

Comportamiento cinético e hidráulico de un humedal construido a escala real

• Noelia Alasino* • Florencia Nadal • Laura Primo • Pablo Bollo •
• Nancy Larrosa •

Universidad Nacional de Córdoba, Argentina

*Autor de correspondencia

Resumen

Alasino, N., Nadal, F., Primo, L., Bollo, P., & Larrosa, N. (mayo-junio, 2015). Comportamiento cinético e hidráulico de un humedal construido a escala real. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(3), 93-104.

En este trabajo se presentan resultados del estudio de un humedal de flujo subsuperficial horizontal con *Cortadeira selloana* construido en el año 2010 para tratar el efluente cloacal generado en una dependencia de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. La construcción del mismo se realizó con el objetivo de analizar la factibilidad de tratar los efluentes cloacales de una vivienda tipo, por lo que se construyó a escala real con un área superficial de 10 m², aproximadamente. Se calculó el valor de la constante cinética de remoción de materia orgánica y se diseñó un *software* de simulación que permite evaluar distintas situaciones hipotéticas considerando al sistema como un reactor flujo pistón (RFP). También se realizó un ensayo con trazador conservativo para determinar la distribución del tiempo de residencia (DTR) y el comportamiento hidrodinámico del flujo. Como resultado, se pudo detectar que el sistema en estudio no se comporta según el modelo hidrodinámico supuesto para su diseño, sino que se asemeja a un sistema conformado por dos reactores flujo pistón con dispersión en paralelo. Se obtuvo una constante de reacción para la eliminación de materia orgánica, considerando un modelo de RFP y una cinética de remoción de primer orden de $k = 0.115 \text{ d}^{-1}$. La simulación permitió conocer a priori la concentración de materia orgánica del efluente del humedal para situaciones de interés. Se destaca la importancia de realizar estudios en sistemas de una escala mayor a pruebas pilotos, tal como se realizó en el presente trabajo (en el cual el sistema se hizo a escala real), y monitorearlos en el tiempo, ya que las raíces de la vegetación, acumulación de sólidos, asentamiento de la grava y depresiones en el suelo por el peso de la celda son factores que hacen que el sistema se modifique y cambie su morfología y por lo tanto cambie su capacidad depurativa.

Palabras clave: humedal construido, *Cortadeira selloana*, comportamiento hidráulico, constante cinética.

Abstract

Alasino, N., Nadal, F., Primo, L., Bollo, P., & Larrosa, N. (May-June, 2015). Kinetic and Hydraulic Behavior of a Full-Scale Constructed Wetland. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 6(3), 93-104.

This work presents the results from the study of horizontal subsurface flow in a constructed wetland with *Cortadeira selloana*. The wetland was built in 2010 to treat waste generated by a facility belonging to the National University of Cordoba, Argentina. It was constructed to analyze the feasibility of treating wastewater generated by housing, and was therefore built at full-scale with an area of approximately 10 m². The kinetic constant for removing organic matter was calculated and simulation software was designed to evaluate different hypothetical situations considering a piston flow reactor system. A conservative tracer test was also performed to determine the distribution of residence time and the hydrodynamic behavior of the flow. As a result, it was determined that the system does not behave according to the hydrodynamic design model but rather as a system composed of two piston flow reactors with parallel dispersion. A reaction constant was obtained for the removal of organic matter based on a piston flow reactor model and a first-order removal kinetics of $k = 0.115 \text{ d}^{-1}$. The simulation identified a priori the concentration of organic matter in the effluent from the wetland for the situations of interest. The importance of studies using scales that are larger than pilot tests is highlighted (as was done in the present study using a full-scale system), as well as monitoring them over time, given that the vegetation roots, accumulation of solids, settling of gravel and soil depressions from the weight of the cell change the system and its morphology and, therefore, its purification capacity.

Keywords: Constructed wetland, *Cortadeira selloana*, hydraulic behavior, kinetic constant.

Recibido: 07/08/2013
Aceptado: 12/02/2015

Introducción

Los humedales artificiales son sistemas de fito-depuración de aguas residuales. El sistema consiste en el desarrollo de un cultivo de macrófitas de hojas flotantes o enraizadas sobre un lecho de grava impermeabilizado. La acción de las macrófitas hace posible una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas, a través de las cuales el agua residual afluyente es depurada progresiva y lentamente (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

El tratamiento de efluentes por humedales puede ser descrito como un tratamiento biológico y microbiológico, donde la materia orgánica de las aguas residuales es metabolizada por las bacterias del sistema. El oxígeno necesario para el metabolismo aerobio de estos microorganismos es aportado por la fotosíntesis de las plantas a través de sus raíces y rizomas. La sedimentación (en regiones de flujo lento), adsorción en las partículas de suelo y en los sistemas de raíces y otras partes de plantas, fotooxidación, captación directa de la planta e intercambio catiónico también son importantes mecanismos de remoción de contaminantes (Woodard and Curran, Inc., 2011).

Los humedales han cobrado relevancia en la ingeniería sanitaria debido a que son sistemas que permiten una muy flexible localización de sitio, optimización del tamaño según la carga contaminante y tratamiento de una gran cantidad de aguas residuales. Constituyen una solución de bajo costo ampliamente utilizada en el mundo para el tratamiento secundario y/o terciario de diferentes tipos de aguas residuales (Vymazal, 2009).

Los humedales construidos para el tratamiento de agua residual se han clasificado de manera tradicional en dos tipologías, atendiendo a si la circulación del agua es de tipo subterránea o superficial.

En los humedales de flujo superficial (HFS) el agua está expuesta directamente a la atmósfera, con una profundidad máxima de 0.4 m y circula de modo preferente a través de los tallos de las plantas.

En los humedales de flujo subsuperficial (HFSS), la circulación del agua es subterránea, a través de un medio granular con una profundidad de alrededor de 0.6 m, y en contacto con los rizomas y raíces de las plantas que crecen gracias a los espacios de la porosidad de la grava. Los humedales de flujo subsuperficial se clasifican según el sentido de circulación del agua en horizontales (HFSSH) o verticales (HFSSV).

Los humedales, durante el transcurso del tiempo, pueden cambiar las condiciones bajo las cuales fueron diseñados y construidos, cambiando su morfología y, con esto, su conductividad hidráulica y porosidad, incidiendo de forma notable en los resultados esperados.

En este trabajo se presentan los resultados de estudios realizados en un humedal construido —con *Cortadeira selloana* en el mes de junio de 2010— para tratar los efluentes cloacales generados en una dependencia de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, y de una vivienda familiar situada de manera contigua al mismo ($-31^{\circ} 26' 21.29''$, $-64^{\circ} 11' 28.47''$).

Para el diseño del humedal y cálculo de sus dimensiones se utilizó la metodología de Reed, Miledlebrooks y Crites (1995), que considera al humedal como un RFP con cinética de degradación de materia orgánica de primer orden (ecuación (1)):

$$\frac{DBO_5 \text{ efluente}}{DBO_5 \text{ afluyente}} = e^{-k\tau} \quad (1)$$

donde DBO_5 efluente y DBO_5 afluyente son las concentración de demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) en el efluente y afluyente, respectivamente; k , la constante de velocidad cinética, y τ es el tiempo de retención hidráulica. Para el cálculo de τ se aplicó la ecuación (2):

$$\tau = \frac{(LWh)\epsilon}{v} \quad (2)$$

donde L es el largo; W , el ancho; h , la profundidad del humedal; ϵ , la porosidad del lecho, y v es el caudal volumétrico del efluente.

Se consideró para su diseño un caudal (v) de 700 l/d (consumo de agua promedio de las dos instalaciones al momento de la construcción). El resto de los valores se tomaron según recomendaciones bibliográficas. Se consideró una DBO_5 afluente de 240 mgO_2/l ; DBO_5 efluente de 30 mgO_2/l (valor exigido por la DIPAS (1999) para descarga directa en embalse); ϵ de 0.38; k de 0.73 d^{-1} (Lara-Borrero, 1999); h de 0.5 m, y relación $L/W = 3$. El área resultante de este humedal fue de unos 10 m^2 , con 2.1 m de ancho y 5.1 m de largo. El caudal de diseño y volumen de la celda arrojó un tiempo de residencia hidráulico teórico de 2.9 días (Nadal, 2010; Nadal et al., 2012).

Durante los ocho primeros meses desde su construcción (desde julio de 2010 hasta febrero de 2011), el humedal trató agua residual doméstica con un caudal promedio de 700 l/d proveniente de las instalaciones sanitarias de la dependencia de la universidad y la vivienda. A partir de marzo de 2011, la vivienda fue deshabitada y el caudal de ingreso al humedal disminuyó a unos 222 l/d promedio. En la figura 1 se muestran fotografías del humedal construido.

Materiales y métodos

Durante los años 2011 y 2012 se llevaron a cabo diversos estudios que permitieron evaluar el

funcionamiento del sistema: comportamiento hidrodinámico, evaluación cinética y simulaciones de situaciones hipotéticas mediante un *software* diseñado para tal fin.

Ensayo de trazador para determinación de τ experimental y evaluación hidrodinámica

La evaluación hidrodinámica es una herramienta útil para conocer el comportamiento que describe el sistema en la práctica y así ajustarlo al modelo de reactor o combinación de reactores que mejor se aproxime. Para ello es preciso realizar ensayos con trazadores no conservativos, con el fin de obtener la curva de distribución de tiempos de residencia (DTR) (Hincapié-Marín, 2007). Esta curva se compara luego con las curvas teóricas de los modelos de flujo pistón (RFP), flujo pistón con dispersión (RFPD) o una combinación de ellos con reactores mezcla completa (RMC).

Para la evaluación hidrodinámica se empleó la curva DTR siguiendo el método descrito en Levenspiel (2002). Como trazador se utilizó NaCl, inyectándose al sistema de manera instantánea a la entrada del humedal 300 g de la sal disueltos en dos litros de agua. Cada día se midieron la conductividad y caudal del efluente hasta observar los valores normales de



Figura 1. Fotografía del humedal construido con *Cortadeira selloana*: a) en 2010, b) en 2012.

conductividad del agua residual tratada. Para la medición de conductividad se utilizó una sonda multiparamétrica marca Horiba U-10. Luego se calculó el tiempo de retención hidráulico medio (t_M), según la ecuación (3), y se construyó la curva E normalizada (E_θ), normalizando el tiempo y la concentración del trazador mediante las ecuaciones (4) y (5):

$$t_M = \frac{\sum(t_i \Delta t_i C_i)}{\sum(\Delta t_i C_i)} \quad (3)$$

donde t_i y C_i son los tiempos y concentraciones de sal obtenidos en el transcurso del ensayo:

$$\theta = \frac{t_i}{t_M} \quad (4)$$

$$E_\theta = \left(\frac{C_i}{\sum C_i \Delta t_i} \right) t_M \quad (5)$$

siendo θ el tiempo normalizado. Por último se comparó la curva E_θ vs. θ obtenida en el ensayo, con curvas E_θ normalizadas para patrones de flujo de RFP ideal, RFP con dispersión y con n reactores de mezcla completa conectados en serie o combinaciones de éstos.

Evaluación cinética

Los humedales artificiales pueden considerarse como reactores biológicos y su rendimiento ser estimado mediante una cinética de primer orden (ecuación (1)) para la remoción de DBO_5 , material en suspensión u otro contaminante, como el nitrógeno. Para la evaluación de la constante cinética se asumió una reacción de primer orden (Kadlec, 2003; Francia, Camarena, & Guzmán, 2002; Reed et al., 1995) y se utilizaron las concentraciones de DBO_5 afluente y DBO_5 efluente obtenidos en ensayos realizados según APHA (APHA, AWWA, WEF, 2005), a partir de los 15 meses de construido el humedal, con una variación en el tiempo entre cada ensayo de unos tres meses (en septiembre y diciembre

de 2011, y en marzo y mayo de 2012). Luego se validó dicha constante de reacción k con los datos registrados en 2010, cuando el caudal de alimentación era diferente (en 2010 era de 700 l/d y desde febrero de 2011 fue de unos 222 l/d).

Desarrollo de software de simulación

Se desarrolló un programa de simulación escribiendo un modelo matemático en el lenguaje *Visual Basic 6.0* de Microsoft con las ecuaciones (1) y (2) (es decir, considerando que el sistema puede ser modelado como un RFP) y la constante cinética obtenida. Este programa permite ensayar el comportamiento del sistema en estudio y de otros humedales análogos en diferentes situaciones. Permite simular escenarios para calcular y graficar la DBO_5 efluente, modificando cualquiera de las siguiente cinco variables: dimensiones L , W y h del humedal; porosidad ϵ del medio; caudal diario del afluente v ; DBO_5 afluente o las precipitaciones. Todas estas variables afectan el tiempo de residencia del efluente en el sistema (θ), y por lo tanto son determinantes en la DBO_5 efluente y la capacidad de remoción del humedal. Para poder graficar la DBO_5 efluente en función de una de las variables, se deben introducir como datos las otras cuatro. Para simular la situación de lluvia se aplican las ecuaciones (6) y (7), a fin de contemplar el aumento de caudal y la dilución del afluente (considerando que toda el agua aportada por las lluvias ingresa a la entrada del humedal):

$$\tau = \left[\frac{(LWh)\epsilon}{v + \frac{\text{mmlluvia} LW}{1000}} \right] \quad (6)$$

$$\text{DBO}_{5 \text{ afluente aparente}} = \left[\frac{\text{DBO}_{5 \text{ afluente}} v}{v + \frac{\text{mmlluvia} LW}{1000}} \right] \quad (7)$$

donde τ está expresado en días y DBO_5 afluente aparente es la DBO_5 que tendría el afluente si se diluyera con el agua aportada por la lluvia cada día.

Resultados y discusión

Determinación de la τ experimental del HAFS y modelo de flujo actual

La figura 2 muestra la curva de distribución de tiempo de residencia realizada luego de 28 meses de construido el humedal, en octubre de 2012. A partir del análisis de la misma se obtuvo un t_M de 11.7 días.

Comparando la curva E_θ obtenida (figura 2) y las curvas E_θ de reactores no ideales (Levenspiel, 2002), se pudo ver la similitud de ésta con la curva E_θ correspondiente a reactores con “flujo en caminos paralelos”. Advirtiendo esta similitud y observando en la curva E_θ obtenida la existencia de dos picos acampanados, se propone un modelo hidrodinámico para el humedal en estudio, formado por dos RFP con dispersión en paralelo. El primer pico de la curva da indicios de un RFP con flujo más rápido y, por su menor altura, una menor fracción de flujo respecto al

segundo RFP más lento. Se propuso que cada uno de los RFP pueda ser representando por una función de distribución normal ($f1(\theta)$ y $f2(\theta)$), caracterizada por sus parámetros *media* (que representarían el tiempo de residencia normalizado de cada reactor) y *desviación estándar* (que representaría la dispersión de cada uno de éstos). Se propuso que la suma ponderada de $f1(\theta)$ y $f2(\theta)$, según la fracción de flujo, dé como resultado una función $f(\theta)$ (ecuación (8)):

$$a f1(\theta) + b f2(\theta) = f(\theta) \quad (8)$$

con a y b , factores de ponderación de las funciones $f1(\theta)$ y $f2(\theta)$, respectivamente. Por último, se hace uso de la herramienta *Solver* de Excel para optimizar los parámetros de $f1(\theta)$ y $f2(\theta)$, a fin de obtener la mayor correlación (R^2) entre la función $f(\theta)$ y la curva E_θ del humedal (figura 3). Los parámetros de $f1(\theta)$ y $f2(\theta)$ buscados fueron los tiempos medios de residencia θ_1 y θ_2

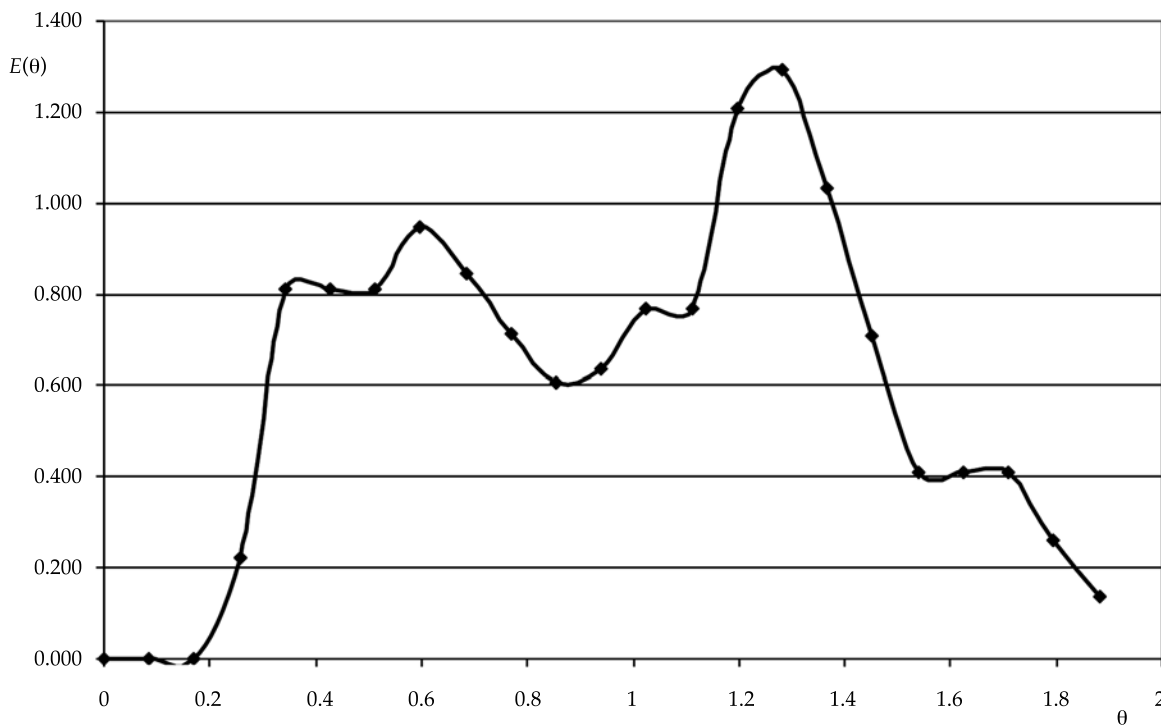


Figura 2. Curva E normalizada obtenida luego de 28 meses de construido el humedal.

(ecuaciones (9a) y (9b)), y desviaciones estándar $\sigma_{\theta 1}$ y $\sigma_{\theta 2}$ (ecuaciones (10a) y (10b)).

$$\theta_1 = \frac{t_{M1}}{t_M} \quad (9a)$$

$$\theta_2 = \frac{t_{M2}}{t_M} \quad (9b)$$

$$\sigma_{\theta 1} = \sqrt{2 \frac{D_1}{u_1 L}} \quad (10a)$$

$$\sigma_{\theta 2} = \sqrt{2 \frac{D_2}{u_2 L}} \quad (10b)$$

siendo D el coeficiente de dispersión longitudinal, u la velocidad media de flujo y L la longitud del reactor.

Para el modelo mencionado de dos RFP con dispersión en paralelo se obtuvo un θ_1 de 0.550 y un módulo de dispersión ($D/\mu l$) de 0.194 para el primer RFP y la fracción de flujo (parámetro a de la ecuación (8)) de 0.400; mientras que para el segundo RFP, el θ_2 obtenido fue de 1.257; el módulo de dispersión ($D/\mu l$) de 0.246 y la fracción de flujo (parámetro b de la ecuación (8)) de 0.600. El valor de R^2 encontrado en la optimización fue de 0.896, indicando una muy buena correlación entre la función $f(\theta)$ y la curva E_θ del humedal.

Evaluación cinética. Determinación de la constante de reacción k para remoción de DBO_5

Con el tiempo de residencia medio experimental (11.7d) y la ecuación (1) se calculó la constante cinética, utilizando las concentraciones de DBO_5 afluente y DBO_5 efluente medidas entre septiembre de 2011 y mayo de 2012. Con los valores

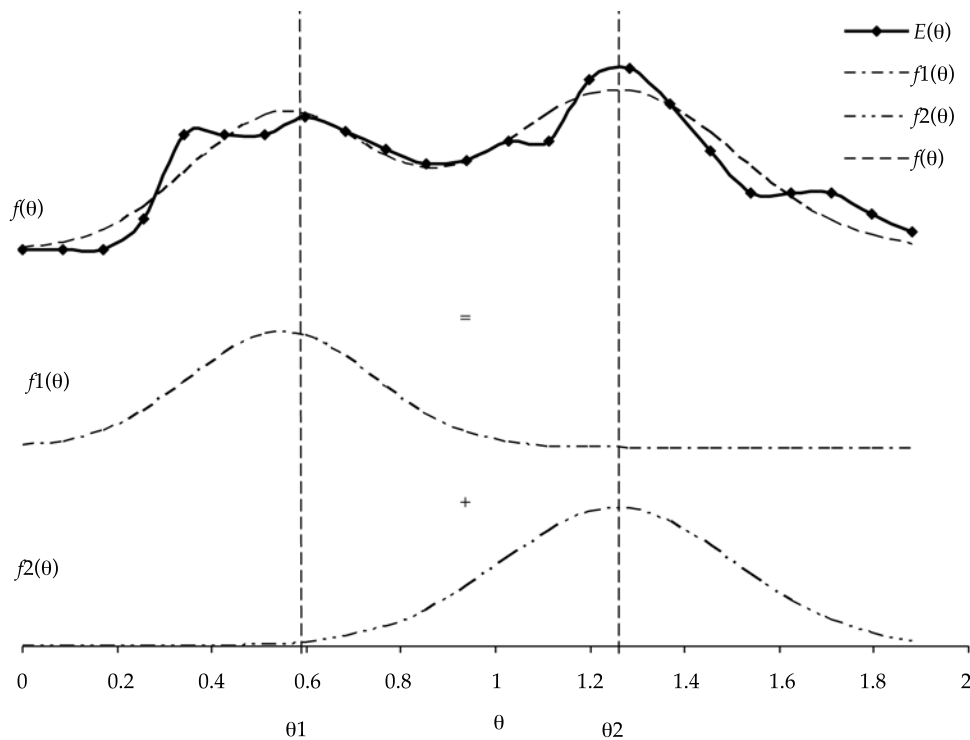


Figura 3. Modelo para evaluar la hidrodinámica del humedal; $f_1(\theta)$ y $f_2(\theta)$: funciones de distribución normal que representan los RFP del modelo; θ_1 y θ_2 : tiempos de residencia normalizados para los RFP.

de k calculados se determinó un valor promedio y se calculó la DBO_5 teórica del efluente, para determinar si este promedio puede representar el conjunto; caso contrario, se eliminan los valores con grandes desviaciones respecto al resto (cuadro 1).

Se descartaron las determinaciones correspondientes al mes 15 (septiembre de 2011) por introducir una diferencia mayor a 25% entre la DBO_5 efluente medida y la estimada con el promedio de k . Por lo tanto, se determinó como constante de reacción k para la remoción de DBO_5 el promedio de las k calculadas para los meses 18, 21 y 23. Este valor resultó en $k = 0.115$ 1/d.

Programa de simulación del HFSSH

Las figuras 4 y 5 muestran la interfaz visual del software de simulación. Los rangos que admite el programa de simulación son los siguientes: un volumen de la celda ($L * W * h$) de 0 a 16 m^3 ; una porosidad (ϵ) de 0.3 a 0.6; un caudal diario (v) de 0 a 1 m^3/d ; DBO_5 afluente de 0 a 400 $mg O_2/l$, y lluvias de 0 a 60 mm/d . Cabe destacar que el modelo sólo puede utilizarse en humedales que empleen para la remoción *Cortaderia selloana*, ya que ésta define la cinética del sistema y que el mismo no contempla variaciones de la remoción con la temperatura. Sin embargo, se podría hacer extensivo a otra vegetación (con

Cuadro 1. Determinación de la constante k para remoción de DBO_5 .

Edad del humedal	Fecha	DBO_5 afluente (mg/l)	DBO_5 efluente (mg/l)	k (1/d)	DBO_5 efluente teórica con $k = 0.105$ 1/d (mg/l)	DBO_5 efluente teórica con $k = 0.115$ 1/d (mg/l)
15 meses	Sep. 2011	162.8	66.6	0.076	47.5	-
18 meses	Dic. 2011	147.5	39.93	0.112	43.0	38.4
21 meses	Marzo 2012	92	24	0.115	26.8	24.0
23 meses	Mayo 2012	90.4	22.6	0.118	26.4	23.5

$k = 0.105$ 1/d, valor promedio de k considerando todas las determinaciones realizadas.

$k = 0.115$ 1/d, valor promedio de k eliminando las determinaciones realizadas en el mes 15 (septiembre de 2011).

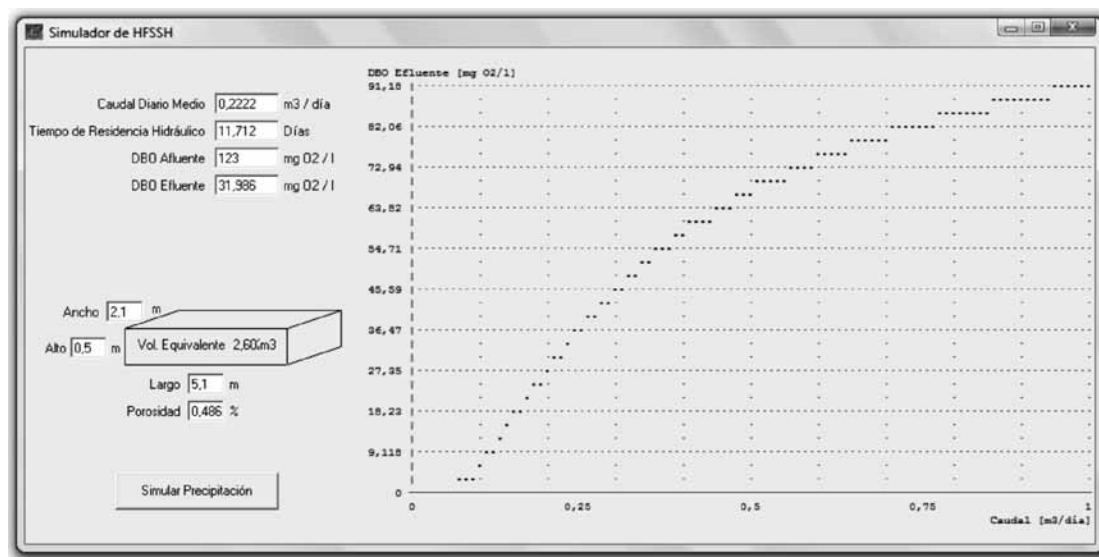


Figura 4. Simulación de la variación de DBO_5 del efluente en función del caudal.

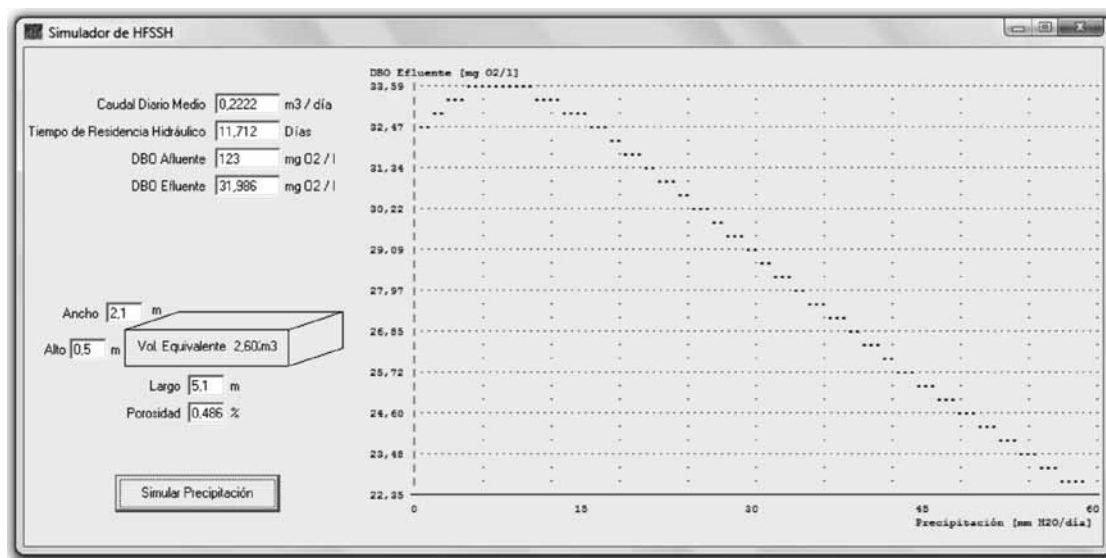


Figura 5. Simulación de la variación de DBO₅ del efluente en función de precipitaciones.

otros valores de k) y contemplar la variación con la temperatura, introduciendo las variables correspondientes al programa.

Evaluación de situaciones hipotéticas del HFSSH en estudio

El límite máximo de DBO₅ efluente para la calidad de las aguas residuales para descarga a cursos de agua superficial, según las "Normas para la protección de los recursos hídricos superficiales y subterráneos de la provincia de Córdoba – Decreto Provincial 415/99" es de 30 mg O₂/l. Para el sistema actual de volumen ($LWh = 5.1 \times 2.1 \times 0.5$) de 5.355 m³; $\epsilon = 0.486$; $v = 0.22$ m³/d; DBO₅ afluente = 123 mg O₂/l y, en ausencia de lluvias, las simulaciones dan un DBO₅ efluente de 32 mg O₂/l, y no sería apto para descarga directa a un cuerpo de agua superficial. Se simuló situaciones variando cada una de estas variables para establecer los límites admisibles.

Con precipitaciones

La figura 6 muestra la variación de DBO₅ efluente simulado para diferentes situaciones de lluvia

(mm de lluvia) para el humedal en estudio. El agua aportada por la lluvia tiene dos efectos encontrados en el sistema: a) un efecto desfavorable, pues disminuye el tiempo de residencia y así la remoción de materia orgánica, aumentando el DBO₅ efluente; y b) un efecto favorable, ya que disminuye la DBO₅ afluente aparente en situaciones de lluvia (ecuación (7)) por un efecto de dilución, disminuyendo la DBO₅ efluente. El primer efecto se observa hasta valores de precipitaciones de hasta 18 mm de lluvia; sin embargo, se observa que el efecto de la dilución prioriza a partir de ese valor, obteniéndose un efluente con una DBO₅ menor que los días sin lluvia.

Con variación de DBO afluente

La figura 7 muestra la simulación realizada, variando la DBO₅ afluente y manteniendo constante el resto de las variables (volumen de 5.355 m³; $\epsilon = 0.486$; $v = 0.22$ m³/d) y ausencia de precipitaciones. El valor máximo de DBO₅ afluente admitido es de 115 mg O₂/l, para cumplir con el nivel de DBO₅ que exige el Decreto 415-99 de 30 mg O₂/l, para descarga a embalse (criterio para el cual fue diseñado el humedal).

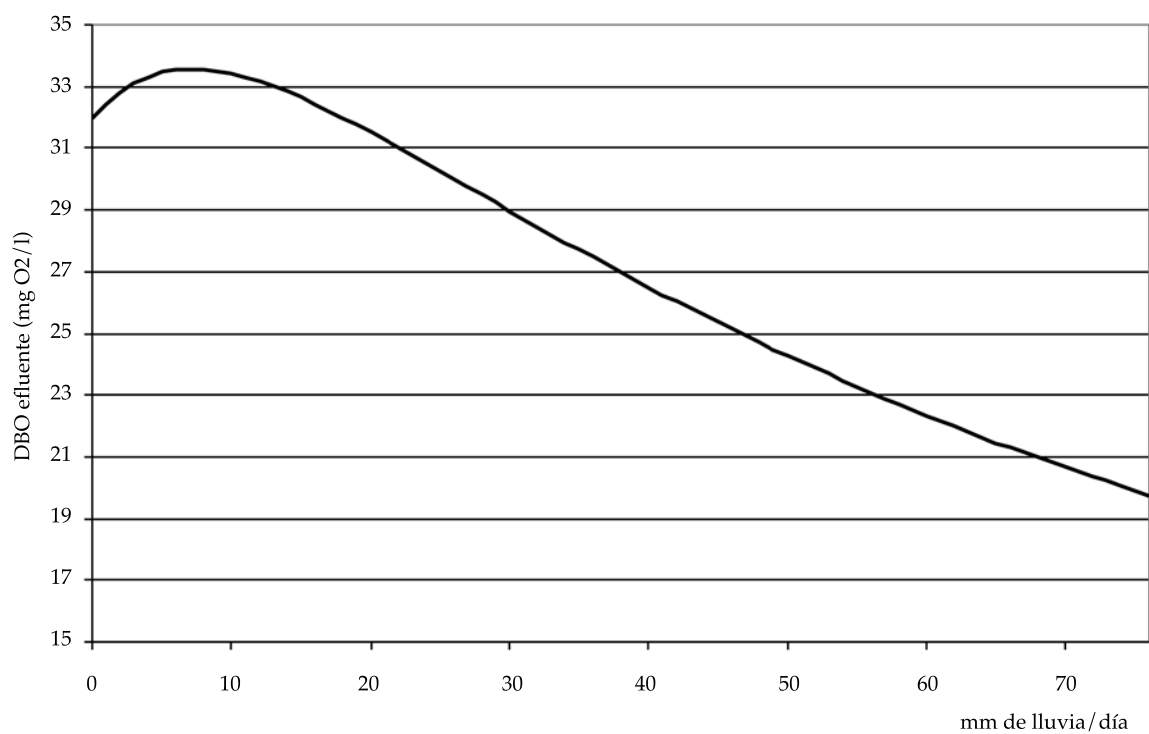


Figura 6. Simulación de la variación de la DBO₅ del efluente en función de las precipitaciones.

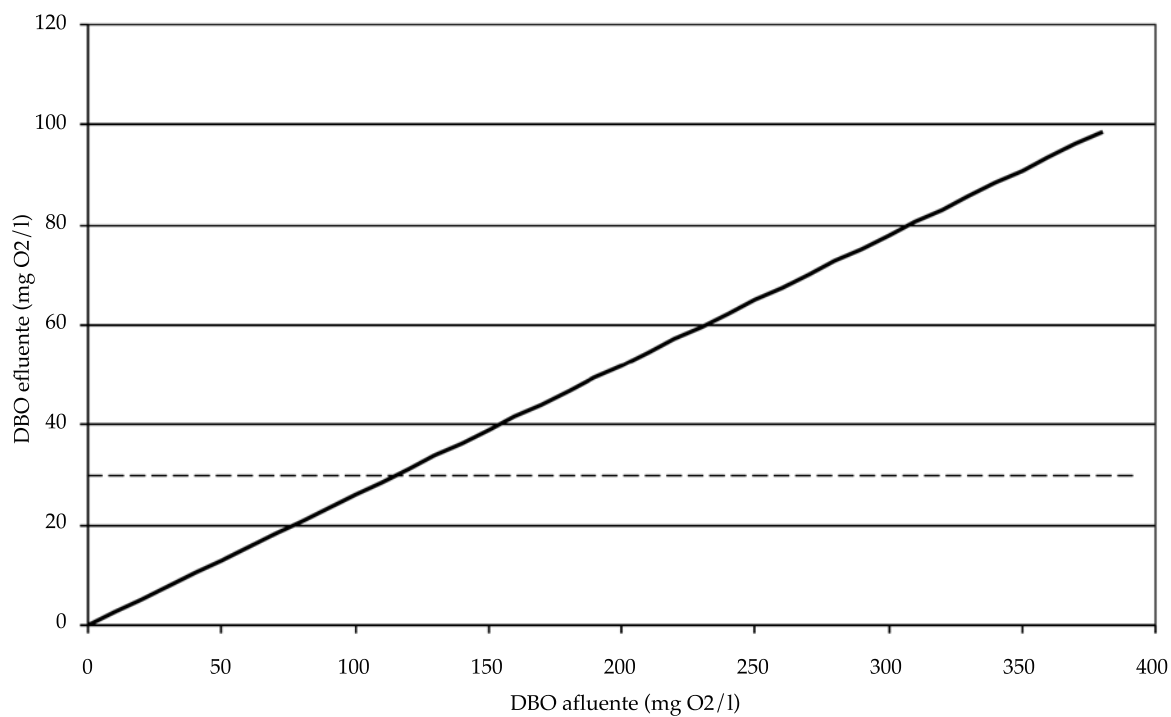


Figura 7. Simulación de la variación de DBO₅ del efluente en función de la DBO₅ del afluente.

Con variación del caudal para diferentes DBO_5 afluente

La figura 8 ilustra la variación de la DBO_5 efluente en función del caudal diario v en caso de: a) mantenerse la DBO_5 afluente promedio; b) incrementarse en un 50%, y c) verse reducida un 50% para el humedal en estudio (volumen de 5.355 m^3 ; $\varepsilon = 0.486$) y en ausencia de precipitaciones. En la figura 8 se observa que a medida que aumenta el caudal del afluente manteniendo su DBO_5 constante, disminuye el tiempo de residencia y, por ende, baja la remoción de materia orgánica. Al variar la DBO_5 afluente, manteniendo el caudal constante, se ve afectada la DBO_5 efluente de igual manera, observándose que a mayores valores de DBO_5 afluente mayor es la DBO_5 efluente y cuanto menor es la DBO_5 en el afluente, menor en el efluente, como es de esperar. Se observa también que para cumplir con el nivel de DBO_5 efluente de $30 \text{ mgO}_2/\text{l}$ que exige el Decreto 415-99 para una concentración

de DBO afluente de $123 \text{ mgO}_2/\text{l}$, el valor máximo de caudal de entrada admitido es de $0.2123 \text{ m}^3/\text{d}$; para DBO afluente de $185.4 \text{ mgO}_2/\text{l}$ es de $0.1647 \text{ m}^3/\text{d}$, y para DBO afluente de $61.5 \text{ mgO}_2/\text{l}$ es de $0.4169 \text{ m}^3/\text{d}$.

Conclusiones

Mediante la evaluación hidrodinámica se detectó que el sistema en estudio modificó el comportamiento de flujo pistón ideal y evolucionó hacia un modelo de dos reactores flujo pistón con dispersión en paralelo. Como se esperaba, el sistema ya en funcionamiento se alejó del modelo ideal, pues a través del tiempo se produce una variación del volumen efectivo del humedal y cambio en su morfología debido a poros ocupados por raíces de la vegetación y acumulación de sólidos, asentamiento de la grava y depresiones en el suelo por el peso de la celda, entre otros. Este sistema con canalizaciones, semejante a dos reactores de flujo pistón en

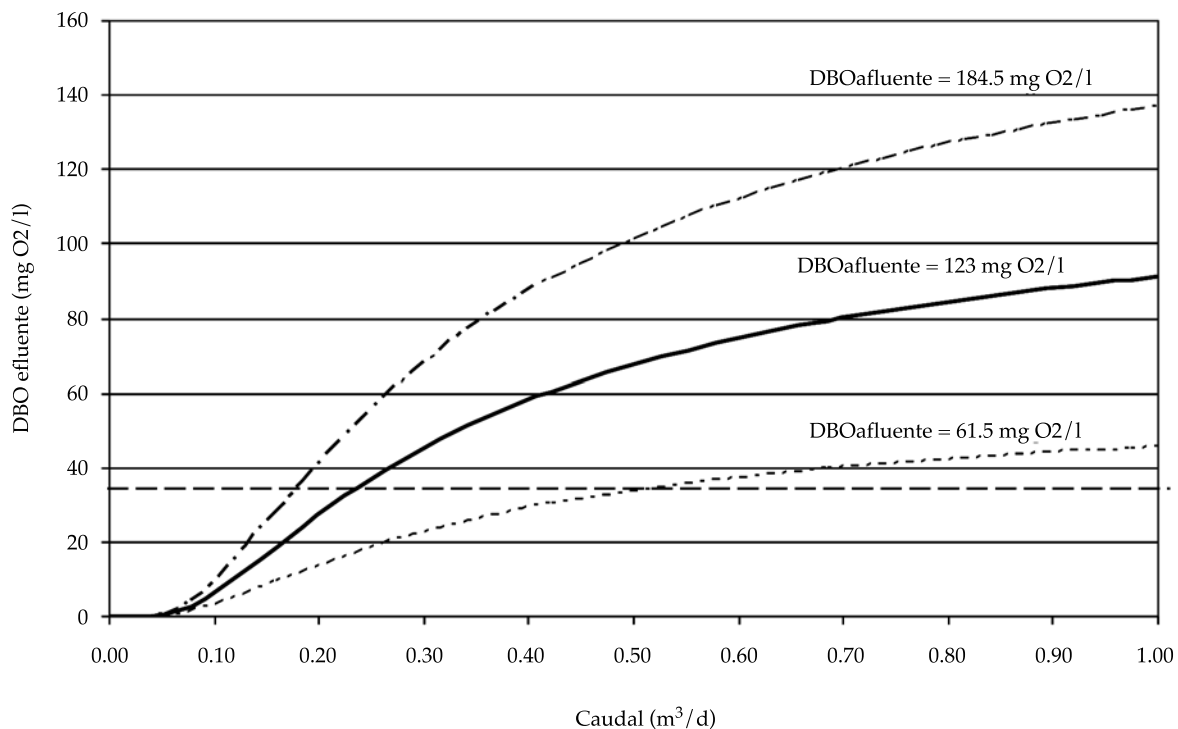


Figura 8. Variación de DBO_5 efluente en función del caudal v , para tres DBO_5 afluente.

paralelo con dispersión, se ajustó a un modelo Gaussiano.

El cálculo de la constante cinética, tomando como modelo el RFP y las concentraciones de DBO_5 de la entrada y salida del humedal real, dio como resultado una $k = 0.115 \text{ d}^{-1}$, aproximadamente siete veces menor a la constante utilizada para el diseño. Es decir, la eficiencia de remoción no coincidió con la supuesta al inicio para el diseño, tomada de la bibliografía.

Estos dos factores, la modificación del comportamiento hidrodinámico y el cálculo de la constante cinética *real* de cada humedal, resaltan la importancia de llevar a cabo estudios con sistemas a escalas reales y evaluarlos a través del tiempo.

Si bien esta constante fue calculada mediante el modelo de flujo pistón ideal, es de gran utilidad para simular y evaluar los resultados en cuanto a la carga de materia orgánica en el efluente, factor primordial a controlar en efluentes cloacales que descargan a cuerpos de agua superficiales. La simulación permitió conocer a priori la concentración de materia orgánica del efluente del humedal para situaciones de interés, establecer los caudales y concentraciones de DBO_5 del afluente que puede tratar este humedal, así como el nivel de precipitaciones aceptables para el mismo, cumpliendo con los límites admisibles de la normativa local.

Abreviaturas

RFP:	reactor flujo pistón.
HFS:	humedal de flujo superficial.
HFSS:	humedal de flujo subsuperficial.
HFSSH:	humedal de flujo subsuperficial horizontal.
HFSSV:	humedal de flujo subsuperficial vertical.
DBO_5 efluente:	concentración de demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) en el efluente.
DBO_5 afluente:	concentración de demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) en el afluente.
k :	constante de velocidad cinética.

τ :	tiempo de retención hidráulica.
L :	largo del humedal.
W :	ancho del humedal.
h :	profundidad del humedal.
ε :	porosidad del lecho.
v :	caudal volumétrico de efluente.
DIPAS:	Dirección Provincial de Agua y Saneamiento.
DTR:	Distribución de Tiempos de Residencia.
t_M :	tiempo de retención hidráulico medio.
E_θ :	curva E normalizada.
t_i :	tiempo i .
C_i :	concentración de sal obtenidos en el tiempo i .
θ :	tiempo normalizado.
APHA:	American Public Health Association.
DBO_5 afluente aparente:	DBO_5 que tendría el afluente si se diluyera con el agua aportada por la lluvia diariamente.
$f1(\theta)$, $f2(\theta)$:	funciones de distribución normal de los dos RFP con dispersión en paralelo.
a , b :	fracciones de flujo de los RFP 1 y 2 en paralelo, respectivamente.
$f(\theta)$:	función f .
θ_1 , θ_2 :	tiempos medios de residencia de los RFP 1 y 2 en paralelo, respectivamente.
$\sigma_{\theta 1}$, $\sigma_{\theta 2}$:	desviaciones estándar de los RFP 1 y 2 en paralelo, respectivamente.
D :	coeficiente de dispersión longitudinal.
u :	velocidad media de flujo.
$D/\mu l$:	módulo de dispersión.

Agradecimientos

Al personal del Laboratorio de Hidráulica, en especial a su director, ingeniero Gerardo Hillman, por ofrecernos el espacio físico para llevar a cabo esta experiencia y facilitarnos los materiales necesarios.

Referencias

- APHA, AWWA, WEF (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (21th Ed.).

- Washington, DC: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. F., & Andrade, M. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Cochabamba, Bolivia: Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro Agua).
- DIPAS (1999). *Normas para la protección de los recursos hídricos superficiales y subterráneos de la provincia de Córdoba – Decreto Provincial 415/99*. Córdoba, Argentina: Dirección Provincial de Agua y Saneamiento.
- Francia, P. D., Camarena, E. A., & Guzmán, A. J. (2002). *Análisis de ecuaciones para la predicción de la reducción de la DBO₅ en el tratamiento de aguas residuales mediante pantanos artificiales de flujo subsuperficial*. México, DF: Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, AIDIS.
- Hincapié-Marín, D. (2007). *Cinética e hidrodinámica aplicadas, en condiciones ambientales locales, a humedales de flujo subsuperficial a escala piloto*. Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Kadlec, R. H. (2003). Effects of Pollutant Speciation in Treatment Wetland Design. *Ecological Engineering*, 20(1), 1-16.
- Lara-Borrero, J. A. (1999). *Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales*. Trabajo final. Master en Ingeniería y Gestión Ambiental. Barcelona: Instituto Catalán de Tecnología, Universidad de Politécnica de Cataluña.
- Levenspiel, O. (2002). Ingeniería de las reacciones químicas (p. 638) (2a Ed.). Barcelona: Ed. Reverté.
- Nadal, F. (2010). *Propuestas de sistemas de remediación sanitaria para localidades serranas: caso Potrero de Garay*. Proyecto final integrador de grado. Córdoba, Argentina: Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba.
- Nadal, A. F., Larrosa, N., Alasino, N., Gutiérrez, C., Severini, H., & Hillman, G. (2012). Propuestas de sistemas de remediación sanitaria para Potrero de Garay, Córdoba, Argentina (p. 39). *Libro de resúmenes del Primer Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos*, Buenos Aires, Argentina.
- Ramallo, R. S. (1996). *Tratamiento de aguas residuales* (p. 705). Barcelona: Ed. Reverté, S.A.
- Reed, S., Miledlebrooks, J., & Crites, R. (1995). *Natural Systems for Waste Management and Treatment* (p. 433) (2th Ed.). New York: McGraw Hill.
- Vymazal, J. (January, 2009). The Use Constructed Wetlands whit Horizontal Sub-surface Flow for Various Types of Wastewater. *Ecological Engineering*, 35(1), 1-17.
- Woodard and Curran, Inc. (2011). *Industrial Waste Treatment Handbook* (2nd Ed.). Waltham, USA: Butterworth-Heinemann Ed.

Dirección institucional de los autores

Dra. Noelia Alasino
M.C. Florencia Nadal
Ing. Laura Primo
Ing. Pablo Bollo
M.C. Nancy Larrosa

Universidad Nacional de Córdoba
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Av. Vélez Sarsfield 1611
Ciudad Universitaria
5000 Córdoba, ARGENTINA
Teléfonos: +54 (351) 5353 800, int. 29783, 4682 781 y 4333 078
nalasino@efn.uncor.edu
anadal@ina.gov.ar
lauvep@gmail.com
pablo85@gmail.com
nlarrosa@efn.uncor.edu