



## Caracterización de humedales artificiales por fluorescencia inducida por láser

Diego F. García<sup>1</sup>, Efraín Solarte<sup>1</sup>, John Jairo Sandoval<sup>2</sup>, Andrés Toro<sup>2</sup>, Daniel Ascuntar<sup>2</sup>, Miguel Peña

<sup>1</sup>Grupo de Óptica Cuántica, Universidad del Valle, Colombia;

<sup>2</sup>Instituto CINARA, Universidad del Valle, Colombia.

### RESUMEN

Se desarrolló un método óptico para conocer el comportamiento hidrodinámico de un humedal artificial de flujo sub-superficial, en el régimen de dispersión. El humedal fue construido en el municipio de Ginebra (Valle), por la Universidad del Valle y el Instituto CINARA. El método utiliza la técnica de fluorescencia inducida por láser (LIF) con trazadores fluorescentes. Se usa Rodamina WT como trazador y un láser de Nd: YAG (@ 532 nm; 25 mW.) como fuente de excitación. Se presentan las curvas de la dependencia temporal de la función de distribución de intensidad de fluorescencia, que permiten determinar el comportamiento dispersivo de las partículas del agua residual dentro del humedal.

**Palabras Clave:** LIF, Dispersión, Rodamina WT, Humedal, Trazador Fluorescente.

### Abstract

### Characterization of wetlands by laser-induced fluorescence

An optical method was developed to study the hydrodynamic flow by dispersion in a subsurface flow constructed wetland, build in the Ginebra research area (Valle del Cauca, Colombia). The method utilizes laser induced fluorescence (LIF), and Rhodamine WT as fluorescent tracer. Water collected samples were excited using a 35 mW, DPSS Nd:YAG laser at 532 nm. Fluorescence spectra were measured and elaborated to obtain the tracer concentration and the residence time of the fluid elements. Typical distribution functions are presented and the observed time evolution was studied for three different wetland systems. The results allow the determination of the wetland's hydrodynamic parameters.

**Keywords:** Laser Induced Fluorescence, Rhodamine WT, Constructed Wetland, and Fluorescence Tracer.

Para citar este artículo: García DF.; Solarte E.; Sandoval JJ.; Toro A.;Ascuntar D.;Peña M. Caracterización de humedales artificiales por fluorescencia inducida por láser. Bistua .2011;9(1):77-82

+Autor para el envío de correspondencia y la solicitud de separatas: Solarte E.A Grupo de Óptica Cuántica,Universidad del Valle, Colombia e-mail: @

Recibido:Agosto 28 2009

Aceptado: Mayo 16 de 2011

## 1. INTRODUCCIÓN

Los humedales realizan diferentes funciones ecológicas y en ese sentido tienen también diferentes aplicaciones, entre las que cabe destacar la transformación y remoción de nutrientes y de materia orgánica que es utilizada con fines de purificación en procesos naturales de producción de agua potable, y en cuyo estudio estamos muy interesados en nuestra universidad. En el desarrollo de un proyecto especial, que pretende producir sistemas de purificación preliminar de aguas servidas, la Universidad del Valle, a través del Instituto Cinara y con apoyo de Colciencias, ha diseñado prototipos de humedales en la estación experimental de Ginebra (Valle del Cauca). Un humedal artificial de flujo subsuperficial es un sistema que consiste en zanjas o canales excavados y rellenos de material granular, generalmente grava, en donde el nivel del agua se mantiene por debajo de la superficie de la grava. Se utilizan varias especies vegetales cuya función básica es la remoción de nutrientes presentes en las aguas. Las especies vegetales se han usado en los humedales artificiales construidos son *Phragmites* y *Heliconias*.

Investigaciones recientes sobre la hidrodinámica de los humedales artificiales mostraron que el control del régimen hidrológico del sistema, junto con un óptimo funcionamiento hidrodinámico dentro del humedal, son factores esenciales para el buen funcionamiento de estas unidades. El estudio del comportamiento hidrodinámico del humedal se realiza aplicando las técnicas de hidrodinámica experimental (p. e. estudios de dispersión), que son ampliamente aplicadas como herramientas metodológicas para establecer el patrón de flujo del agua y el régimen de mezcla, en diferentes condiciones ambientales.

En este trabajo se presenta el estudio del comportamiento hidrodinámico de un humedal artificial de flujo subsuperficial que se ha diseñado con un tipo de vegetación conocida como *Heliconia*. Los tipos de humedales artificiales y el sistema piloto de humedales construido se presentan en la Figura 1.

Se usó una técnica óptica y se realizó un diseño experimental (óptico y estadístico) que permite obtener la información hidrodinámica. La técnica óptica utilizada está relacionada con la interacción de la radiación láser con la materia en sistemas atómico – moleculares. Es bien conocido que

cuando los átomos o las moléculas son excitados a altos niveles de energía, pueden caer a niveles más bajos emitiendo radiación (emisión o luminiscencia). Para los átomos excitados por una fuente de energía a alta temperatura esta emisión de luz es comúnmente llamada emisión atómica u óptica (espectroscopia de emisión atómica) y para los átomos excitados con luz, es llamada fluorescencia (espectroscopia atómica de fluorescencia). La emisión de fluorescencia tiene lugar a frecuencia inferior a la de la luz incidente: la emisión de radiación se produce después de haber cedido alguna energía al entorno, generalmente en procesos de relajación que incluyen modos de vibración. Los típicos colores fluorescentes son una manifestación de este efecto: las moléculas absorben luz de alta energía, en el ultravioleta y hasta el verde, y emiten luz en frecuencias más bajas del espectro visible.

## 2. SOBRE LA CARACTERIZACIÓN HIDRODINAMICA DEL HUMEDAL

La caracterización hidrodinámica de un humedal como los presentados anteriormente (o mejor, reactor debido a que es un sistema que solo tiene una entrada y una salida) tiene que ver fundamentalmente con el comportamiento del agua que fluye en él; debido a la constitución no homogénea del sistema, el fluido toma diversos caminos y es evidente que a los elementos del fluido que siguen diferentes caminos a lo largo del humedal, les podría tomar tiempos diferentes en pasar a través de él (Levenspiel, 2004.). La distribución de estos tiempos, en la corriente de fluido que sale del recipiente, se denomina distribución del tiempo de residencia (RTD) del fluido y se llamará en adelante: la función  $E$ , y tiene unidades de inverso de tiempo. Esta función contiene la información básica sobre la hidrodinámica del sistema, que puede determinarse mediante una técnica de trazadores. Así, la función de distribución de los tiempos de residencia (RTD) es la medida de la distribución de tiempo de todos los elementos del fluido en las salidas del recipiente, referidas al tiempo o momento de entrada al mismo.

Un procedimiento óptico que permita conocer la distribución de los tiempos de residencia en los humedales se basa en la determinación de la intensidad de fluorescencia en función de la longitud de onda, para cada muestra recogida a la salida del humedal, en un tiempo dado, posterior a momento de la adición del trazador. Cada muestra de agua residual recogida a la salida del humedal en un tiempo determinado, permite hallar una concentración de trazador, es decir, permite determinar el tiempo en el que un volumen de fluido que se ha movido a través del humedal y hallar así la distribución de tiempos de residencia a partir de datos discretos.

Con una curva de calibración de concentración de trazador en función del área del correspondiente espectro de fluorescencia es posible determinar las concentraciones de las muestras recogidas para una serie de tiempos  $\{t_i\}$  con el fin de construir una grafica de concentración en función del tiempo, la cual permite conocer la distribución  $E(t)$  el comportamiento estadístico de los reactores. Esta función está definida como:

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int C(t) dt} \quad (1)$$

Donde  $C(t)$  son las concentraciones para cada tiempo  $t$  y la integral de  $C(t)$  corresponde al área bajo la curva de concentración,  $C(t)$  en función del tiempo  $t$ . La función  $E(t)$  por lo tanto está normalizada. A partir de esta distribución, los reactores se caracterizan mediante los dos momentos principales la media y la varianza. La media  $\bar{t}$  es el tiempo medio de transito. La varianza  $\sigma^2$  describe el grado de dispersión de los tiempos de residencia en el tiempo. Para datos continuos se definen mediante las siguientes integrales:

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} t C(t) dt}{\int_0^{\infty} C(t) dt} \quad (2)$$

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^{\infty} (t - \bar{t})^2 C(t) dt}{\int_0^{\infty} C(t) dt} \quad (3)$$

Para casos discretos, que son la mayoría de medidas experimentales, las integrales se reemplazan por sumas.

## 2.1. El Modelo de Dispersión

Si se introduce en el fluido que entra a un humedal un impulso ideal de un trazador, el impulso se dispersa a medida que pasa a través del recipiente, lográndose una distribución de tiempos de residencia,  $E(t)$ . Se considera que un reactor (el humedal) se desvía poco del patrón de flujo pistón, si la forma de la distribución de tiempos de residencia no cambia apreciablemente durante el tiempo que dura una medición ni durante su paso por el punto de medición. En este caso, se puede emplear un modelo que se conoce como el modelo de dispersión.

El modelo de dispersión tiene en cuenta la deformación que sufre el frente plano, de distribución del trazador, por los fenómenos difusivos y el comportamiento fluido dinámico. De acuerdo con lo anterior, la sección del humedal no mantendrá el frente plano del reactor tubular ideal. Este comportamiento se traduce en un ensanchamiento de la curva obtenida como respuesta del trazador.

Como el proceso de mezcla implica un reagrupamiento o redistribución de materia, ya sea por deslizamiento o por formación de remolinos y puesto que esto se repite un número considerable de veces durante el viaje del fluido a través del humedal, se considera que estas perturbaciones son de naturaleza estadística, algo parecido a lo que ocurre en la difusión molecular. Se puede considerar que todas las contribuciones al retromezclado del fluido que circula en la dirección  $x$  son descritas por la ley de Fick, es decir, están dadas una ecuación de la forma:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (4)$$

El parámetro llamado  $D$  en la ecuación (4), es el coeficiente de dispersión longitudinal, caracteriza inequívocamente el grado de retromezclado durante el flujo y la variable  $x$  es la dirección de circulación del fluido dentro del humedal. Esta ecuación puede ponerse en forma adimensional, haciendo  $z = (ut + x)/L$  y  $\theta = t/\bar{t} = tu/L$ , así, la ecuación (4) que representa el modelo de dispersión se transforma en:

$$\frac{\partial C}{\partial \theta} = \left( \frac{Du}{L} \right) \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{\partial C}{\partial z} \quad (5)$$

Donde  $L$  es la longitud del humedal,  $u$  es la velocidad lineal media del fluido y  $C$  es la concentración. El grupo adimensional  $Du/L$ , denominado módulo de dispersión del humedal, es el parámetro que mide el grado de dispersión. Su valor limita rangos de comportamiento hidrodinámico

Si  $Du/L < 0,01$  la curva en ensanchamiento no cambia significativamente en cuanto a forma a su paso por el punto de medida. Lo que significaría tener un verdadero flujo pistón.

Si  $Du/L > 0,01$  en este caso la respuesta al impulso es ancha y pasa por el punto de medida tan lentamente que cambia su forma (se extiende) durante el tiempo que es medida. Esto proporciona una curva  $E$  muy ancha y asimétrica. En la Figura 2 se presentan varios perfiles normalizados  $E(\theta)$  para módulos de dispersión grandes.

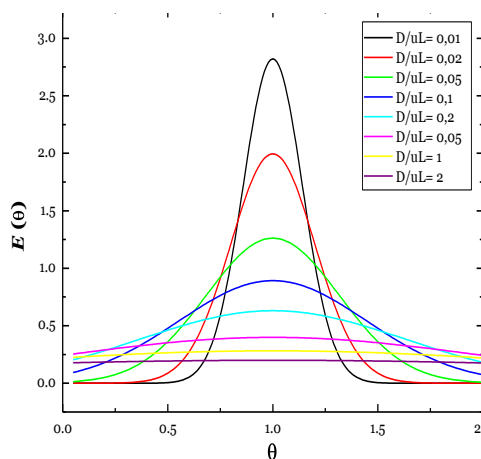


Figura 2. Curvas de distribución para módulos de dispersión mayores que 0,01

### 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El montaje óptico para las medidas de los espectros de fluorescencia, se muestra esquemáticamente en la Figura 3. La fuente de luz es un láser de Nd: YAG (25 mW) que emite de forma continua en la línea de 532 nm. La luz del láser pasa a través de un divisor de haz (Beam Splitter) que permite controlar la intensidad por medio de un polarizador, para posteriormente incidir sobre la muestra que se encuentra en el soporte portamuestras. La fluorescencia emitida por la muestra se recoge perpendicularmente al haz de excitación y por medio de una fibra óptica (200  $\mu$ m de diámetro) es conducida al espectrómetro SD2000 donde es

separada espectralmente y detectada. Para las medidas se utilizaron celdas de acrílico UV de 1 cm. de longitud de paso y 3,5 mL de volumen. Las muestras se trabajaron a temperatura ambiente.

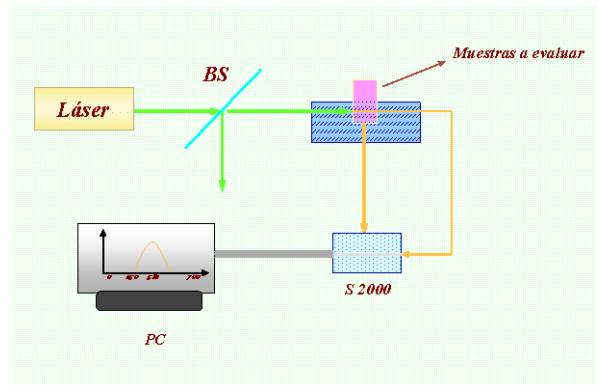


Figura 3. Esquema básico del montaje óptico para la medición de fluorescencia

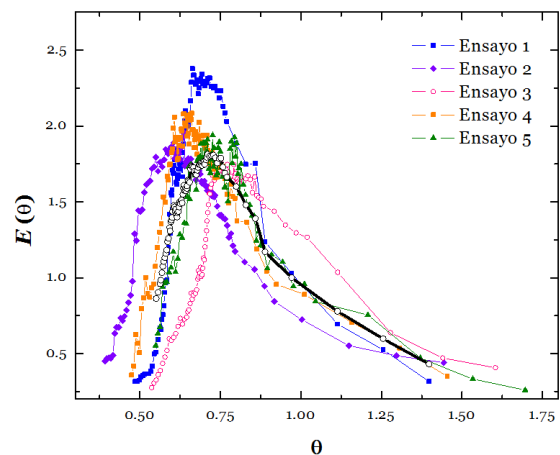


Figura 4. Curva de respuesta de trazador, que corresponde a la función de distribución de tiempo de residencia, para el humedal con vegetación Heliconia

Este montaje diseñado para medir básicamente espectros de fluorescencia, permite obtener curvas de intensidad en función de la longitud de onda para cada muestra recogida a la salida del humedal después de la adición del trazador. Cada muestra de agua residual es recogida al cabo a un determinado tiempo y se supone que posee una determinada concentración  $C$  desconocida, que se determina por el método óptico y permite obtener tiempos de

residencia a partir de datos discretos. Cada punto de la curva de tiempos de residencia es el resultado de un espectro de fluorescencia. Para el análisis hidrodinámico se realizaron mediciones para cinco ensayos, se presentan los resultados para el humedal sembrado con Heliconias, el cual se encuentra con un caudal de 72 L/h. Cada uno de estos ensayos se llevó a cabo en fechas diferentes con el fin de analizar la evolución del humedal.

#### 4. RESULTADOS

La gráfica de la Figura 4 presenta las curvas de función de distribución de tiempo de residencia normalizada, en los cinco ensayos realizados para el humedal Heliconia, en negro se señala la curva promedio, que resume el comportamiento del humedal.

Se representa la curva de la función densidad (o distribución), en la que  $E(\theta)$  es medido en función del tiempo promedio de residencia  $\theta$ . En esta curva permite apreciar cómo es el paso de los elementos de fluido a través del humedal, se observa como la concentración del trazador empieza a tener un aumento cuando entra a la zona activa del humedal, hasta que presenta un pico pronunciado, indicando en dicho sector que el humedal en dicho punto presenta un comportamiento de flujo pistón o flujo ideal para todos los ensayos. Es de destacar que después del pico, la curva del tiempo de residencia empieza a decaer lentamente, esto es debido a espacios o zonas muertas, que tienen poco intercambio con el resto del fluido y en los cuales se produce un estancamiento de fluido. Los elementos de fluido que han sido atrapados en esta zona tienen tiempos de residencia mayores, presentando una cola en la región posterior al tiempo medio de residencia. Esta cola representa es un flujo completamente mezclado.

Los valores hidrodinámicos se calcularon de las curvas de tiempos de residencia para todas las distribuciones encontradas y también para la curva promedio representativa de cada humedal. Los valores correspondientes al humedal de Heliconias se presentan en la Tabla I.

El valor hallado para el módulo de dispersión  $D/uL$ , en todos los ensayos, se ajusta de forma correcta al modelo de dispersión por tener valores inferiores a 1. Mediante los valores de dispersión obtenidos se puede sustentar el por qué las curvas para todos los ensayos son de forma asimétrica, debido a que son valores superiores a 0,01. Con valores inferiores a 0,01 es de esperarse que sea una curva con una forma de campana definida y simétrica.

Por otra parte, respecto al porcentaje de recuperación de trazador obtenido el ensayo 3 fue el que mejores resultados de recuperación arrojó, caso

contrario a lo obtenido en el ensayo 5 el cual tuvo un porcentaje de recuperación de tan solo el 56 %. Estas pérdidas de trazador se pueden atribuir principalmente a que se puede tener una absorción del trazador por parte del medio (como puede ser la grava o la vegetación) ó un estancamiento del trazador en alguna zona del humedal.

#### 5. CONCLUSIONES

Este trabajo muestra que la determinación de la distribución del tiempo de residencia en un reactor, mediante la medición del cambio de concentración de un trazador inyectado puntualmente a la entrada del sistema, proporciona información sobre el régimen de flujo que se desarrolla dentro del reactor. La forma de las curvas evidencia la presencia de zonas muertas dentro del sistema, lo que implica un aumento en los tiempos de retención de las partículas del trazador.

Se logró desarrollar un método óptico para el estudio de flujo de agua que permitiera conocer el comportamiento hidrodinámico del agua residual dentro de un humedal con vegetación.

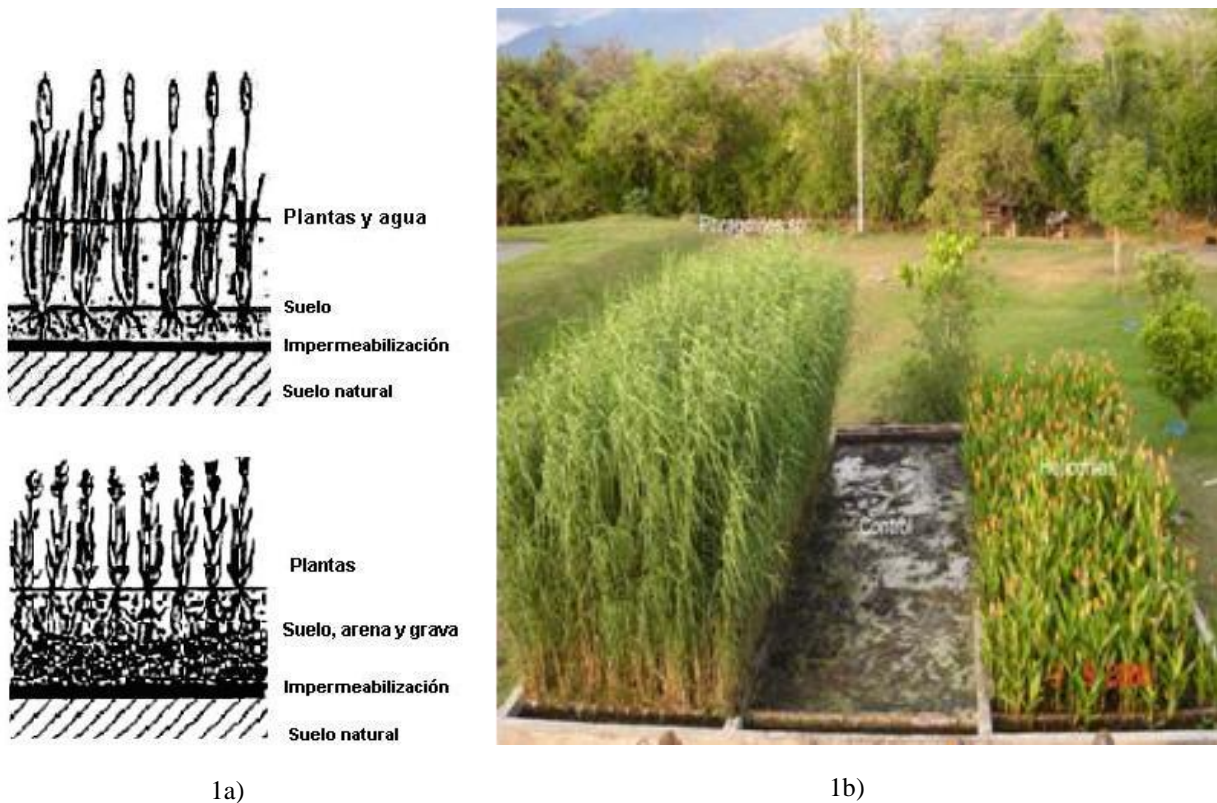
Los porcentajes de concentración obtenidos para todos los ensayos en el humedal con vegetación Heliconia muestran una aparente retención de trazador, que puede ser debida a la absorción del trazador por parte de la vegetación o a la adherencia del trazador sobre la grava.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad del Valle el apoyo logístico, técnico y financiero que hacen posible este proyecto y la presentación de este trabajo.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Octave Levenspiel. *Ingeniería de las Reacciones Químicas*. LIMUSA, SA, 2004.
2. Ira N. Levine. *Fisicoquímica*. McGraw-Hill, 2004.
3. F. Reif. *Fundamentos de Física Estadística y Térmica*. McGraw-Hill, 1968.
4. Convención de Ramsar". [http://www.ramsar.org/lib\\_manual2004s.htm#cl](http://www.ramsar.org/lib_manual2004s.htm#cl)
5. Levenspiel, Octave. *Chemical Reaction Engineering*. John Wiley & Sons, 1972.
6. Berkeley Physics Course. *Física Estadística*. Reverte, 1996.
7. "Modelación de los mecanismos involucrados en la transformación y remoción de nutrientes y material orgánica en humedales artificiales sub-superficiales para tratamientos de aguas residuales" Proyecto de Investigación. CINARA, Universidad del Valle, 2003.



**Figura 1.** Humedales empleados para analizar el comportamiento hidrodinámico. En el lado izquierdo superior se muestra el esquema de un humedal de flujo libre, debajo el de un humedal de flujo subsuperficial. La fotografía 1b) muestra el sistema construido con tres humedales de diferente vegetación, a la izquierda se encuentra el sistema con *Phragmites*; en el centro el humedal de Control (sin vegetación) y al lado derecho el de *Heliconias*.

TABLA I. Valores hidrodinámicos hallados experimentalmente para el reactor de Heliconias

	$\bar{t}$ [h] $\pm 0,01$	$\sigma^2$ [h <sup>2</sup> ] $\pm 0,01$	$\left(\frac{D}{uL}\right) \pm 0,01$	Recuperación de trazador [%]
<b>Ensayo 1</b>	145,34	1536,9	0,04	76
<b>Ensayo 2</b>	132,50	2339,7	0,07	60
<b>Ensayo 3</b>	160,09	3046,4	0,06	91
<b>Ensayo 4</b>	147,39	2686,0	0,07	74
<b>Ensayo 5</b>	150,25	3080,8	0,07	56

