

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| <i>Título</i>               | Análisis de flujos turbulentos en cuerpos de agua somera.   |
| <i>Autor / Adscripción</i>  | José Isidro Robles López<br>Instituto Mexicano de Tecnología del Agua   |
| <i>Publicación</i>          | Ingeniería Hidráulica en México, 19(1): 75-82   |
| <i>Fecha de publicación</i> | 2004  |
| <i>Resumen</i>              | En este trabajo se estudiaron los cambios de régimen de un flujo que ingresa a un cuerpo de agua somera, este es, por ejemplo, el caso de la llegada de un río al océano. En el presente estudio se considera un flujo tipo chorro con un número grande de Reynolds que ingresa verticalmente en un tanque de agua en reposo conformado por dos placas paralelas entre sí, cuya separación entre ellas fue de milímetros. |
| <i>Identificador</i>        | <a href="http://hdl.handle.net/123456789/1280">http://hdl.handle.net/123456789/1280</a>   |

# Análisis de flujos turbulentos en cuerpos de agua somera

José Isidro Robles López

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

*En este trabajo se estudiaron los cambios de régimen de un flujo que ingresa a un cuerpo de agua somera, este es, por ejemplo, el caso de la llegada de un río al océano. En este tipo de flujos, la dimensión horizontal del cuerpo de agua es muy superior a la vertical, de manera que el rango de las escalas de las corrientes es sumamente particular. En el presente estudio se considera un flujo tipo chorro con un número grande de Reynolds que ingresa verticalmente en un tanque de agua en reposo conformado por dos placas paralelas entre sí, cuya separación entre ellas fue de 0.6, 1.29 y 4.4 mm. Así que el flujo desarrollado en el tanque es cuasi tridimensional o chorro turbulento en un plano. Debido a las características particulares de ese flujo, se encuentran varias aproximaciones en la literatura especializada. Por ejemplo, flujo cortante turbulento desarrollado, objeto esencial de este estudio, el cual tiene dos fuentes principales de generación: los esfuerzos debidos a turbulencia de longitud de escala grande que tienen lugar en el plano horizontal y los esfuerzos debidos a turbulencia de longitud de escala pequeña generados por la influencia de la fricción en el plano vertical. Empleamos para el estudio del flujo la técnica de análisis de imágenes digitales. Aunque las profundidades de los flujos en la presente investigación son pequeñas, comparadas con la dimensión lateral del movimiento turbulento, sólo son dependientes del efecto de fricción las corrientes turbulentas en el campo lejano ( $x, c_1/2h > 0.2-0.5$ ). La fricción es una fuerza que ejerce un efecto estabilizador en el movimiento turbulento generado por el cortante transversal de gran escala.*

**Palabras clave:** turbulencia, imágenes digitales, técnicas experimentales, esfuerzos de Reynolds.

## Introducción

Existe una gran cantidad de estudios que hablan de turbulencia en todas sus modalidades: flujos en descarga libre (sin influencia de pared) (Wood, 1992), flujos turbulentos en canales someros (Alavian y Chu, 1985), flujos de superficie (influencia de la superficie libre) (Johnston *et al.*, 1991, y Engelund y Pedersen, 1973, entre otros). Los flujos turbulentos se presentan de diferente manera en la naturaleza, como es el caso de descargas de emisores submarinos, descarga de un río a una laguna, la descarga de una fábrica a un río, incluso el de un volcán liberando gases y polvo a la atmósfera. Específicamente, el flujo turbulento que ingresa a un cuerpo de agua somero no ha sido ampliamente estudiado en laboratorio (Altai *et al.*, 1999).

El estudio cobra importancia debido a un efecto extra: la turbulencia de gran escala ( $L_t$ ), que en términos energéticos respecto a la turbulencia de pequeña escala ( $l_t$ ) es muy inferior, tanto, que es difícil simularla y separar sus efectos. Sin embargo, este efecto es responsable de la transferencia de energía y masa, tales como la temperatura, contaminantes, material suspendido, etcétera. Por otra parte, el efecto de la turbulencia de pequeña escala ( $l_t$ ) se presenta como el gran efecto estabilizador del flujo turbulento con una gran cantidad de energía suprimida.

En estos flujos se han realizado estudios comparativos de los resultados de las simulaciones de modelos numéricos de flujos turbulentos someros con datos experimentales (Babarutsi *et al.*, 1996, y Babarutsi y Chu, 1998). Para este caso, en el laboratorio Enzo Levi del

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), se construyó un dispositivo experimental que simula flujo turbulento que ingresa a un cuerpo de agua somero y en reposo (ilustración 1). Además, se siguió un programa experimental en donde se contempló un total de seis pruebas, combinando varios parámetros considerados importantes, como el gasto ( $Q_0$ ), el diámetro del inyector ( $d_0$ ) o la separación  $2h$  de placas paralelas, los cuales permiten una amplia variedad de configuraciones de flujo turbulento, suficientes para considerar varios números de Reynolds, diferentes escalas de longitud turbulentas, etcétera.

Las pruebas se realizaron considerando igualdad en la temperatura del agua de dos tanques: un tanque conteniendo el agua en combinación con el trazador y un segundo tanque únicamente con agua en reposo como cuerpo de agua receptor, donde se inyectó el flujo turbulento que contiene al trazador.

Para el análisis de flujos turbulentos de diferentes escalas de longitud se utilizó una técnica que consiste básicamente en un sistema de imágenes de video para la cuantificación en laboratorio de los efectos difusivos de flujos turbulentos (Zhang, 1997). Por medio del seguimiento visual de la liberación de trazador en el chorro

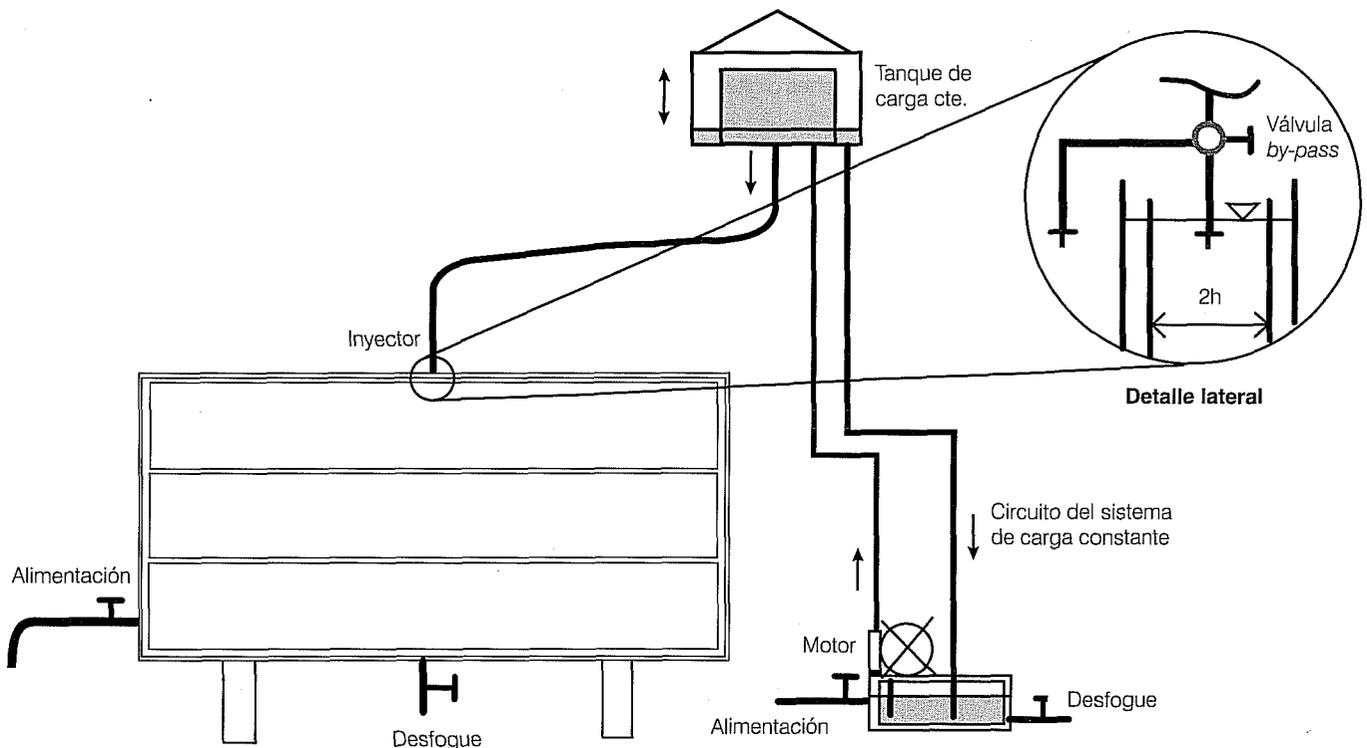
como elemento visual de las estructuras turbulentas, se establece una relación no lineal entre la concentración liberada y el parámetro difusivo. Los detalles del programa experimental se describen más adelante.

Se sabe que en este tipo de flujos se presenta una multiplicidad de números de onda, diferentes dinámicas de flujo y distintos rangos, además de intermitencia de gran escala. Un fenómeno de tales características requiere no sólo de estudios numéricos sino de pruebas realizadas en laboratorio para la determinación de coeficientes necesarios que tomen en cuenta los efectos combinados presentes en los valores medios de velocidad y los valores equivalentes fluctuantes afectados por dichos coeficientes.

### Programa experimental

Dado que se considera el caso de cuerpos de agua de poca profundidad con relación a la dimensión horizontal, se diseñó un dispositivo con la posibilidad de realizar pruebas de flujo confinado y no confinado (ilustración 1), de manera que se pueden desplazar entre sí dos de sus paredes. Las distancias de separación entre placas paralelas (definidas como  $2h$ , en la ampliación circular

**Ilustración 1. Instalación experimental para análisis de flujos turbulentos.**



en el dibujo, ilustración 1) consideradas para las pruebas fueron de 0.60, 1.29 y 4.4 cm. Estas separaciones se definieron a partir de pruebas previas relacionadas con flujo confinado somero (Chu y Babarutsi, 1989), las cuales permitieron identificar efectos de confinamiento y de fricción de pared referente a un efecto alternante en la dirección del chorro. Se utilizaron tres diferentes diámetros del orificio del inyector para descarga del chorro.

En el desarrollo del programa experimental se consideraron como variables relevantes del fenómeno el gasto de inyección  $Q_0$ , la separación entre placas  $2h$  y el diámetro del orificio de inyección  $d_0$ . La terna de valores se ilustra en la cuadro 1 para las diferentes pruebas del programa (ver resultados en las ilustraciones 4a, 4b, 4c, 4d, 4e y 4f).

### Proceso de calibración para el análisis de concentraciones

Para obtener información tanto espacial como temporal de la transferencia de masa en el experimento, se instrumentó una técnica de análisis digital de imágenes con el apoyo de un *software* específico para estos casos, denominado *ImageTool*. Como se muestra en la ilustración 1, se tiene un tanque con placas transparentes que permiten el paso de la luz para iluminar la zona de prueba y ser captada mediante una cámara de video Sony, CCD-VX1, con separación de colores, con imágenes de 640 x 480 pixeles, en una escala de grises y BPP:8.

La idea básica de la calibración del presente sistema experimental con apoyo de un análisis de imágenes digitales radica en conocer la relación que guarda la concentración del trazador con respecto a la facilidad en que esta concentración deja pasar la luz (intensidad lumínica), para ser captada en una imagen digital con

resolución de la unidad básica de la imagen que es el pixel. Para ello se realizó, previo a las pruebas de medición, un programa de calibración del sistema, el cual se detalla a continuación: se construyeron especímenes especiales de dimensiones de 20 x 20 cm, conservando los mismos materiales y respetando las separaciones entre placas a las del tanque experimental; en estos especímenes se grabaron imágenes a diferentes concentraciones (conocidas) de trazador y se determinó su intensidad lumínica en una escala de grises de 0 a 255, correspondiendo el blanco al valor de 255 y el negro al valor de 0. En la ilustración 2 se muestra una curva típica de ajuste para diferentes concentraciones relacionadas con diferentes intensidades lumínicas.

Para el ajuste de los datos se utilizó un polinomio del siguiente tipo:

$$\frac{C}{C_0} = a_0 + a_1\rho + a_2\rho^2 + a_3\rho^3 + a_4 e^{(0.1\rho)}$$

Donde  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  y  $a_4$  son coeficientes de las curvas de calibración de la concentración del trazador. De manera que se tiene una relación de una variación de concentración relativa con un cambio en la intensidad lumínica  $\rho$ . Con esta información es posible conocer en toda la imagen el dato de la concentración instantánea, en prácticamente todo el campo de estudio y en el tiempo, dado que se tomaba el video a una razón de treinta imágenes por segundo. Con esta calibración, internamente, en el *software ImageTool*, es posible inferir prácticamente todas las concentraciones instantáneas a partir de su nivel de gris que cambia de pixel a pixel, de manera que se tiene una gran cantidad de información tanto espacial como temporal con este método no intrusivo.

**Cuadro 1. Resumen de las condiciones de las pruebas.**

| Prueba | $Q_0$ (cm <sup>3</sup> /s) | $C_0$ (g/l) | $A_0$ (cm <sup>2</sup> ) | $2h$ (cm) | $d_0$ (cm) | $T$ (°C) |
|--------|----------------------------|-------------|--------------------------|-----------|------------|----------|
| CANG1  | 76.48                      | 0.125       | 0.159                    | 0.6       | 0.45       | 22.1     |
| CANG2  | 62.31                      | 0.125       | 0.159                    | 0.6       | 0.45       | 23.4     |
| CMED1  | 101.94                     | 0.06        | 0.95                     | 1.29      | 1.10       | 22.5     |
| CMED2  | 101.94                     | 0.06        | 0.95                     | 1.29      | 1.10       | 23.5     |
| CMED3  | 92.30                      | 0.06        | 0.95                     | 1.29      | 1.10       | 22.5     |
| CANCH1 | 68.98                      | 0.03        | 0.78                     | 4.4       | 1.00       | 23.0     |

Donde:

$Q_0$  = gasto de inyección.

$C_0$  = concentración inicial.

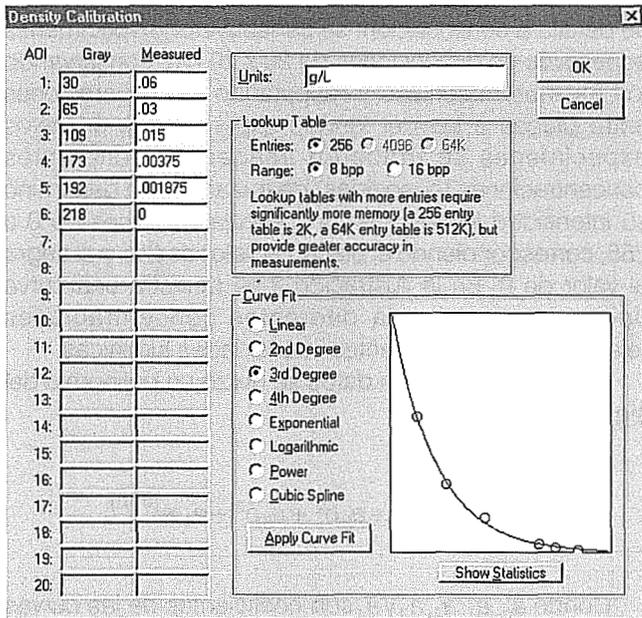
$A_0$  = área del inyector.

$2h$  = separación entre placas.

$d_0$  = diámetro del inyector.

$T$  = temperatura del flujo turbulento e igual a la temperatura del agua en reposo en grados centígrados.

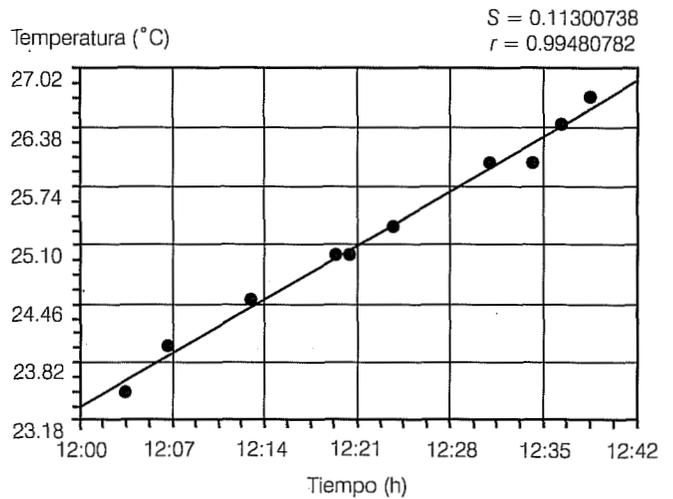
Ilustración 2. Curva de ajuste que relaciona las concentraciones del trazador con el valor en la escala de grises (intensidad luminica).



El control de variables relevantes en el desarrollo de las pruebas experimentales resulta de suma importancia, sobre todo para el caso en el que se desean pruebas con el menor número posible de efectos superpuestos. Estos efectos pueden ser los de flotación debidos a diferencia de densidades o temperatura entre el flujo de inyección y el cuerpo receptor, efectos de confinamiento, efectos por fricción de pared, etcétera. Para el caso de la temperatura, se realizaron pruebas en el sistema a fin de determinar el efecto de calentamiento generado por una bomba utilizada para la inyección de trazador con sistema de carga constante. Las pruebas se realizaron en un periodo aproximado de 33 minutos, con intervalos de unos cinco minutos. Después de realizar el ajuste (ilustración 3) de los valores medidos de temperatura se obtuvo que el periodo de tiempo aproximado para la variación de 1°C fue de 11 minutos, aproximadamente. Cada una de las pruebas requiere de un tiempo muy corto, del orden de segundos, pero se necesita tiempo extra para lograr la estabilización del circuito. Para los fines del programa experimental se utilizó la bomba encendida por dos minutos, al cabo de los cuales se realizó la prueba; posteriormente se apagó para evitar sobrecalentamiento.

Las concentraciones de trazador fueron cuidadas con básculas de precisión para la determinación de pesos específicos y densidades para cada prueba; los resultados de estas muestras se resumen en el cuadro 2 y en la ilustración 4.

Ilustración 3. Comportamiento de la temperatura del agua para inyección con trazador por efecto de bombeo.



Cuadro 2. Valores de concentración de trazador del programa experimental para la calibración.

| Tipo de prueba | Concentración $C_0$ (g/l) | Peso específico (kg/m <sup>3</sup> ) | Densidad (kg*s <sup>2</sup> /m <sup>4</sup> ) |
|----------------|---------------------------|--------------------------------------|---|
| ANG            | 0.125                     | 997.63                               | 101.69  |
| MED            | 0.06                      | 998.06                               | 101.74  |
| ANCH           | 0.03                      | 997.73                               | 101.71  |

### Análisis del estudio de visualización de imágenes digitales

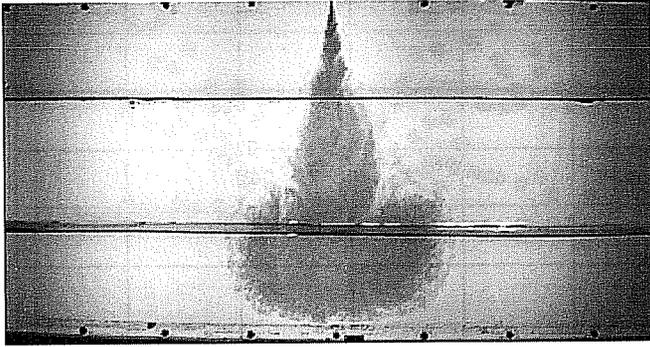
#### Efecto de confinamiento en el campo cercano

El desarrollo inicial del chorro turbulento es relativamente independiente del efecto de fricción. El inverso cuadrado de la concentración sigue las siguientes relaciones lineales:

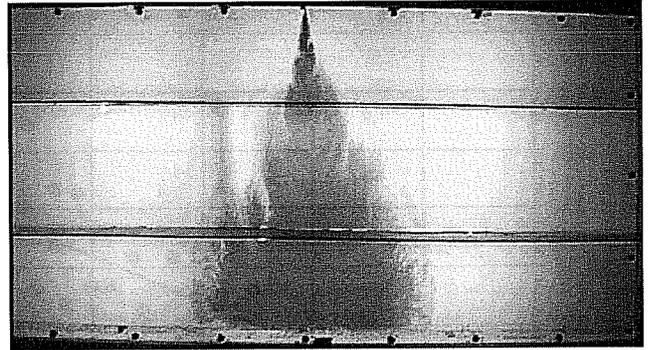
$$\frac{C_f^2}{C_m^2} = 0.064 \frac{x_f C_f}{2h} \quad (1)$$

donde  $C_f$  es la escala de concentración; la relación lineal (1) se muestra en la ilustración 5, correspondiente a la información comprendida entre el intervalo de 0 hasta aproximadamente 0.5 en el sentido de los valores de  $x_f C_f / 2h$ , los cuales sólo dependen del flujo y de la distancia de la fuente.

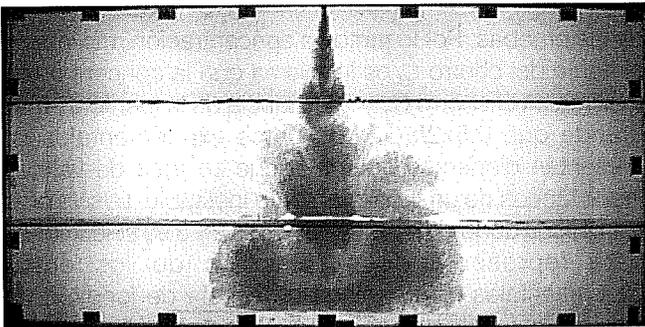
Ilustración 4. Condiciones de prueba para (a) CANG1,  $V_0 = 480.87$  cm/s,  $C_0 = 0.125$  g/l,  $2h = 0.6$ ,  $Q_0 = 76.48$  cm<sup>3</sup>/s; (b) CANG2,  $V_0 = 391.76$  cm/s,  $C_0 = 0.125$  g/l,  $2h = 0.6$ ,  $Q_0 = 62.31$  cm<sup>3</sup>/s; (c) CMED1,  $V_0 = 107.26$  cm/s,  $C_0 = 0.06$  g/l,  $2h = 1.29$ ,  $Q_0 = 101.94$  cm<sup>3</sup>/s; (d) CMED2,  $V_0 = 97.13$  cm/s,  $C_0 = 0.06$  g/l,  $2h = 1.29$ ,  $Q_0 = 92.30$  cm<sup>3</sup>/s; (e) CMED3,  $V_0 = 85.3$  cm/s,  $C_0 = 0.06$  g/l,  $2h = 1.29$ ,  $Q_0 = 81.06$  cm<sup>3</sup>/s; (f) CANCH1,  $V_0 = 87.83$  cm/s,  $C_0 = 0.03$  g/l,  $2h = 4.4$ ,  $Q_0 = 68.98$  cm<sup>3</sup>/s.



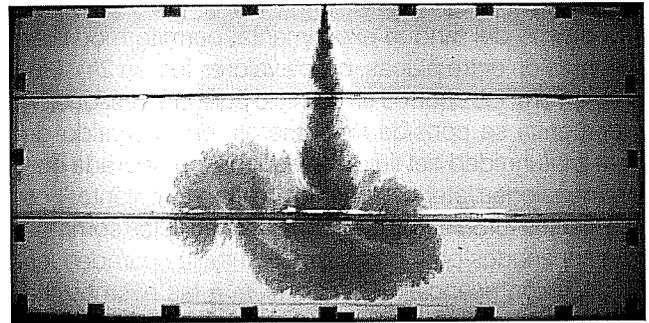
(a)



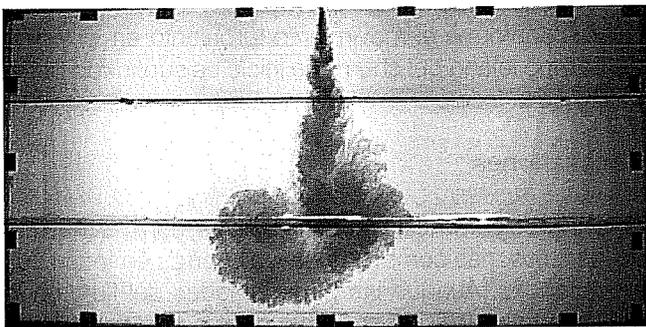
(b)



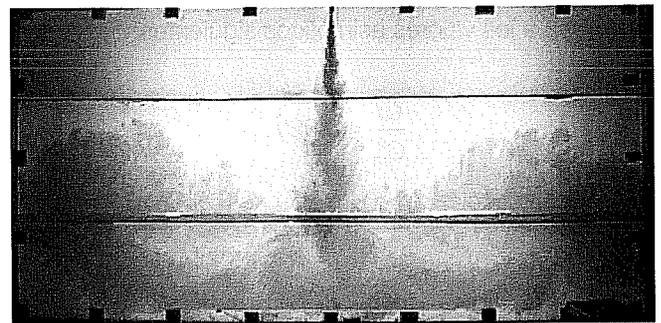
(c)



(d)

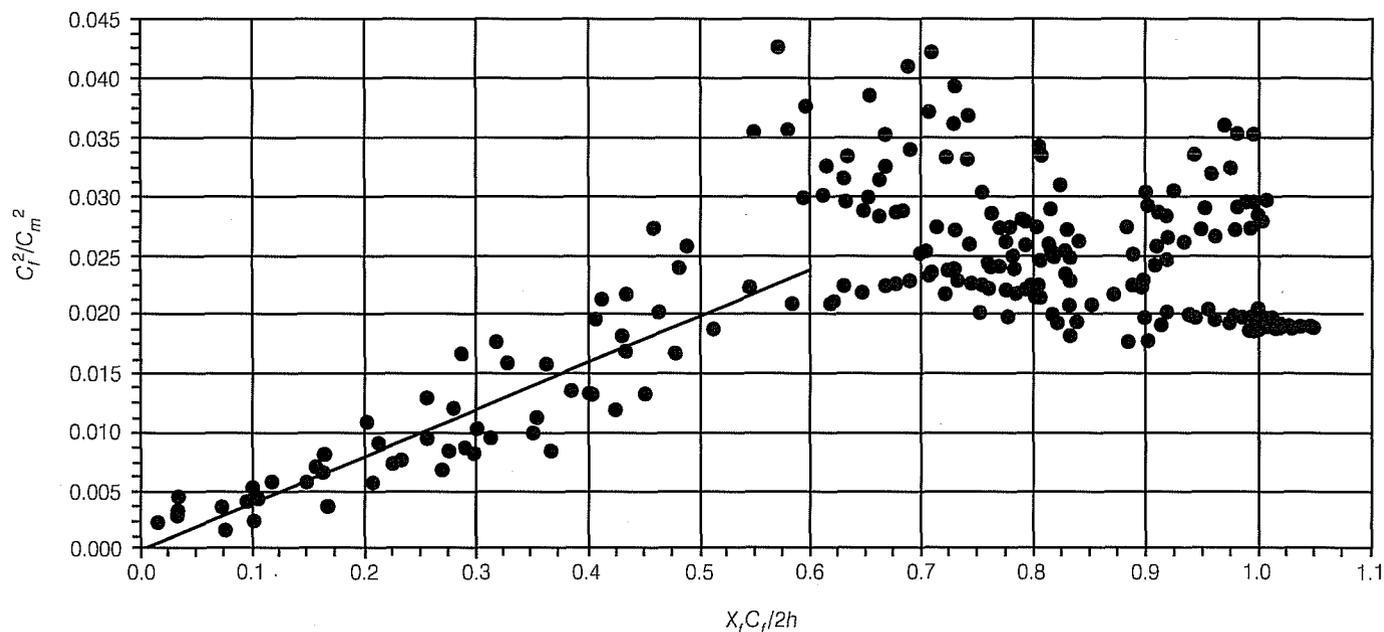


(e)



(f)

**Ilustración 5. Concentración máxima  $C_m$  en la sección transversal del frente de flujo turbulento. La información se obtiene del inverso cuadrado de  $C_m$  normalizado por una escala de concentración  $C_f$ .**



El diseño del tanque experimental permite modificar la separación entre placas, cuyos valores fueron  $2h=0.6, 1.29$  y  $4.4$  cm; los chorros en su inicio para la investigación experimental se consideran someros, en el sentido de que la profundidad del flujo es pequeña, comparada con las dimensiones laterales del movimiento turbulento. Los movimientos turbulentos de gran escala en flujos someros están confinados para desplazarse entre las paredes, en una dirección esencialmente paralela a las mismas. La característica principal de todas las pruebas es que se consideran como flujos confinados, pero no todos los flujos someros son afectados por la fricción.

*Efecto de confinamiento en el campo lejano*

El mezclado disminuye en la región de campo lejano, de manera que las concentraciones del trazador utilizado se aproximan a los valores asintóticos siguientes:

$$\frac{C_f^2}{C_m^2} = 0.029 \quad (2)$$

$$\frac{C_f^2}{C_m^2} = 0.029 \quad (3)$$

Este resultado se considera como un valor promedio, que representa el comportamiento grueso de la totalidad

de las pruebas. Por lo tanto, la concentración máxima en el frente del chorro  $C_f$  es la misma que la concentración máxima en el chorro  $C_m$  y la distancia de la fuente es más grande que  $0.5 \times 2h / C_f$ . Los datos experimentales se presentan dispersos debido a que se trata de valores instantáneos de un flujo turbulento inestable. Los valores asintóticos dados por las ecuaciones 2 y 3 se seleccionan para representar los promedios de los datos experimentales. En términos de escala de longitud de fricción y la fuente de gasto, los valores asintóticos dados por las ecuaciones 2 y 3 son:

$$C_f = C_m \approx 5.98 C_0 q_0 \sqrt{\frac{C_f \rho}{2h m_0}} \quad (4)$$

La concentración del trazador se aproxima a esos valores conforme el movimiento turbulento en la región del campo lejano del chorro de inicio es suprimido por el efecto de la fricción.

**Conclusiones**

El flujo turbulento inestable confinado es, con mucho, uno de los flujos más complejos de los chorros en todas sus modalidades. Aunque las profundidades del flujo en la presente investigación son pequeñas con respecto a la dimensión lateral del movimiento turbulento, sólo los flujos

turbulentos son dependientes del efecto de fricción ( $x_f c_f / 2h > 0.2-0.5$ ). La fricción es una fuerza que induce un efecto estabilizador en el movimiento turbulento generado por el cortante transversal de gran escala. Debido a este efecto, el mantenimiento del flujo turbulento de gran escala sólo es posible si la producción de energía por el cortante transversal es más grande que el trabajo negativo realizado contra la fuerza de fricción. La zona de influencia del efecto de fricción no está perfectamente definida debido a la naturaleza inestable del flujo. Sin embargo, la variación de la pendiente definida por la línea recta que se observa en la ilustración 5 muestra un comportamiento con una variación aproximadamente lineal, lo que puede delimitar una zona llamada de flujo turbulento estable, para posteriormente encontrar un máximo en la región alrededor del valor  $x_f c_f / 2h = 0.5$ . Después se presenta un aglomerado de puntos con valores del total de las pruebas, que se aproximan al valor de 0.029 de la concentración relativa en el costado derecho de la ilustración 5.

### Nomenclatura

- $Q_o$  = gasto de inyección del chorro,  $\text{cm}^3/\text{s}$ .  
 $A_o$  = área del inyector del chorro,  $\text{cm}^2$ .  
 $d_o$  = diámetro del inyector,  $\text{cm}$ .  
 $V_o$  = velocidad inicial de inyección del chorro,  $\text{cm}/\text{s}$ .  
 $2h$  = espesor entre placas paralelas,  $\text{cm}$ .  
 $C_o$  = concentración inicial del chorro,  $\text{g}/\text{l}$ .  
 $x_f$  = distancia del inyector al frente del chorro,  $\text{cm}$ .  
 $c_f$  = factor de fricción igual a 0.008.  
 $C_m$  = concentración máxima en la sección transversal,  $\text{g}/\text{l}$ .  
 $C_f$  = concentración en el frente del chorro,  $\text{g}/\text{l}$ .  
 $L_t$  = turbulencia de gran escala.  
 $l_t$  = turbulencia de pequeña escala.

Recibido: 20/09/2002  
Aprobado: 04/04/2003

### Referencias

- ALAVIAN, V. y CHU, V.H. Turbulent exchange flow in a shallow compound channel. *Proc., 21th Congress of Int. Assoc. of Hydraulic Research*. Vol. 3, 1985, pp. 446-451.
- ALTAI, W., ZHANG, J., VINCENT, H. y CHU, V.H. Shallow turbulent flow simulation using two-length-scale model. *Journal of engineering mechanics*. Vol. 125, núm. 7, julio, 1999, pp. 780-788.
- BABARUTSI, S., NASSIRI, M. y CHU, V.H. Computation of shallow recirculating flow dominated by friction. *Journal hydraulic engineering*. ASCE. Vol. 122, núm. 7, 1996, pp. 367-372.
- BABARUTSI, S. y CHU, V.H. Modeling transverse mixing layer in shallow open-channel flow. *Journal hydraulic engineering*. ASCE. Vol. 124, núm. 7, 1998, pp. 718-727.
- CHU, V.H. y BABARUTSI, S. Confinement bed-friction effects in shallow turbulent mixing layers. *Journal of hydraulics engineering*. Vol. 114, núm. 10, octubre, 1989, pp. 1257-1274.
- ENGELUND, F. y PEDERSEN, F.B. Surface jet at small Richardson numbers. *Journal of hydraulics division*. ASCE. Vol. 99, núm. HY3, 1973, pp. 405-416.
- JOHNSTON, A.J., PHILLIPS, C.R. y VOLKER R.E. Modeling horizontal round buoyant jets in shallow water. *Journal of hydraulics engineering*. Vol. 120, núm. 1, enero, 1991, pp. 41-59.
- WOOD, I.R. *Jets, plumes and ocean outfalls*. 11<sup>th</sup> Australian Mechanics Conference. Hobart, Australia: University of Tasmania, 1992, pp. 1297-1307.
- ZHANG, J.B. *Turbulence measurement in shallow shear flow using video imaging method*. PhD thesis. Montreal: Department of Civil Engineering and Appl. Mech., McGill University, 1997.

### Abstract

ROBLES LÓPEZ, J.I. *Turbulent flow analysis in shallow water bodies*. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. XIX, no. 1, January-March, 2004, pp. 75-82.

*This work studied the regime changes of flows incoming to shallow water bodies. This is the case, for example, of rivers flowing into the oceans. In this type of flows, the horizontal dimension of the water body is much larger than the vertical one, so the range of current scales is quite special. In this study, we consider a jet flow with a large Reynolds number that enters vertically into a tank containing with water at rest, conformed by two parallel plates with a separation of 0.6, 1.29, and 4.4 mm. Therefore, the flow developed in the tank is quasi three-dimensional or a one-plane turbulent jet. Due to the particular characteristics of this flow, several approximations can be found in specialized literature. For example, the fully developed turbulent shear flow, an essential object of this study, has two main generation sources: the stresses due to large-scale turbulence that take place on the horizontal plane and the stresses due to a small-range turbulence, generated by the influence of friction on the vertical plane. We used the digital image analysis technique to study the flow. Although the depths of the flows in the present study are small compared with the lateral dimension of the turbulent motion, only the turbulent flows in the far field ( $x, c, /2h > 0.2-0.5$ ) are dependent on the friction effect. Friction is a force exerting a stabilizing effect on the large-scale transverse-shear-generated turbulent motion.*

**Keywords:** turbulence, digital images, experimental techniques, Reynolds stresses.

### Dirección institucional del autor:

*M. en C. José Isidro Robles López*

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua,  
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, México,  
C.P. 62550,  
teléfono: + (52) (777) 329 3600, extensión 510,  
fax: + (52) (777) 321 8904,  
irobles@tlaloc.imta.mx.