámica de la laguna estableciendo correlaciones entre los parámetros físico-químicos y ambientales más representativos del sistema.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El proyecto se realizó en la ciudad de Montería - Colombia, en las coordenadas 8° 45' 40" latitud norte y 75° 51' 24" longitud oeste, donde se localiza la laguna estudiada. El sistema de tratamiento está formado por un canal de ingreso, un dissipador de energía, un desarenador y dos trenes de lagunas facultativas (dos lagunas en serie por cada tren de tratamiento) de 300 m de largo, 160 m de ancho y 1,80 m de profundidad cada una. El caudal promedio ingresa a la laguna secundaria mediante dos interconexiones superficiales y una sumergida, con un valor de 240 L/s. En la Figura 1, se muestra la localización del sistema de tratamiento.

Para el desarrollo del proyecto se plantearon dos etapas: la primera consistió en un monitoreo de la laguna para medir las concentraciones de conductividad, temperatura, pH, DBO<sub>5</sub>, DQO y alcalinidad total en 12 puntos, tomando muestras puntuales cada 3.5 horas, desde las 7:00 a.m. hasta las 5:00 p.m. Adicionalmente, se tomaron 11 muestras para medir la concentración de DBO<sub>5</sub> y temperatura en la entrada y salida de la laguna, en jornadas posteriores al día del monitoreo. La segunda etapa, comprendió el procesamiento y análisis de los datos obtenidos en la primera fase.

Para determinar visualmente el patrón de mezcla predominante en la laguna, se construyeron curvas para cada parámetro fisicoquímico con el software Surfer 8, versión 2002. Mediante una hoja de cálculo (Excel 2007), se iteraron valores de constantes biocinéticas de degradación de la materia orgánica (K), a partir de los datos de DBO<sub>5</sub> y temperatura del afluente y efluente de la laguna, para cada uno de los modelos racionales. Luego se

calibró cada modelo buscando coincidir la curva de  $DBO_5$  efluente monitoreado con la curva de  $DBO_5$  efluente simulado, ajustando los valores de K a partir de un valor semilla. Para optimizar el sistema de tratamiento, se utilizó el valor de la constante hallada y se proyectó el tiempo de retención hidráulico adecuado.

La dinámica de los parámetros físico-químicos en la laguna, se determinó a partir de una matriz de correlación de Pearson, utilizando el software Statistix 8.1 (Trial Versión). Se escogieron como parámetros importantes aquellos que tuvieran un coeficiente de correlación alto, con un criterio de significancia de  $\alpha=0,05$ .

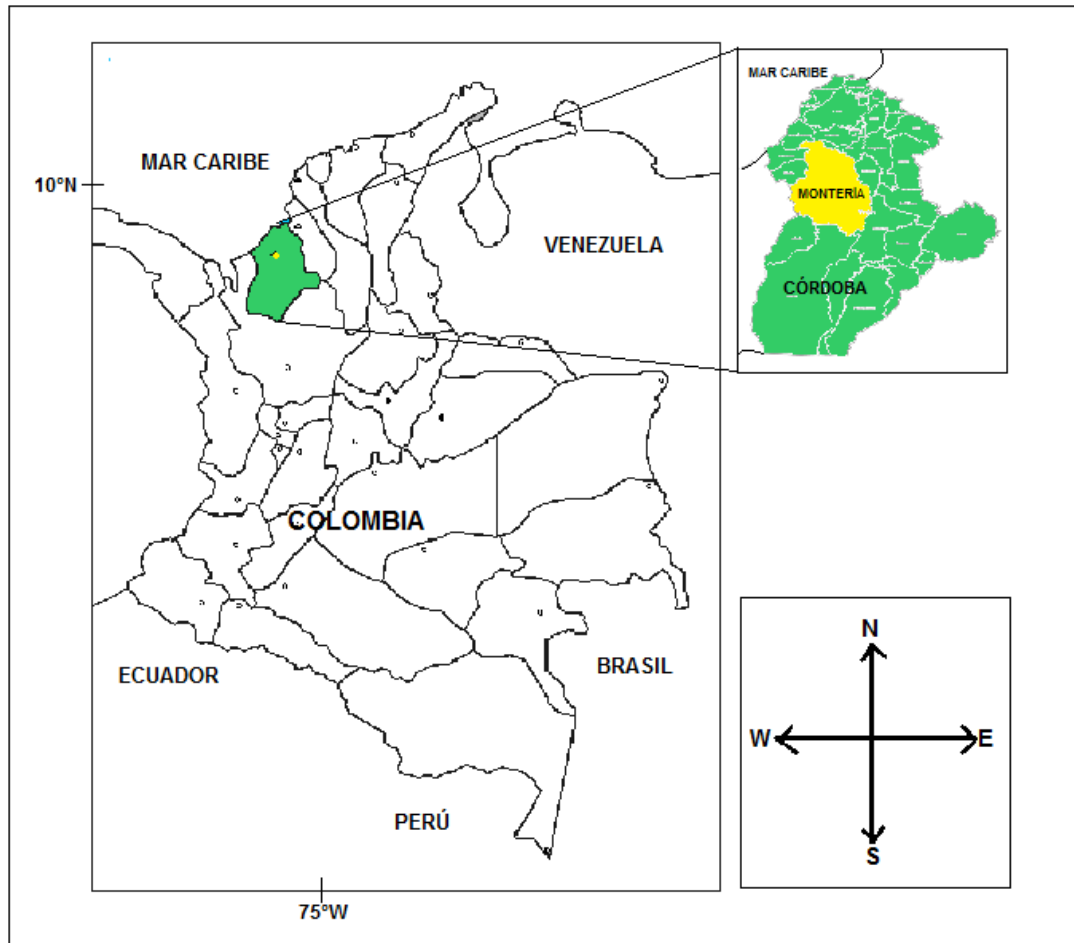


Fig. 1: Localización del proyecto

## RESULTADOS Y DISCUSION

En la Figura 2, se muestra el comportamiento espacial y temporal de los parámetros fisicoquímicos monitoreados.

A excepción de la temperatura, se observó un comportamiento no homogéneo en el espejo de agua para las concentraciones de los parámetros analizados, debido a que la hidrodinámica en las lagunas de estabilización es muy compleja (Aldana et al., 2005). Factores como el viento, la radiación solar, la humedad relativa, la temperatura y la geometría de la laguna juegan un papel muy importante en el patrón de flujo de estos sistemas de tratamiento (Badrot-Nico et al., 2009). Para lagunas con un funcionamiento adecuado se esperar

que la masa de agua superficial se calentara uniformemente y la estratificación se diera en función de la profundidad (Rolim, 2000). Sin embargo, en esta laguna la temperatura presentó dos gradientes diferentes, uno a la derecha y otro a la izquierda, teniendo mayores valores el lado derecho de la laguna en la zona de entrada. Este comportamiento podría explicarse a partir del tipo de estructura de entrada, puesto que la entrada sumergida genera poca turbulencia en el agua superficial, permitiendo que ésta conserve valores acordes a la radiación solar que esté recibiendo, mientras que el afluente con ingreso superficial, podría ocasionar mayor turbulencia y aireación del agua, alterando la temperatura de la superficie.

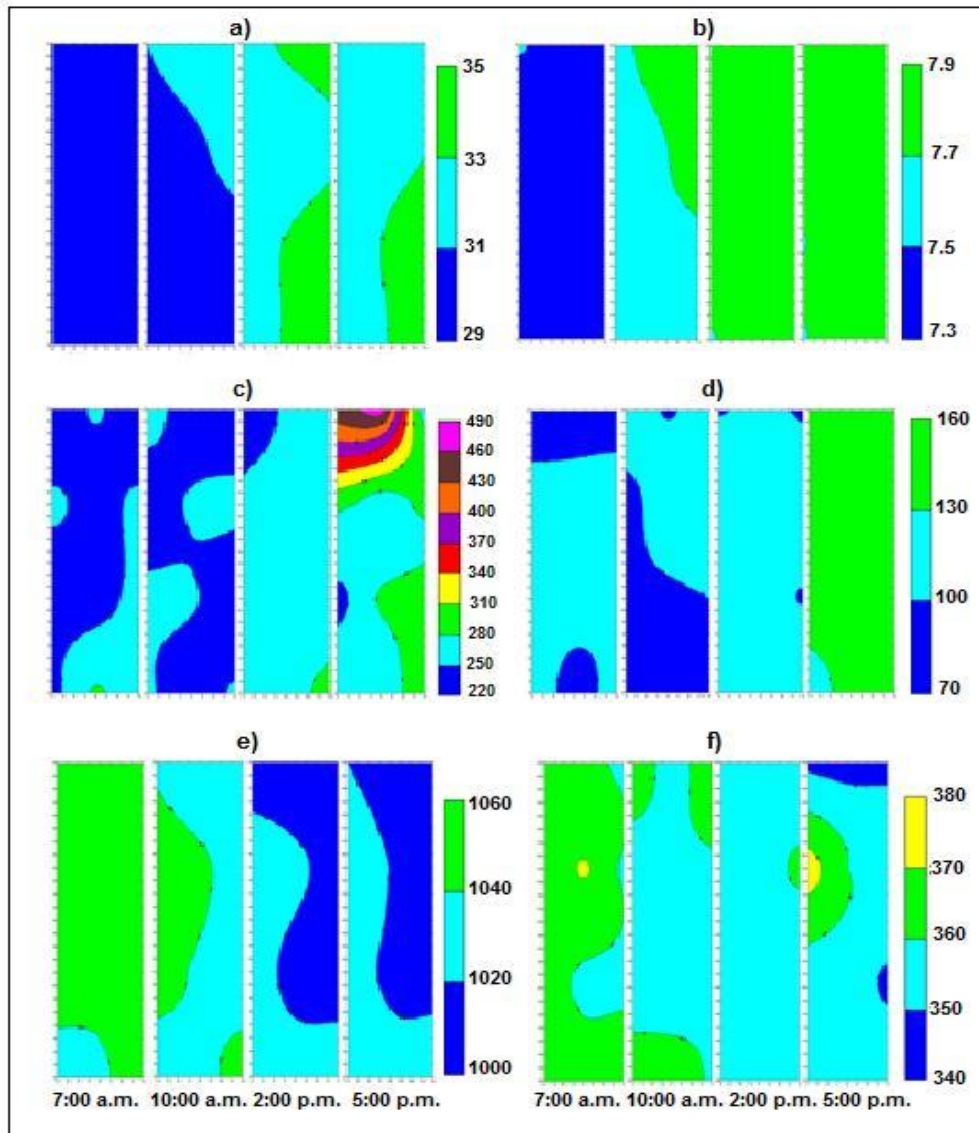


Fig. 2: Comportamiento de parámetros fisicoquímicos en la laguna: a) Temperatura, b) pH, c) DQO, d) DBO<sub>5</sub>, e) Conductividad, f) Alcalinidad

En la Tabla 1, se muestra la matriz de correlación de los parámetros fisicoquímicos estudiados.

Según la matriz de correlación, se identificaron dos grupos: el primer grupo relaciona la conductividad, pH y alcalinidad, con coeficientes de correlación mayores a 0.46 y el segundo grupo relaciona DBO<sub>5</sub>, DQO,

conductividad y temperatura, con coeficientes menores a este valor. La correlación hallada para el primer grupo, puede explicarse por la influencia del pH sobre los demás parámetros, debido al tipo de agua residual que trata el sistema, es decir, aguas residuales domésticas con altos contenidos de sales, nitratos y potasio, entre otros (Seoáñez, 2004). Para el segundo grupo, la temperatura ejerce una gran influencia en el comportamiento de los otros parámetros, debido a que juega un papel importante en el proceso fotosintético de las algas y repercute en los niveles de oxígeno disponible, por lo tanto en las concentraciones de DBO<sub>5</sub>. De igual manera la temperatura tiene una relación directa con la conductividad (CIESE, 2006; Calderón, 2002).

Tabla 1: Valores de los coeficientes de correlación de los parámetros fisicoquímicos

|                        | ALCALINIDAD         | CONDUCTIVIDAD       | DBO <sub>5</sub>   | DQO                | TEMPERATURA        |
|------------------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| <b>CONDUCTIVIDAD</b>   | 0,5100<br>(0,0002)  |                     |                    |                    |                    |
| <b>DBO<sub>5</sub></b> | -0,2905<br>(0,0452) | -0,4127<br>(0,0036) |                    |                    |                    |
| <b>DQO</b>             | -0,4213<br>(0,0029) | -0,3205<br>(0,0264) | 0,4466<br>(0,0015) |                    |                    |
| <b>TEMPERATURA</b>     | -0,2654<br>(0,0683) | -0,4395<br>(0,0018) | 0,4379<br>(0,0019) | 0,2025<br>(0,1675) |                    |
| <b>pH</b>              | -0,4594<br>(0,0010) | -0,8421<br>(0,0000) | 0,3825<br>(0,0073) | 0,2737<br>(0,0598) | 0,4112<br>(0,0037) |

Los valores entre paréntesis son p-valores (α=0,05)

De acuerdo a la Figura 2, el patrón de mezcla predominante en la laguna es de flujo disperso y puede obedecer al elevado caudal de operación del sistema de tratamiento y a la geometría rectangular de la laguna, que favorece zonas muertas en las esquinas. De acuerdo a investigaciones adelantadas por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente - CEPIS, el comportamiento predominante para lagunas tipo facultativo es de dispersión axial (flujo disperso), dado que representa un comportamiento mixto entre el flujo pistón y mezcla completa (Sáenz, 2000; Rojas, 2002). Von Sperling (2005), en estudios realizados en 186 lagunas de estabilización de diferentes partes del mundo, sugirió que el modelo que más se aproxima al comportamiento hidrodinámico real en una laguna de estabilización es el de flujo disperso, lo anterior está acorde a lo hallado en este estudio. Recientemente, en Francia se utilizó una modelización en 3 dimensiones (3D) para simular la velocidad del agua, la temperatura y la concentración de contaminantes en función de todos los factores meteorológicos influyentes, donde el modelo conceptual de flujo disperso presentó la mejor respuesta de simulación para velocidades del viento menores a 3.5 m s<sup>-1</sup> (Badrot-Nico et al., 2009). En las lagunas de estabilización de la ciudad de Montería - Colombia, la velocidad del viento no superó los 3.0 m s<sup>-1</sup>, razón por la cual el modelo de flujo disperso es el adecuado para simular las condiciones de tratabilidad del agua residual de la ciudad.

El modelo de flujo disperso se calibró a partir de los datos obtenidos en las jornadas de campo. Inicialmente se halló el número de dispersión en función de la relación Largo/Ancho de la laguna (L/W=1,875), de acuerdo a la ecuación propuesta por Yañez en 1988 y corroborada por Von Sperling (2005), que corresponde a 0,4960. Se utilizaron las ecuaciones 1, 2 y 3, para desarrollar la hoja de cálculo y mediante iteraciones, se definió la constante que permitió el mejor ajuste de las curvas, la cual fue de K<sub>20</sub>=0,0614 ± 0,0096 d<sup>-1</sup>, dato que se encuentra dentro de los valores típicos reportados por Romero (1998).

$$\frac{C}{C_0} = \frac{4\alpha e^{-\alpha x/L}}{(1 + \alpha)^2 e^{-\alpha x/L} - (1 - \alpha)^2 e^{-\alpha x/L}} \tag{1}$$

$$\alpha = \sqrt{1 + KT} \tag{2}$$

$$D = \frac{L/W}{[-0.261 + 0.254(L/W) + 1.014(L/W)^2]} \tag{3}$$

En la Figura 3, se muestra la curva de calibración del modelo al igual que la curva de concentración de DBO<sub>5</sub> monitoreada.

La eficiencia de remoción de carga orgánica del sistema lagunar fue de 51% aproximadamente, que se considera baja y obedece principalmente a la excesiva carga orgánica superficial (COS) que recibe el sistema de tratamiento, con valores superiores a 1000 KgDBO<sub>5</sub>/Ha-día, que son típicos para sistemas lagunares anaeróbicos y no para lagunas facultativas, que habitualmente trabajan con COS < 400 Kg DBO<sub>5</sub>/Ha-día (Rolim, 2000; Romero, 1998). La sobrecarga orgánica influye notablemente en la coloración del espejo de agua del sistema lagunar, ya que disminuye severamente los niveles de clorofila "a" (Aguirre et al., 2007). Para lagunas facultativas con buen funcionamiento la coloración superficial debe ser verde oscuro o "esmeralda", situación que no se observó en la laguna estudiada y que corrobora el inadecuado funcionamiento del sistema de tratamiento.

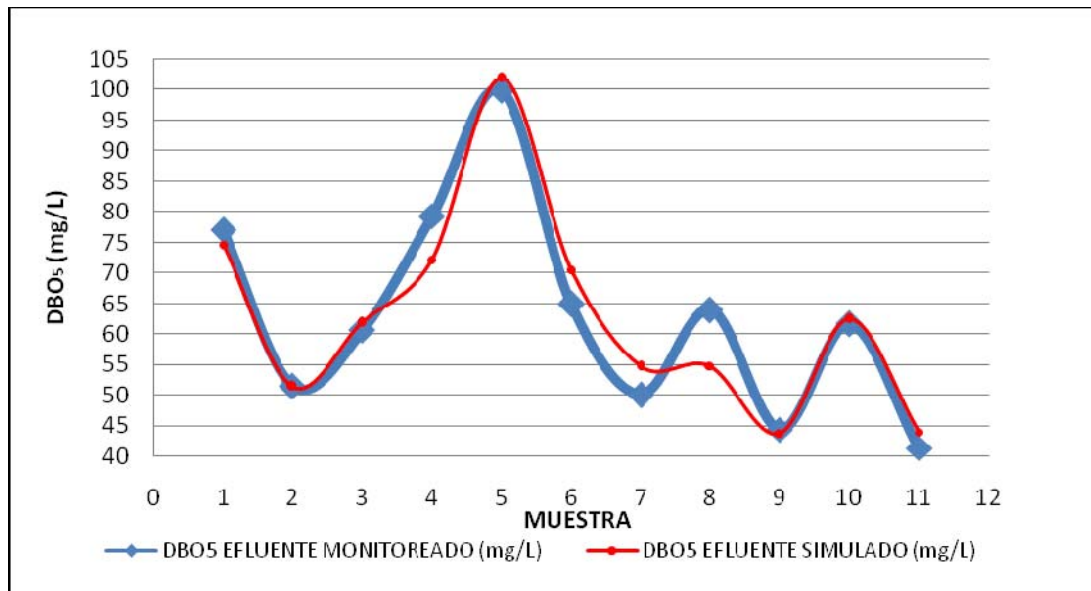


Fig. 3: DBO<sub>5</sub> efluente simulado y DBO<sub>5</sub> efluente monitoreado, para flujo disperso

Para aumentar la eficiencia de tratamiento de la laguna hasta el nivel de remoción exigido por la norma colombiana, es decir, 80% en carga orgánica (MARC, 1984) es necesario aumentar el tiempo de retención, lo cual se consigue aumentando el área total de tratamiento o reduciendo las cargas afluentes al sistema.

**CONCLUSIONES**

La dinámica encontrada en la laguna facultativa secundaria no fue la esperada, ya que se observaron comportamientos anormales de algunos parámetros. Por otra parte, se hallaron altas correlaciones entre parámetros que usualmente no se encuentran asociados, lo que indica un funcionamiento irregular de la laguna, posiblemente por las altas cargas orgánicas aplicadas actualmente al espejo de agua.

La hidráulica de la laguna influye en el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos, en especial la forma como ingresa el agua al sistema. Se observaron dos gradientes de temperatura claramente marcados, debido a que dos de las estructuras de entrada eran superficiales y una sumergida.

El patrón de mezcla de la laguna es de flujo disperso. El valor de la constante  $K_{20}$  se encuentra en el rango establecido para este tipo de sistemas de tratamiento, sin embargo, la eficiencia de remoción es considerablemente baja, lo que hace necesario optimizar el sistema para lograr el cumplimiento de los requerimientos legales vigentes.

## NOMENCLATURA

|    |   |   |
|----|---|---|
| a  | = | Constante adimensional                              |
| Co | = | Concentración del contaminante en el afluente, mg/L |
| C  | = | Concentración del contaminante en el efluente, mg/L |
| D  | = | Factor de dispersión adimensional                   |
| T  | = | tiempo en días                                      |
| K  | = | constante global de asimilación                     |
| L  | = | Longitud de la laguna, en m                         |
| W  | = | Ancho de la laguna, en m                            |

## AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen a la Empresa Proactiva S.A. E.S.P., Aguas de Montería y a la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Montería, por su apoyo a este proyecto.

## REFERENCIAS

Aldana, G., Bracho, N. (2005); *Simulation and prediction of hydrodynamic performance at university of Zulia's wastewater stabilization ponds using a 3D-Computational Fluid Dynamic (CFD) model*. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería (ISSN: 0254-0770): 28(1), 86-94.

Aguirre, N.; Mejía, R.; Múnera, M. (2007); *Variación nictemeral de la calidad del agua en las lagunas de estabilización del municipio de La Ceja, Antioquia*. Revista Facultad de Ingeniería (ISSN: 0120-6230): numero 040, pp. 22-40.

Badrot-Nico, F.; Guinot V.; Brissaud, F. (2009); *Fluid flow pattern and water residence time in waste stabilisation ponds*. Water Science & Technology-WST (ISSN: 0273-1223): 59(6), 1061–1068.

Calderón, F. (2002); *La conductividad eléctrica y la conductividad a granel del suelo como base para la medición de la humedad del suelo*. Bogotá. Disponible en: [www.drcalderonlabs.com](http://www.drcalderonlabs.com) (acceso: 01 de junio de 2010).

CIESE (2006); Center of Innovation in Engineering and Science Education, Stevens Institute of Technology. *Libreta de Campo para las Pruebas de las Muestras de Agua. Demanda Biológica de Oxígeno*. Disponible en: <http://www.k12science.org/curriculum/dipproj2/es/fieldbook/index.html> (acceso: 03 de junio de 2010).

Kehl, O.; Wichern, M.; Lübken, M.; Horn, H. (2009); *Analysis of design approaches for stabilization ponds under different boundary conditions-A comparison*. Ecological Engineering (ISSN: 0925-8574): 35(8), 1117–1128.

MARC (1984); Ministerio de Agricultura República de Colombia, Ministerio de Salud República de Colombia, Departamento Nacional de Planeación. Decreto 1594. Bogotá, Colombia.

Peña M. (2003); Lagunas de estabilización para el tratamiento de aguas residuales. International Water and Sanitation Centre, IRC, Cali, Colombia. Disponible en: <http://www.es.irc.nl/page/26728> (acceso: 7 de mayo de 2010).

Rodríguez, T.; Pérez, E.; Vivas, E. (2003); *Determinación de las constantes cinéticas y estequiométricas en un biorreactor de lodos activados convencional a escala. Laboratorio de Aguas Residuales de un Frigorífico*. Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina (ISSN: 1909-77350): Número 013 pp. 9-16.

Rojas R. (2002); Determinación de la constante cinética en lagunas de estabilización, Métodos Experimentales. Curso Internacional Gestión Integral De Tratamiento De Aguas Residuales. CEPIS/OPS-OMS, pp. 7

Rolim S. (2000); Sistema de lagunas de estabilización, 1ª ed., Bogotá, editorial McGraw-Hill, 2000. pp. 112, 198-199, 203, 215.

Romero, J. (1998); Acuitratamiento por lagunas de estabilización, 3ª ed., Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, pp. 42-141.

Sáenz, R. (2000); *Consideraciones en relación con el uso de lagunas de estabilización para el tratamiento de aguas residuales*. CEPIS, 2000. Disponible en: <http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/proyecto/repidisc/publica/hdt/hdt33/hdt33.html> (acceso: 29 de Junio de 2010)

Seoánez, M. (2004); Depuración de las aguas residuales por tecnologías ecológicas y de bajo costo, Editorial Mundi prensa, Madrid, pp. 105.

Short, M.D., Cromar, N.J.; Fallowfield, H.J. (2010); Hydrodynamic performance of pilot-scale duckweed, algal-based, rock filter and attached-growth media reactors used for waste stabilisation pond research. Ecol. Eng. (doi:10.1016/j.ecoleng.2010.07.015): 36(12), 1700-1708.

Von Sperling, M. (2005); *Modelling of coliform removal in 186 facultative and maturation ponds around the world*. Water Research (ISSN: 0043-1354): 39(20), 5261–5273.