

ESTUDIO COMPARATIVO DE LA REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO HORIZONTAL SUBSUPERFICIAL USANDO TRES ESPECIES DE MACRÓFITAS

JORGE IGNACIO MONTOYA¹
LEONARDO CEBALLOS²
JUAN CARLOS CASAS³
JORDI MORATÓ⁴

RESUMEN

Los humedales construidos se presentan actualmente como una tecnología prometedora en reducir la contaminación por aguas residuales; este estudio investigó la remoción de materia orgánica con agua residual sintética, en términos de demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO₅) y mediciones *in situ* de pH, oxígeno y temperatura cada 15 días, durante 3 meses, en seis sistemas de humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal, a escala piloto, sembrados con tres diferentes macrófitas: *Canna limbata*, *Heliconia psittacorum* y *Phragmites sp*; las remociones medias de DQO fueron de 97,31 % y 95,94 % para *Canna*

-
- 1 Biólogo y Magíster en Docencia en Tecnología, Universidad de Antioquia. Docente y Director de Investigación y Posgrados, Tecnológico de Antioquia. Medellín, Colombia. jmontoya@tdea.edu.co
 - 2 Licenciado en Educación: Matemáticas, Universidad de Medellín; Estadístico, Universidad de Antioquia; Magister en Educación, Universidad de Antioquia. Docente, Tecnológico de Antioquia. Medellín, Colombia. iceballo@tdea.edu.co
 - 3 Ingeniero Químico, Magíster y Doctor (c) en Ingeniería Ambiental, Universidad de Antioquia. Docente, Departamento de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad del Cauca. Popayán, Colombia. jccasas@unicauca.edu.co
 - 4 Licenciado en Ciencias Biológicas y Doctor en Microbiología, Universidad Autónoma de Barcelona. Profesor Titular, Director Cátedra Unesco de Sostenibilidad y Director del Laboratorio de Microbiología Sanitaria y Medioambiental (MSMLab), Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, España. jordi.morato@upc.edu.es

limbata; 94,49 % y 93,50 % para *Heliconia psittacorum*; 97,39 % y 97,13 % para *Phragmites sp.* En DBO₅ fueron de 100 % y 99,36 % para *Canna limbata*; 99,09 % y 97,49 % para *Heliconia psittacorum*; 100 % y 99,45 % para *Phragmites sp.* Se concluye que existen diferencias significativas para la remoción de DQO entre las diferentes plantas ($P < 0,05$); en la remoción de la DBO₅ no existen estadísticamente diferencias significativas entre las diferentes plantas ($P < 0,05$). Este estudio demuestra la opción de reducir la contaminación por materia orgánica utilizando humedales construidos.

PALABRAS CLAVE: demanda química de oxígeno; demanda bioquímica de oxígeno; agua residual; humedal construido; macrófitas; materia orgánica.

COMPARATIVE STUDY OF THE ORGANIC MATTER REMOVAL IN HORIZONTAL SUBSURFACE FLOW CONSTRUCTED WETLANDS USING THREE SPECIES OF MACROPHYTES

ABSTRACT

Constructed wetlands appear at the present time like a promising technology in reducing the pollution by waste waters; this study investigated the organic matter removal with synthetic waste water, in terms of chemical oxygen demand (COD), biological oxygen demand (BOD₅) and *in situ* measurements of pH, oxygen and temperature every 15 days, during three months, in six horizontal subsurface-flow constructed wetland systems, in pilot scale, seeded with three different macrophytes: *Canna limbata*, *Heliconia psittacorum* and *Phragmites sp.*; the average removals of COD were of 97,31 % and 95,94 % for *Canna limbata*; 94,49 % and 93,50 % for *Heliconia psittacorum*; 97,39 % and 97,13 % for *Phragmites sp.* In BOD they were of 100 % and 99,36 % for *Canna limbata*; 99,09 % and 97,49 % for *Heliconia psittacorum*; 100 % and 99,45 % for *Phragmites sp.* We conclude that there are significant differences in DQO removal between different plants ($P < 0,05$); in BOD₅ removal significant differences between the different plants do not exist statistically ($P < 0,05$). This study demonstrates the option to reduce the pollution from organic matter using constructed wetlands.

KEY WORDS: chemical oxygen demand; biochemical oxygen demand; wastewater; constructed wetland; macrophytes; organic matter.

ESTUDO COMPARATIVO DA REMOÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA EM BANHADOS CONSTRUÍDOS DE FLUXO HORIZONTAL SUBSUPERFICIAL USANDO TRES ESPÉCIES DE MACRÓFITAS

RESUMO

Os banhados construídos são agora uma tecnologia promissora para reduzir a poluição por esgotos; este estudo investigou a remoção de matéria orgânica com esgoto sintético, em termos de demanda química de oxigênio (DQO), demanda biológica de oxigênio (DBO₅) e medições *in situ* de pH, oxigênio e temperatura a cada 15 dias durante 3 meses, em seis sistemas de banhados construídos de fluxo sub-superficial horizontal, em escala piloto plantados com três diferentes macrófitas: *Canna limbata*, *Heliconia psittacorum* e *Phragmites sp.*; as remoções médias de DQO média foram 97,31 % e 95,94 % para *Canna limbata*, 94,49 % e 93,50 % para *Heliconia psittacorum*; 97,39 % e 97,13 % para *Phragmites sp.* Em DBO₅ foram de 100 % e 99,36 % para *Canna limbata*, 99,09 % e 97,49 % para *Heliconia psittacorum*; 100 % e 99,45 % para *Phragmites sp.* Conclui-se que existem diferenças significativas para a remoção de DQO entre plantas diferentes ($P < 0,05$); na remoção de DBO₅ não existem diferenças estatisticamente



significativas entre plantas diferentes ($P < 0,05$). Este estudio demuestra a possibilidade de reduzir a poluição por matéria orgânica utilizando banhados construídos.

PALAVRAS-CÓDIGO: demanda química de oxigênio, demanda bioquímica de oxigênio; esgotos; banhado construído; macrófitas; matéria orgânica.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales en casi la totalidad de los países de América Latina están muy distantes de lo requerido en materia ambiental. Las subregiones latinoamericanas presentan diferencias muy marcadas tanto en el aspecto socioeconómico como en sus características físicas, ambientales y tecnológicas; para Hench *et al.* (2003) existen estados y municipalidades que carecen de instalaciones mínimas y adecuadas para la recolección y depuración de aguas residuales. Colombia, en general, cuenta con sistemas para tratar el 20 % de las aguas residuales producidas en el área urbana, pero sólo se da efectivamente en un 10 %. Esta situación, comparada con la de 1990 cuando se trataba el 5 %, puede entenderse como un avance en el tratamiento de efluentes urbanos, pero aún resta camino por recorrer en este aspecto (MADVT, 2004). En la actualidad muchas de las fuentes y de los efluentes se están contaminando por materia orgánica (Leyva, 2001).

Muchas de las plantas de tratamiento convencionales de América Latina operan por períodos limitados (y otras son abandonadas), debido a diferentes razones, entre ellas a elevados costos de operación y mantenimiento. Varios de los sistemas desarrollados de tratamiento tipo humedal construido se caracterizan por ser relativamente económicos y sencillos de elaborar, realizan los complejos procesos naturales de depuración, físicos, químicos y biológicos, son versátiles y estables ante diferentes concentraciones y tipo de contaminantes, presentan menos disipación de energía, baja producción de residuos, bajo impacto ambiental y son más bien simples de operar (Ayaz y Akca, 2001; Song, Bi y Cao, 2002; Mantovi *et al.*, 2003). Además los humedales construidos son más flexibles y menos susceptibles de fluctuaciones de la

carga contaminante que los sistemas convencionales (Kadlec y Knight, 1996).

Estas ventajas en conjunto los convierten en una de las alternativas tecnológicas de tratamiento más atractivas para países en desarrollo, aun cuando su implementación y desarrollo se ha hecho ante todo en países industrializados (Kadlec y Knight, 1996).

Sin embargo falta conocer información sobre tipos de macrófitas, influencia de la concentración de nutrientes, tipos de sustratos, tipos de soportes, temperaturas, etc.

Los humedales construidos, en particular los de sistemas de flujo subsuperficial horizontales, se han desarrollado prioritariamente para remover materia orgánica de aguas residuales domésticas (Kadlec *et al.*, 2000). La depuración de aguas residuales en estos sistemas se presenta en lo fundamental debido a procesos biológicos asociados con las raíces de las plantas y medio granular (Characklis y Marshall, 1990; Brix, 1994; Kadlec y Knight, 1996; Nguyen, 1999; USEPA, 2000; Wetzel, 2001; Stott y Tanner, 2005; García *et al.*, 2010).

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), debido al desconocimiento del funcionamiento interno de los humedales construidos, ha identificado la necesidad de entender mejor el funcionamiento, el efecto y el comportamiento de los diferentes tipos de plantas en la remoción de materia orgánica (USEPA 1993b; Kemp y George, 1997).

Por tanto, contar con elementos y criterio de diseño que permitan entender el comportamiento de los humedales construidos es un factor relevante en la selección e implementación de tecnologías alternativas en el tratamiento de las aguas residuales. El presente estudio busca determinar y comparar la eficiencia de remoción de materia orgánica en agua

residual sintética utilizando humedales construidos de flujo subsuperficial plantados con *Canna limbata*, *Heliconia psittacorum* y *Phragmites sp.*

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para estudiar la remoción de materia orgánica en agua residual sintética se aplicó la técnica de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal. Las fuentes orgánicas solubles de demanda química de oxígeno se pueden eliminar mediante cualquier proceso biológico viable, aerobio, anaerobio u otro. Sin embargo, los procesos aerobios son los que se suelen emplear como método principal para la reducción de DBO en las aguas residuales domésticas, ya que las reacciones microbiológicas son rápidas, por lo regular 10 veces más que en los procesos anaerobios. Por lo tanto, los humedales, aunque sean relativamente pequeños, pueden permanecer abiertos a la atmósfera, dando lugar a la forma más económica de reducción de DBO₅.

Se construyeron seis humedales a escala piloto en fibra de vidrio, de 1,0 m de largo, 0,6 m de alto y 0,6 m de ancho; se les agregó grava de diámetro 3,2-6,4 mm, de 48 % de porosidad, gravedad específica 2,5, hasta 0,3 m de alto, una lámina de agua de 0,25 m de alto, 6 plantas macrófitas por metro cuadrado y se aclimataron durante un mes con agua residual de la quebrada La Quintana, en

Medellín. Cada tratamiento tuvo dos réplicas por cada tipo de planta. El agua residual se preparó y adaptó según Dangcong *et al.* (2000). Las mediciones se realizaron a lo largo de seis meses con un tiempo de retención hidráulica de 7 días y un caudal de 7 mL m⁻¹. Las variables objeto de estudio fueron demanda biológica de oxígeno (DBO₅) y demanda química de oxígeno (DQO), medidas por el método colorimétrico utilizando un equipo nanocolor 500D Macherey-Nagel con pruebas según el “método estándar”. La temperatura se midió con un termómetro de mercurio. La temperatura de Medellín oscila entre 18 y 28 °C. La precipitación media anual es 1.500 mm.

La unidad experimental en la que se realizó el estudio fue la caseta de humedales de flujo subsuperficial a escala piloto (figura 1), formada por seis unidades, A y B plantadas con *Phragmites sp.*, C y D plantadas con *Canna limbata* y E y F plantadas con *Heliconia psittacorum*.

Para verificar si los resultados provienen de una distribución normal se aplicó la prueba de Sminorv-Kolmogorov. Se hizo un análisis exploratorio de los resultados calculando sus estadígrafos básicos en SPSS versión 16; mediante un análisis de varianza (ANOVA) se comprobó la existencia de diferencias significativas en la DQO y DBO₅ entre las diferentes plantas.



Figura 1. Tratamientos y réplicas de los humedales piloto



3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La temperatura media del agua en la entrada fue de $(23,73 \pm 2,02)$ °C y a la salida estuvo en el rango entre 24,62 y 25,68 °C, que es adecuado para la remoción eficiente de materia orgánica (Kadlec y Knight, 1996).

La figura 2 muestra los porcentajes de remoción de demanda química de oxígeno de los siste-

mas plantados con *Phragmites sp.*, *Canna limbata* y *Heliconia psittacorum*.

En la figura 2, el valor medio de porcentaje en remoción de DQO fue de $97,39 \pm 2,46$ y $97,13 \pm 2,38$ para la *Phragmites sp.* en sus respectivas réplicas; para la *Canna limbata* el valor medio de porcentaje de remoción de DQO fue de $97,31 \pm 1,68$ y $95,94 \pm 2,61$, y para *Heliconia psittacorum* fue de $94,49 \pm 5,28$ y $93,50 \pm 0,08$.

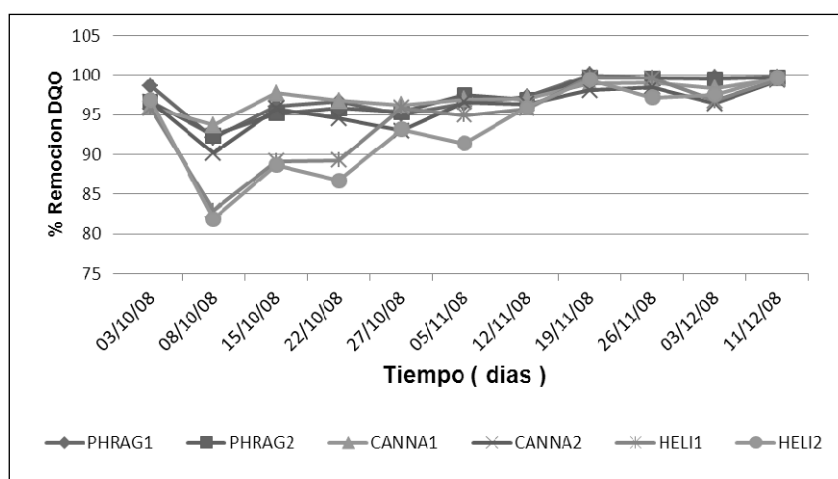


Figura 2. Porcentajes de remoción de demanda química de oxígeno (DQO), obtenidos en cada punto de muestreo para las diferentes macrófitas

La transformación de la DQO es esencialmente afectada por los microorganismos cuya presencia y actividad es realizada por la presencia y procesos mediados por las plantas de los humedales (Armstrong, Armstrong y Beckett, 1990; Brix, 1993). Según la figura 2, para el primer mes de mediciones se encontraron remociones superiores al 95 %, lo cual es debido al crecimiento de las raíces densas y plumosas que favorecen la adhesión de las comunidades de bacterias degradadoras de la materia orgánica y actúan como filtros de material particulado (Kim y Geary, 2001). En la grava utilizada la comunidad microbiana da facilidad a este proceso; la grava puede incluso remover pequeños materiales, entre ellos bacterias patógenas presentes en aguas con valores de flujo bajo.

Los valores obtenidos en DQO en este trabajo cumplen con las normas de vertimiento de calidad de agua en Colombia, según el Decreto 1594 de 1984. También están en concordancia con lo reportado en valores de DQO por la literatura (Metcalf & Eddy, 1991) y están por encima de los reportados por otros autores (Kowalik y Obarska-Pempkowiak, 1998; Masbough *et al.*, 2005; Vymazal, 2001), lo cual puede ser causado por diferentes condiciones ambientales presentes para los estudios reportados.

En este estudio el comportamiento en porcentaje de eliminación de DBO_5 fue ligeramente superior al de la DQO, esto concuerda con lo encontrado por Masbough *et al.* (2005). La DBO_5 en general presenta constituyentes de alta degradabilidad; también se

encontró que por plantas no se presentan diferencias significativas entre la remoción de la DQO y la DBO₅. Este resultado es contrario a lo reportado por la literatura (Kadlec y Knight, 1996; Tanner, 2000), donde

fueron encontradas diferencias en las remociones de DQO y DBO₅ para diferentes plantas; esto pudo ser debido a que las condiciones ambientales y las plantas no fueran exactamente las mismas.

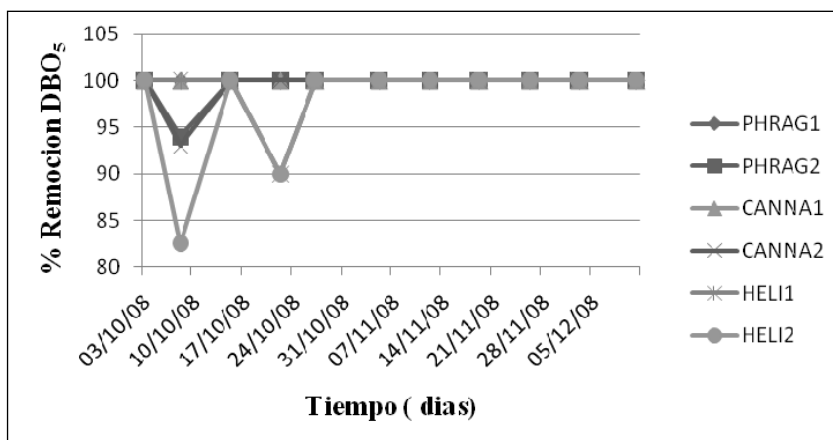


Figura 3. Porcentajes de remoción de demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) obtenidos en cada punto de muestreo para las diferentes macrófitas

La figura 3 muestra los porcentajes de remoción de demanda bioquímica de oxígeno de los sistemas plantados con *Phragmites sp.*, *Canna limbata* y *Heliconia psittacorum*.

En la figura 3, el valor medio de porcentaje en remoción de DBO₅ fue de $100 \pm 0,00$ y $99,45 \pm 1,81$ para la *Phragmites sp.*, en sus respectivas réplicas. Para la *Canna limbata* el valor medio de porcentaje de remoción de DBO₅ fue de $100 \pm 0,00$ y $99,36 \pm 2,11$ y para *Heliconia psittacorum* fue de $99,09 \pm 3,02$ y $97,49 \pm 5,83$.

Los valores obtenidos en este estudio cumplen con las normas de vertimiento de calidad de agua en Colombia, según el Decreto 1594 de 1984.

Los valores de porcentajes de remoción en DBO₅ son consistentes con lo reportado en la literatura (USEPA, 1993a; Kadlec y Knight, 1996; Nakamura, 2000; Axler, Henneck y McCarthy, 2001; Barrett *et al.*, 2001; Vymazal, 2001; Aguirre, 2004; Davison, Headley y Pratt, 2005). También los valores obtenidos de DBO₅ están por encima de los reportados en la literatura (Vymazal, 2001;

Masbough *et al.*, 2005; Sánchez, 2007), lo cual pudo ser debido a que en estos sistemas las plantas aún estaban en proceso de crecimiento.

La figura 4 muestra los perfiles de oxígeno disuelto, en la entrada y salida de los sistemas plantados con *Phragmites sp.*, *Canna limbata* y *Heliconia psittacorum*.

En la figura 4 el valor medio de la concentración de oxígeno disuelto del agua residual sintética a la entrada fue de $(4,94 \pm 0,38)$ mg L⁻¹; para la *Phragmites sp.* El valor medio de la concentración de oxígeno disuelto fue de $(1,62 \pm 0,92)$ mg L⁻¹ y $(1,65 \pm 0,81)$ mg L⁻¹, durante las respectivas réplicas; para *Canna limbata* el valor medio de la concentración de oxígeno disuelto fue de $(1,68 \pm 0,35)$ mg L⁻¹ y $(1,83 \pm 0,73)$ mg L⁻¹ y para la *Heliconia psittacorum* el valor medio fue de $(1,67 \pm 0,42)$ mg L⁻¹ y $(1,62 \pm 0,72)$ mg L⁻¹.

Según la figura 4 las concentraciones de OD encontradas en este estudio son bajas y están dentro del rango típico de valores encontrados en efluentes (< 2.0 mg L⁻¹) (Masbough *et al.*, 2005; Vymazal *et al.*,



2006). Igualmente los valores obtenidos permiten confirmar lo encontrado por Masbough *et al.*, (2005), donde al considerar la demanda de oxígeno en el influente, fueron esperados valores bajos de OD. Los humedales construidos debido a la saturación e inundación del

suelo presentan características de déficit o ausencia de oxígeno con predominio de condiciones anaerobias, por lo cual las concentraciones de oxígeno disuelto son muy bajas en los efluentes (Knight *et al.*, 1993; Aguirre, 2004; Vymazal *et al.*, 2006; García *et al.*, 2010).

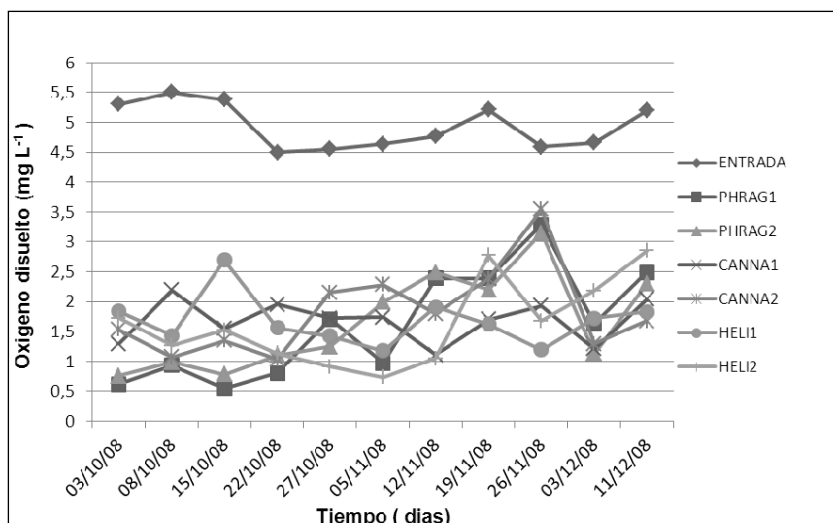


Figura 4. Variación en la concentración oxígeno disuelto (OD) en el influente e efluente en cada punto de muestreo para las diferentes macrófitas

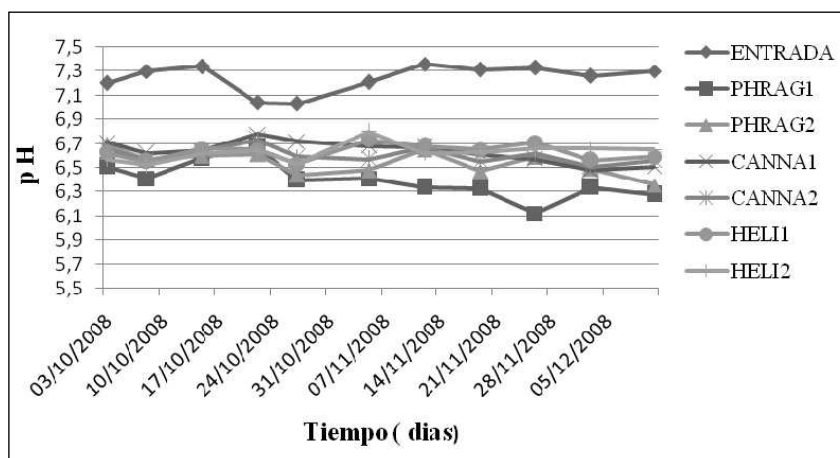


Figura 5. Unidades de pH a la entrada y salida obtenidas en cada punto de muestreo para las diferentes macrófitas

La figura 5 muestra los perfiles de pH en la entrada y salida de los sistemas plantados con *Phragmites sp.*, *Canna limbata* y *Heliconia psittacorum*.

En la figura 5, el valor medio de pH del agua residual sintética a la entrada fue de $7,24 \pm 0,11$; para la *Phragmites sp.* el valor medio de pH fue

de $6,40 \pm 0,15$ y $6,54 \pm 0,10$, durante las respectivas replicas; para *Canna limbata* el valor medio de pH fue de $6,64 \pm 0,09$ y $6,60 \pm 0,06$ y para la *Heliconia psittacorum*, fue de $6,63 \pm 0,07$ y $6,63 \pm 0,08$.

El valor de pH en el efluente del sistema fue ligeramente por encima del neutro (7,24), en relación con los valores de pH en los influentes de las unidades plantadas (6,40-6,64); el rango encontrado en dichas unidades no permite que el proceso de nitrificación se dé, el rango más posible de pH para la acción de las bacterias nitrificantes es 7,5-8,6 (Metcalf & Eddy, 1991); otra importante observación de la figura 5 es que la mayoría de los valores de pH en el

efluente están dentro del rango de pH 6,5-7,5, óptimo para el crecimiento de bacterias, sin embargo, ningún valor está por debajo de 4,0 o por encima de 9,5, los cuales mucha bacterias no tolerarían (Metcalf & Eddy, 1991). Los niveles de pH en los efluentes están dentro de los rangos reportados por la literatura (Kadlec y Knight, 1996; Kadlec *et al.*, 2000).

3.1 Análisis estadístico

Para determinar si los datos provienen de una distribución normal, se aplicó la prueba de Smirnov-Kolgomorov y se encontró que sí provienen de una distribución normal.

Tabla 1. Resultados ANOVA para DQO y DBO₅

Prueba	Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	F	Valor-P	Valor critico F
DQO	Entre grupos	0,172	5	0,0034	2,56	0,04	2,37
	Intragrupos	0,0807	60	0,0013			
	Total	0,0980	65				
DBO ₅	Entre grupos	0,0049	5	0,0010	1,11	0,36	2,37
	Intragrupos	0,0527	60	0,0009			
	Total	0,0576	65				

Según los resultados comparados en la tabla 1, mediante una prueba de análisis de varianza (ANOVA), se concluye que existen diferencias significativas para la remoción de demanda química de oxígeno (DQO) entre las diferentes plantas (valor $p = 0,04$), también se encontró que no existen estadísticamente diferencias significativas en la remoción de demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅); (valor $p = 0,36$), por plantas existen diferencias significativas entre la remoción de la DQO y la DBO₅.

Según el análisis de varianza de un factor en la remoción para la DQO, la mejor remoción se presentó en el siguiente orden: *Phragmites sp.*, *Canna limbata* y *Heliconia psittacorum*. Para la DBO₅, aunque las plantas remueven bien, no se encontró cuál de ellas remueve mejor que la otra.

4. CONCLUSIONES

Este artículo permite reiterar la importancia que tienen los humedales construidos en la depuración de aguas residuales para la remoción de materia orgánica, también el potencial de aprovechamiento que tienen las macrófitas empleadas en esta investigación, utilizando diferentes plantas. Esta alternativa de los humedales construidos muy empleada para depuración de diferentes tipos de aguas residuales en Europa, es poco conocida y aplicada en Colombia; estos sistemas de tratamiento pueden ser una opción para tratar las aguas residuales especialmente en comunidades pequeñas de escasos recursos y apartadas dentro del territorio nacional.

Los resultados reportados en este artículo sugieren que los humedales construidos de flujo



subsuperficial plantados con cualquiera de las plantas *Canna limbata*, *Heliconia psittacorum* y *Phragmites* sp. pueden remover efectivamente materia orgánica de aguas residuales domésticas y, aunque las plantas removieron bien, no se encontró cuál de ellas remueve mejor que la otra. En general se encontró que la remoción de DBO₅ (97,49-100 %) fue mayor que la DQO (93,50-97,39 %), esto puede explicarse por el hecho de que las raíces de las plantas proporcionan sitios específicos como la rizósfera donde se desarrollan procesos microbiológicos, al igual que los procesos de adsorción y filtración (Armstrong, Armstrong y Beckett, 1990; Brix, 1993), igualmente los microorganismos aprovechan con facilidad la materia orgánica biodegradable como fuente de carbono.

Los resultados encontrados de OD en el efluente confirman que en este tipo de tratamientos con humedales construidos de flujo subsuperficial se presentan normalmente bajos valores de OD, ya que en ausencia de oxígeno la respiración anaeróbica es una alternativa para los microorganismos presentes. Los valores de pH encontrados están dentro de lo esperado en estos sistemas, puesto que las plantas por actividad fotosintética generan un equilibrio *buffer* y no permiten que el pH normalmente baje y la actividad de los microorganismos se vea afectada. El uso de plantas ofrece condiciones climáticas óptimas para la remoción de materia orgánica.

Para el futuro es importante evaluar el efecto de aguas poco cargadas en este tipo de macrófitas en climas tropicales y en particular, en nuestro medio, pues el aporte de materia orgánica autóctona al sistema podría ser significativo.

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación se desarrolló gracias al apoyo del Tecnológico de Antioquia, Medellín, Colombia; de la Universidad Politécnica de Cataluña, España y de la Facultad de Ingeniería Civil, Departamento de Ingeniería Ambiental de la Universidad del Cauca, Popayán, Colombia.

REFERENCIAS

- Aguirre, P. (2004). *Mecanismos de eliminación de la materia orgánica y de los nutrientes en humedales construidos de flujo subsuperficial*, pp. 17-29. En: García, J.; Morató, J. y Bayona, J. M. *Nuevos criterios para el diseño y operación de humedales construidos. Una alternativa de bajo coste para el tratamiento de aguas residuales*. Barcelona: CPET y UPC, 2004. 100 p.
- Armstrong W.; Armstrong, J. and Beckett, P. M. (1990). *Measuring and modelling of oxygen release from roots of Phragmites australis*. In: *Constructed wetlands in water pollution control*, Cooper P. F. and Findlater B. C. (eds.).
- Axler, R.; Henneck, J. and McCarthy, B. (2001). "Residential subsurface flow treatment wetlands in northern Minnesota". *Water Science and Technology*, vol. 44, No. 11-12, pp. 345-352.
- Ayaz, S. C. and Akca, L. (2001). "Treatment of wastewater by natural systems". *Environment International*, vol. 26, No. 3 (January), pp. 189-195.
- Barrett, E. C.; Sobsey, M. D.; House, C. H. and White, K. D. (2001). "Microbial indicator removal in onsite constructed wetlands for wastewater treatment in the Southeastern US". *Water Science and Technology*, vol. 44, No. 11-12, pp. 177-182.
- Brix, H. (1993). *Macrophyte-mediated oxygen transfer in wetlands: transport mechanisms and rates*. In: Moshiri, G. A. (ed.) *Constructed wetlands for water quality improvement*, CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 391-398.
- Brix, H. (1994). "Use of constructed wetlands in water pollution control: historical development, present status, and future perspectives". *Water Science and Technology*, vol. 30, No. 8, pp. 209-223.
- Colombia. MADVT (2004). Ministerio del Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. *La infancia, el agua y el saneamiento básico en los planes de desarrollo departamentales y municipales*. Informe Panorama Nacional, Calidad del Agua.
- Characklis, W. G and Marshall, K. C. (1990). *Biofilms*, Wiley-Interscience and John Wiley and Sons, New York.
- Dangcong, P.; Bernet, N.; Delgenes, J. P. and Moletta, R. (2000). "Effect of oxygen supply methods on the performance of a sequencing batch reactor for ammonium nitrification". *Water Environment Research*, vol. 72, No. 2, pp. 195-200.
- Davison, L.; Headley, T. and Pratt, K. (2005). "Aspects of design, structure, performance and operation of reed beds-eight years experience in northeastern New South Wales, Australia". *Water Science and Technology*, vol. 51, No. 10, pp. 129-138.

- García, J.; Rousseau, D. P. L.; Morató, J.; Lesage, E.; Matamoros, V. and Bayona, J. M. (2010). "Contaminant removal processes in subsurface-flow constructed wetlands: a review". *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 40, No. 7 (July), pp. 561-661.
- Hench, K. R.; Bissonnette, G. K.; Sextstone, A. J.; Coleman, J. G.; Garbutt, K. and Skousen, J. G. (2003). Fate of physical, chemical, and microbial contaminants in domestic wastewater following treatment by small constructed wetlands". *Water Research*, vol. 37, No. 4, pp. 921-927.
- Kadlec, R.H and Knight, R.L. (1996). *Treatment wetlands*. CRC Press, Florida, 893 pp.
- Kadlec, R. H.; Knight, R. L.; Vyamazal, J.; Brix, H.; Cooper, P. and Haberl, R. (2000). *Constructed wetlands for water pollution control processes, performance, design and operation*. IWA Specialist Group on Use of Macrophytes in Water Pollution Control, Scientific and Technical Report No. 8. IWA Publishing.
- Kemp, M. C. and George, D. B. (1997). Subsurface flow constructed wetlands treating municipal wastewater for nitrogen transformation and removal. *Water Environment Research*, vol. 69, No. 7, pp. 1254-1262.
- Kim, S. Y. and Geary, P. M. (2001). The impact of biomass harvesting on phosphorus uptake by wetland plants". *Water Science and Technology*, vol. 44, No. 11-12, pp. 61-67.
- Knight, R. L.; Ruble, R. W.; Kadlec, R. H. and Reed, S. C. (1993). *Database North American wetlands for water quality treatment*, Phase II Report, prepared for USEPA. September.
- Kowalik, P. and Obarska-Pempkowiak, H. Poland. In: Vyamazal, J.; Brix, H., Cooper, P. F.; Green, M. B. and Haberl, R. (eds.). *Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe*. Leiden, The Netherlands: Backhuys, 1998. pp. 217-225.
- Leyva, P. (2001). *El medio ambiente en Colombia: el agua*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM. Ministerio del Medio Ambiente. República de Colombia. 530 p.
- Mantovi, P.; Marmiroli, M.; Maestri, E.; Tagliavini; Piccinini, S. and Marmiroli, N. (2003). Application of a horizontal subsurface flow constructed wetland on treatment of dairy parlor wastewater, *Bioresource Technology*, vol. 88, No. 2, pp. 85-94.
- Masbough, A.; Frankowski, K.; Hall, K. and Duff, S. (2005). "The effectiveness of constructed wetland for treatment of wood waste leachat". *Ecological Engineering*, vol. 25, No. 5, pp. 552-566.
- Metcalf & Eddy Inc. *Wastewater engineering: Treatment and reuse*, 3rd ed. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 1991.
- Nakamura, K.; Miki, O. and Shimatani, Y. (2000). *Compact wetland system for urban area in Japan*. 7th International Conference on Wetland System for Water Pollution Control, vol 2, pp. 963-969. Lake Buena Vista, FL (11-16 November).
- Nguyen, L. M. (1999). "Organic matter composition, microbial mass and microbial activity in gravel-bed constructed wetlands treating farm dairy wastewaters". *Ecological Engineering*, vol. 16, No. 2, pp. 199-221.
- Sánchez, N. E. (2007). *Estandarización de las condiciones que influyen en el tratamiento de agua residual doméstica utilizando la técnica de humedales artificiales*. Tesis (Ingeniería Ambiental), Universidad del Cauca, Popayán.
- Song, Z.; Bi, X. and Cao, J. (2002). "Application of constructed wetlands in sewage treatment in small cities in China". *Chinese Journal of Ecology*, vol. 22, No. 3, pp. 74-78.
- Stott, R. and Tanner, C. (2005). "Influence of biofilm on removal of surrogate faecal microbes in a constructed wetland and maturation pond". *Water Science and Technology*, vol. 51, No. 9, pp. 315-22.
- Tanner, C. C. (2000). *Plants as ecosystem engineers in subsurface-flow treatment wetlands*. Proceedings of the International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, vol. 1, pp. 13-22. Lake Buena Vista, FL (11-16 November).
- USEPA (United States Environmental Protection Agency) (1993a). *Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment. A technology assessment*, EPA/832/R-93/008, USEPA Office of Water. Washington, D. C.
- USEPA (1993b). *Guidance for design and construction of a subsurface flow constructed wetland*. USEPA, Region 6, Water Management Division, Municipal Facilities Branch, Technical Section.
- USEPA (2000). *Constructed wetlands treatment of municipal wastewaters*. EPA/625/R-99/010. United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Cincinnati, OH, 165 p.
- Vymazal, J. Types of constructed wetlands for wastewater treatment: their potential for nutrient removal, In: Vyamazal, J. (ed.). *Transformations of nutrients in natural and constructed wetlands*. Leiden, The Netherlands: Backhuys, 2001. pp. 1-93.
- Vymazal, J.; Greenway, M.; Tonderski, K.; Brix, H and Mander, Ü. (2006). "Constructed wetlands for wastewater treatment". *Wetlands and Natural Resource Management*, vol. 190, Section II, pp. 69-96.
- Wetzel, R. G. (2001). "Fundamental processes within natural and constructed wetlands ecosystems: short-term objectives". *Water Science and Technology*, vol. 44, No. 11-12, pp.1-8.