

Implementación de un sistema de fitorremediación en zona aledaña a reserva forestal protectora El Malmo, Boyacá, Colombia

Implementation of a system of phytoremediation in area surrounding to forest protective reserve El Malmo, Boyacá, Colombia

Implementação de um sistema de fitoremediação em zona adjacente à reserva florestal protetora El Malmo, Boyacá, Colômbia

Albaluz Ramos Franco¹, Jeffrey Mauricio Prieto Naranjo²,
Diana Milena Cárdenas Nieto³ & Magda Susana Bernal Sierra⁴

^{1,2,3,4}Biólogo

^{1,2,3,4}Grupo de Investigación Biología para la Conservación. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja, Boyacá. Colombia

¹albaluz.ramos@uptc.edu.co,

²jeffrey.prieto@uptc.edu.co,

³dianacardenasnieto@gmail.com,

⁴magda.bernal@uptc.edu.co

Resumen

Las actividades de fitorremediación a través de humedales artificiales, contribuyen con la depuración de aguas residuales mediante procesos biológicos y físicos. En la Reserva El Malmo (Tunja, Boyacá, Colombia) no existe un mecanismo de captación para disponer las aguas residuales domésticas veredales. Las aguas de desecho son vertidas al ecosistema sin tratamiento previo, lo que hace necesaria la búsqueda de alternativas que mitiguen el impacto de los vertidos. En esta investigación, se implementó un humedal artificial de flujo subsuperficial con el uso de *Cyperus papyrus* y *Schoenoplectus californicus* para el tratamiento de aguas residuales

domésticas. Con esta alternativa se logra una reducción de coliformes totales y fecales de 98,5% y 88% respectivamente. Así mismo, el DBO5 y DQO tuvieron remociones de 27,4% y 25,2%. El oxígeno disuelto disminuyó, al igual que el ambiente se tornó ligeramente ácido y anaerobio. La percepción de los habitantes de la zona fue positiva y se consideran capacitados para replicar el método mejorando las características propias del diseño.

Palabras clave: depuración, flujo sub-superficial, humedal artificial, remoción, *Cyperus papyrus*, *Schoenoplectus californicus*.

Abstract

The activities of phytoremediation through artificial wetlands, contribute to the purification of wastewater through biological processes and physical. In the Reserve The Malmo (Tunja, Boyacá, Colombia) there is a trapping mechanism to provide domestic wastewater veredales. Waste water are discharged into the ecosystem without prior treatment, which makes it necessary to search for alternatives to mitigate the impact of discharges. In this research, implements a artificial wetland of flow subsurface with the use of *Cyperus papyrus* and *Schoenoplectus californicus* for the treatment of domestic wastewater. With this alternative leads to a reduction of total and faecal coliforms of 98.5% and 88 % respectively. Likewise, the BOD5 and COD had removals of 27.4% and 25.2%. The dissolved oxygen decreased, as did the atmosphere grew slightly acidic and anaerobic. The perception of the inhabitants of the area was positive and they are considered to be able to replicate the method to improve the characteristics of the design.

Key-words: debugging, subsurface flow, artificial wetlands, removal, *Cyperus papyrus*, *Schoenoplectus californicus*.

Resumo

As atividades de fitoremediação através de pantanais artificiais, contribuem com a depuração de águas residuais por meio de processos biológicos e físicos. Na reserva El Malmo (Tunja, Boyacá, Colômbia) não existe um mecanismo de captação para dispor as águas residuais domésticas. As águas residuais são vertidas ao ecossistema sem tratamento prévio nenhum, isso faz com que seja necessária a busca de alternativas que diminuam o impacto dessas águas. Nesta pesquisa, foi implementado um pantanal artificial de fluxo subsuperficial usando *Cyperus papyrus* e *Schoenoplectus californicus* para o tratamento de águas residuais domésticas. Com essa alternativa logrou-se uma diminuição de coliformes totais e fecais de 98,5 e 88% respectivamente. Igualmente, o DBO5 e DQO tiveram remoções de 27,4 y 25,2%. O oxigênio dissolvido diminuiu assim como o ambiente tornou-se mais ácido e anaeróbio. A percepção dos habitantes da zona foi positiva e são considerados capacitados para replicar o método melhorando as características próprias do desenho.

Palavras-chave: depuração, fluxo subsuperficial, pantanal artificial, remoção, *Cyperus papyrus*, *Schoenoplectus californicus*.

Introducción

La escasez de agua potable en el mundo, motiva a la comunidad científica a buscar una alternativa que posibilite remediar las aguas residuales, que hasta hace unas décadas se catalogaban como un problema ambiental de menor preocupación (Fernández, Miguel & Curt, 2005). La simulación de sistemas naturales heterótrofos y de alta productividad como los humedales y turberas, se ha convertido en una opción para rescatar el recurso hídrico y reciclarlo mediante el uso de plantas, microorganismos y elementos minerales que, en conjunto, cumplen una función depurativa de las aguas (Arias y Brix, 2003; Frers, 2008; Velez, 2007; Upadhyay, Mishra & Pandey, 2007; Vymazal, 2010; Pant & Adholeya, 2007; CENTA, 2008). Los humedales artificiales, también llamados biofiltros (Fernández *et al.*, 2005; Programa de agua y saneamiento América Latina y el Caribe

[WSP-LAC], 2006), se proponen como un método fácil de implementar, económico en mantenimiento y apropiado para zonas donde la instalación de una red de alcantarillado no es viable (Weisner, 2013). Este sistema ha sido contemplado en la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio realizada por la ONU (Millennium Ecosystem Assessment, 2003), como una alternativa para la mitigación de los efectos del cambio climático sobre la disponibilidad de agua en el mundo (Everard, Harrington & McInnes, 2012).

La fitorremediación por medio del sistema de humedal artificial dispone los compuestos presentes en los desechos líquidos, así estos pueden ser absorbidos y, posteriormente metabolizados por plantas, que crecen sobre un substrato periódicamente deficiente en oxígeno como resultado de un exceso en el contenido

de agua (Schmidt-Mumm, 1998); a su vez, en las raíces se crea una interfaz facilitadora del crecimiento de microorganismos, acelerando la degradación de compuestos que la planta por sí sola no podría consumir (Morató *et al.*, 2014; Chen *et al.*, 2007; Stottmeister, Wiebner, Kuschik & Kappelmeyer, 2003). Ante las dificultades y barreras de aplicación de métodos eficaces para el tratamiento de las aguas negras, ha surgido un sinnúmero de modificaciones al concepto original de humedal artificial, cada una adecuada a la topografía, caudal e incluso tipo de agua a transformar, encontrando sistemas de flujo vertical, horizontal, superficial, subsuperficial y mixtos (Arias & Brix, 2003). Los humedales de flujo horizontal subsuperficial son conocidos como “sistemas tipo jardín” (Fernández *et al.*, 2005), debido a que las macrófitas se siembran en un lecho granular como grava, roca volcánica e incluso arena por donde fluiría el líquido; allí, la lámina de agua no queda a la vista del observador, evitando la proliferación de vectores y los malos olores (Weisner, 2013). Este medio funciona como un tamiz, en donde los sólidos suspendidos se filtran y se adhieren al material particulado, elaborando una película de nutrientes que servirá como medio de cultivo a los microorganismos que actuarán como antagonistas de los patógenos inmersos en el agua (Morató *et al.*, 2014) (Figura 1.)

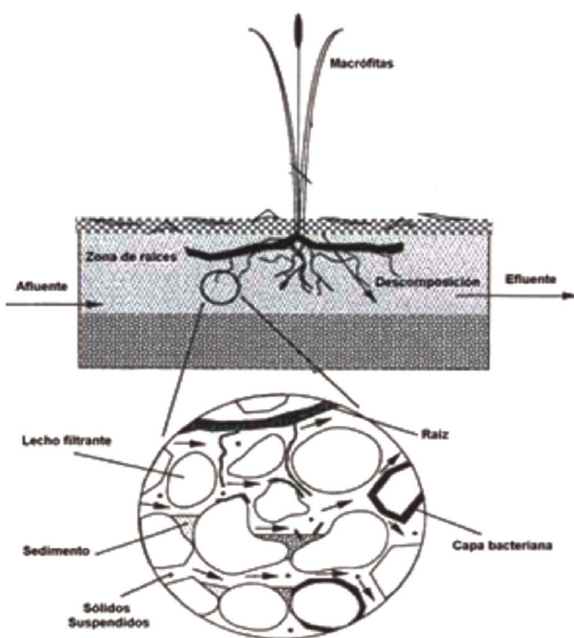


Figura 1. Componentes del humedal artificial.

Fuente: WSP-LAC (2006).

Weisner (2013) y Morató *et al.* (2014) reconocen la eficacia del sistema, con porcentajes de disminución en la concentraciones de nitratos, nitritos, fósforo y coliformes fecales y totales mayores a 90%, y un aumento significativo en la disponibilidad de oxígeno disuelto, demostrando así su factibilidad para reutilizar el agua en labores como riego de cultivos y alimentación para animales domésticos. El sistema de humedal subsuperficial requiere la presencia de plantas que permanezcan enraizadas en un sedimento inundado, pero que sus hojas y flores se encuentren bien emergidas. Las especies *Cyperus papyrus* y *Schoenoplectus californicus* han demostrado tener un alto desempeño depurador, incluso en condiciones de temperaturas ambientales de alta montaña (Weisner, 2013). A pesar que los biofiltros han sido utilizados alrededor del mundo, con un éxito replicable, son pocos los casos donde la población beneficiada interactúa de manera inmediata con la implementación y el funcionamiento del sistema (CENTA, 2008). En visitas realizadas al área adyacente de la Reserva Forestal Protectora El Malmo durante los meses de marzo y abril de 2014, se observó una problemática que no es ajena a las comunidades rurales: no existe algún tipo de saneamiento o tratamiento a las aguas residuales domésticas, los habitantes dejan correr el afluyente desde sus casas hasta los pastizales cercanos, o en su defecto, cuentan con pozos sépticos mal elaborados que solo contribuyen con la lixiviación de contaminantes hacia las quebradas y aguas subterráneas aledañas, las cuales son abundantes en la zona, debido a su formación geológica de rocas con porosidad primaria, creando acuíferos de extensión regional altamente productivos (Plan de Ordenamiento Territorial de Tunja (POT, 2001).

El objetivo de la presente investigación es evaluar la eficacia de fitorremediación de un humedal artificial de flujo subsuperficial en condiciones de uso real, con un sistema piloto capaz de mitigar el vertimiento de aguas residuales domésticas en la zona rural aledaña a la R.F.P. El Malmo, sin servicio de alcantarillado; donde se involucra a los habitantes del lugar en el proceso de instalación y funcionamiento del sistema para incentivar su replicación.

Materiales y Métodos

Área de Estudio

La Reserva Forestal Protectora El Malmo, está ubicada a 8 km del caso urbano de Tunja, con una altitud entre 3.050 a 3.275 msnm; cuenta con 159 ha de bosque secundario y algunos relictos de bosque primario con predominio de encenillo (*Weinmannia tomentosa*), de allí nacen las quebradas Barón Gallero, Berbenal y Los Reyes (Herrera, 2005) que contribuyen a la subcuenca de Teatinos. El Plan de Desarrollo Municipal (2016-2019), señala que solo 37% de su área pertenece al Estado, mientras el

63% restante son predios privados de vocación minifundista; según Cabrejo & González (2002) el carácter mixto de uso del suelo en esta zona suscita conflictos socioeconómicos, que pueden disminuir con una educación ambiental extensiva, incentivando el uso racional de los recursos naturales y las buenas prácticas agrícolas y ganaderas. Para la construcción del sistema, se consultó con los habitantes de la vereda Barón que circunda la reserva (Figura 2.); dicha propiedad posee un área para cultivo de papa y zanahoria, un área de pastoreo vacuno y galpones para aves de corral; así como una unidad habitacional para 9 personas.

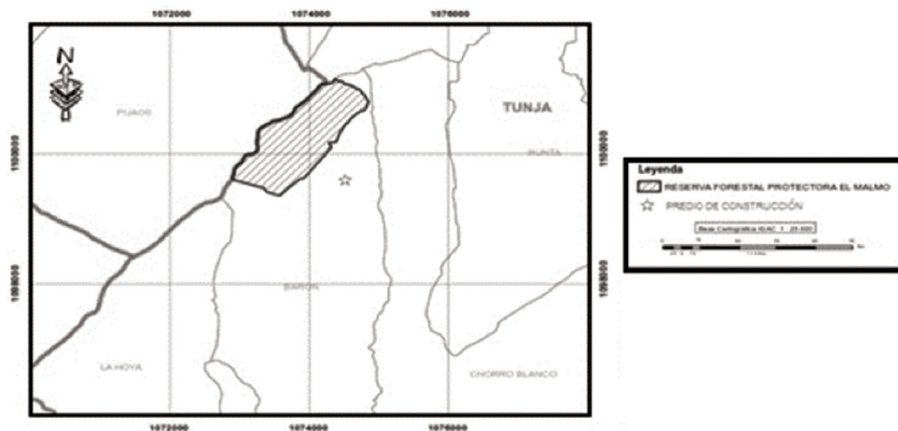


Figura 2. Localización del área de estudio

Construcción del Sistema Piloto

Cálculo del tamaño de humedal - Según Fernández *et al.* (2005) la superficie de siembra debe ser de aproximadamente 1,5 m² por cada habitante equivalente, siendo para este caso 12m² para los 9 habitantes equivalentes que contribuyen al afluente del predio elegido. El tamaño final del humedal es de 4m de largo, 3m de ancho y 1,5m de profundidad, con un volumen de 10 m³, y con la capacidad de depurar un caudal de 0,004375 L/hab-día (de acuerdo al cálculo para aguas residuales domésticas establecidas en RAS, (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000). (Figura 2)

Impermeabilización y siembra: se cubrió por completo la excavación con geomembrana de 0,5 cm de grosor, sobre la cual se dispusieron capas de grava de 3 y 8 cm de diámetro. El lecho filtrante soportará

las raíces de las plantas y aumentará la superficie de contacto del humedal. Sobre este sustrato, se sembraron 5 individuos cada 10 cm de *Cyperus papyrus* en el centro y 12 individuos cada 10 cm de *Schoenoplectus californicus* en los bordes, esta disposición obedece a las necesidades de luz de *S. californicus*, puesto que *C. papyrus* puede llegar a medir 3 m de alto, formando un dosel que impediría el correcto desarrollo de la primera. Por último, se cubrió el sembrado con una delgada capa de arena para compactar el sistema. El humedal desde el inicio de la siembra fue conectado a la tubería con agua residual como se ilustra en las Figuras 3 y 4. Estas dos especies fueron seleccionadas de acuerdo a las recomendaciones hechas por Weisner (2013) siendo su combinación la más efectiva en la remoción de materia orgánica y nutrientes; por otro lado, su morfología es

ideal en sistemas subsuperficiales, Schmidt-Mumm (1998) las define como Helófitas: plantas enraizadas en un sedimento que puede estar permanentemente inundado, con hojas y flores bien emergidas.

Canalización. Todas las salidas de agua residual de la casa fueron conectadas al humedal con un tubo de 4 in, el cual conduce a una caja de recolección que distribuirá el agua hacia el humedal por medio del tubo de dispersión de aguas residuales (Figura

3). Al final del humedal se realizó una perforación en la geomembrana y se instaló un tubo de 1½ in. Con el apoyo de los habitantes de la casa se regularon los gastos excesivos de agua durante el experimento, dado que en humedales horizontales de flujo subsuperficial, el canal de las aguas se reduce a la entrada y no alcanza a ser distribuido uniformemente a lo largo del humedal (Lahora, 2003) por lo que el caudal debe ser manejado cuidadosamente. (Figura 4.)

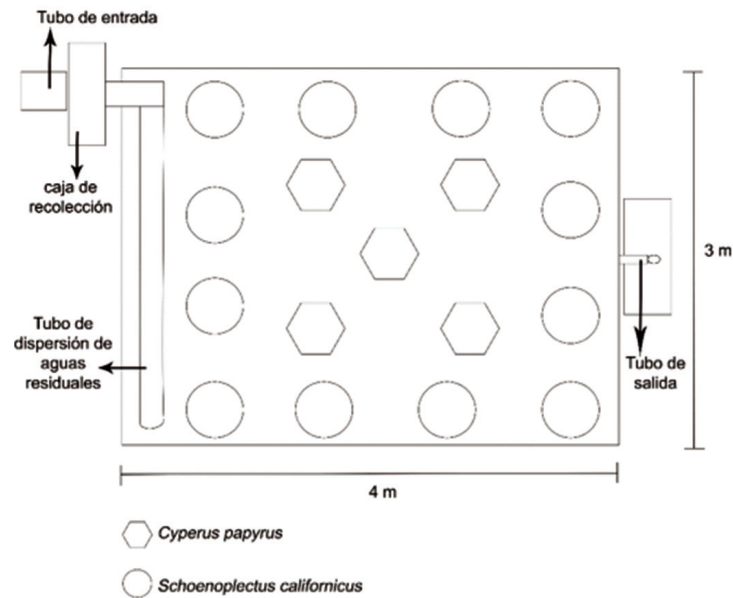


Figura 3. Ubicación de las especies utilizadas

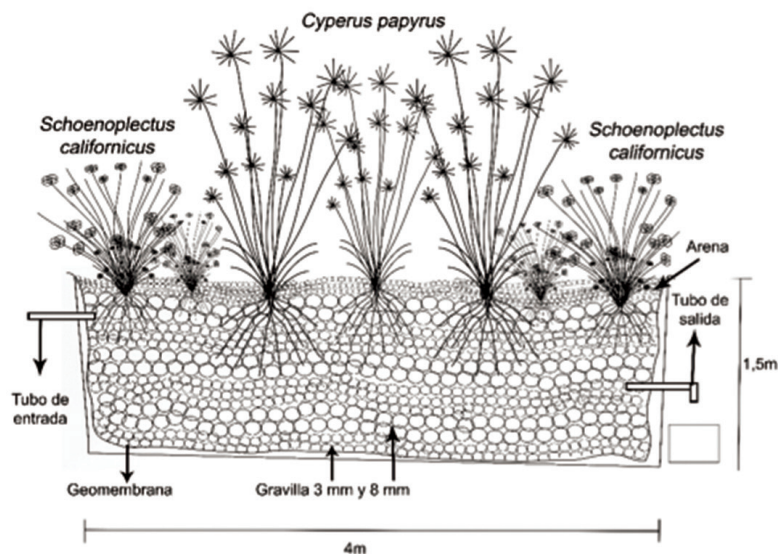


Figura 4. Vista lateral del humedal artificial

Calidad del Agua

En 1984, el Ministerio de Agricultura de Colombia mediante Decreto 1594, reglamentó los parámetros mínimos a tener en cuenta para el destinar el uso del agua, determinando que la DBO demanda bioquímica de oxígeno a cinco (5) días, DQO demanda química de oxígeno, sólidos suspendidos, pH, Oxígeno disuelto y coliformes (NMP) proveen la información suficiente para lo anterior. Cumpliendo con la normatividad, se realizaron dos análisis de agua en un laboratorio certificado por el IDEAM, antes y después de la puesta en funcionamiento del sistema, para comparar los niveles de depuración en el agua sin tratar y luego de tres meses de funcionamiento.

Apropiación social del conocimiento

Para lograr una interacción con la población beneficiaria del sistema, se realizaron dos jornadas de capacitación con los habitantes de la zona aledaña a la reserva, incluyendo la participación de líderes comunales de las veredas cercanas como Runta, Chorro Blanco y La Hoya. La primera de estas sesiones, profundizó en las características y funcionamiento del humedal, justificando la necesidad del tratamiento de las aguas de desecho; a través de técnicas de dinámica grupal como lluvia de ideas y cartografía social propuestas por Geilfus (2002) con la participación de 20 adultos. La segunda

intervención se realizó durante la construcción del humedal, donde los habitantes del predio seleccionado colaboraron con su mano de obra y conocimientos en plomería. Paso a paso, se explicó la función de los materiales, las características generales de las especies utilizadas y a manera de dialogo semi-estructurado (Geilfus, 2002) se discutieron las expectativas del proyecto.

Resultados

Para la comparación de resultados de análisis fisicoquímicos en el agua, se tuvo en cuenta lo reportado en la literatura respecto al tiempo de aclimatación de las plantas en el sistema, un rango de tres a cinco meses es óptimo para que las raíces cubran por completo el sustrato y la biopelícula de bacterias sea lo suficientemente compacta para evitar su desprendimiento y posterior descomposición, lo cual incrementa los valores de DQO (Romero *et al.*, 2009). De esta forma, se tomó la primera muestra sobre el conducto principal de recolección de aguas residuales, hecho por los habitantes del predio antes de la construcción del sistema y la muestra de comparación, pasados tres meses de instalación e inicio de funcionamiento del humedal.

Parámetros Fisicoquímicos

El análisis fisicoquímico del agua antes y después del tratamiento por el sistema se resume en la Tabla 1.

Tabla 1. Análisis fisicoquímicos del agua residual antes y después del tratamiento y porcentaje de remoción

Parámetro	Julio 2014	Marzo 2015	% Remoción
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	70.000.000	1.000.000	98,57
Coliformes Totales (NMP/100ml)	1.670.000.000	198.000.000	88,14
DBO5 (mg/l-O2)	215	156	27,44
DQO (mg/l-O2)	534	399	25,28
Oxígeno Disuelto (mg/l-O2)	1,60	0,40	75,00
pH	8,95	6,53	--
Sólidos Suspendidos Totales (mg/l)	450	90	80,00

Coliformes fecales (CF) y totales (CT). El agua residual ingresó al humedal con 7×10^7 NMP/100ml y salió con 1×10^6 NMP/ml, obteniendo así una reducción en CF del 98,5%. En cuanto a CT, el valor sin tratamiento es de $1,6 \times 10^9$ NMP/100ml y la salida del humedal arroja un valor de $1,8 \times 10^8$ NMP/100ml, con una disminución en CT de 88,14%.

Demanda bioquímica de oxígeno y demanda química de oxígeno. El agua residual ingresó al humedal con una concentración de DBO_5 de 215 mg/l y salió con una concentración de 156 mg/l, con una remoción final de 27,4%. El valor inicial de la concentración de la DQO es de 534 mg/l y la final de 399 mg/l, obteniendo una remoción del 25,2%.

Oxígeno disuelto. La disponibilidad de oxígeno a la salida del humedal disminuyó significativamente con respecto al caudal de entrada, pasando de 1,60 mg/l- O_2 a 0.40 mg/l- O_2 , esto es, una reducción del 75%.

pH. El entorno del humedal al momento de entrar en funcionamiento experimentó un viraje de alcalino, a ligeramente ácido. El agua residual inicial marcó un pH de 8,95, el agua final tuvo un valor de 6,53.

Sólidos suspendidos totales. La cantidad de material sólido a la entrada del sistema fue de 450 mg/l, el cual disminuyó a 90 mg/l en la segunda toma de muestra, su reducción fue del 80%.

Apropiación Social del Conocimiento

En abril de 2015, se realizó el último encuentro con los habitantes del predio para efectuar una Matriz de Indicadores de Evaluación de Impacto (Geilfus, 2002) con el fin de calificar la percepción de los usuarios frente a la puesta en funcionamiento del sistema depurador. En esta participaron 5 adultos y 4 niños, quienes construyeron la matriz usando las técnicas de lluvia de ideas y valoración cualitativa de cada indicador (Tabla 2.)

Tabla 2. Resumen matriz de indicadores de evaluación de impacto

Indicador	Adultos	Niños	Valoración
Social	Interacción sobre el tema con líderes veredales Adquisición de nuevos conocimiento Creación de una zona de recreación con jardinería	Adquisición de nuevos conocimiento Interacción sobre el tema con el grupo escolar	Positiva
Económico	Disminución del costo de tratamiento de aguas residuales: sistema vs. pozo séptico Posibilidad de empleo en construcción de nuevos sistemas	Ninguno	Positiva
Ambiental	Adopción de nuevas prácticas de aseo Disminución del uso de agentes químicos corrosivos (creolina) Mejor disposición de desechos sólidos de cocina y baño	Eliminación de zonas contaminantes en el predio Disminución de enfermedades infectocontagiosas entéricas	Positiva

Fuente: Geilfus, 2002

Discusión

Rivera *et al.* (1995) relacionan los altos porcentajes de remoción de materia orgánica disuelta con la cantidad de coliformes presentes en el medio; su abundancia parece está vinculada al tipo de sustrato, siendo los humedales de tipo subsuperficiales

los más propicios para su crecimiento versus otros diseños, gracias al sustrato granular (Morató *et al.*, 2014). García *et al.* (2003) encontraron una mayor riqueza de microorganismos en medios granulares grandes, como las gravas; las cuales están dispuestas en dos tamaños para este estudio ($\frac{3}{4}$ in y $\frac{1}{2}$ in).

Aunque benéfica en el interior del sistema, la presencia de Coliformes en el agua disminuye la potencialidad de reuso de la misma; las pruebas realizadas indican una enorme descenso en su número, su disminución se puede deber a factores tanto físicos como biológicos: la acción de las macrófitas mediante mecanismos de filtración, asimilación de nutrientes, sedimentación facilitan la formación de biopelículas donde se acentúan otros grupos de microorganismos que atacan la microbiota regular de las aguas residuales (Karathanasis *et al.*, 2003). De este mecanismo de remoción por microorganismos antagonistas se conocen los casos de predación por protistas, ataques de virus (Colífagos) y nanoflagelados heterotróficos (Vacca *et al.*, 2005); los cuales en conjunto contribuyen a la reducción de los valores de coliformes totales y fecales. Se puede afirmar que la remoción de microorganismos coliformes fue óptima (98,57% y 88,14%) en comparación a sistemas desarrollados en Centroamérica (WSP-LAC, 2006) y Colombia (Lara & Vera, 2005) con porcentajes de 99,52% y 69% respectivamente. Los géneros de bacterias con mayor probabilidad de encontrarse en el sistema son *Escherichia*, *Clostridium*, *Pseudomonas* y *Aeromonas* (Morató *et al.*, 2014), sin embargo, es imperativo realizar un estudio más profundo sobre las asociaciones bacterianas presentes el sistema instalado, dada su ubicación geográfica (alta montaña) y la combinación de macrófitas utilizada; los microorganismos reportados en la literatura pertenecen a sistemas instalados en países templados como España (Morató *et al.*, 2014)

El descenso de los valores de DBO y DQO es consecuencia de una menor cantidad de materia orgánica susceptible de ser oxidada mediante actividad microbiana en el agua tratada. La disponibilidad de zonas aeróbicas, promovidas por la acción de las raíces y rizomas (zonas predominantes en los sistemas de flujo subsuperficial), donde los microorganismos toman el oxígeno para degradar la materia orgánica en CO₂ y agua, se ha reportado como la causa de la disminución de DQO (García & Rodríguez, 2005; Nivala *et al.*, 2013; Lahora, 2003), gracias a la desnitrificación, la reducción del sulfatos y metanogénesis (Stottmeister *et al.*, 2003). Las

raíces de las plantas usan aproximadamente el 35% del oxígeno disponible alrededor de éstas en la degradación de compuestos orgánicos, el 9% en la nitrificación del amonio, y un 56% es utilizado para la respiración radicular (Li *et al.*, 2013). CENTA (2008) enuncia que la relación DBO/DQO es un indicador de eficiencia en el tratamiento de aguas residuales, y propone una escala: $\geq 0,4$ Aguas muy biodegradables; $0,2 - 0,4$ Aguas biodegradables y $\leq 0,2$ Aguas poco biodegradables; para el presente trabajo, la relación inicial fue de 0,40 y de 0,39 después de su paso por el sistema, la disminución en dicha correspondencia indica eficiencia en la mitigación del impacto de las aguas tratadas después de salir del sistema. La eficacia de remoción se concluye baja en comparación con las cifras reportadas por WSP-LAC (2006); García & Rodríguez (2005) entre el 93 y el 97%; se establece así, que el sistema aún es inmaduro. Un seguimiento de la remoción en la DBO y DQO es necesaria para determinar el tiempo de maduración del humedal.

La reducción de los valores de oxígeno disuelto no se deben directamente a la captación por la planta, si no a las comunidades microbianas que se establecen gracias a la acción éstas (Nivala *et al.*, 2013). Además, la creación de zonas anaeróbicas y anóxicas, promueve la ligera acidificación, como en este caso. La disminución del pH se presenta junto con un decrecimiento del oxígeno disuelto, que afecta el potencial redox (Yang *et al.*, 2012). Una forma de mejorar el funcionamiento de los humedales de flujo subsuperficial es optimizar la aireación del sistema, previniendo excesos en el flujo del caudal que evitará la colmatación de la capacidad máxima del sistema, principal causa de la creación de zonas anóxicas. Entonces, con una alta cantidad de oxígeno, las biopelículas encargadas de la degradación de contaminantes se desarrollan exitosamente en el sustrato (Nivala *et al.*, 2013).

Se ha reportado que los humedales de flujo subsuperficial son eficientes en la eliminación de compuestos orgánicos gracias a la sedimentación y filtración de las partículas coloidales en las raíces de las macrófitas (WSP-LAC, 2006). En general, la remoción de sólidos suspendidos fue exitosa, como

lo afirma CENTA (2008) esta puede relacionarse con la cantidad de oxígeno disuelto, la reducción de sólidos flotantes aumenta la porción del gas en el agua y elimina malos olores en el sistema. Se considera que un incremento en la eliminación de partículas puede mejorarse con la implementación de un subsistema previo de decantación para aglomerados de gran tamaño, que logre al menos un 97% de eficiencia (WSP-LAC, 2006).

La calificación general que arrojó la Matriz de Indicadores de Evaluación de Impacto (Geilfus, 2002) fue positiva, los habitantes del predio destacan la adquisición de nuevos conocimientos como uno de los beneficios más importantes, hacen énfasis en el ahorro monetario de la implementación del sistema al ser comparado con los gastos de construcción de un pozo séptico. Sus hábitos de aseo tuvieron cambios en cuanto a la disminución de uso de sustancias corrosivas y detergentes abrasivos, la disposición de desechos sólidos sanitarios y una reducción en la cantidad de jornadas de lavandería. Los niños mencionan la eliminación del charco negro, refiriéndose al pastizal donde desembocaba el tubo de aguas negras anterior a la instalación del humedal, que actuaba como foco de infecciones gastrointestinales e insectos vectores. Las mujeres de la vivienda crearon una huerta de plantas aromáticas en torno al humedal como pasatiempo. Los adultos afirman estar en la capacidad de replicar la construcción del sistema y capacitar a otros campesinos en dicha labor.

Conclusiones

El sistema es eficiente y cumple el objetivo de mitigar el impacto del vertimiento de aguas residuales en el ecosistema aledaño al predio donde se instaló. Se recomienda el uso de humedales artificiales de flujo subsuperficial como método de tratamiento secundario, es fundamental acoplarlo con un pretratamiento de sedimentación primaria, que logre separar residuos de gran tamaño para evitar anegación del humedal y disminución del rendimiento. Sin embargo los biofiltros son un sistema ideal para zonas descentralizadas donde un tratamiento

convencional o alcantarillado no es posible, este método es de bajo costo, de fácil implementación y escaso mantenimiento.

El humedal artificial como sistema de fitorremediación de aguas residuales fue aceptado por la comunidad aledaña a la Reserva Forestal Protectora El Malmo, los habitantes comprendieron las ventajas de la instalación en sus predios. Los usuarios del humedal están satisfechos con los beneficios que les brinda y se consideran aptos para capacitar a otras personas en la replicación de la técnica.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a Colciencias, entidad que financió este proyecto por medio de la Convocatoria 617 de 2013, así como a la Dirección de Investigaciones de la UPTC; a los habitantes de la vereda Barón, especialmente a los propietarios del predio por permitir el desarrollo de la investigación. A los profesores Liliana Rosero Lasprilla y Wilson Ricardo Álvaro, por su constante apoyo y valiosos aportes, a Richard Canova por su participación en la elaboración de la propuesta inicial de este trabajo y a todos los integrantes del Semillero de Investigación GAIA.

Literatura Citada

1. Arias, C. & Brix, H. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*(13), 17-24.
2. Cabrejo, F. & Gonzalez, G. (2002). Caracterización de la vegetación del bosque Altoandino del transecto Barón Germania de la Reserva Forestal "El Malmo" Tunja, Boyacá (Tesis de Especialización). Tunja: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
3. Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla [CENTA]. (2008). Manual de depuración de aguas residuales urbanas. Sevilla: Alianza por el Agua.
4. Chen, W., Chen, Z., He, Q., Wang, X., Wang, C. & Chen, D. (2007). Root growth of wetland plants with different root types. *Acta Ecológica Sinica* (Online English edition of the Chinese language journal), 27(2), 450-458.
5. Clarke, E. & Baldwin, A. (2002). Responses of wetland plants to ammonia and water level. *Ecological Engineering*(18), 257-264.

6. Decreto 3930, Artículo 7° (Presidencia de la República de Colombia 25 de Octubre de 2010).
7. Díaz, F., O'Geen, A. & Dahlgren, R. (2010). Efficacy of constructed wetlands for removal of bacterial contamination from agricultural return flows. *Agricultural water management*(97), 1813-1821.
8. Everard, M., Harrington, R. & McInnes, R. (2012). Facilitating implementation of landscape-scale water management: The integrated constructed wetland concept. *Ecosystem Services*(2), 27-37.
9. Fernández, J., Miguel, E. & Curt, M. (2005). Manual de Fitodepuración. Filtros de Macrófitas en flotación. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
10. Frers, C. (2008). El uso de las plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales. *Observatorio Medioambiental*(11), 301-305.
11. García Botero, T. & Rodríguez Susa, M. (2005). Diseño, construcción y evaluación preliminar de un humedal de flujo subsuperficial. Recuperado de: <http://dspace.uniandes.edu.co:9090/xmlui/handle/1992/760?show=full>
12. García, J. & Corzo, A. (2008). Depuración con humedales construidos: Guía práctica de diseño, construcción y explotación de humedales de flujo subsuperficial. Catalunya.
13. García, J., Vivar, J. & Aromir, M. (2003). Role of hydraulic retention time and granular medium in microbial removal in tertiary treatment reed beds. *Water Research*, 37(26), 45-53.
14. Geilfus, F. (2002). 80 Herramientas para el desarrollo participativo. Jan José, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
15. Herrera, Y. (2005). Diagnóstico y concertación del Plan de Manejo de la Reserva Forestal Protectora El Malmo. Tunja.
16. Hsu, C., Hsieh, H., Yang, L., Wu, S., Chang, J., Hsiao, S. & Lin, H. (2011). Biodiversity of constructed wetlands for wastewater treatment. *Ecological Engineering*(37), 1533-1545.
17. Karathanasis, A., Potter, C. & Coyne, M. (2003). Vegetation effects on fecal bacteria BOD and suspended solid removal in constructed wetlands treating domestic wastewater. *Ecological Engineering*(20), 157-169.
18. Kegne, I., Amougou, A., Soh, E., Tsama, V., Ngoutane, M., Dodane, P. & Koné, D. (2008). Effects of fecalsludge application on growth characteristics and chemical composition of *Echinochloa pyramidalis* and *Chase* and *Cyperus papyrus*. *Ecological Engineering*, 233-242.
19. Lahora, A. (2003). Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: La edar de los gallardos (Almería). *Ecología, manejo y conservación de los humedales*(49), 99-112.
20. Lara, J. & Vera, I. (2005). Implantación y evolución de un humedal artificial de flujo subsuperficial en Cogua, Cundinamarca. *Ingeniería y Universidad*, 47-63.
21. Li, L., Yang, Y., Tam, N., Lei, Y., Mei, X. & Yang, F. (2013). Growth characteristics of six wetland plants and their influences on domestic wastewater treatment efficiency. *Ecological Engineering*(60), 382-392.
22. Martelo, J. & Lara, J. (2012). Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales; una revisión del estado del arte. *Ingeniería y Ciencia*, 8(15), 221-243.
23. Masi, F. & Martinuzzi, N. (2007). Constructed wetlands for the Mediterranean countries: Hybrid systems for water reuse and sustainable sanitation. *Desalination*(215), 44-55.
24. Millennium Ecosystem Assessment. (2003). *Ecosystems and Human Well-being: A Framework for Assessment*. Washington D.C: Island Press.
25. Ministerio de Desarrollo Económico. (2000). Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico [RAS]. Bogotá.
26. Morató, J., Codony, F., Sanchez, O., Martín, L., García, J. & Mas, J. (2014). Key design factors affecting microbial community composition and pathogenic organism removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Science of the Total Environment*(481), 81-89.
27. Mosquera, Y. & Lara, J. (2012). Tratamiento de lixiviados mediante humedales artificiales: revisión del estado del arte. Tumbaga, 73-99.
28. Nivala, J., Wallace, S., Headley, T., Kassa, K., Brix, H., Afferden, M. & Muller, R. (2013). Oxygen transfer and consumption in subsurface flow treatment wetlands. *Ecological Engineering*(61), 544-554.
29. Pant, D. & Adholeya, A. (2007). Biological approaches for treatment of distillery wastewater: a review. *Bioresource Technology*(98), 2321-2334.
30. Parra, J. (s.f.). Hidrografía, Cuencas y Subcuencas. Plan de ordenamiento territorial 2000-2009. Tunja, Boyacá.
31. Plan de Ordenamiento Territorial de Tunja [POT]. (2001). Recuperado de: http://www.tunja-boyaca.gov.co/apc-aa-files/63353630666563646636613430366433/Acuerdo_No_0014_del_31May2001_POT.pdf
32. Programa de agua y saneamiento América Latina y el Caribe [WSP-LAC]. (2006). Biofiltro: Una opción sostenible para el tratamiento de aguas residuales en pequeñas localidades. Honduras: AZER Impresos.
33. Rivera, F., Warren, A., Ramírez, E., Decamp, O., Bonilla, P. & Gallegos, E. (1995). Removal of pathogens from wastewaters by the root zone method (RZM). *Water Science Technology*, 32(2), 8-11.
34. Rodríguez, T. & Ospina, I. (2005). Humedales artificiales de flujo vertical para mejorar la calidad del río Bogotá. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 74-84.
35. Romero, M., Colin, A., Sanchez, E. & Ortiz, L. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Revista Internacional de contaminación ambiental*, 25(3), 157-167.
36. Schmidt-Mumm, U. (1998). Vegetación acuática y pastoreo de la sabana de Bogotá y plano del río Ubaté: Ecología y taxonomía de la flora acuática y semiacuática. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

37. Stottmeister, U., Wiebner, A., Kusch, P. & Kappelmeier, U. (2003). Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology Advances* (22), 93-117.
38. Tanner, C. (2000). Plants as ecosystem engineers in subsurface flow treatment wetlands. 7 International conference on wetlands systems for pollution control, 13-22.
39. Upadhyay, A., Mishra, V. & Pandey, S. (2007). Biofiltration of secondary treated municipal wastewater in a tropical city. *Ecological Engineering* (30), 9-15.
40. Vacca, G., Wand, H., Nikolausz, M., Kusch, P. & Kastner, M. (2005). Effect of plants and filter materials on bacteri removal in pilot-scale constructed wetlands. *Water Research* (39), 1361-1373.
41. Velez, J. (2007). Los biosólidos ¿una solución o un problema? *Producción más limpia*, 2(2), 57-71.
42. Vymazal, J. (2010). Constructed wetlands for wastewater treatment. *Water*, 2(3), 530-549.
43. Weisner, C. (2013). Reducción de contaminantes en aguas residuales domésticas empleando marófitas en un sistema Batch. Memorias del II Seminario Internacional y III Nacional del Geomática, Hidráulica y Medio Ambiente, 1-12. Tunja.
44. Yang, J., Liu, Y. & Ye, Z. (2012). Root-induced changes of pH, Eh, Fe (II) and fractions of Pb and Zn in rhizosphere soils of four wetlands plants with different radial oxygen losses. *Pedosphere*, 22(4), 518-527.

Conflicto de Intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses

Recibido: 02 de septiembre de 2015
Aceptado: 30 de septiembre de 2015