



EVALUACIÓN CINÉTICA DE UN HUMEDAL DE TRATAMIENTO EN UN CLIMA TEMPLADO SUB HÚMEDO EN MÉXICO

Armando Rivas Hernández^{1,2}, Icela Dagmar Barceló Quintal¹, Gabriela Eleonora Moeller Chávez³, Nancy Edith Figueroa García¹.

1 Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Paseo Cuauhnáhuac No. 8532, Col. Progreso. Jiutepec, Mor. CP 62550, Tel. (52) 01.777.329.36.00.

2 Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco. División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Av. San Pablo No. 180, Col. Reynosa Tamaulipas, Azcapotzalco, CP 02200. Tel y Fax: (52) 01.555.318.93.60.

3 Universidad Politécnica del Estado de Morelos, UPEMOR. Boulevard Cuauhnáhuac 566. Col. Lomas del Texcal. Jiutepec, Morelos. C.P. 62550. Tel. (52) 777.229.35.33 Ext. 3556

arivas@tlaloc.imta.mx; rivas.hz@gmail.com; ibarceloq@gmail.com; gabriela.moeller@gmail.com; miyagui2000@yahoo.com

Resumen

Los humedales de tratamiento han incrementado de manera importante su uso a nivel internacional, principalmente por sus bajos costos y sencillez de operación, así como por su valiosa integración al medio ambiente. Existen varios modelos para el dimensionamiento de los humedales de tratamiento. Las ecuaciones incluyen constantes cinéticas obtenidas de manera empírica en Europa y Estados Unidos, bajo condiciones diferentes (clima, calidad y cantidad del agua residual, geometría, granulometría, especies vegetales, tiempo y eficiencia de operación) a las existentes en México. El uso de estas constantes, sin realizar los ajustes necesarios, implica el riesgo del subdimensionar o sobredimensionar estos sistemas, con los consecuentes efectos negativos que esto provoca, como son la disponibilidad de terreno, eficiencias de remoción de contaminantes, incremento de costos de operación y mantenimiento, dificultad en la operación, etc. Se analiza en este estudio el comportamiento dentro del humedal de la disminución de contaminantes, con respecto al tiempo de retención y se obtiene la constante cinética para un humedal de tratamiento, con dos años de operación, para una condición específica de clima templado sub húmedo en México y se hace la comparativa con respecto a los modelos existentes de diseño.

Introducción

Los humedales de tratamiento, desde los años 90 han presentado un fuerte desarrollo a nivel mundial para la depuración de las aguas residuales (Rodríguez, 2003). En México, de acuerdo con el Inventario Nacional de Plantas de Tratamiento, han incrementado del 0.2 % en el año 2001 al 8.2 %, para el 2011, lo que evidencia la importancia de su uso en este país, para caudales que oscilan entre 0.2 L/s y 120 L/s. Estos sistemas tienen menores costos de tratamiento en relación a los sistemas electromecánicos, debido principalmente a que no requieren energía eléctrica para su funcionamiento, por la mínima capacitación que requieren sus operadores y por su sencillez de operación y mantenimiento;

Sin embargo, requieren de áreas mucho mayores que los sistemas electromecánicos, los cuales son compactos debido a que el oxígeno es suministrado por medio de equipos electromecánicos por lo que su principal limitante es la disponibilidad de terreno (García, 2004). Hoy en día existen varios criterios para el diseño de los humedales de tratamiento. Las ecuaciones disponibles (EPA, 1988, Kadlec y Knigh 1996) fueron obtenidas de manera empírica, principalmente en Europa y en los Estados Unidos de Norteamérica bajo condiciones ambientales, sociales y económicas bastante diferentes que las existentes en México, por lo que se tiene la disyuntiva de seleccionar alguno de estos criterios. Las constantes cinéticas fueron obtenidas utilizando una amplia variedad de aspectos como son el clima, especies vegetales, granulometría del medio filtrante, calidad del agua, geometría de los estanques de tratamiento, variantes de operación, entre otros, por lo que no es conveniente su uso sin ningún ajuste en países con climas templados y en los tropicales, donde se presenta el riesgo de sobredimensionarlos, lo que dificulta la consecución del terreno y afecta en el funcionamiento del sistema desde el punto de vista de su balance de masas. Se tiene por lo tanto la necesidad de obtener constantes cinéticas que apliquen para condiciones específicas, de tal modo que se calculen de manera más objetiva las áreas de tratamiento, se ajusten los costos y se optimicen las eficiencias de remoción de contaminantes. Se tiene como objetivo de este estudio obtener en un sistema a escala real (en una comunidad rural que genera aguas residuales municipales) una constante cinética para el diseño de humedales de tratamiento, que aplique para una condición climática específica en México.

Metodología

El sistema de tratamiento en donde se realizó este estudio se ubica en la localidad de Cucuchuco, municipio de Tzintzuntzan, Michoacán, en las coordenadas 19°35'00.30" de latitud norte y 101°37'47.40" de longitud oeste, a una altura de 2 060 metros sobre el nivel del mar. Su caudal de diseño es de 1 L/s y lleva dos años de operación. El flujo es continuo. La secuencia serial de las unidades de tratamiento, utilizada para

“Norteamérica y el Caribe en el camino hacia el desarrollo sostenible”

este estudio consiste de pretratamiento (rejillas y desarenador), tanque séptico (TS) y humedal de tratamiento (HT). El HT fue impermeabilizado con geomembrana de polietileno de alta densidad; se diseñó para tratar 1.0 L/s; sobre la membrana tiene una capa de arcilla de 0.1 m; el medio filtrante está formado por tres capas de tezontle (roca piroclástica ígnea, extrusiva, porosa y muy ligera de 0.2 m de espesor, con granulometrías de 0.05 – 0.07 m en el fondo, 0.03 – 0.05 m en la parte media y 0.015 – 0.03 m en la superficie, por lo que el medio granular tiene una profundidad de 0.7 m; su carga orgánica es de 15.16 kg/d, fue sembrado con tule (*Thypha sp*), no incluye recirculación ni uso de energía eléctrica; fue diseñado para una concentración de 10 000 CF NMP/100 mL. El tratamiento del agua continúa en unidades posteriores (laguna de maduración y humedal de pulimento), que es donde el diseño corresponde al cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-1996. El HT está dividido en dos módulos: el módulo A presenta un largo de 47.5 m y un ancho de 27 m, con área de 1 282 m²; el módulo B tiene un largo de 47.2 m y un ancho de 13.5 m, y un área de 641 m². Cada humedal presenta tuberías con perforaciones de 2”, a cada 0.2 m; están colocadas a lo ancho en los cabezales. En cada módulo, se ubicaron 5 puntos de muestreo (H-a, H-b, H-c, H-d y H-e), a cada 10 m de distancia (el H-a también a 10 m del tubo de distribución, en el cabezal), con el propósito de monitorear la mejoría de calidad del agua a diferentes tiempos de retención, a lo largo del humedal. La campaña de muestreo se realizó durante el mes de noviembre, bajo condiciones de estiaje. La frecuencia de muestreo fue de cada 4 horas, durante 48 horas. Se obtuvieron muestras simples para coliformes fecales (CF) y muestras compuestas para la demanda bioquímica de oxígeno, (DBO₅), nitrógeno total (NT), fósforo total (PT), y sólidos suspendidos totales (SST). Los parámetros de campo fueron: pH, oxígeno disuelto (OD), temperatura ambiental y del agua y conductividad eléctrica. Se realiza una comparativa de las constantes entre los resultados obtenidos (condiciones reales) y las ecuaciones de diseño más comunes existentes (Kadlec y Knigh, 1996 y EPA, 1988). Igualmente se hace una comparación bajo las condiciones reales del humedal estudiado.

Resultados y discusión

En la figura 1 se muestran los resultados de pH y OD. El pH del agua cruda presenta un valor de 6.6, el cual disminuye en el tanque séptico a 6.5 debido a los ácidos grasos ahí generados. En el sitio H-d, en ambos módulos, se obtienen los valores más cercanos al neutro. En el sitio H-e (efluente del humedal) nuevamente disminuye el valor, lo que coincide con una disminución de OD y un incremento de la DBO₅ (figura 3), es decir, se tiende a generar una condición anaerobia.

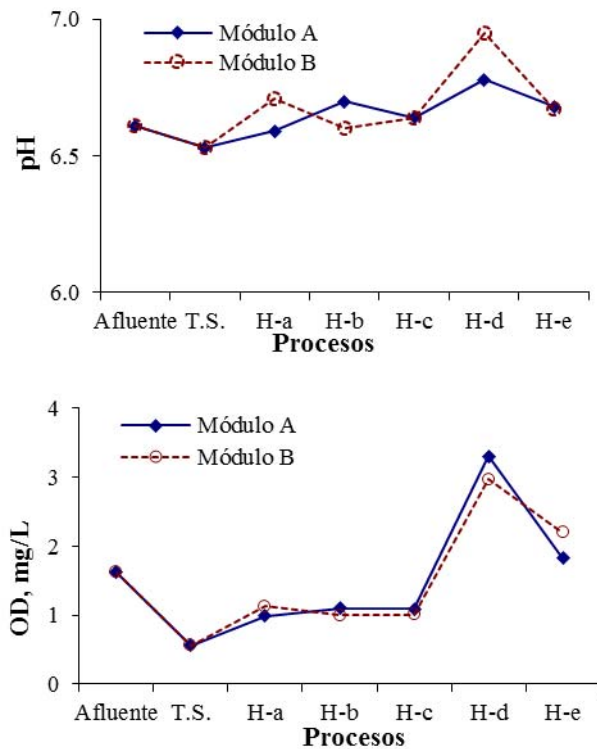


Figura 1. Resultados de pH y OD en los módulos A y B del humedal del sobrenadante

De manera general el pH de los dos módulos presenta una tendencia a aumentar. (Kadlec y Wallace, 2009) refieren que los humedales de tratamiento presentan la característica de producir un pH cercano al valor neutro, por lo que incluso encuentran aplicación para el tratamiento de aguas residuales generadas en la industria minera.

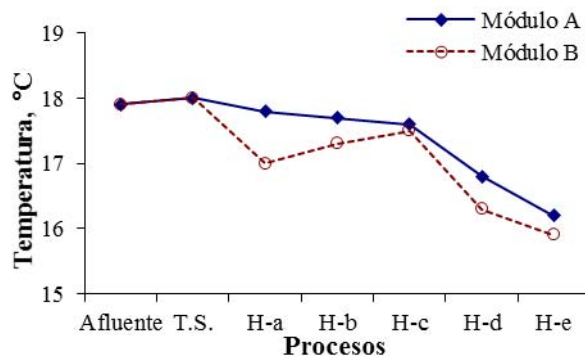
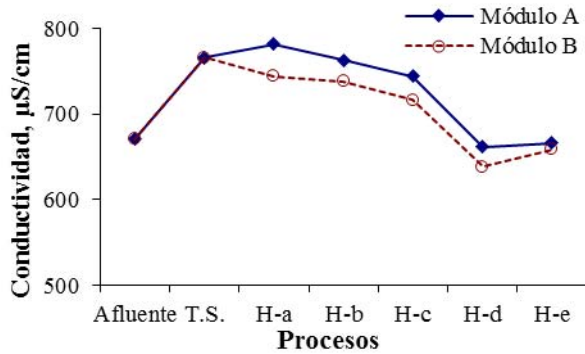
El comportamiento del OD se presenta de manera similar al pH, en donde la concentración tiende a aumentar conforme incrementa el tiempo de retención.

La menor concentración se presenta entre el agua cruda y el efluente de la fosa séptica donde se desarrolla una condición fuertemente anóxica, con valores menores de 1.0 mg/L, condición que persiste hasta el sitio H-b, con una concentración menor de 2.0 mg/L. En el sitio H-c se obtienen valores del orden de 3.0 mg/L, lo que indica una mejoría de calidad del agua y una reducción de contaminantes, sin embargo, en el punto H-c nuevamente se desarrolla la concentración anóxica (Kadlec y Wallace, 2009).

La conductividad eléctrica (figura 2) tiende a disminuir conforme avanza el tiempo de tratamiento, lo que pudiera deberse a que el humedal presenta relativamente poco tiempo de operación, ya que lo común es que con los años de funcionamiento los minerales existentes en el agua residual tiendan a acumularse. La temperatura tiende a disminuir desde el agua cruda hacia el efluente del humedal; sin embargo, los

“Norteamérica y el Caribe en el camino hacia el desarrollo sostenible”

valores permanecen por encima de los 15 °C, lo que beneficia la cinética de remoción de contaminantes.



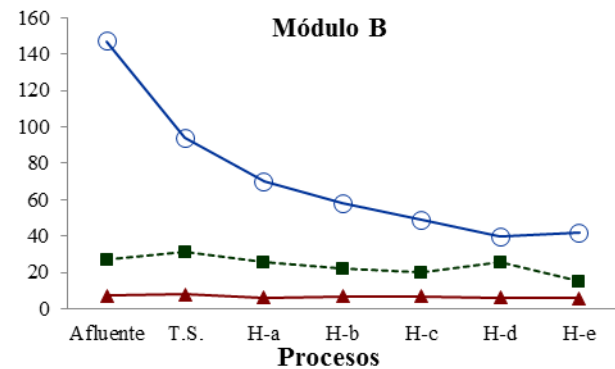
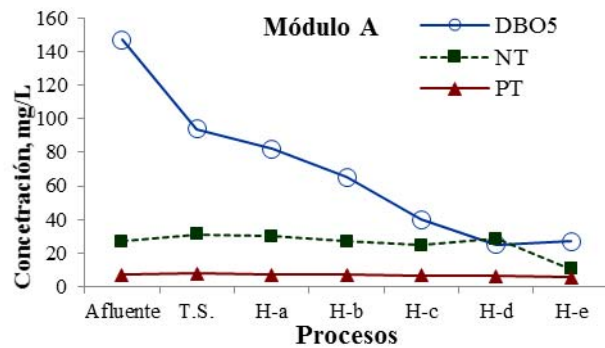
TS = Tanque séptico, H-a a H-e = sitios del humedal del sobrenadante.

Figura 2. Resultados de Conductividad eléctrica y temperatura en los módulos A y B del humedal del sobrenadante

En las figuras 3 y 4 se muestran los resultados de reducción de diversos contaminantes. DBO₅, NT y PT en los módulos A y B. Se indica una disminución de éstos conforme incrementa el tiempo de tratamiento. El parámetro que se remueve con mayor velocidad es la DBO₅. La eficiencia de remoción de este contaminante dentro del humedal del módulo A, a partir del tanque séptico es del 71 % y en el módulo B del 58 %, con un valor promedio de los dos módulos del 63 %. Aparentemente el humedal del módulo B, con una relación largo-ancho mayor que la del módulo A, fue más eficiente, sin embargo se requiere de un mayor número de muestreos para que pudiera ser este aspecto concluyente.

El espacio del humedal que presentó ligeramente una mayor velocidad de reducción de DBO₅ fue el comprendido entre los puntos H-c y H-d. En contraste, después del sitio H-d la curva incrementa ligeramente (punto H-e), lo que indica que el tiempo de retención requerido para llegar a la concentración esperada de DBO₅, de 30 mg/L, corresponde al existente en el punto H-d, (punto de capacidad máxima de reducción de este contaminante), es decir, se llega a la concentración de fondo, por lo que este tipo de humedales podrían diseñarse para un tiempo de retención equivalente al obtenido hasta el punto H-d. Entre los puntos H-d y H-e se muestra el comportamiento de la concentración del fondo. La eficiencia de remoción de

DBO₅ fue de 93.46 % en el Módulo A y del 93.31 en el módulo B.



TS = Tanque séptico, H-a a H-e = sitios del humedal del sobrenadante.

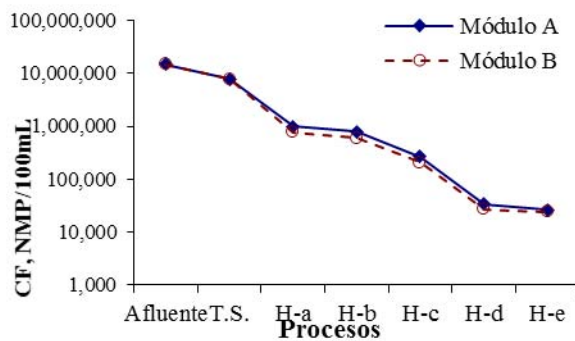
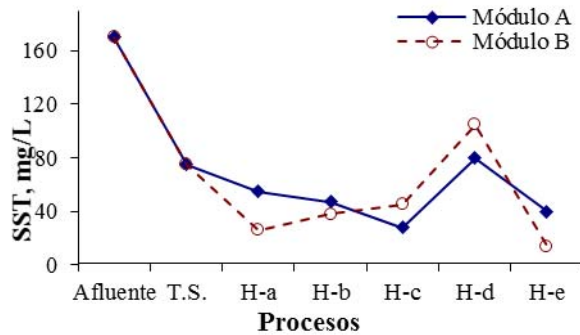
Figura 3. Remoción de DBO₅, NT y PT en los módulos A y B

La mayor concentración obtenida de NT dentro del humedal en ambos módulos se presenta en el sitio H-a, con un valor promedio de los dos módulos de 27.7 mg/L, correspondiente al sitio donde se desarrollan las reacciones de formación de amonio, el que se volatiliza cuando incrementa la concentración de oxígeno (Vymazal 2007, 2008), situación que se presenta entre los puntos de muestreo H-d y H-e, con una concentración promedio de los dos módulos de 12.7 mg/L.

En la figura 4 se presentan los resultados de SST y CF en los módulos A y B. Ambos parámetros presentan la mayor velocidad de reducción en los primeros metros del humedal, entre el tanque séptico y el sitio H-a, situación frecuente en estos sistemas como lo refiere García, *et al.*, (2004). La eficiencia global de remoción de SST del humedal es del 64 % y del 99.68 % de CF. La remoción de SST está fuertemente asociada a procesos de sedimentación, filtración y la porción de materia particulada a la utilización de carbono para el desarrollo de microorganismos, así como fuente de energía (Vymazal, 2007). La reducción de coliformes fecales se debe principalmente a la disminución de materia orgánica, incremento de pH, depredación y a la sedimentación en materiales particulados. La reducción de CF prácticamente se vuelve asintótica (equivalente a la concentración del fondo) en

“Norteamérica y el Caribe en el camino hacia el desarrollo sostenible”

los últimos 10 metros del humedal, es decir, entre los puntos H-d y H-e.

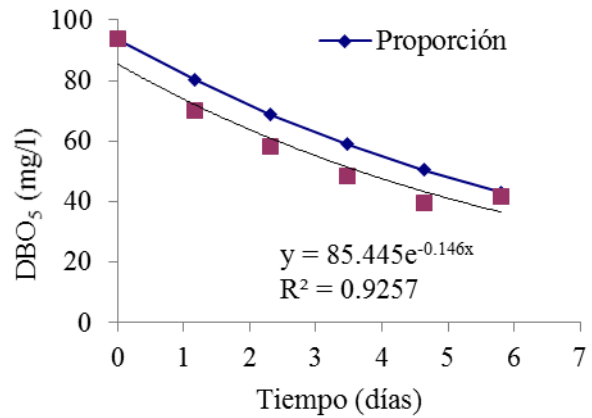
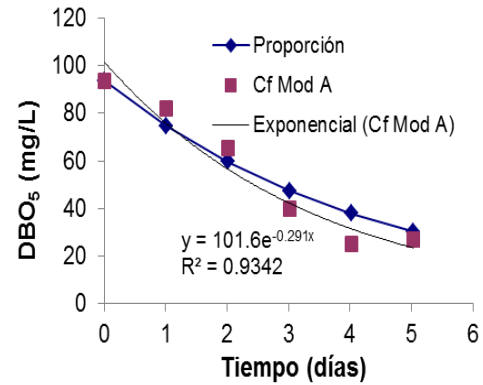


TS = Tanque séptico, H-a a H-e = sitios del humedal del sobrenadante.

Figura 4. Remoción de SST y CF en los módulos A y B del humedal del sobrenadante

Cabe citar nuevamente que el humedal fue diseñado para obtener 10 000 CF NMP/100 mL, y que la reducción de contaminantes continúa en unidades de tratamiento posteriores.

En la figura 5 se muestran las gráficas y ecuaciones obtenidas de la cinética de remoción de DBO₅ de los módulos A y B. Los tiempos de retención, en días, corresponden a los sitios anteriormente citados entre H-a y H-e. Cabe señalar que la correlación obtenida en los dos módulos es bastante similar, 0.9342 en el módulo A y 0.9257 en el módulo B. En el módulo A es ligeramente mayor y se obtiene bajo una relación largo-ancho de 1:1.8, respecto al módulo B con una relación largo-ancho de 3.5; sin embargo, aunque la diferencia es muy pequeña y aparentemente se presenta un comportamiento similar, se genera una diferencia en los valores de las ecuaciones ($y=101.6e^{-0.291x}$, $y=85.445e^{-0.146x}$), lo que induce a pendientes diferentes en las curvas exponenciales.



Cf = Concentración final.

Figura 5. Cinética de la remoción promedio de DBO₅ de los módulos A y B con los resultados de la ecuación

En la figura 6 se muestra una comparación del área requerida para el dimensionamiento de los humedales de tratamiento, con base en el criterio de remoción de DBO₅, mediante las ecuaciones de diseño de la EPA, Kadlec y la obtenida mediante este estudio. Se observa que de acuerdo con la ecuación de la EPA la concentración del fondo, que es de aproximadamente 10 mg/L, se puede obtener en un tiempo de retención cercano a los cuatro días; de acuerdo con Kadlec el mismo valor se podría obtener en cinco días y mediante la ecuación de este estudio, que corresponde al valor real obtenido en campo, el tiempo es de 12 días, por lo que podría inferirse que con los dos primeros criterios de diseño se calculan valores subdimensionados. La Kt obtenida en este estudio fue de 0.1675 d⁻¹, para un TRH de 7 días, para llegar a una concentración de 30 mg/L de DBO₅ en el agua tratada, que corresponde a la requerida por la normativa mexicana.

“Norteamérica y el Caribe en el camino hacia el desarrollo sostenible”

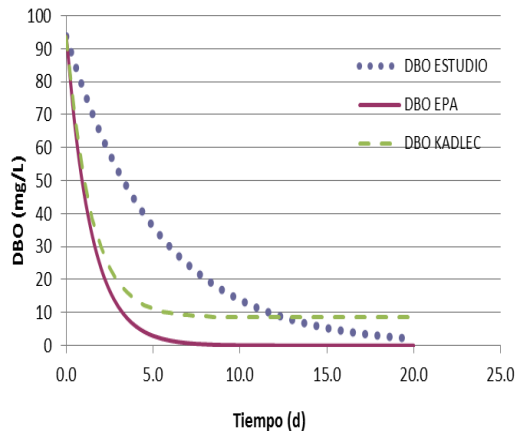


Figura 6. Comparativa del área requerida por diferentes modelos de diseño

Sin embargo, es importante señalar que cuando se presenta una ligera variación en los valores de sus constantes se obtienen requerimientos mayores de área en comparación con los valores reales de este estudio, lo que evidencia una alta sensibilidad de las ecuaciones tradicionalmente utilizadas para el diseño de los humedales de tratamiento.

Por otro lado, se enfatiza que los resultados de este estudio aplican de manera específica para el humedal evaluado, bajo las condiciones específicas de su obtención, por lo que es necesario realizar nuevas investigaciones con el fin de obtener constantes que apliquen de una manera más eficaz en el diseño de estos sistemas, de tal manera que sean más eficientes y con menores costos de tratamiento.

Conclusiones

Los resultados experimentales realizados en los humedales de tratamiento de Cucuchucho han permitido el establecimiento de una metodología adaptada para este clima específico, en la determinación de la variación de DBO₅, nitrógeno total, fósforo total y coliformes fecales, con buenas eficiencias de remoción.

Se demuestra que con las constantes usualmente utilizadas para el diseño de los humedales de tratamiento (EPA, 1988 y Kadlec y Knight, 1996), se generan con relativa facilidad sistemas subdimensionados o sobredimensionados, dependiendo del coeficiente o del valor de la constante utilizada. El subdimensionamiento propiciaría el no obtener la calidad esperada en el agua tratada, y el sobredimensionamiento, además de dificultar la obtención del terreno (área y costos), afecta el funcionamiento desde el punto de vista del balance de masas, por lo que se concluye que es importante la obtención de constantes específicas, de tal modo que estos sistemas se diseñen bajo condiciones reales de operación, para un clima específico, en donde el área obtenida permita obtener la eficiencia esperada de remoción de contaminantes.

Referencias

- Environmental Protection Agency. (1988). Design Manual. Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment. Cincinnati, OH, USA.
- García J., J. Motaó y J. Bayona. (2004). *Nuevos Criterios para el Diseño y Operación de Humedales Construidos*. CPET. Barcelona, España.
- Kadlec R.H. y R.L. Knight. (1996). *Treatment Wetlands*. Lewis Publishers. Boca Ratón, FL, USA.
- Kadlec R.H. y S.D Wallace. (2009). *Treatment Wetlands*. CRC Press. Boca Ratón, FL, USA.
- Rodríguez P. de A. C. (2003). Humedales construidos. *Estado del arte (I y II)*. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, **24** (3), 35-41.
- Vymazal J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Sci. Total Environ.* 380, 48–65.
- Vymazal J. (2008). *Constructed wetlands for wastewater treatment: a review*. Proceedings of Taal 2007. The 12th world lake conference. Sengupta, M. and Dalwani, R. Editors.