



Tecnología, Ciencia, Educación

ISSN: 0186-6036

imiqac@sercom.com.mx

Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos A.C  
México

Guido-Zárate, Alejandro; Durán-de-Bazúa, Carmen  
Remoción de contaminantes en un sistema modelo de humedales artificiales a escala de laboratorio  
Tecnología, Ciencia, Educación, vol. 23, núm. 1, enero-junio, 2008, pp. 15-22  
Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos A.C  
Monterrey, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48223103>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica  
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

# Remoción de contaminantes en un sistema modelo de humedales artificiales a escala de laboratorio

## Pollutants removal in a lab-scale constructed wetlands model system

Alejandro Guido-Zárate\*, Carmen Durán-de-Bazúa

UNAM, Facultad de Química, realizado en el Programa de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental, PIQAyQA, 04510 Mexico D.F. Tel. +(55) 56 22 53 00, Fax +(55) 56 22 53 03. Correo-e (e-mail): agor\_05@yahoo.com.mx

### RESUMEN

Los humedales construidos (HC) o humedales artificiales (HA) representan una opción alternativa para los problemas que encaran los países con economías emergentes como México, desde el punto de vista económico y tecnológico, pues son sistemas de tratamiento en los que, a través de procesos físicos, químicos y biológicos se logra la remoción de contaminantes presentes en las aguas residuales, pudiéndose utilizar una vez tratadas para uso agrícola o industrial. En la presente investigación se realizaron experimentos con reactores a escala de laboratorio para evaluar el papel que juegan las plantas (*Phragmites australis* o carrizo) en sus primeras etapas de crecimiento en la remoción de contaminantes medidos como demanda química de oxígeno soluble (DQO<sub>soluble</sub>) y como conductividad eléctrica (CE). Se construyeron dos reactores de 25 litros, con un volumen de trabajo de 12.5 L empleando recipientes de plástico (uno con un brote de la planta de 1.5 cm de altura, RA<sub>1</sub> y el segundo, como control, RA<sub>2</sub>, sin planta), empacados con escoria volcánica (tezontle). Los reactores fueron iluminados durante 16 horas por día empleando lámparas de tubos fluorescentes con características similares a la luz natural. Ambos se mantuvieron inundados para eliminar el ingreso de aire por convección. Se utilizó agua residual sintética preparada diariamente disolviendo sacarosa, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> con una DQO<sub>soluble</sub> experimental promedio de 450 mg/L. El tiempo de residencia hidráulica (TRH) de los dos reactores fue de 1.8 días. Se tomaron muestras de agua residual a la salida de cada reactor y a las profundidades de 2, 10 y 30 cm respecto al nivel del agua de los reactores para poder observar el perfil de remoción de la DQO<sub>soluble</sub> y la CE empleando metodología estandarizada para la determinación de la DQO<sub>soluble</sub> y para la medición de la CE se empleó un electrodo comercial. Los resultados obtenidos al alcanzar la etapa estable, cuando la hidrofita tenía aproximadamente 50 cm de altura, indican que el reactor (RA<sub>1</sub>) mostró los más altos valores de remoción de DQO<sub>soluble</sub> y CE (54 y 9.3% respectivamente) con respecto al reactor control (RA<sub>2</sub>) sin planta (38.1 y 4.4%, respectivamente). El análisis de los resultados indica que estas diferencias fueron estadísticamente significativas (P<0.05). Los valores de DQO<sub>soluble</sub> y CE disminuyen a medida que la profundidad es mayor siendo mayor la remoción de ambos parámetros a la profundidad de 10 cm

para el reactor con planta resaltando la importancia de la zona radicular de la planta en la eficiencia de remoción del sistema.

### ABSTRACT

Constructed wetlands (CW) or artificial wetlands (AW) represent a feasible option for the problems confronted by emerging economies countries, such as Mexico, from the technical and economical point of view, because they are integrated wastewater treatment systems in which through physical, chemical, and biological processes, pollutants can be efficiently removed from wastewaters allowing its use for agricultural and/or industrial purposes. In this research experiments were carried out using reactors at laboratory scale to evaluate the role played by plants (*Phragmites australis*) in its first stage of growth in pollutants removal measured as soluble chemical oxygen demand COD<sub>soluble</sub> and electrical conductivity (EC). Two reactors were built using 25 liters plastic containers, with 12.5 L working volume (one with a 1.5 cm height plant, RA<sub>1</sub> and a second one as a control, RA<sub>2</sub>, unplanted), packed with volcanic slag (tezontle). The reactors received illumination during 16 h a day using fluorescent tube lamps with natural light characteristics. Both reactors were kept flooded to minimize the effect of convective oxygen transfer through air sucking. Synthetic wastewater was daily prepared by dissolving sucrose, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, and Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> rendering an approximate concentration of 450 mg/L COD<sub>soluble</sub>. Hydraulic residence time (HRT) in both reactors was 1.8 d. Samples of wastewaters at the inlet and outlet as well at 2, 10, and 30 cm depth from the water level were taken, and the COD<sub>soluble</sub> and EC were determined using the standard methodology and commercial electrodes respectively. Results obtained, when the hydrophyte has approximately 50 cm height, indicate that the plant had a marked beneficial role (RA<sub>1</sub>) with removal rates of 54 and 9.3%, for COD<sub>soluble</sub> and EC, respectively, compared with the control reactor (RA<sub>2</sub>) (38.1 and 4.4%, respectively). Data analyses indicated that these differences were statistically significant (P<0.05). Values for COD<sub>soluble</sub> and EC diminish as depth increases having the highest removal at 10 cm where the plant root system is located indicating the importance of the plant presence for the pollutants removal phenomena.

Palabras clave: Remoción de contaminantes, demanda química de oxígeno, conductividad eléctrica, humedales artificiales  
Keywords: Pollutants removal, chemical oxygen demand, electric conductivity, artificial wetlands, constructed wetlands

\* Autor a quien debe enviarse la correspondencia

(Recibido en inglés: Enero 15, 2007, traducido al español, enero 15, 2008, Aceptado: Mayo 20, 2008)

## INTRODUCCIÓN

En México, como en otros países con economías emergentes, alrededor del 80% de las aguas residuales generadas en las diferentes actividades humanas se descarga a los cuerpos receptores sin ningún tratamiento (INEGI, 2005; SEMARNAT, 2005), con los consecuentes resultados de deterioro ambiental y problemas de salud pública. Los humedales construidos (HC) o artificiales (HA) representan una opción factible para resolver estos problemas debido a sus bajos costos de mantenimiento y operación, que los hace una tecnología muy atractiva desde el punto de vista económico y técnico, dado que logran reducir adecuadamente los contaminantes presentes en el agua residual. Los humedales artificiales están basados en los siguientes principios fundamentales: La actividad bioquímica de los microorganismos, la entrada al sistema de oxígeno fotosintético por las raíces de las plantas y la presencia de un material inerte empacado que sirve de soporte tanto para los microorganismos como para las hidrofítas. Este material puede operar como un filtro para retener partículas (Brix, 1997; Olmedilla y col., 2000) así como para intercambiar iones. Estos tres elementos eliminan sustancias disueltas y en suspensión del agua residual y degradan los compuestos orgánicos hacia su mineralización. Los humedales artificiales pueden emplearse como un sistema complementario en las plantas ya existentes de tratamiento de aguas residuales (Shutes, 2001) para mejorar la calidad del agua tratada (pulimento) y pueden también usarse como el tratamiento principal para comunidades pequeñas, especialmente en las zonas rurales y suburbanas (Durán-de-Bazúa, 2004).

Los objetivos de esta investigación fueron los de evaluar el efecto de la fotosíntesis de una hidrofita en sus primeras etapas de crecimiento sobre las eficiencias de remoción de contaminantes medidos como demanda química de oxígeno soluble y la variación de la conductividad eléctrica a diferentes profundidades en reactores biológicos a escala de laboratorio, plantando un brote de *Phragmites australis*.

## MATERIALES Y MÉTODOS

*Reactores a escala de laboratorio*

Se construyeron dos reactores a escala de laboratorio. Eran cilindros de plástico de 30 cm de diámetro y 35 cm de altura (Fig. 1).

Se colocaron tres puertos de muestreo a 2, 10 y 30 cm de profundidad (desde la parte superior) para tomar muestras representativas de cada zona. El nivel de agua se controló usando una manguera de látex puesta a 2

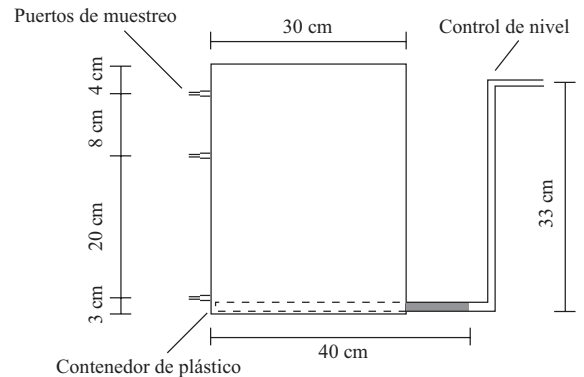


Figura 1. Dimensiones del reactor

cm abajo del nivel superior del material de empaque, manteniendo inundado el sistema 2cm debajo de la superficie para minimizar el efecto de transferencia de masa convectiva de oxígeno a través de la succión de aire ambiente (Fenoglio-Limón, 2003). Los reactores estaban empacados con roca volcánica (*tezontle*, una palabra náhuatl que significa piedra como cabello esponjado, *tetl+tzontli*). Un brote de carrizo de 1.5 cm de altura (*Phragmites australis*) se colocó en el centro del reactor denominado RA<sub>1</sub>. El segundo reactor como control no tuvo planta (RA<sub>2</sub>).

*Condiciones experimentales*

Se usó agua residual sintética para alimentar ambos reactores, la cual se preparaba diariamente resolviendo sacarosa, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>·12H<sub>2</sub>O en un contenedor de 40L con agua de la llave, lo que resultó en una relación C:N:P de 15:1:0.1 y una DQO<sub>soluble</sub> de 450 mgO<sub>2</sub>/L, valor típico de aguas residuales domésticas en un drenaje rural o suburbano (Davis y Cornwell, 1998). El flujo diario para cada reactor era de 7 L d<sup>-1</sup> que daba un tiempo de residencia hidráulica considerando el factor de porosidad de 51% de 1.8 días (IWA, 2000). Los reactores se colocaron en un laboratorio con iluminación controlada de lámparas de tubos fluorescentes usando un equipo temporizador para mantener 16h de iluminación y 8 h de oscuridad. La Figura 2 presenta el sistema experimental usado en esta investigación. Una vez alcanzado el régimen permanente, durante 4 semanas de éste y cuando la hidrofita tenía una altura de aproximadamente 53 cm,

corroborada esta etapa con mediciones de demanda química de oxígeno soluble a la salida con variaciones menores a  $\pm 10\%$  (Soto-Esquivel, 2003; Soto-Esquivel y col., 2004), empleando la metodología de la APHA (1992) modificada por Oaxaca-Grande (1997), se realizaron mediciones de conductividad eléctrica a 2, 10 y 30 cm de profundidad empleando un equipo portátil computarizado (Guido-Zárate, 2006).

El agua residual se alimentó en el centro junto a la macrofitas para minimizar efectos de difusión del oxígeno del aire a través de los reactores. Se midieron la temperatura y humedad relativa del laboratorio para observar posibles cambios ambientales en estos parámetros durante los experimentos.

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

***Demanda química de oxígeno soluble ( $DQO_{soluble}$ )***

Las Figuras 3 y 4 muestran los valores de  $DQO_{soluble}$  de influentes y efluentes de los reactores para los periodos de iluminación y oscuridad. La Tabla 1 presenta los valores promedio de los porcentajes de remoción de  $DQO_{soluble}$ .

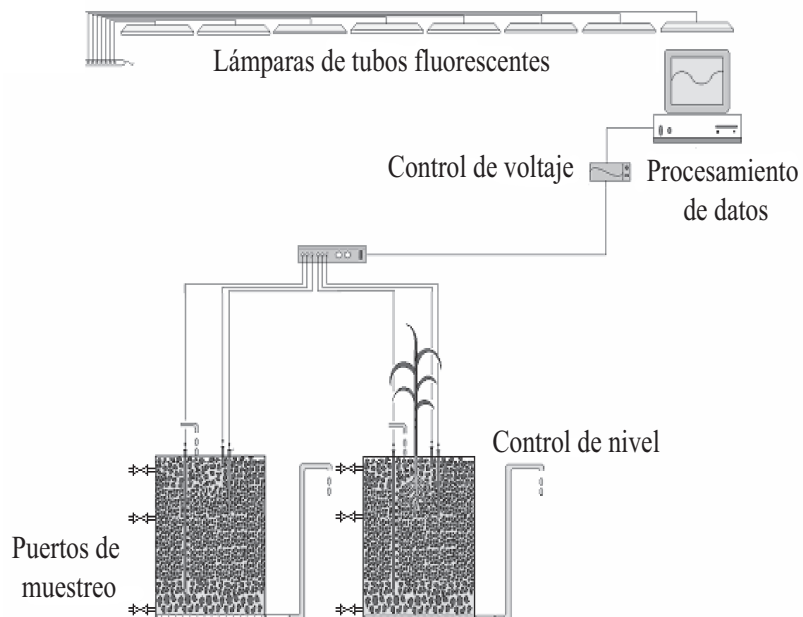
Estos resultados muestran claramente una reducción de este parámetro, tanto en el reactor con planta (RA1) como en el control (RA2). Para el período de ilumi-

**Tabla 1.** Porcentaje de remoción de  $DQO_{soluble}$  (a régimen permanente) durante los periodos de iluminación y oscuridad\*

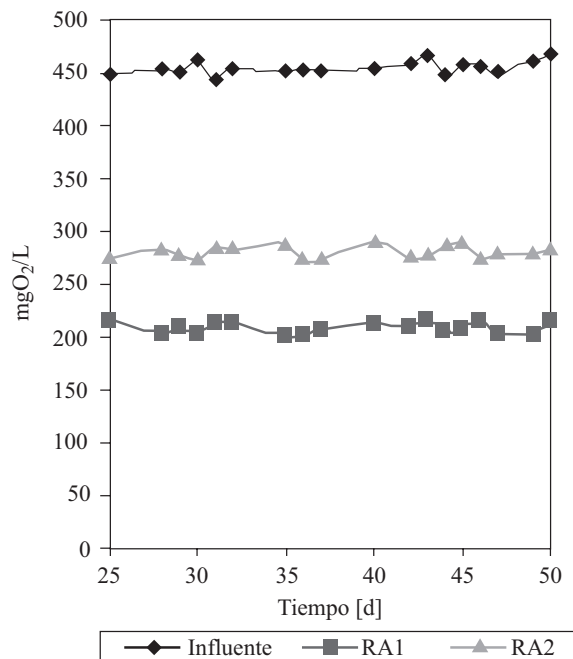
Reactor	Iluminación	Oscuridad
RA1 (con una hidrofitas de 53 cm de altura)	54.1	43.1
RA2 (control sin planta)	39.8	38.7
Diferencia atribuible a la presencia de una planta	14.3	
Diferencia atribuible al error experimental		4.4

\*Cada valor representa el promedio de toda la etapa estable

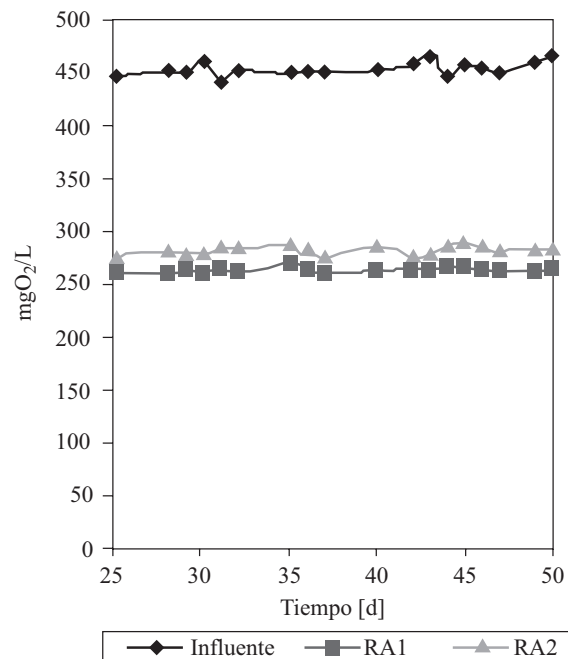
nación puede verse que el reactor RA1 (con hidrofitas) presentó la remoción más alta de  $DQO_{soluble}$  (valor de  $DQO_{soluble}$  del efluente de 216.2 mg  $O_2/L$ ), indicando que la macrofitas sí está jugando un rol en la reducción de la  $DQO_{soluble}$  (Fig. 3). Este efecto es atribuible al hecho de que durante el período de iluminación la oxidación de la material orgánica se mejora debido a la transferencia de oxígeno brindando ese oxígeno cerca de la zona radicular para las bacterias aerobias. La zona radicular sirve además como material de soporte para



**Figura 2.** Sistema experimental



**Fig. 3.** Variaciones de la  $DQO_{soluble}$  del efluente en la etapa estable durante el período de iluminación (RA1 con hidrofita, RA2 sin planta o control)



**Fig. 4.** Variaciones de la  $DQO_{soluble}$  del efluente en la etapa estable durante el período de oscuridad (RA1 con hidrofita, RA2 sin planta o control)

las bacterias heterotróficas (Brix, 1997) que consumen este oxígeno, tanto fotosintético como difundido a través de los aerénquimas, incrementando la tasa de degradación (Tabla 1). Las bacterias anóxicas también degradan material orgánico usando como aceptores de electrones a sulfatos y nitratos principalmente. Estas condiciones se tienen en ambos reactores a 30 cm de profundidad, tanto en el que tiene hidrofita como en el reactor control. La presencia de  $H_2S$  generado por este intercambio electrónico fue confirmada por el olor de las muestras de agua de salida. La remoción en el reactor control RA2 (sin planta) de  $DQO_{soluble}$  fue menor (valor en el efluente de 281.4  $mgO_2/L$ ).

Las Figuras 5 a 8 muestran los perfiles de  $DQO_{soluble}$  para ambos períodos, iluminación y oscuridad en los tres puntos de muestreo (2, 10 y 30 cm de profundidad). Puede observarse que la  $DQO_{soluble}$  disminuye conforme se incrementa la profundidad para ambos reactores. Es interesante notar que para el reactor con hidrofita, la  $DQO_{soluble}$  removida es mayor a 10 cm (zona radicular) en comparación con el reactor control sin planta. La estratificación de los porcentajes de remoción de

$DQO_{soluble}$  ocurre en ambos reactores para los dos períodos pero no hay diferencia significativa al 99.5% para los porcentajes del reactor control sin planta (Figs. 6 y 8), con respecto al que tiene la hidrofita. Este análisis estadístico indicó que los resultados de remoción de  $DQO_{soluble}$  entre ambos reactores fueron significativamente diferentes favoreciendo al que tiene la hidrofita ( $P < 0.005$ ).

#### Conductividad eléctrica (EC)

Las Figuras 9 a la 14 presentan las variaciones de la conductividad eléctrica durante los períodos de iluminación y oscuridad. Puede verse que sí hay cambios en los valores de este parámetro pero que no hay diferencias significativas entre los períodos de iluminación y oscuridad para los reactores RA1 y RA2 ( $P > 0.005$ ). Se sabe que las plantas pueden asimilar algunos iones como nutrientes traza e incorporarlos a sus tejidos. Los resultados obtenidos indican que, en estas condiciones experimentales, en el reactor con hidrofita (RA1) sí se reduce el valor de la conductividad

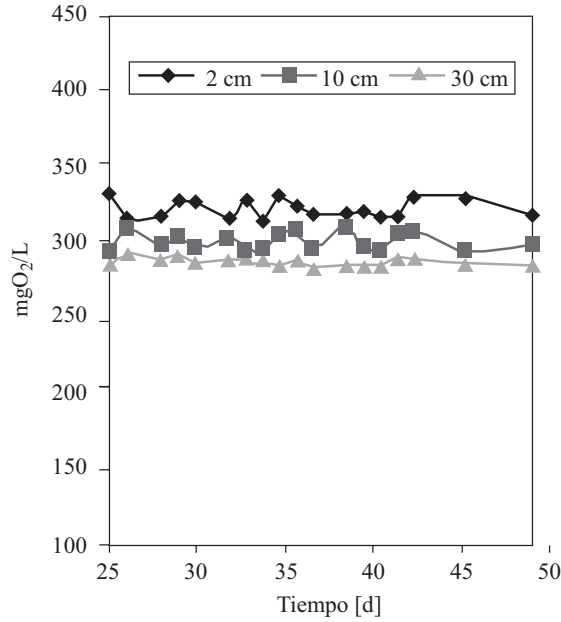


Figura 6. Perfiles de DQO<sub>soluble</sub> (RA2, sin planta) durante el período de iluminación

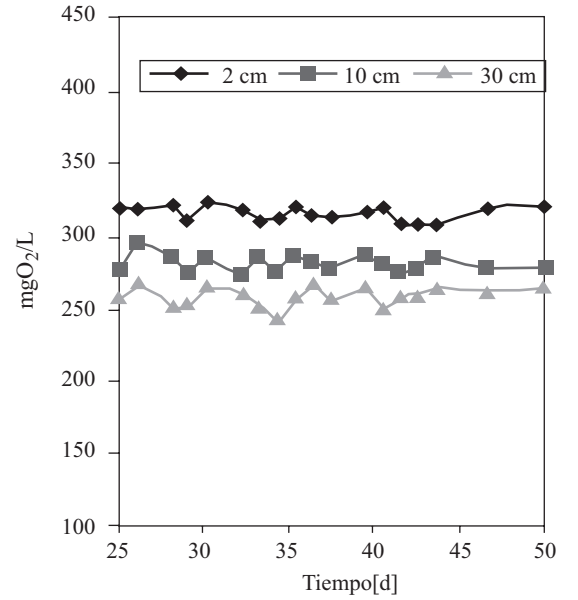


Figura 7. Perfiles de DQO<sub>soluble</sub> (RA1, con hidrofita) durante el período de oscuridad

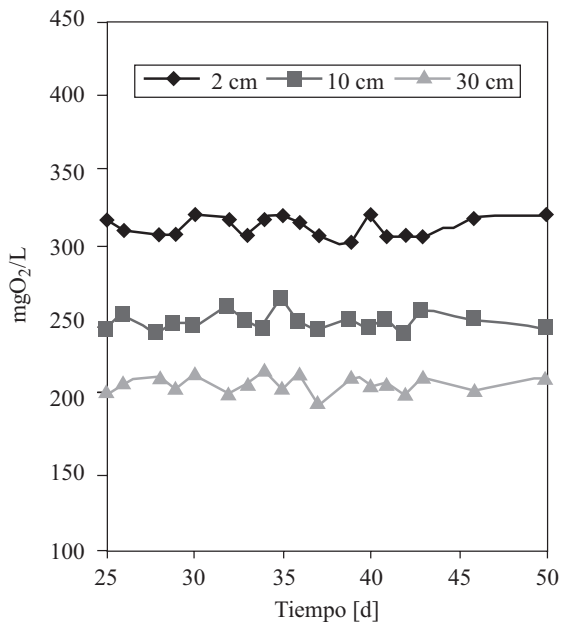


Figura 5. Perfiles de DQO<sub>soluble</sub> (RA1, con hidrofita) durante el período de iluminación

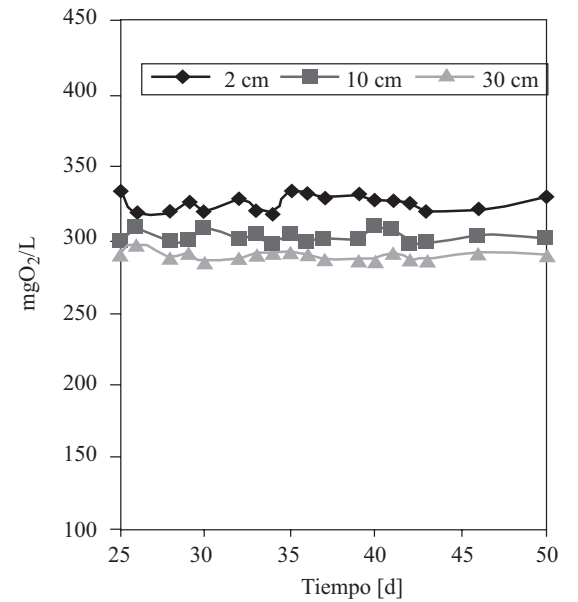
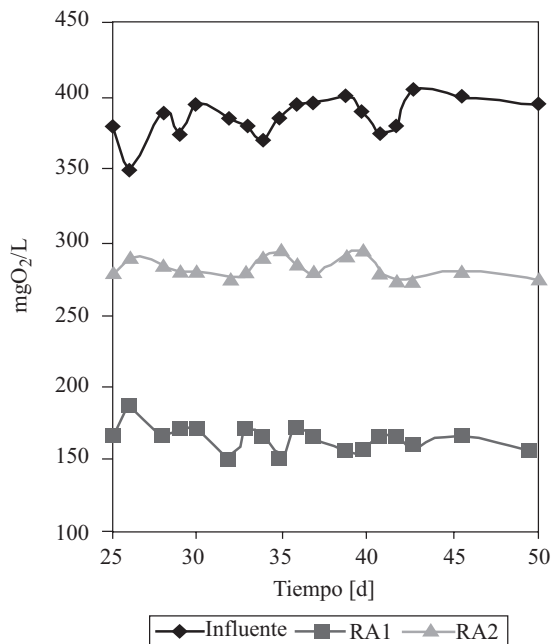
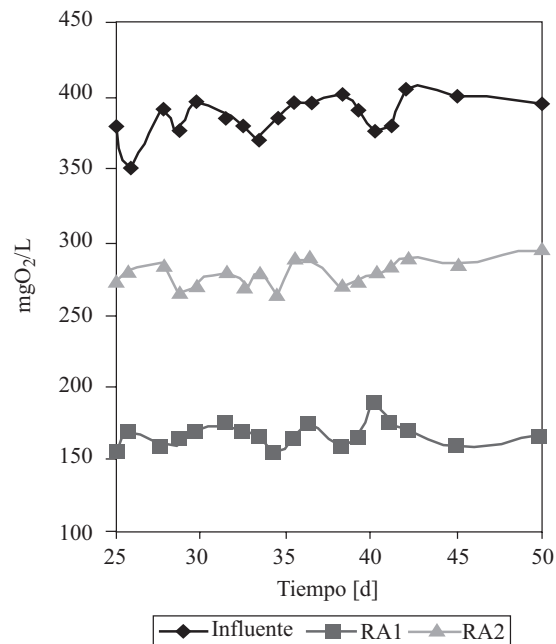


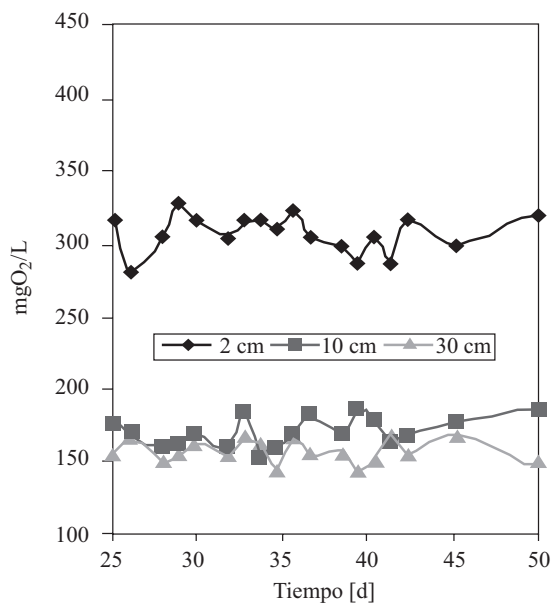
Figura 8. Perfiles de DQO<sub>soluble</sub> (RA2, sin planta) durante el período de oscuridad



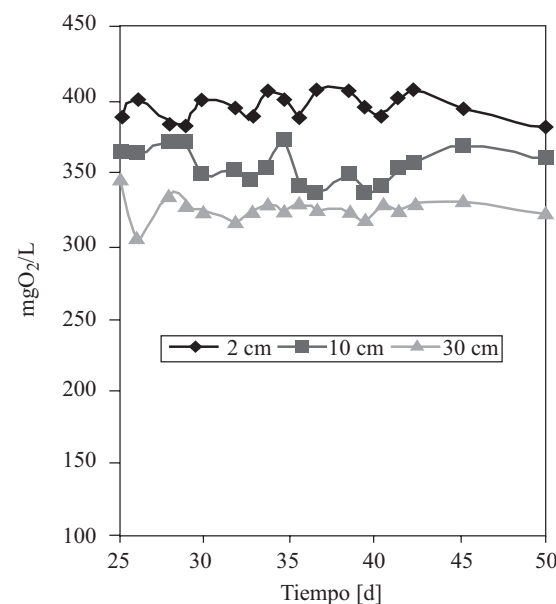
**Figura 9.** Variaciones en la conductividad eléctrica EC, del efluente con respecto al influente a condiciones estables durante el período de iluminación (RA1 con hidrofita, RA2 control sin planta)



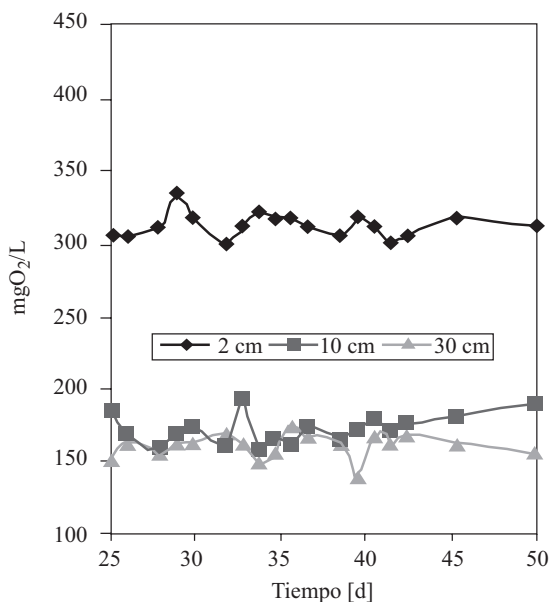
**Figura 10.** Variaciones en la conductividad eléctrica EC, del efluente con respecto al influente a condiciones estables durante el período de oscuridad (RA1 con hidrofita, RA2 control sin planta)



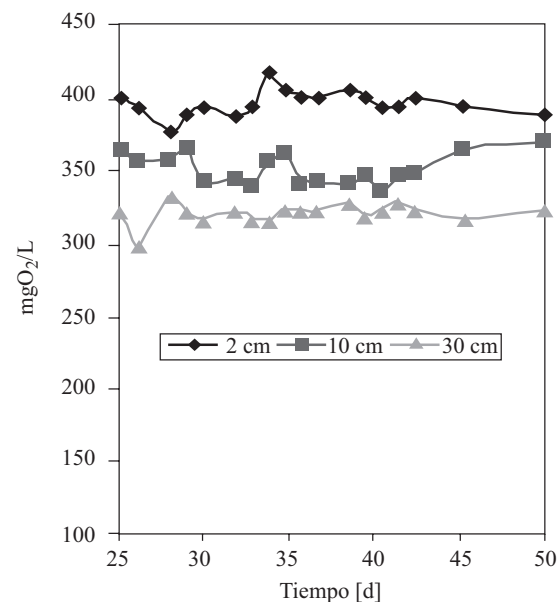
**Figura 11.** Variaciones en la conductividad eléctrica EC, del efluente con respecto al influente a condiciones estables con respecto a la profundidad para el reactor RA1 con hidrofita durante el período de iluminación



**Figura 12.** Variaciones en la conductividad eléctrica EC, del efluente con respecto al influente a condiciones estables con respecto a la profundidad para el reactor RA2 control sin planta durante el período de iluminación



**Figura 13.** Variaciones en la conductividad eléctrica EC, del efluente con respecto al influente a condiciones estables con respecto a la profundidad para el reactor RA1 con hidrofita durante el período de oscuridad



**Figura 14.** Variaciones en la conductividad eléctrica EC, del efluente con respecto al influente a condiciones estables con respecto a la profundidad para el reactor RA2 control sin planta durante el período de oscuridad

eléctrica (Tabla 2) y la diferencia sí es significativa ( $p < 0.05$ ). En esta etapa de crecimiento de las hidrofitas no se observan diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre los períodos de oscuridad e iluminación.

**Tabla 2.** Porcentaje de reducción de la conductividad eléctrica, EC, durante la etapa estable durante los periodos de iluminación y oscuridad

Reactor	Iluminación	Oscuridad
RA1 (con hidrofita)	9.31	9.16
RA2 (control, sin planta)	4.31	4.45

**CONCLUSIONES**

Pudo corroborarse que, aunque la remoción de iones en el reactor con macrofita fue del doble de la obtenida en

el reactor control, es todavía muy baja y esto se debe al hecho de que el brote de la macrofita está en el inicio de su crecimiento (de 1.5 a 53 cm) y a que las condiciones ambientales son templadas (temperatura promedio del laboratorio  $\approx 23.5^\circ\text{C}$  y humedad relativa promedio de 53% durante la realización de los experimentos). En sistemas reales, la reducción de la conductividad eléctrica, EC, puede darse con valores mayores debido a la densidad de las plantas y las características climáticas de luz y temperatura (Durán-de-Bazúa y col., 2003; Tchobanoglous, 1993; Wetzel, 1993; Wiessner y col., 2005a,b). Esto indica que no hubo diferencias significativas del efecto de la pequeña hidrofita entre los períodos de oscuridad e iluminación para movilizar los iones medidos como conductividad eléctrica presentes en el agua residual sintética alimentada (Tabla 2 y Figuras 11 a 14). La siguiente etapa de esta investigación involucra el crecimiento de la macrofita de la talla actual a la talla de aproximadamente 1.00 m, en la que se espera ver aumentos en las eficiencias de remoción de los compuestos disueltos medidos como DQOs y una diferencia estadísticamente significativa entre el sistema

con hidrofita y el que no la tiene, evaluando el rol del oxígeno fotosintético y transportado por las aerénquimas de la planta. Asimismo, se verá el rol de la hidrofita en la remoción de nitrógeno y fósforo, dos macronutrientes importantes para las plantas.

#### RECONOCIMIENTOS

Se agradece el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Conacyt, México y la Facultad de Química de la UNAM para el primer autor en la forma de una beca de posgrado y de un apoyo de formación de docentes. Asimismo, se agradece el apoyo financiero parcial a través de la Oficina Regional del Conacyt "Oriente Golfo (Tabasco-Veracruz)" al Proyecto 00-06-016-V, Depuración de aguas residuales domésticas usando humedales artificiales.

#### REFERENCIAS

- APHA 1992. *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. Ediciones Díaz de Santos. Madrid, España.
- Armstrong, J., Armstrong, W. (1988). *Phragmites australis*-A preliminary study of soil-oxidizing sites and internal gas transport pathways. *New Phytol.* **108**:373-383.
- Armstrong, J., Afreen-Zobayed, F., Blyth, S., Armstrong, W. 1999. *Phragmites australis*: effects of shoot submergence on seedling growth and survival and radial oxygen loss from roots. *Aquatic Botany.* **64**:275-289.
- Brix, H. 1997. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands?. *Water Science and Technology.* **35**(5):11-16.
- Davis, M.L., Cornwell, D.A. 1998. *Introduction to Environmental Engineering*. 3a. Ed., WCB McGraw-Hill. Nueva York, EE.UU.
- Durán-de-Bazúa, C. 2004. Tratamiento sostenible de aguas de suministro y residuales para países con economías emergentes / Sustainable treatment of water and wastewaters for emerging countries. En *Proceedings of the Third International Minisymposium on Removal of Contaminants from Wastewaters, Atmosphere, and Soils*. UNAM, Facultad de Química, PIQAyQA. Disco compacto. Julio 7-10, 2004. C. Durán-de-Bazúa, L.I. Ramírez Burgos (Eds.). México D.F. Mexico.
- Durán-de-Bazúa, C., Bernal-González, M., Esponda-Aguilar, P.L., Fenoglio-Limón, F.E., García-Gómez, R.S., Guzmán-Aguirre, S., Guzmán-López, P., Juárez-Méndez, C.H., Mejía-Chávez, A.G., Padrón-López, R.M., Ramírez-Burgos, L.I., Rodríguez-Cruz, A., Rodríguez-Monroy, J., Salinas-Castillo, N.V., Soto-Esquivel, M.G., Varela-Montellano, E. 2003. Evaluation of Salmonella, Shigella, Helminth Eggs, Enterococci, and Total and Fecal Coliforms Reduction in Treated Wastewaters from Horizontal and Vertical Flow Artificial Wetland Prototype Systems. Presentado en *1<sup>st</sup> International Conference on Water Hygienisation on Constructed Wetlands, Ponds, and Related Systems*. Center for Environmental Studies Leipzig-Halle GmbH. Noviembre 7-9. Leipzig, RFA.
- Fenoglio-Limón F.E. 2003. Fenómenos de transferencia de oxígeno por convección en sistemas que simulan humedales artificiales utilizando columnas empacadas. *Tesis de Maestría en Ciencias (Química ambiental)*. Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Químicas (Orientación: Química Ambiental). UNAM. México D.F. México.
- Guido-Zárate, A. 2006. Estudio de los potenciales de óxido-reducción en reactores biológicos que simulan un humedal artificial. *Tesis de Maestría en Ingeniería (Ingeniería Ambiental)*. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería (Campo disciplinario: Agua). UNAM. México D.F. México.
- INEGI. (2005). Página de redes internacionales / Web page. www.inegi.gob.mx
- IWA. 2000. *IWA Specialist Group on Use of Macrophytes in Water Pollution Control. Constructed wetlands for pollution control: Processes, performance, design, and operation*. Scientific and Technical Report No.8, Londres, Reino Unido.
- Oaxaca-Grande, A.M. 1997. Estudio comparativo para la determinación de la demanda química de oxígeno entre el método estándar de reflujo abierto y el método rápido colorimétrico de reflujo cerrado / Comparative study for the determination of chemical oxygen demand using the standard method with open reflux and the rapid colorimetric closed reflux method. *Professional thesis (Chemical Engineering). Tesis profesional (Ingeniería Química)*. Instituto Tecnológico de Orizaba. May 16, 1997. Orizaba, Veracruz, México.
- Olmedilla-Pérez, M., Carrillo-Sánchez, S., Rojo, C. 2000. Función depuradora de los humedales. II: Una revisión bibliográfica sobre el papel del saneamiento. *Humedales Mediterráneos. 1*:123-130.
- SEMARNAT. 2005. Dirección electrónica (redes internacionales): <http://www.semarnat.gob.mx>
- Shutes, R.B.E. 2001. Artificial wetlands and water quality improvement. *Environment International.* **26**:441-447.
- Soto-Esquivel, M.G. 2003. Efecto de la generación de oxígeno fotosintético en un sistema sólido-líquido-gas. *Tesis de Maestría en Ingeniería (Ingeniería Ambiental)*. UNAM. México D.F. México.
- Soto-Esquivel, M.G., Guzmán-Aguirre, S., Mejía-Chávez, A.G., Durán-de-Bazúa, C. 2004. Study of the effect in the redox potentials of lab scale packed columns with *Typha latifolia* presence. Presented at *9th Intl. Conference on Wetland Systems*. Cemagref. Sep. 27-Oct. 1, 2004. Avignon, Francia.
- Tchobanoglous, G. 1993. Constructed wetlands and aquatic plant systems: research, design, operational and monitoring guides. En *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. Lewis Publishers. Pp 23-34. EEUU.
- Wetzel, R.G. 1993. Constructed wetlands: Scientific foundations are critical. En *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. Lewis Publishers. Pp 3-7. EEUU.
- Wiessner, A., Kappelmeyer, P., Kusch, P., Kastner, M. 2005a. Influence of the redox condition dynamics on the removal efficiency of a laboratory-scale constructed wetland. *Water Research.* **39**:248-256.