

Tratamiento de agua residual a través de humedales

Díaz Acero Carlos Ariel. Cdiaz@ustatunja.edu.co. Magíster en Ingeniería Civil.

(Recibido: 25 de Junio de 2014; Aprobado: 04 de Julio de 2014)

Resumen— Este trabajo hace una recopilación de algunas investigaciones que se han hecho sobre el diseño, construcción y operación de una de las tecnologías no convencionales existentes en el tratamiento de agua residual como lo son los humedales. Resaltando que en Colombia, la mayoría de los sistemas de tratamiento de aguas residuales han resultado inviables económica, técnica o ambientalmente; ya sea en sus fases de construcción, operación o mantenimiento, haciendo recomendable desarrollar tecnologías apropiadas, que sean económicas, eficientes y confiables.

Destacando entre otros, el caso de un humedal piloto diseñado, construido y operado en la Escuela Colombiana de Ingeniería de la ciudad de Bogotá, bajo las condiciones de intemperie a las que tiene que estar expuesto ambientalmente. Analizando las condiciones de carga hidráulica, tiempo de retención, cargas de DBO y DQO, e igualmente las remociones promedio como resultado de la actividad físico-química de la vegetación, el medio poroso y la actividad biológica.

Presentando los humedales como una opción viable para el tratamiento complementario de aguas residuales domésticas, reduciendo los efectos adversos de los vertimientos sobre los medios receptores.

Palabras clave— Agua residual, humedal, tratamiento.

Abstract— *The present document does a summary of some investigations that have been done on the design, construction and operation of one of the not conventional technologies in the treatment of wastewater like it are the wetlands. Noting that in Colombia, most of the systems of wastewater treatment have proved unviable economically, technically and environmentally; perhaps in its construction, operation or maintenance, therefore it is necessary to develop appropriate technologies that are economical, efficient and reliable.*

Emphasizing among others the case of a pilot wetland designed, built and operated in the Escuela Colombiana de Ingeniería, of the city of Bogotá, under weather conditions that have to be exposed environmentally. Analyzing hydraulic charge conditions, retention time, charges of DBO and DQO, and also the removals as a result of activity physicalchemical of the vegetation, the porous medium and biological activity.

Presenting the wetlands as a viable option for the complementary treatment of domestic wastewater, reducing the adverse effects of discharges on the water courses.

Keywords— *wastewater, wetland, treatment.*

I. INTRODUCCIÓN

En Colombia el crecimiento de la población y de los diferentes sectores de producción, dejan en evidencia la gran demanda del recurso hídrico que afronta el país y por consiguiente la alta generación de vertimientos. De tal forma que la escasa cobertura para el tratamiento de aguas residuales que afronta actualmente, hace necesario estudiar diferentes alternativas de tratamiento, con el fin de controlar la contaminación de suelos, aguas subterráneas, cuerpos de agua, y evitar problemas de salubridad.

La mayoría de los sistemas de tratamiento de aguas residuales han resultado inviables económica, técnica o ambientalmente; ya sea en sus fases de construcción, operación o mantenimiento, haciendo recomendable desarrollar tecnologías apropiadas, que sean económicas, eficientes y confiables.

Los humedales construidos, se presentan como una tecnología para el tratamiento principal o complementario de aguas residuales, principalmente en los casos donde resulta difícil construir, operar o mantener adecuadamente los sistemas de tratamiento convencionales.

De esta forma se presentan los humedales construidos tanto de flujo superficial como subsuperficial, dependiendo si el agua está o no expuesta a la atmósfera, respectivamente. Los humedales de flujo superficial debido a su configuración, pueden albergar distintos tipos de vegetación: macrófitas ya sean emergentes, flotantes o sumergidas. Los de flujo subsuperficial sólo presentan macrófitas emergentes. Estos últimos se pueden clasificar según el sentido del flujo del agua en horizontales o verticales.

Se han publicado distintos trabajos de investigación relacionados con el tratamiento de agua residual a través de humedales construidos, especialmente de flujo subsuperficial, dada su particularidad de no tener una lámina de agua expuesta a la atmósfera, reduciendo los problemas de malos olores, presencia de vectores y riesgo público por posible contacto con el agua residual.

El presente trabajo se centra en los humedales construidos de flujo subsuperficial (subsurface flow constructed wetland), resaltando su desempeño principalmente en el tratamiento de agua residual doméstica y el incremento de su uso en el país.

II. DESARROLLO DEL TRABAJO

En los años cincuenta en Europa se introduce el concepto de los humedales como sistemas para mejorar la calidad del agua. (Kadlec y Knight, 1996).

Este sistema genera principalmente procesos físicos, químicos y biológicos, ligados a la vegetación, los microorganismos y el suelo (US.EPA, 2000).

Los sistemas diseñados para propiciar características y procesos físicos, químicos y biológicos de un humedal natural son comúnmente conocidos como “humedales artificiales” o “humedales construidos”. De esta forma para aprovechar los procesos de remoción propios de un humedal natural surgen los humedales construidos. Los humedales construidos son sistemas complejos e integrados en los que tienen lugar interacciones entre el agua, plantas, animales, microorganismos, energía solar, suelo y aire; con el propósito de mejorar la calidad del agua residual y proveer un mejoramiento ambiental (Osnaya, 2012).

A. Tipos de humedales construidos

Existen dos tipos de humedales construidos a saber, por una parte los de flujo superficial y por otra los de flujo subsuperficial.

1) Humedales de flujo superficial

En los cuales el agua está expuesta a la atmósfera, que pueden o no tener un recubrimiento en el fondo para evitar la contaminación al agua freática y una capa sumergida de suelo para soportar las raíces de la vegetación macrófita. La vegetación más usada para los humedales de flujo libre incluye éneas, carrizos, juncias y juncos. El sistema tiene acondicionadas estructuras de entrada y salida para asegurar una distribución uniforme del agua residual, normalmente se alimenta en forma continua y el tratamiento se produce durante el flujo del agua a través de los tallos y raíces de la vegetación (Osnaya, 2012).

a) Principales ventajas de un humedal de flujo superficial, la USEPA (2000), destaca:

- Proporcionan la incorporación de hábitat de vida silvestre y oportunidades para la recreación pública.
- La remoción de DBO, SST, DQO, metales y compuestos orgánicos de las aguas residuales domésticas puede ser muy efectiva con un tiempo razonable de retención.

b) Principales desventajas de un humedal de flujo superficial, USEPA (2000):

- Las necesidades de terreno de estos humedales pueden ser grandes, especialmente si se requiere la remoción de nitrógeno.
- El fósforo, los metales y algunos compuestos orgánicos persistentes que son removidos, permanecen en el sistema ligados al sedimento y por ello se acumulan con el tiempo.
- En climas fríos las bajas temperaturas durante el invierno reducen la tasa de remoción de DBO y de las reacciones biológicas responsables por la nitrificación y desnitrificación.
- La mayoría del agua contenida en los humedales de flujo superficial es esencialmente anóxica, limitando el potencial de nitrificación rápida del amoníaco.
- Los mosquitos y otros insectos vectores de enfermedades pueden convertirse en un problema de salubridad.

2) Humedales de flujo subsuperficial

En los cuales el agua está expuesta a la atmósfera, puede o no presentar una impermeabilización en el fondo, pero particularmente estos humedales tienen un medio poroso o lecho (grava, arena, tierra, carbón, entre otros) que soporta el crecimiento de la vegetación emergente y participa en el tratamiento del agua residual. El nivel del agua está por debajo de la superficie del soporte y fluye únicamente a través del medio que sirve para el crecimiento de la película microbiana, que es la responsable en gran parte del tratamiento que ocurre al agua residual, en donde las raíces penetran hasta el fondo del lecho (Osnaya, 2012).

a) Humedales de flujo subsuperficial horizontal

En estos sistemas el agua fluye horizontalmente en forma permanente a través de un medio poroso y una vegetación emergente. Se emplean estructuras de entrada y descarga para asegurar la distribución adecuada y la recolección uniforme del agua residual aplicada. El método más comúnmente utilizado en los sistemas de menor tamaño consiste en tubería múltiple perforada. Por lo general

el agua ingresa por un extremo en la parte superior del humedal y se recoge en la parte inferior opuesta (U.S. EPA, 2000).

b) Humedales de flujo subsuperficial vertical

Estos humedales son cargados con aguas residuales que se vierten o dosifican a la superficie del humedal desde arriba usando un sistema mecánico de dosificación. Las aguas se recogen en una red de drenaje situada en el fondo del humedal. Estos humedales de flujo vertical reciben cargas intermitentes desde la superficie. La aplicación intermitente del agua residual y el drenaje vertical en el lecho permiten que las reacciones aeróbicas se produzcan con rapidez. (U.S. EPA, 2000).

c) Principales ventajas de un humedal de flujo subsuperficial, la USEPA (2000), destaca:

- La configuración de los humedales de flujo subsuperficial proporciona una mayor protección térmica que los humedales de flujo superficial.
- La remoción de DBO, SST, DQO, metales y compuestos orgánicos de las aguas residuales domésticas puede ser muy efectiva con un tiempo razonable de retención.
- Los mosquitos y otros insectos vectores no son un problema, mientras el sistema se opere adecuadamente y se mantenga el nivel de flujo subsuperficial. También se elimina el riesgo de que niños y mascotas estén expuestos al agua residual parcialmente tratada.

d) Principales desventajas de un humedal de flujo subsuperficial, USEPA (2000):

- El fósforo, los metales y algunos compuestos orgánicos persistentes que son removidos, permanecen en el sistema ligados al sedimento y por ello se acumulan con el tiempo.
- La mayoría del agua contenida en los humedales de flujo superficial es esencialmente anóxica, limitando el potencial de nitrificación rápida del amoníaco.
- Costos de construcción altos asociados al medio poroso requerido.

B. Principales casos de humedales construidos en el país

En Colombia se han construido humedales de flujo subsuperficial, enfocados primordialmente a la realización de pruebas piloto en el tratamiento de agua residual doméstica con caudales y poblaciones de diseño relativamente pequeñas.

En el año 1997, Lara construyó en la ciudad de Tunja, un humedal de flujo subsuperficial, como un sistema de tratamiento complementario de agua residual doméstica tratada previamente en un reactor anaerobio UASB, operado el sistema durante un tiempo cercano a dos años, presentando especificaciones con tiempos de retención entre 0,9 días y 3 días, caudal promedio de 2,2 m³/d, vegetación macrofita junco (*Typhadomingueis*), obteniendo las siguientes eficiencias promedio en la remoción de demanda química de oxígeno (DQO), 51,7 %; demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), 45,1 %; nitrógeno total, 15,0 %; fósforo total, 31,0 %, sólidos suspendidos totales (SST), 88,6 % y sólidos totales (ST), 22,5 %.

En Cogua, en el departamento de Cundinamarca, la Universidad Javeriana construyó en el 2004, un humedal piloto de flujo subsuperficial precedido de un tanque séptico prefabricado. El humedal manejó un caudal promedio de 1,34 m³/d y un afluente esperada en DBO₅ de 132 mg/L y un efluente de 44 mg/L. El reactor fue una celda de 2 m de ancho por 5,8 m de largo, con una profundidad efectiva de 0,6 m, es decir un área del humedal de 11,6 m² con un tiempo de retención hidráulica de 1,6 días y una carga hidráulica de 0,23m/d. Obteniendo con el sistema remociones promedio de DBO₅ en entre el 66 y el 80 %, de nitrógeno total entre el 30 y el 70 %, para el fósforo alrededor del 28 %, en sólidos suspendidos totales entre el 44 y el 90 % (Lara, 2006).

En el año 2009 en la vereda La Bananera del municipio de Pereira, se utilizaron humedales horizontales de flujo subsuperficial como tratamiento complementario para el tratamiento de aguas residuales domésticas de La Bananera. Para lo cual se dispusieron cuatro humedales de 90 m² cada uno, construidos a escala real para el tratamiento secundario del efluente de un tanque séptico y un filtro anaerobio arrojando promedios de remoción de 49,58 % para DBO₅ y 45,83 % para DQO. Los humedales de la planta de tratamiento estuvieron sometidos a un caudal medio de 0,27 L/s, para una carga hidráulica media aplicada alrededor de 2542 m³/ha.d y un tiempo de retención hidráulica de 1,23 días obtenido como promedio anual (Arroyave y Castaño, 2010).

En la ciudad de Bogotá, la Universidad Nacional ha trabajado un prototipo de humedal artificial de configuración simple y eficiente denominado “HUMEDAR – I ®” cuya configuración involucra un reactor anaerobio de compartimientos paralelos de flujo a pistón, seguido de un humedal artificial de alta tasa conformado por macrófitas nativas y comunes soportadas sobre sustrato de material plástico reciclado con un diseño especial de aproximadamente 300 m²/m³ de superficie específica. Este prototipo tiene la particularidad como se menciona, de usar como lecho filtrante un medio de soporte plástico de forma esfero elipsoidal de múltiples planos con porosidad del 94%, (Sanabria et al, UNAL 2009) que fue desarrollado para satisfacer los requerimientos de gran superficie específica del elemento para el crecimiento de biopelícula.

El sistema ya se encuentra en funcionamiento a escala real en diversas poblaciones e instituciones del país con diferentes condiciones topográficas y climáticas, habiéndose comprobado su funcionalidad y eficiencia en la depuración de contaminantes de aguas residuales urbanas. En la evaluación de un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante esta tecnología, instalado en la locación petrolera Caño Gandul en el departamento de Casanare, se lograron eficiencias de remoción de la DBO₅ para el humedal en promedio un 45%, de SST obtuvo una eficiencia de remoción en promedio del 92.5 % con un tiempo de retención hidráulico promedio de 2.77 d (Otalora, 2011).

En la Escuela Colombiana de Ingeniería de la ciudad de Bogotá se diseñó, construyó y monitoreó un humedal piloto de flujo subsuperficial horizontal, construido con medio de carbón mineral y una vegetación macrófita de tipo ornamental *Zantedeschia aethiopica* (Díaz y Romero, 2013).

Entre los criterios utilizados para la selección de la vegetación del humedal se buscó una planta que se desarrollará en humedales naturales o en condiciones similares, de fácil manipulación y adquisición en la zona e igualmente que resultara estéticamente

agradable. De esta forma, se escogió la *Zantedeschia aethiopica*, la cual se puede propagar comercialmente por semilla, en forma vegetativa por división de los rizomas y por cultivo de tejidos, siendo la forma vegetativa la usada en este estudio. Esta vegetación no requiere procedimientos especiales durante el cultivo, sólo retirar hojas amarillas o enfermas y mantener limpio el cultivo. La densidad de siembra fue de 14 plantas por m². La vegetación ornamental usada, produjo una flor atractiva que cumplía con especificaciones comerciales, generando un valor económico agregado.

Se optó por carbón mineral como lecho principal del humedal, por ser un material con buenas propiedades de porosidad, conductividad hidráulica, absorción y desgaste. Se operó el humedal, bajo las condiciones de intemperie a las que tiene que estar expuesto ambientalmente, realizando la alimentación del sistema con un agua residual sintética de caracterización doméstica.

El humedal trató un flujo volumétrico promedio de 96 L/d, con un tiempo de retención hidráulica de 4 días. Manejando una carga hidráulica superficial promedio de 480 m³/ha.d, una carga promedio de DQO de 506 kg DQO/ha.d y una carga de DBO₅ 188 kg DBO₅/ha.d. Obteniendo remociones promedio superiores al 85% para turbiedad y SST. Las remociones promedio observadas para DQO y DBO₅ fueron respectivamente de 70 y 52%.

III. CONCLUSIONES

Se puede decir que entre los diferentes tipos de humedales, los de flujo subsuperficial son los más usados en el país para tratamiento de agua residual doméstica, debido particularmente a las ventajas que presenta en cuanto a evitar problemas de salubridad por las condiciones de exposición del agua residual.

Los humedales de flujo subsuperficial logran mejores resultados en la remoción de contaminantes, operando dentro de un sistema, como tratamiento secundario o terciario, normalmente precedidos por algún tipo de pre-tratamiento o tratamiento primario de forma continua para garantizar su adecuado funcionamiento y evitar entre otros taponamiento en el humedal.

Las cargas orgánicas que soportan los humedales de flujo subsuperficial son bajas, de tal forma que la vegetación y especialmente el medio poroso utilizado juegan un papel determinante en la remoción de estas cargas, ya que los microorganismos que degradan la materia orgánica se encuentran formando una biopelícula alrededor del medio, y entre mayor sea la superficie del medio se prevé que mayor será la remoción de carga orgánica.

Existen medios porosos no convencionales como el carbón mineral y el plástico de material reciclable, que pueden ser utilizados con buenas propiedades de porosidad, conductividad hidráulica y absorción.

REFERENCIAS

- Akrotos, C.S., Tsihrintzis, V.A., (2007). Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. Ecol. Eng. 29 (2), 173–191.

- Albuquerque, A., Arendacz, M., Gajewska, M., Obarska-Pempkowiak, H., Randerson, P. and Kowalik, P. (2009). Removal of organic matter and nitrogen in an horizontal subsurface flow (HSSF) constructed wetland under transient loads. *Water Science & Technology*. Volume 60, Number 7: 1677-1682.
- American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21 Edition, American Public Health Association, New York.
- Arias, C.A., Del Bubba, M., Brix, H., (2001). Phosphorus removal by sands for use as media in subsurface flow constructed reed beds. *Water Res.* 35 (5), 1159–1168.
- Arroyave, A., Castaño, J., (2009). Efectos del tipo de vegetación y de las variaciones de profundidad en la eficiencia de remoción de patógenos en humedales construidos de flujo subsuperficial. Grupo de investigación aguas y aguas de Pereira, Colombia.
- Belmont, M.A. & C.D. Metcalfe. (2003). Feasibility of using ornamental plants (*Zantedeschia eathiopica*) in subsurface flow treatment wetlands to remove nitrogen, COD and nonylphenol ethoxylate surfactants. A laboratory-scale study. *Ecol. Eng.* 21(4-5): 233-247
- Conferencia Internacional Humedales Construidos para el Tratamiento de Aguas Residuales (2010). Transferencia de conocimiento a Latinoamérica. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira - Colombia.
- Crites, R.W., G. Tchobanoglous (1998). *Small and Decentralized Wastewater Management Systems*, McGraw Hill Co., New York, New York.
- Díaz, C., Romero, J., (2013). Evaluación de la remoción de DBO, DQO, SST, NTK, PT y CF en un humedal de flujo subsuperficial construido con carbón mineral y cultivado con *Zantedeschia aethiopica*. Colombia. *Revista Escuela Colombiana de Ingeniería* ISSN: 0121-5132. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, v. 1 No. 89 pp.29-37.
- FAO, Food and Agriculture Organization, (1985). *Water quality for agriculture. Irrigation and Drainage Paper 29 Rev. 1.*
- García, M., Soto, F., González, J., Bécares, E., (2006). A comparison of bacterial removal efficiencies in constructed wetlands and algae-based systems. 10th International conferences on wetlands system for water pollution control. 335.
- Kadlec, R.H., Vymazal, J., Cooper, P., Haberl, R., (2000). *Constructed wetlands for pollution control: processes, performance, design and operation*, IWA Publishing, London.
- Kadlec, R.H., R. Knight (1996). *Treatment Wetlands*, Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- LARA Carlos, y otros. (1997). *Posttratamiento del efluente de un reactor UASB por medio de un humedal artificial*. Universidad de Boyacá, Colombia.
- LARA Borrero Jaime. (2004). *Implantación y Evolución de un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial en Cogua, Cundinamarca, Colombia*.
- Metcalf & Eddy (1991). *Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización*, 3ª edición, McGraw Hill, USA.
- MINAMBIENTE, Ministerio del Medio Ambiente, (2002). *Guía de Gestión de Manejo, Tratamiento y Disposición Final de Aguas Residuales Municipales*, Bogotá, Colombia.
- Ministerio de salud, (1984). Decreto 1594 del 26 de junio de 1984, Bogotá, Colombia.

- OMS, World Health Organization, (2006). A compendium of standards for wastewater reuse in the Eastern Mediterranean Region. Regional Office for the Eastern Mediterranean.
- OSNAYA Maricarmen, (2012). Propuesta de Diseño de un Humedal Artificial para el Tratamiento de Aguas Residuales en la Universidad de la Sierra Juárez. Universidad del Sierra Juárez, México.
- OTÁLORA, A., (2011). Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales de alta tasa en la locación petrolera de Caño Gandúl. Trabajo final de maestría. Universidad Nacional De Colombia, Bogota, Colombia.
- Reed, S.C., R.W. Crites, E.J. Middlebrooks (1995). Natural Systems for Waste Management and Treatment – Second Edition, McGraw Hill Co, New York, New York.
- Romero Rojas J., (2002). Calidad del agua. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, ECI, Bogotá D.C. Colombia.
- Romero Rojas J., (1999). Tratamiento de aguas residuales: teoría y principios de diseño, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, ECI, Bogotá D.C. Colombia.
- Sanabria, O. (2009). Humedales Artificiales de Alta Tasa - HAAT- Reactores de flujo horizontal subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales: Teoría y Práctica.
- Sanabria, O. (2010). Innovative Alternative of Low Cost to Purify Waterwaster in Countries in Via of Development. Universidad de Pamplona. Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo.
- USDA, United State Department of Agriculture, (2010). Natural Resources Conservation Service, <http://plants.usda.gov/java/profile?symbol=ZAAE>.
- U.S. EPA (1993). Guía para el Diseño y Construcción de un Humedal Construido con Flujos Subsuperficiales, US EPA-REGIÓN 6.
- U.S. EPA (1993). Subsurface Flow Constructed Wetlands for Wastewater Treatment A Technology Assessment, EPA 832-R-93-008, US EPA OWM, Washington, DC.
- U.S. EPA (1999). Free Water Surface Wetlands for Wastewater Treatment: A Technology Assessment, US EPA, OWM, Washington, DC.
- U.S. EPA (2000). A Handbook Constructed Wetlands, Volumen 2, Domestic Wastewater.
- U.S. EPA (2000). Design Manual Constructed Wetlands for Municipal Wastewater Treatment, US EPA CERL, Cincinnati, Ohio.
- Zurita, F., De Anda, J., Belmont, M.A. (2009). Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands. Ecol. Eng. 35(5): 861-869.