

## Determination of the mean hydraulic retention time at the constructed horizontal flow wetlands using a chemical tracer

Gabriela Ferrer<sup>1</sup>, Claudia Morán<sup>1</sup>, Gerardo Aldana<sup>1</sup>, Jhonny Pérez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigaciones del Agua (CIA), Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia.

<sup>2</sup>Universidad de la Goajira, Colombia. gmfs2109@hotmail.com, gerardoaldana\_21@hotmail.com

### Abstract

Constructed wetland usually has two phases as liquid and solid. Mean hydraulic retention time MHRT is suppose delaying by the solid phase. Aim of this study was to know the flow pattern and phases contribution at the hydraulic efficiency using tracer technique as LiCl for two constructed horizontal wetland superficial flow CHWSF at pilot scale. Walls were made with concrete and the bed was settled up with gravel and sand. Tracer was injected as impulse signal at the same time in both wetlands 1 and 2. Methodology was figured out recollecting samples at the effluent for a time series and then it were analyzed at the lab with an atomic absorption spectrometer. Sampling was done for three studies. 1. CHWSF vegetation less. 2. CHWSF submerges influent and 3. CHWSF vegetation growths. The results showed that MHRT values were nearly and similar for all studies such 2,70-1,38-1,33h and 2,84-0,98-1,09h for the wetland 1 and 2, respectively. Tracer recovery mass was varying in a range from 90 to 55% in both. Dispersion number (d) was varying a range between 0,42 to 0,30 for wetland 1, and 0,38 to 0,20 to wetland 2, flow pattern found was pointed out to a dispersed flow to all cases less vegetation growths. Vegetation was promoting either more axial dispersion or less hydraulic efficiency.

**Keywords:** constructed wetland, tracer, hydraulic efficiency, flow pattern.

## Determinación del tiempo retención hidráulico en humedales construidos de flujo horizontal usando un trazador químico

### Resumen

Humedales construidos usualmente tienen dos fases líquida y sólida. Se supone que el tiempo de retención hidráulico TRH experimental es retrasado por la fase sólida. El ánimo de este estudio fue conocer el patrón de flujo y que factores contribuyen en la eficiencia hidráulica, utilizando la técnica de un trazador LiCl en dos humedales construidos de flujo superficial horizontal HCSH a escala piloto. Las paredes fueron construidas en concreto y el lecho fue de grava y arena. El trazador fue inyectado como una señal impulso al mismo tiempo en ambos humedales 1 y 2. La metodología consistió en recolectar las muestras del efluente por un período de tiempo y la concentración de Litio fue analizada mediante la técnica de espectrofotometría de absorción atómica. El análisis de las muestras se realizó en tres etapas: I flujo horizontal sin plantas, II afluentes sumergidos y III con humedales plantados. Los resultados indicaron que el tiempo de retención hidráulico (TRH), tuvo una tendencia similar en el comportamiento del sistema de los humedales para las tres etapas (TRH=2,70-1,38-1,33h) para el humedal 1 y de 2,84-0,98-1,09h para el humedal 2 en las etapas I, II, III respectivamente. El porcentaje de recuperación del trazador varió entre 55% al 90%. El número de dispersión varió en un rango entre 0,42 a 0,30 para el humedal 1 y de 0,38 a

0,20 para el humedal 2, se encontró que el patrón de flujo fue disperso para todos los casos a excepción del plantado. La vegetación resultó que incrementa la dispersión axial y disminuye la eficiencia hidráulica.

**Palabras clave:** humedal construido, trazador, eficiencia hidráulica, patrón de flujo.

## Introducción

Actualmente existen diferentes tipos de tratamiento de aguas residuales ya sean físicos, químicos y biológicos o una combinación de estos [1] incluyendo la sedimentación, precipitación adsorción entre otros [2]. Dentro de los sistemas de tratamientos físicos existentes los humedales construidos pertenecen a las nuevas tecnologías no convencionales. Son zonas de tierras, generalmente planas, en las que la superficie se inunda de forma permanente al cubrirse regularmente de líquido, el suelo se satura, quedando desprovisto de oxígeno y dando lugar a un ecosistema híbrido entre los acuáticos y los terrestres [3]. Son sistemas donde los contaminantes presentes en las aguas residuales son removidos por una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que se efectúan en el ambiente natural [4,5]. La depuración de las aguas residuales en los humedales construidos se lleva a cabo, fundamentalmente, por la presencia de diversas poblaciones adheridas; tanto a la superficie de las plantas, [6] como al medio de soporte (arena). Debido a que el medio poroso brinda mayor área superficial para el crecimiento de los microorganismos la velocidad de remoción en los sistemas con flujo subsuperficial es mayor [7].

Se han utilizado una gran variedad de plantas entre las que predominan las plantas flotantes, emergentes y sumergidas siendo las eneas (*Typha* sp.), la caña o junquillo (*Phragmites communies*), los juncos (*Juncus* sp.), (*Scirpus* sp.) y (*Carex* sp.) [5] las más utilizadas. Las plantas incorporan a los humedales materiales orgánicos como el sedimento y los restos vegetales; éstos últimos se acumulan en la arena, grava y roca debido a la baja velocidad del agua (<10 mm/s) [8-10]. La permeabilidad del suelo (0,03 para la arena) [6] afecta el movimiento del agua a través del humedal, muchas transformaciones químicas y biológicas tienen lugar en el suelo [6]. El agua fluye por encima de la superficie del suelo en el cual ocurre la mayor actividad microbiana asociada a la capa de detri-

tos depositada [11]. Los suelos con algún contenido (10 cm de espesor) de arena son muy efectivos en la remoción de fósforo [12, 13].

Se ha analizado el papel de la vegetación (*Typha latifolia*) en dichos humedales. Álvarez y Becares [14], confirmaron en estudios previos [15] con referencia al efecto positivo de la vegetación sobre la eliminación de los contaminantes en aguas residuales diluidas. Los trazadores se clasifican en: trazadores no conservativos, trazadores conservativos, trazadores radiactivos [16]. El uso de trazadores en sistemas de tratamiento de aguas residuales se basa en colorantes tal como: rhodamina WT, sustancias radioactivas tal como agua tritiada e iones como  $\text{Li}^+$  que pueden inyectarse en la entrada de la unidad de forma simultánea, así como también estudios realizados por [16] sobre la evaluación del comportamiento hidráulico de reactores Anaerobios de Flujo Ascendente UASB por medio del uso del trazador (LiCl) siguiendo la metodología descrita por [17], y utilizando la técnica de espectrofotometría de absorción atómica se determinaron las curvas de distribución de edad del trazador o curva E, obteniéndose que los TRH experimental del reactor fueron menores a los TRT teórico, y varios picos de máxima concentración presentando cortos circuitos.

Otras investigaciones [18, 19] discutieron el desempeño de un humedal construido de flujo subsuperficial basado en comportamientos hidráulicos usando un trazador químico (rhodamina WT, Rhodamina B y NaCl). El objetivo de este estudio fue utilizar un trazador de LiCl para calcular los tiempos hidráulicos experimentales, número de dispersión y el efecto de las plantas y flujo sumergido en humedales construidos.

## Bases teóricas

**Cálculo del tiempo de retención hidráulico TRH y la curva de distribución de edad del trazador en los humedales construidos de flujo superficial [17]:** Inicialmente se estimula el sistema (humedal) con una sustancia inerte a él,

esta se conoce como trazador para este caso el LiCl, posteriormente se espera la respuesta al estímulo, los datos obtenidos son la concentración de la sustancia de Li a través del tiempo, las ecuaciones utilizadas en función respuesta del trazador son las siguientes:

$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i x \Delta t x t_i}{\sum_{i=1}^n C_i x \Delta t} \quad (1)$$

$$E(t) = \frac{C_i}{\sum_{i=1}^n C_i x \Delta t} \quad (2)$$

donde:

$C_i$  = concentración del Li en un intervalo de tiempo (mg/L).

$\Delta t$  = intervalo de tiempo de medición (min)

$t_i$  = tiempo (min).

$E(t)$  = concentración acumulada de Li (mg/L)

Cálculo de la eficiencia hidráulica EH en los humedales construidos de flujo superficial.

La eficiencia hidráulica para sistemas de tratamientos: lagunas, RAFA y humedales o cualquier otro se calcula a través de la siguiente ecuación [17]:

$$EH = \frac{TRH}{TRT} \quad (3)$$

donde:

$TRH$  = tiempo de retención hidráulico experimental en cada fase de la investigación (min).

$TRT$  = tiempo de retención teórico de los humedales (min).

**Cálculo del número de dispersión por [15] en los humedales construidos de flujo superficial.** El grado de dispersión del flujo, se puede cuantificar por medio del coeficiente de dispersión  $D$  y el número de dispersión  $d = \frac{D}{\mu L}$  y la varianza  $\sigma$  [17]. Según la ecuación

$$\sigma t^2 = \frac{\sigma^2}{t^2} = 2 \left( \frac{D}{\mu L} \right) \quad \text{o bien} \quad \sigma^2 = 2 \left( \frac{DL}{\mu^3} \right) \quad (4)$$

donde:

$D$  = coeficiente de dispersión axial o longitudinal ( $m^2/h$ )

$\mu$  = velocidad media del flujo (m/h).

$L$  = largo del reactor (m)

$t$  = tiempo de retención hidráulico experimental TRH (h).

$\sigma t^2$  = varianza adimensional

Un valor de  $\frac{D}{\mu L}$  alto, significa una dispersión rápida del trazador, indicando presencia de flujo mezclado ( $\frac{D}{\mu L} > 0,01$ ). Un valor de  $\frac{D}{\mu L}$  bajo,

significa una dispersión lenta ( $\frac{D}{\mu L} < 0,01$ ).

**Obtención del número de dispersión por la carta de Yánez citado por [9]:** Se puede leer entrando con la varianza adimensional ( $\sigma t^2$ ) en la grafica de Yánez citado por [9], el número de dispersión ( $d$ ) es leído en la abscisa  $x$  y se divide en 3 áreas:

1. Linealidad dentro de un rango de ( $\sigma t^2$ ) de (0-0,3) con un ( $d < 0,2$ ) el cual describe un comportamiento de flujo pistón FP.

2. Comportamiento ascendente dentro de un rango de ( $\sigma t^2$ ) de (0,3-0,9) con un ( $d < 2,5$ ) el cual describe un comportamiento de flujo parcialmente disperso FD.

3. Comportamiento continuo que tiende a un valor finito de un rango de ( $\sigma t^2$ ) de (0,9-1,0) con un ( $d < 5$ ) el cual describe un comportamiento de flujo mezclado MC. Cuando el valor de  $\sigma t^2$  es  $> 1$  no se puede leer el valor del número de dispersión en la carta, siendo una limitante del método.

## Materiales y métodos

Los humedales hacen parte de un sistema de tratamiento es decir que son usados como postratamiento o tratamiento terciario. Se colocó en funcionamiento dos humedales construidos a escala piloto los cuales se encuentran ubicados dentro de las instalaciones del Centro de investigaciones del agua (CIA) de la ciudad de Maracaibo, Venezuela y forma parte de un tratamiento terciario para tratar aguas municipales provenientes de un sistema de lagunas de estabiliza-

ción, ver Figura 1. El sistema experimental de humedales ya estaba construido por dos celdas de flujo superficial compuesta por dos fases líquida y sólida. El sistema fue alimentado por gravedad, en forma continua desde un tanque circular de fibra de vidrio de 1m<sup>3</sup> y 1,27m de diámetro ubicado a 1,5m desde el nivel de la tubería de entrada a las celdas, el cual recibía el efluente de la laguna de maduración B3, a través de un sistema de bombeo. El caudal fue controlado por las válvulas ubicadas en la tubería de entrada para cada celda. El sistema de bombeo estuvo compuesto por dos bombas de ½ HP, las cuales funcionan las 24 horas alternadamente, las tuberías de succión del efluente de la laguna B3 estuvieron compuestas por filtros compuestos por maracas hechas por filtros de tuberías de PVC de 22cm diámetro agujerados y envueltos en una malla debido que permiten la penetración de mayor cantidad de líquido. El mantenimiento de las maracas se realizó cada cierto tiempo (semanal) dependiendo del estado de la laguna de maduración, pero se realizaba un chequeo diario para observar su funcionamiento. Las dimensiones de diseño de los humedales se observa en la Tabla 1.

Los humedales estuvieron compuestos por un soporte de tierra proveniente de la planicie de Maracaibo y 0,09m de lámina de agua.

En la zona de los afluentes de cada celda se colocaron piedras para disipar la energía y favorecer la distribución del flujo en la entrada del humedal, en la salida se colocaron piedras de mayor diámetro para lograr intersticios de mayor tamaño que evitaran el taponamiento del lecho y facilitar la trayectoria del agua hacia el efluente. Las dimensiones de la base, largo, volumen de cada humedal se encuentran expresadas en la Figura 2. En la Tabla 1 se presenta un resumen de los parámetros hidráulicos de esta investigación donde se puede destacar, que los volúmenes no son iguales para ambos humedales, se consideró variable el volumen, en función de los niveles de la lámina de agua.

**Determinación del TRH en el humedal construido de flujo horizontal superficial:** Para la determinación del TRH experimental del humedal construido, se utilizó como trazador el cloruro de Litio LiCl, el cual fue inyectado de manera instantánea en ambos humedales usando un balón aforado de 500ml en el afluente con una concentración inicial de 5000mg/l.

Las muestras de agua residual con el trazador LiCl se tomaron en la zona de los efluentes, se preservaron con ácido nítrico garantizando un pH<7, mantenidas en refrigeración y digestadas, se analizaron las concentraciones de Litio en el

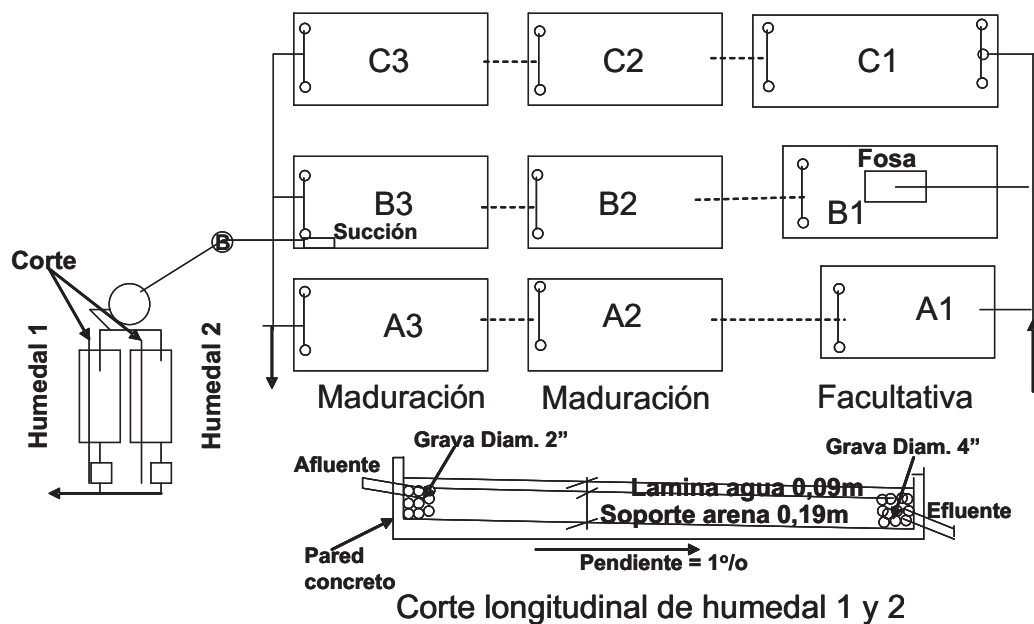


Figura 1. Sistema lagunas estabilización y humedales CIA, Maracaibo, Venezuela.

Tabla 1  
Parámetros hidráulicos y dimensionales para humedales 1 y 2 en las 3 etapas

Humedal 1		Humedal 2	
Medida	Valor	Medida	Valor
Volumen	3,17; 3,13; 1,93m <sup>3</sup>	Volumen	3,22; 1,93; 2,37m <sup>3</sup>
Caudal experimental	1,07; 2,20; 1,57m <sup>3</sup> /d	Caudal experimental	1,07; 1,57; 1,37m <sup>3</sup> /d
Tiempo Retención Teórico, TRT	2,96; 1,41; 1,22 días	Tiempo Retención Teórico, TRT	3,01; 1,21; 1,72.días
Base inferior	1,5m	Base inferior	1,5m
Base superior	3,3m	Base superior	3,3m
Profundidad de entrada	0,46m	Profundidad de entrada	0,46m
Largo superior	16,85m	Largo superior	16,85m
Largo inferior	15,5m	Largo inferior	15,5m
Taludes	2:1	Taludes	2:1
Columna de agua	0,083; 0,082; 0,072 m	Columna de agua	0,080; 0,062; 0,010m
Espesor de la capa de tierra	0,19m	Espesor de la capa de tierra	0,19m
Porosidad de la arena	0,03*	Porosidad de la arena	0,03

\*Fue tomado de [9] y fue calculado según el tipo de sustrato (arena).

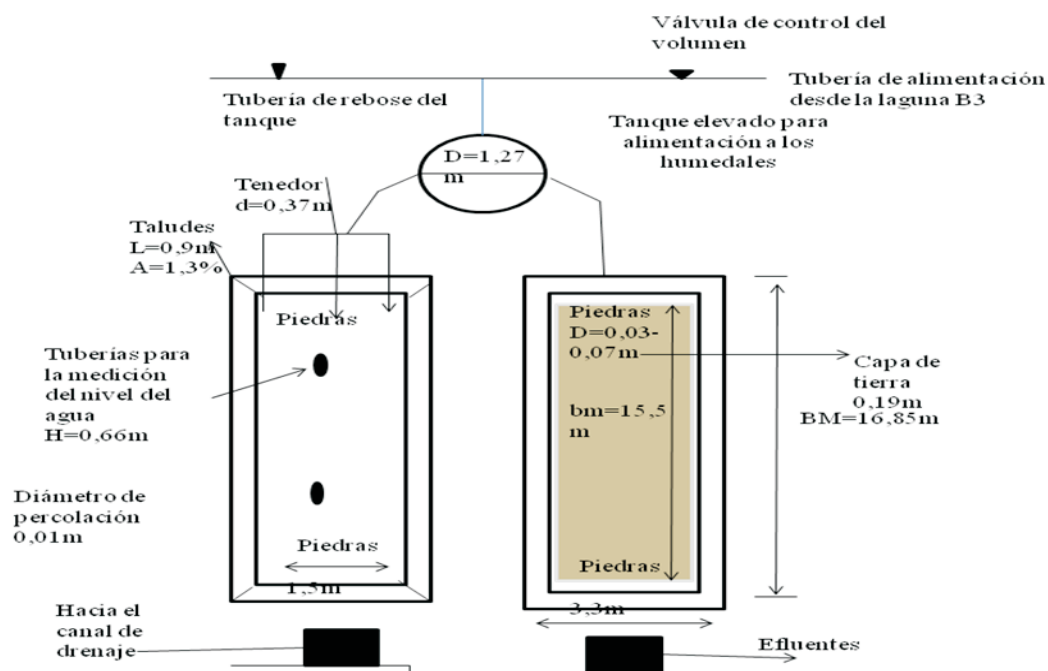


Figura 2. Distribución de los componentes del sistema experimental.

espectrofotómetro de absorción atómica con llama de acetileno.

El ensayo fue dividido en 3 etapas: flujo horizontal sin plantas, afluentes sumergidos y humedales plantados con *Typha Dominguensis*, el muestreo se realizó en intervalos de tiempo variables (1, 2 y 3h) espaciados en función de la inyección del trazador, durante aproximadamente entre 7 y 10 días equivalente a 4 veces el TRT teórico, tiempo estimado para garantizar la salida total del trazador del humedal; el cual fue calculado dividiendo el volumen entre el caudal promedio experimental medido dos veces por día en el afluente y efluente del humedal; las muestras fueron un total de 94 para cada etapa, analizadas simultáneamente luego de su recolección. Para la determinación del tipo de flujo en los humedales se llevó a cabo según la metodología descrita por Levenspiel [17], el análisis de la curva de Edad del trazador y el número de dispersión de Yáñez [9]. El número de dispersión fue obtenido con la varianza adimensional ( $\sigma t^2$ ) calculada bajo la curva del experimento, y luego entrando y cortando la curva de Yáñez.

### Resultados y discusión

En la etapa I flujo horizontal sin plantas el TRH experimental disminuyó un 9% entre el humedal 1 y humedal 2, la eficiencia hidráulica se

mantuvo sobre el 91%, siendo superior cuando se compara con tratamientos secundarios de lagunas < 55% [9], probablemente a que los humedales utilizan dos fases líquida y sólida. Las curvas de distribución de edad del trazador dieron muy similares para ambos humedales 1 y 2, los caudales experimentales fueron muy estables y presentaron poca variación valor promedio 1,07m<sup>3</sup>/d, ver Tabla 1, evidenciando la replicabilidad del experimento según se observa en la Figura 3. Los porcentajes de recuperación del trazador variaron en un rango entre 86-91% y las zonas muertas fueron menores del 8%. En esta etapa I los caudales fueron menores en comparación a las otras dos, a menor caudal mayor incremento del porcentaje de recuperación en el trazador [18].

En la etapa II con afluente sumergidos para el humedal 1 el TRH disminuyó un 4% entre humedal 1 y humedal 2. El caudal promedio fue la variable que reflejó más cambios dentro del comportamiento hidráulico del sistema siendo diferentes para ambos humedales 2,20 y 1,57 m<sup>3</sup>/d, respectivamente ver Tabla 2.

Probablemente debido a que al sumergir el afluente del humedal 1 la fase sólida por los intersticios produjo mucha variación en el caudal del efluente y aumento las zonas muertas entre 2% a 19%, donde se observó que el caudal promedio experimental en el humedal 1 fue el mayor de

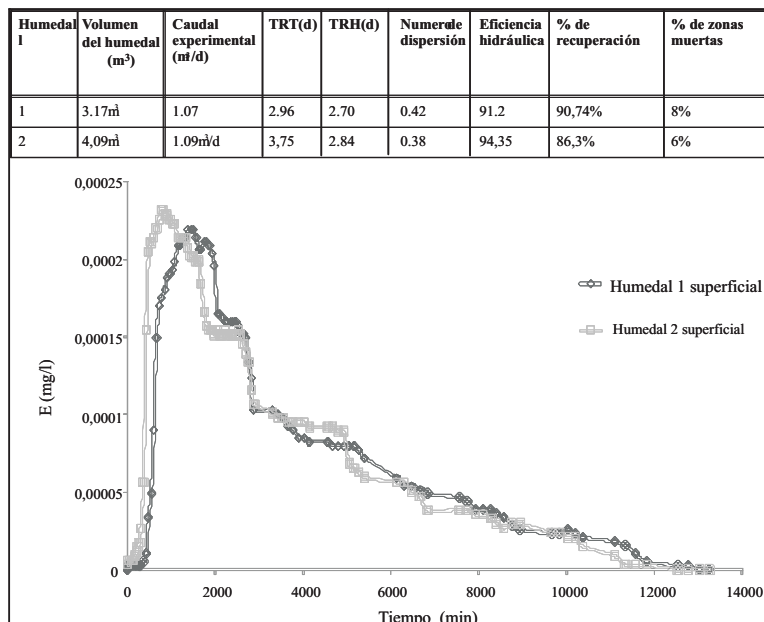


Figura 3. Curva de edad del trazador para los humedales 1 y 2 en la etapa I.



todos en las 3 etapas según se observa en la Tabla 1 y la Figura 4.

En la etapa III con plantas el humedal 2 el TRH disminuyó un 18% entre humedal 1 y humedal 2, siendo ésta diferencia la más alta reportada para todas las etapas, debido al flujo retrasado en el efluente originado por la fase sólida y las raíces en el humedal plantado por lo que resulta tener menor EH en comparación con los de afluentes sumergidos y los de flujo horizontal sin plantas, debido a que la lamina de agua disminuyó a 0,01m, por la presencia de las plantas, por lo tanto; la dispersión axial aumentó por la obstaculización de las raíces. Sin embargo, la

reproducibilidad del ensayo resulto muy eficiente según se observa en la Figura 5, a pesar que los caudales promedios experimentales estuvieron cercanos 1,57 y 1,37m<sup>3</sup>/d, respectivamente, ver Tabla 1.

El número de dispersión disminuyó levemente, presenciando un flujo pistón, mientras que para el humedal 1, aunque el número de dispersión disminuyó, mantuvo la tendencia a flujo disperso, se evidenció que las raíces de las plantas ejercieron un efecto de canalización dentro de la fase sólida, ya que disminuyó la lamina de agua superficial y el flujo disperso, por lo tanto aumentó la proporción de zonas muertas [18] entre 34% a 38%.

Tabla 2  
Valores calculados de los parámetros hidráulicos experimentales

Fase	Etapa I		Etapa II		Etapa III	
	Humedal 1	Humedal 2	Humedal 1	Humedal 2	Humedal 1	Humedal 2
TRH (d)	2,70	2,84	1,38	0,94	1,33	1,09
EH	91,2	94,35	97,87	80,9	76	63,3
%Re	90,74	86,3	78,15	20,33	55,60	57,05
$\sigma^2$	0,50	0,48	0,50	1,57	0,32	0,24
d	0,42	0,38	0,42	NA	0,30	0,20

Donde: TRH (tiempo de retención hidráulica experimental), EH (eficiencia hidráulica), %Re (porcentaje de recuperación del trazador),  $\sigma^2$  (varianza adimensional), d (número de dispersión), NA = no aplica.

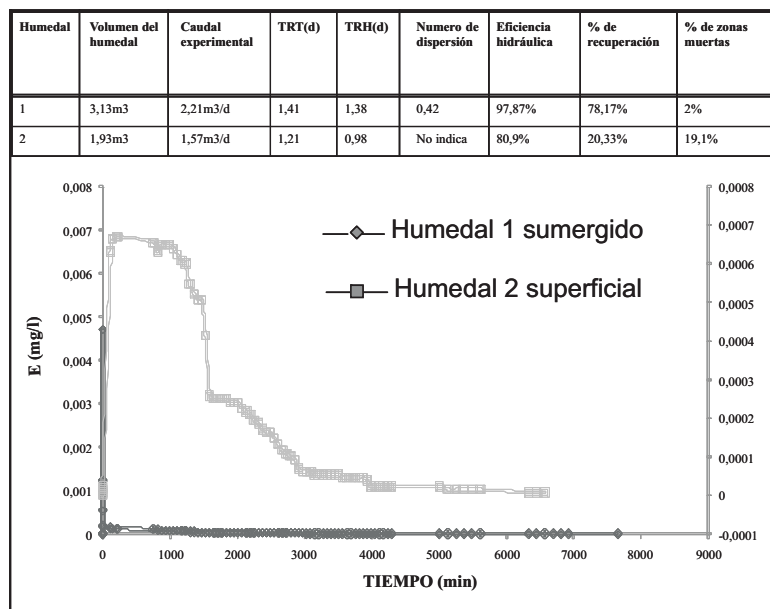


Figura 4. Curva de edad del trazador para los humedales 1 y 2 en la etapa II.

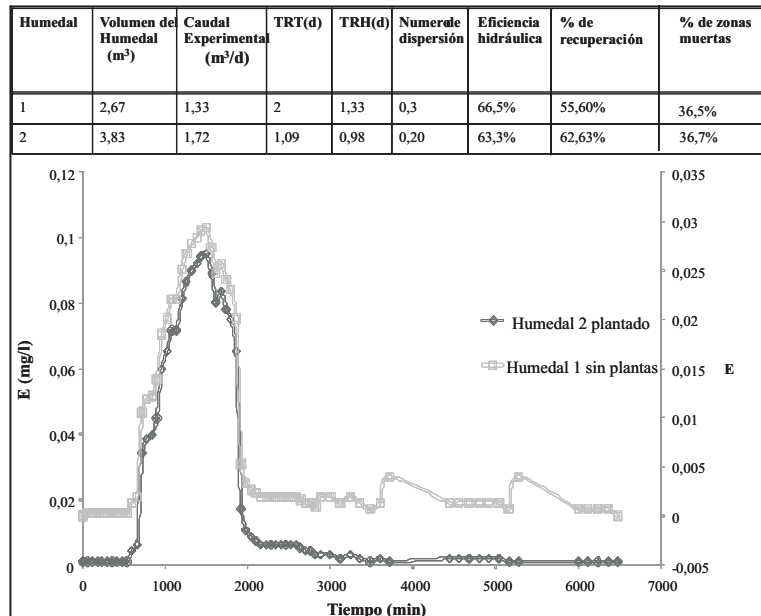


Figura 5. Curva de edad del trazador para los humedales 1 y 2 en la etapa III.

Los humedales sin plantar resultaron con eficiencias hidráulicas EH mayores del 90% y los plantados menores del 70%, dando como resultado en ambos casos eficiencias hidráulicas superiores a sistemas de lagunas de estabilización <55% [9], indicando que al involucrar otra fase además de la líquida, como la sólida la EH puede incrementarse >98%, puesto también en evidencia en los RAFA [20].

Las variaciones de los porcentajes de recuperación del trazador, se debieron a varios factores: la mala distribución del flujo en algunas zonas del humedal como se observó en la etapa II para el humedal 1 con afluente sumergido, indicando acumulación de la sustancia trazadora en el medio de soporte (arena), con presencia o no de lámina de agua.

Los números de dispersión leídos, dieron muy cercanos a 0,42, ver Tabla 2, para las etapas I y II indicando la presencia de flujo disperso y 0,20 en la etapa III indicando flujo pistón, a excepción de la etapa II para el humedal 2, cuyo valor no pudo ser determinado a través del modelo de dispersión de Yáñez, debido a que la varianza adimensional  $\sigma t^2$  resultó mayor de 1.

Se evidenció que una concentración de Litio en el medio de soporte (arena) provocó que el fluido dentro del humedal no esté bien distribuido y

que el trazador no haya logrado salir, ya que muchos contaminantes químicos tienden a unirse por adsorción con diversos sólidos, lo que dependerá, en gran parte, de la cantidad y composición de estos en la fase líquida en forma de suspensión [21].

## Conclusiones

Los TRH experimentales fueron menores que los TRT teóricos para todas las etapas variando apenas de 1 a 5h (0,05 y 0,20 días), la eficiencia hidráulica calculada varió entre 63 y 98% respectivamente, resultando mejores los humedales de flujo horizontal y sumergido sin plantar. El número de dispersión resultó similar para los humedales sin plantar 0,42 indicando un comportamiento hidráulico de flujo disperso y de 0,20 para los humedales plantados con tendencia a flujo pistón.

El análisis de la tendencia de la curva permitió identificar la configuración de los humedales durante todas las etapas presenciando un flujo dual (pistón y mezcla completa). Los factores que influyeron en la diferencia de la eficiencia hidráulica entre las tres etapas fueron: a) afluente superficial y/o sumergido; b) presencia de plantas y c) fase líquida (altura de la columna de agua).



## Referencias bibliográficas

1. Stoker, H.; Seager, S. "Química ambiental: Contaminación del aire y del suelo" España. Blume, 1ª edición (1981) 159-160.
2. Moshiri, G. "Constructed Wetlands for Water Quality Improvement" London, Lewis Publishers, 1993.
3. Cooper, P.F.; Job, G.D.; Green, M.B.; Shutes, R.B.E. "Reed beds & Constructed Wetlands for wastewater treatment, WRC" Swindon (2001) 184.
4. Watson, J.T.; Reed S.C.; Kadlec, R.H.; Knight R.L. "Performance expectations and loadings rates for constructed Wetlands" Industrial and Agricultural. UK, Michigan, Lewis Publishers, Chelsea, 1989.
5. Brix, H. "Denmark Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe" Leiden, Backhuys Publisher (1998) 132-152.
6. Lara, J. "Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales" Tesis de Maestría en Ingeniería y Gestión Ambiental. Instituto Catalán de tecnología. Universidad politécnica de Cataluña. Barcelona, España, (1999) 3-9.
7. Reed, S.A., Crites, R.W. and Middlebrooks, J.E. "Natural systems for waste management and treatment" New York, MacGraw-Hill. 1995.
8. Yabroudi, S. "Pulimento de los efluentes de las lagunas de estabilización de LUZ a través de un filtro rocoso" Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela (2000) 4-5.
9. Aldana, G. "Hydraulic behavior and performance improvement of waster stabilization ponds (WSPSSs) using a computational fluid dynamic (CFD) and physical model" PhD Thesis. Universidad de Surrey. Guildford, UK (2004) 245-278.
10. Dubue, K. y Paz, J. "Tratamiento del efluente de las lagunas de estabilización a través de dos especies de plantas macrofitas emergentes" Trabajo especial de grado. Facultad de Ingeniería. La Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela (2004) 4-5.
11. Núñez, M. "Uso de Humedales Construidos como pulimento para efluentes de lagunas de estabilización" Programa de Doctorado en Ingeniería Ambiental, La Universidad del Zulia. Facultad de Ingeniería. Maracaibo, Estado. Zulia. Venezuela. (2008) 123-135.
12. Silva, V. J. "Humedales construidos" Universidad del Valle Colombia. Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente. (2006) 11-115.
13. Romero, J. "Acuitratamiento por lagunas de estabilización" Santa Fe Bogotá, Colombia. Escuela Colombiana de Ingeniería, 2ª edición. (1995). 19 -61-75.
14. Álvarez, J. y Bécares, E. "El papel de la vegetación en humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales" Instituto de Medio Ambiente (IMA), Universidad de León, Calle de La Serna, 56, 24007, León. Universidad de León, Dpto. Ecología Genética y Microbiología, Área de Ecología (1996) 24-28.
15. Soto, F.; Bécares, E.; García, M. "Microfitos en la depuración de aguas residuales. Su función en la eliminación de nutrientes" Tecnología de Aguas (1999) cap.185 68-72.
16. Arroyave, D.; González, M.; Arteaga D. "Evaluación del comportamiento hidráulico un reactor UASB utilizado para el tratamiento de aguas residuales" Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Facultad de Minas. Calle 55 N° 80-54 apto 523. [www.ciiq.org/variados/peru\\_2005/Trabajos/III/3/3.3.11.pdf](http://www.ciiq.org/variados/peru_2005/Trabajos/III/3/3.3.11.pdf). 2007.
17. Levenspiel, O. "Ingeniería de las reacciones químicas" Barcelona, España. Reverté S.A, 2a edición Capitulo 9 (1981) 277-335.
18. Giacomani, G. "Evaluación de parámetros integrales en la distribución del tiempo de residencia en modelos de humedales artificiales con flujo subsuperficial horizontal" XXXI Congreso Interamericano AIDIS. Santiago de Chile. 2008.
19. Hincapié, D. "Cinética e Hidrodinámica Aplicada, en condiciones ambientales locales, a humedales de flujo subsuperficial a escala piloto" Tesis de pregrado, Universidad tecnológica de Pereira. Facultad de tecnología pro-

- grama de química. Industrial, Colombia. (2007) 77.
20. Pérez, J. "Evaluación del funcionamiento hidráulico y la cinética a escala piloto de un reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA) utilizando aguas residuales municipales" Tesis de Doctorado de Ingeniería Ambiental. Universidad de Zulia, Maracaibo, Venezuela. (2010)125-130.
21. Seoáñez, M. "Aguas residuales: Tratamiento por humedales artificiales" Colección Ingeniería del Medio Ambiente. Mundi-Prensa (1999).

Recibido el 16 de Julio de 2012  
En forma revisada el 16 de Septiembre de 2013