

**XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
SAN JOSÉ, COSTA RICA, 9 AL 12 DE SEPTIEMBRE DE 2012**

**METODOLOGÍA PARA DETERMINACIÓN DE COEFICIENTES DE  
DIFUSIÓN EN CAUCES FLUVIALES**

***Pablo E. García<sup>1</sup>, Angel N. Menéndez<sup>1</sup>, Nicolás Badano<sup>1</sup> y Horacio Ezcurra<sup>2</sup>.***

<sup>1</sup> INA (Instituto Nacional del Agua) Autop. Ezeiza-Cañuelas, Tramo J.Newbery, km 1.600, Ezeiza, Argentina

<sup>2</sup> Ezcurra & Schmidt S.A., Buenos Aires, Argentina  
*angel.menendez@speedy.com.ar*

**RESUMEN:**

La cuantificación de la tasa de difusión-dispersión es fundamental para efectuar simulaciones numéricas de transporte de contaminantes. En el marco del estudio de saneamiento para la ciudad de Asunción y su zona metropolitana (República del Paraguay), llevado a cabo para la ESSAP (empresa de provisión de agua y cloacas), se ha implementado una metodología de estimación y verificación del coeficiente de difusión del río Paraguay (donde se construirá un emisario subacuático)

**ABSTRACT:**

Quantifying the rate of diffusion-dispersion is essential to perform numerical simulations of pollutant transport. Within the framework of the study on the sanitary project for the city of Asuncion and its metropolitan area (Paraguay), carried out for ESSAP (water and sewer company), a methodology has been implemented to estimate and verify the diffusion coefficient of the Paraguay River (where an outfall system will be built)

**PALABRAS CLAVES:** Modelación Matemática; Coeficiente de Difusión; Río Paraguay

## INTRODUCCIÓN

Las sustancias contaminantes se disuelven o mezclan con el agua y son transportadas por el movimiento natural del flujo. Este movimiento puede descomponerse en un flujo medio (en el sentido de Reynolds) y uno turbulento. Así, si un material soluble es descargado en un ambiente acuático, será transportado desde el punto de descarga por el movimiento de la masa de agua, y será desparramado longitudinal y perpendicularmente al flujo por los efectos difusivos del movimiento turbulento. Cuando el material se difunde a través del flujo, se desparrama en regiones que poseen diferentes velocidades; este gradiente de velocidades (“advección diferencial”) acelera la dispersión de los materiales en la dirección del flujo. El efecto combinado de la difusión turbulenta y la advección diferencial recibe el nombre de “dispersión” (Fisher, H. 1973).

La cuantificación de la tasa de difusión-dispersión es fundamental para efectuar simulaciones numéricas de transporte de contaminantes. En el marco del estudio de saneamiento para la ciudad de Asunción y su zona metropolitana (República del Paraguay), llevado a cabo para la ESSAP (empresa de provisión de agua y cloacas), se ha implementado una metodología de estimación y verificación del coeficiente de difusión del río Paraguay (donde se construirá un emisario subacuático), a saber:

1. Estimación a partir del seguimiento de manchas generadas por la descarga de pulsos de un colorante
2. Verificación en base a mediciones de concentración en la pluma generada por la descarga continua de un trazador con propiedades fluorescentes

A continuación se describe la metodología y se presentan los resultados de su aplicación.

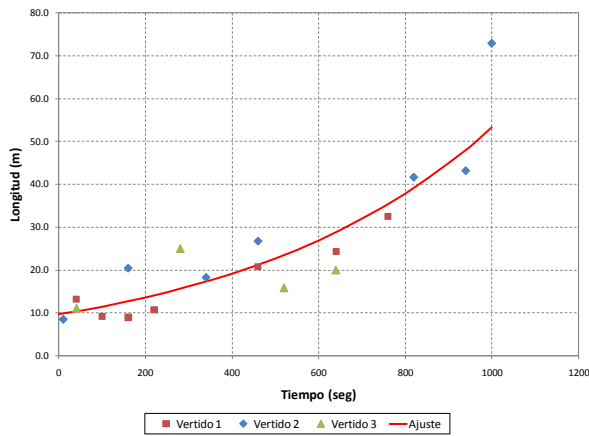
## SEGUIMIENTO DE MANCHAS

Se utilizaron dos tipos de colorante: Rojo Food E124 y Rodamina B320. Se emplearon bidones de 30 litros, con una concentración de colorante de 16,67 g/ltr en todos los casos. Las manchas fueron seguidas mediante fotografías tomadas desde un avión (Figura 1). Junto con el último vertido se lanzó un derivador lagrangeano, provisto en la parte superior de la boya con un equipo GPS, a fin de registrar la trayectoria de la mancha y su velocidad. Se seleccionaron las mejores imágenes obtenidas, se las procesó para aumentar el contraste, se obtuvieron sus escalas, se encuadraron dentro de rectángulos alineados con la corriente y se midieron las dimensiones de sus lados.

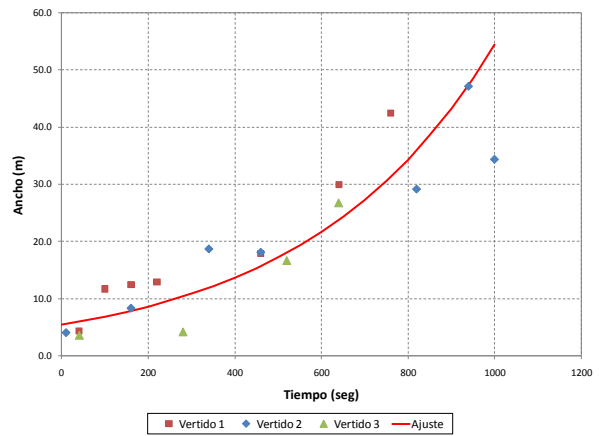
Los lados (longitud y ancho) del rectángulo de encuadre representan las dimensiones de los ejes de la forma de tipo elipsoidal en que deviene la mancha. En la Figura 2a y 2b se presentan la longitud y el ancho de la mancha, respectivamente, para los tres vertidos efectuados en función del tiempo desde el inicio del vertido,  $T$ . Este se relaciona con la distancia recorrida,  $L$ , a través de la relación  $L$  (m) =  $0,7747 * T$  (seg) (el factor de proporcionalidad es, simplemente, la velocidad media de la corriente). Se observa que los resultados son consistentes entre sí para los diferentes vertidos, y que muestran una dispersión considerable debido a la imprecisión de la metodología de determinación del ‘borde’ de la mancha. Además, ambas dimensiones son similares entre sí, es decir, la difusión es similar en ambas direcciones. Debido a ello, en la Figura 3 se representan tanto la longitud como el ancho, que entonces pueden tratarse en conjunto.



**Figura 1.-** Imagen de las manchas.

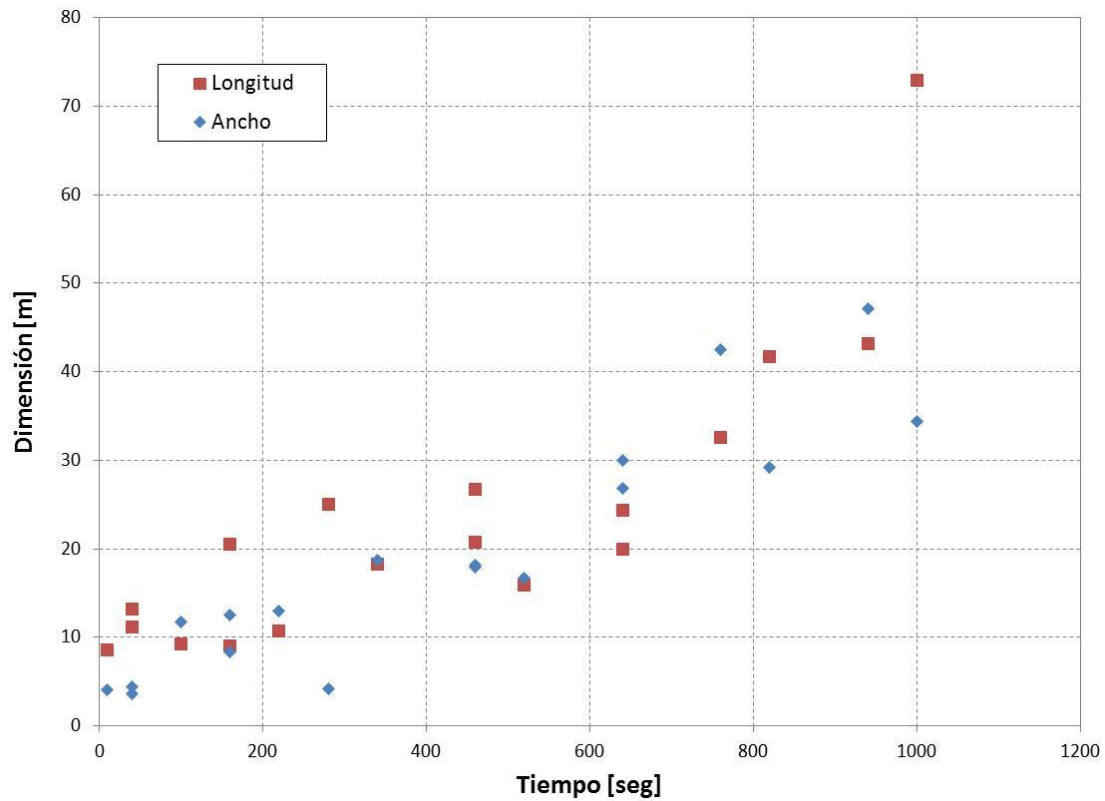


**a) Largo**



**b) Ancho**

**Figura 2.-** Evolución de las dimensiones de las manchas.



**Figura 3.-** Evolución de las dimensiones de las manchas.

Estos resultados se interpretaron en términos del siguiente modelo analítico para la evolución de manchas, producidas por una descarga puntual e instantánea (Menéndez A.N., 2010):

$$C(x, y, t) = \frac{M}{4\pi ht \sqrt{D_L D_T}} \exp \left[ -\frac{(x-ut)^2}{4D_L t} - \frac{y^2}{4D_T t} \right] \quad [1]$$

donde  $x$  e  $y$  son las coordenadas espaciales en el plano referidas al punto de vertido,  $t$  la coordenada temporal a partir del vertido,  $C$  la concentración de la sustancia,  $M$  la masa vertida de la sustancia,  $h$  la profundidad de agua,  $D_L$  y  $D_T$  las difusividades longitudinal y lateral, respectivamente, y  $u$  la velocidad de la corriente, que se la considera alineada con las dirección  $x$ . Si  $C_o$  es la concentración que define el ‘borde’ de la mancha (donde deja de ser visible), y  $L$  y  $A$  son el largo y el ancho instantáneos de la mancha así definida, se tiene que

$$C_o = \frac{M}{4\pi ht \sqrt{D_L D_T}} \exp \left[ -\frac{(L/2)^2}{4D_L t} \right] \quad [2]$$

$$C_o = \frac{M}{4\pi ht \sqrt{D_L D_T}} \exp \left[ -\frac{(A/2)^2}{4D_T t} \right] \quad [3]$$

De las ecuaciones [2] y [3] surge que

$$\frac{D_L}{D_T} = \left(\frac{L}{A}\right)^2 \quad [4]$$

Dado que, de acuerdo al análisis de los datos presentado más arriba,  $L \approx A$ , se tiene que  $D_L \approx D_T \equiv D$ , por lo que las ecuaciones [2] y [3] conducen a la única ecuación

$$C_o = \frac{M}{4\pi htD} \exp\left[-\frac{(L/2)^2}{4Dt}\right] \quad [5]$$

que puede reescribirse como

$$F_1 + F_2 + F_3 = 0; \quad F_1 \equiv \ln\left(\frac{4\pi h C_o}{M}\right); \quad F_2 \equiv \ln(Dt); \quad F_3 \equiv \frac{L^2}{16Dt} \quad [6]$$

La ecuación [6] se utiliza para determinar el valor de la difusividad  $D$ . La masa de colorante volcada en cada ensayo fue  $M = 500$  g. La profundidad (media) en la zona de seguimiento de la mancha se ha estimado en  $h = 7$  m. Como concentración que define el borde de la mancha se ha considerado  $C_o = 0,02$  ppm (es decir, un orden de magnitud menos de lo que se considera color ‘débil’). En la Figura 3 se muestra  $L(t)$ . Entonces, fijado ya el valor de  $F_1$ , puede asignarse una serie de valores a  $D$  y calcular, para cada uno, los términos  $F_2$  y  $F_3$  para cada par de datos  $(L, t)$ , en base a lo cual seleccionar el valor de  $D$  que provea el mejor cumplimiento de la ecuación [6]. Dado que el modelo analítico [1] se cumple mejor cuando uno se aleja de la zona de vuelco (lo que se conoce como ‘campo lejano’), en este análisis no se han considerado los pares de valores  $(L, t)$  para tiempos menores a 200 segundos (distancias de traslado menores a aproximadamente 150 m). Específicamente, se buscó minimizar el valor absoluto de  $(F_1 + F_2 + F_3)$ , de donde resultó  $D = 0,44$  m<sup>2</sup>/s. Considerando que la velocidad de flujo es  $u = 0,77$  m/s y el valor del coeficiente de rugosidad de Manning  $n = 0,025$ , se obtiene una velocidad de corte  $u^* = 44$  mm/s, con lo cual  $D/h u^* = 1,44$ , un valor típico para la difusividad turbulenta adimensional.

## PLUMA CONTÍNUA

Se utilizó como trazador un pigmento fluorescente denominado Fluoresceína (Uranina en Europa), cuya identificación (‘color index’) es C.I. 45350. El trazador es vertido desde un bidón en el que se mantiene la presión constante, de modo que su descarga es constante en el tiempo (Figura 4). El caudal fue de 16,07 litros/hora. La concentración de Fluoresceína en el bidón era de 16,67 g/l. Luego de un período de estabilización (½ hora), se empezó a medir la concentración del trazador mediante un fluorómetro a lo largo de transectas. El equipo mide la concentración de fluoresceína en el agua que es aspirada del río, desde una profundidad constante de aproximadamente 25 cm. Con estos datos se generaron archivos del tipo posición-concentración. En las ‘zonas blanco’, antes del vertido o fuera del mismo, se detectó un nivel de fluorescencia natural de 1,85 ppb,

aproximadamente (Esta fluorescencia natural es producida en parte por la clorofila presente en el plancton del río).

Se realizaron dos ensayos independientes, los días 10 y 11 de febrero de 2011. Los resultados de los mismos se muestran en la figura 5.



**Figura 4.-** Imagen de la pluma.



**a)** 10 febrero 2011



**b)** 11 febrero 2011

**Figura 5.-** Ensayos con Fluorescencia.

Se simuló la pluma mediante el mismo modelo bidimensional hidrodinámico y de transporte de contaminantes utilizado para el estudio de saneamiento. El código numérico utilizado fue el MOHID (Leitão, P. C. 1996), que permite la modelación de procesos de difusión-dispersión. Se adoptó un tratamiento Lagrangeano. Las celdas del modelo eran de 10m x 10m (dimensiones suficientes para la simulación de las plumas de gran escala descargadas por los emisarios).

Debe tenerse en cuenta que, contrariamente al caso de los emisarios, el caudal descargado en estos ensayos es muy bajo (16 lt/hr), lo cual conduce a una ‘dilución inicial numérica’ muy fuerte. En efecto, en cada paso de tiempo de cálculo, con  $\Delta t = 5$  seg, se vuelca un volumen de 0,02 lts, el cual se diluye en un volumen de celda de aproximadamente  $700 \text{ m}^3$  (considerando una profundidad del orden de 7 m), es decir, la dilución es del orden de  $3 \cdot 10^7$ . Con esa dilución la concentración del vertido, de 16,7 g/l, se transforma en una concentración inicial en el cuerpo de agua de aproximadamente 0,5 ppb, dando un ‘techo’ a la concentración en el cuerpo de agua de 2,4 ppb, luego de sumarle la concentración de base. Es obvio, entonces, que el modelo no puede representar para esta descarga en forma correcta la dilución física inicial. No obstante, con el modelo numérico se buscó determinar el ‘ancho’ de la pluma lejos del punto de vertido, donde la solución ya no depende de ese detalle.

Se tomaron los datos correspondientes al día 11 de febrero de 2011 para la comparación, dado que en esa instancia se efectuó un barrido más adecuado de la zona de impacto, ya que las trayectorias fueron relativamente transversales y hasta el ‘borde’ de la pluma. Los resultados se presentan en la Figura 6. Tal cual se explicó más arriba, el modelo no capta los mayores valores de concentración debido a la dilución inicial numérica elevada. Pero se observa que representa satisfactoriamente el ‘ancho’ de la pluma calculada, con lo cual el valor de velocidad de difusión adoptado (en base al análisis de las manchas) se consideró verificado.

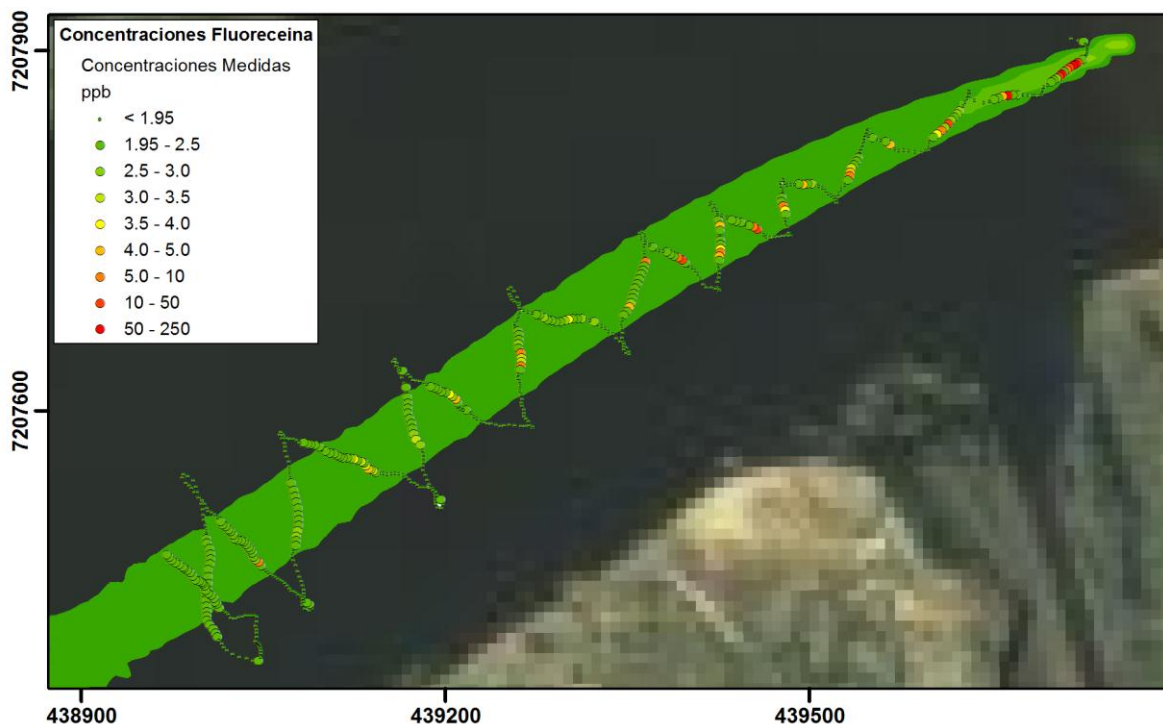


Figura 4. Comparación de pluma simulada y datos de fluorescencia.

## CONCLUSIONES

Se ha descrito una metodología de estimación y verificación del coeficiente de difusión en sentido horizontal para un río, basada en el seguimiento de manchas y el monitoreo de una pluma. Esto ha permitido obtener un valor in-situ para el río Paraguay, en el marco del estudio de saneamiento de la ciudad de Asunción y su área metropolitana.

## REFERENCIAS

**Fisher, H.** (1973), "Longitudinal dispersion and turbulent mixing in open channel flow", Annual review of Fluid Mechanics, pp. 59-78.

**Leitão P C** (1996). "Modelo de dispersão lagrangeano tridimensional". MSc dissertation thesis. Technical University of Lisbon.

**Menéndez, A.N.** (2010). "Transporte de contaminantes en el medio acuático", Apunte de la Maestría en Ingeniería Ambiental, Universidad Tecnológica Nacional. <http://laboratorios.fi.uba.ar/lmm/master1.php>