

Tecnología IMHE: Nuevos desarrollos en la hidráulica

RODRIGO LEMOS RUÍZ (*); ALFREDO CONSTAÍN ARAGÓN (**); ALEJANDRO CARVAJAL RUÍZ (***)

RESUMEN Se presentan en este artículo los principales lineamientos de la tecnología **IMHE** (Instrumentación de multi-medición hidrológica electrónica) que basada en la metodología de "trazadores iónicos", conocida en Europa, introduce unas nuevas funciones de medición. Estas nuevas funciones se basan en ecuaciones alternas, propuestas para describir el transporte de solutos en cauces turbulentos, y cuyos principios son explicados aquí. Se describen algunas pruebas experimentales realizadas en pequeños cauces en Colombia, que demuestran una buena correspondencia entre teoría y datos de campo. Esta tecnología, que puede ser muy fácilmente adaptable a trazadores diferentes a los iónicos puede ser aplicada con comodidad y precisión en estudios de transporte de contaminación y evaluaciones hidráulicas.

IMHE TECHNOLOGY: NEW DEVELOPMENTS IN HYDRAULICS

ABSTRACT *It is presented in this article the main outlines of IMHE technology (multimeasurement electronic hydrometric instrument) which based on "ionic tracer" methodology, well known in Europe, introduces new measurements functions. These are based on alternate equations, proposed to describe the solute transport in turbulent streams, which main principles are explained herein. Here are described some experimental tests realized in small streams in Colombia, which show a good correspondence between theory and field data. This technology, which can be adapted to tracers different from ionics, may be applied with easy and accuracy in contaminant transport studies and hydraulic evaluations.*

Palabras clave: Hidráulica fluvial; Transporte de masa; Técnicas de trazador; Instrumentación digital.

TECNOLOGÍA IMHE

La tecnología **IMHE** corresponde al desarrollo de un instrumento electrónico digital de multimedición hidrométrica, que utilizando la información básica de conductividad de riadas generadas en el vertimiento de un material iónico en cauces turbulentos, extrae valiosa información sobre la naturaleza del transporte en fluidos y sobre las características hidráulicas de la corriente en examen. Esta técnica de los trazadores ha sido muy utilizada en el pasado, pero ciertas modificaciones introducidas al modelo físico de transporte de partículas han permitido avanzar en nuevos conceptos de gran potencial en hidráulica.

Durante los años 1999-2000 se realizaron múltiples salidas técnicas de campo en las que se pusieron a prueba las diferentes conjeturas teóricas, obteniéndose una buena concordancia con los experimentos [1] El instrumento IMHE puede entonces medir cinco variables a saber: Velocidad media en el tramo, caudal, coeficiente de dispersión turbulenta, número

de Manning, y conductividad. Su estructura esta basada en un microcontrolador que coordina las diferentes funciones en menú y realiza las operaciones aritméticas para presentar la información en pantalla o descargar a un computador. Su operación es entonces muy amigable, su tamaño y peso es reducido y su autonomía de baterías recargables es alta, mayor a 9 horas de operación continua. El sensor es comercial por lo que el mantenimiento y calibración son muy estandarizados. Equipos de esta tecnología están siendo adquiridos por las diferentes entidades que tienen responsabilidad en el monitoreo y control del recurso hídrico en Colombia.

UNA NUEVA ECUACIÓN PARA LA VELOCIDAD DEL CAUCE

El desarrollo del concepto de dispersión en los cauces naturales ha sido explicado a partir de la ecuación de Fick para la concentración de trazador, especialmente por Taylor (1953) quien postulo una forma de la ecuación en la que era necesario tener en cuenta un coeficiente constante.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U_x \frac{\partial C}{\partial x} = E \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

Al buscar una solución para esta ecuación, se encuentra que las soluciones son curvas del tipo gaussiano Ecuación (2) descritas por la clásica ecuación de Fick-Einstein:

$$C(x,t) = \frac{M}{A\sqrt{4\pi Et}} e^{-\frac{(x-U_x t)^2}{4Et}} \quad (2)$$

(*) Ingeniero, Universidad del Cauca. Jefe Depto. Hidráulica, Universidad del Cauca, Colombia. ralemos@ucauca.edu.co

(**) Ingeniero Jefe de I+D. Universidad Autónoma de Occidente. Cali, Colombia. alfredoconstain@terra.com

(***) Ingeniero, Instrumentos Inteligentes EAT. Jefe Diseño, Instrumentos Inteligentes EAT, Colombia. amazonas@parquesoft.com

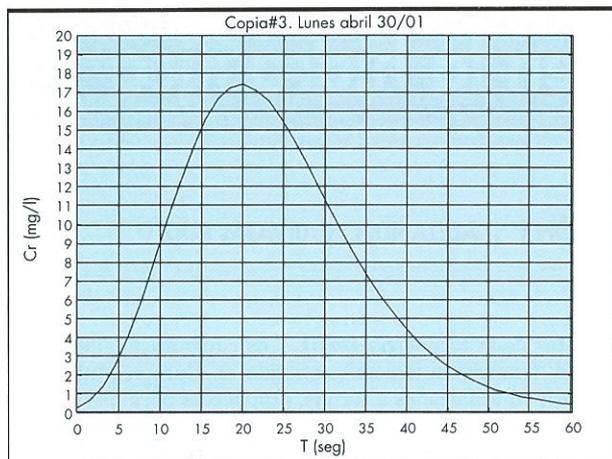


FIGURA 1.

Los resultados experimentales difieren usualmente de la expectativa teoría, ya que son curvas asimétricas, no gaussianas, en las que aparece de manera sistemática una “cola” más larga en el flanco de bajada de la riada. Además algunas veces la altura de la curva no corresponde a las mediciones, especialmente en los tramos cortos y medios del recorrido del trazador en el cauce Figura 1.

El Grupo de Hidrometría, a partir de los desarrollos experimentales de su tecnología digital IMHE ha propuesto una revisión de este concepto, indicando que una probable razón por la cual el experimento no concuerda en algunos casos con la teoría en la ecuación de Fick-Taylor, es por que este modelo no considera ninguna relación numérica entre las poblaciones de partículas que tienen movimiento *advectivo* puro, y las que tienen movimiento *difusivo* puro. Esta condición adicional establece una relación directa entre la causa de las inestabilidades hidráulicas en cauces turbulentos, la velocidad media, y la velocidad de difusión general de las partículas del trazador que paulatinamente se va acoplado al campo de turbulencia [2].

Esta condición numéricamente se establece como un *coeficiente de asimetría* ϕ que relaciona las dos poblaciones de partículas, medida por medio de la razón de velocidades:

$$\phi = \frac{V_{Dif}}{U_x} \quad (3)$$

En esta ecuación, V_{dif} es la *velocidad de difusión* y se calcula por medio de la relación de *Einstein-Smoluchowsky*, la cual es válida para movimiento completamente al azar, U_x es la *velocidad media advectiva del cauce* y E es el Coeficiente de dispersión longitudinal, si se considera una sola coordenada.

$$\Delta^2 = 2 E \tau \quad (4)$$

Por lo tanto, y teniendo en cuenta que Δ y τ son longitudes y tiempos característicos del proceso de dilución, se tiene:

$$U_x = \frac{1}{\phi} \sqrt{\frac{2 E}{\tau}} \quad (5)$$

Esta ecuación, que define la velocidad media del cauce, es en realidad una expresión general, válida incluso para condiciones de *flujo variado*, dado que las condiciones impuestas sobre la ecuación *no tienen que ver con este régimen*. Esta ecuación, que es más general que la ecuación original de la velocidad de Chezy, puede ser aplicada tanto a ríos como a canales.

Igualando la ecuación clásica de Chezy, en condiciones aproximadas de *flujo uniforme* para canales, se puede determinar el Coeficiente de resistencia de Chezy:

$$C = \frac{1}{\phi} \sqrt{\frac{2 E}{\tau R S}} \quad (6)$$

Donde R y S son respectivamente el Radio Hidráulico y la pendiente de la línea de energía.

UNA NUEVA ECUACIÓN PARA LA DISPERSIÓN

Si se despeja el Coeficiente de dispersión longitudinal E , si se reemplaza en la solución de Fick-Taylor, y si se supone que $\tau = \beta t$, donde β es una constante geométrica, se tiene:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U_x \frac{\partial C}{\partial x} = (\phi^2 U_x^2 \beta t) \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (7)$$

Esta ecuación modificada tiene en cuenta la relación de poblaciones en el fenómeno de transporte, y por lo tanto involucra los fenómenos que conducen a formas no gaussianas:

$$C(x, t) = \frac{M}{Q t \phi \sqrt{2 \pi \beta}} e^{-\frac{(x-U_x t)^2}{2 \phi^2 \beta U_x^2 t^2}} \quad (8)$$

La anterior solución concuerda bastante con los datos experimentales, debiéndose tener condiciones de *mezcla completa* (o sea difusión completa en toda la sección transversal) para cumplir con las condiciones de cálculo del caudal Q .

UNA NUEVA ECUACIÓN PARA LA RUGOSIDAD

Si se tiene en cuenta que en los cauces turbulentos, la dispersión longitudinal (originada por gradientes erráticos de velocidad) y la difusión transversal (originada por movimientos de torbellino o por dispersión de obstáculos) corresponden a idénticos movimientos aleatorios, descritos por idénticas leyes, se puede establecer un modelo unificado en el que un único mecanismo efectúe la separación errática de partículas. A partir de este modelo, y aplicando condiciones de la dinámica del fluido, particularidades de la geometría del cauce, y parámetros básicos del agua, se puede entonces llegar a la siguiente expresión para la resistencia y la rugosidad de Chezy y Manning, en condiciones de *flujo uniforme* [3].

$$C = \left(\frac{E}{2 \phi^2 \tau} \right)^{\frac{1}{5}} \left(\frac{v Re}{R^{\frac{1}{5}} S^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (9)$$

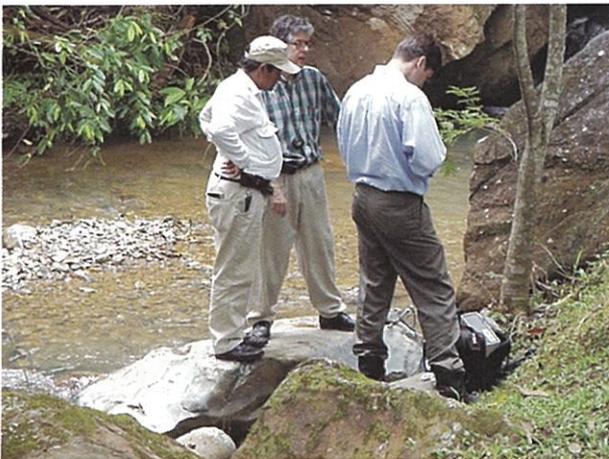
Y también:

$$n = \frac{R \sqrt{S} (2 \phi^2 \tau)^{\frac{1}{5}}}{E^{\frac{1}{5}} (v Re)^{\frac{1}{5}}} \quad (10)$$

Con estas ecuaciones es factible superar el nivel actual de la medición de estos coeficientes, en los que la observación subjetiva ha sido fundamental al método práctico de evaluación de los parámetros en ingeniería civil.



FIGURAS 1, 2 y 3; respectivamente.



ALGUNOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

Utilizando el instrumento digital mostrado en la Fotografía 1, construido para la verificación experimental de las conjeturas teóricas, se realizaron mediciones de campo, tanto en la quebrada de la Fotografía 2, como en el pequeño canal de la Fotografía 3.

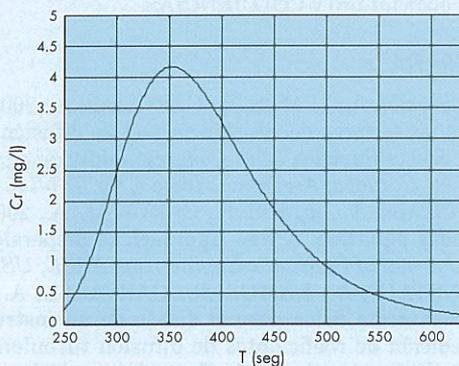
Teniéndose los siguientes resultados:

1. CURVAS TEÓRICAS VS. CURVAS EXPERIMENTALES:

Las ecuaciones (5) y (8) han servido para desarrollar un programa que modela teóricamente las curvas de las riadas, correspondientes a experimentos reales, teniéndose una buena coincidencia tanto en canales como en ríos:

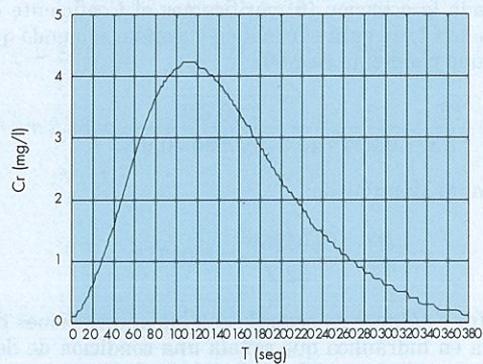
Experimento en Quebrada “Chorro de Plata” a X=80 mts. Y M= 250 Gramos:

X=80 m, $U_x=0.22$ m/s $t=363$ s
 $Q=0.374$ m³/s, $\tau=78.8$ s seg. $\phi=0.384$



Modelo teórico

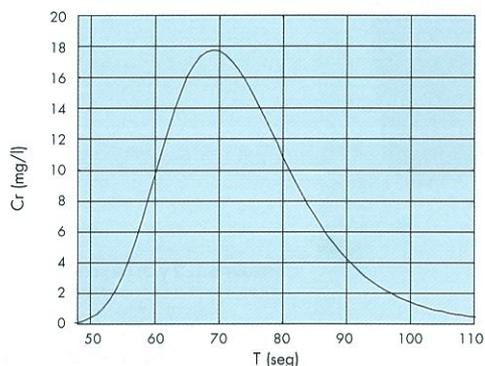
QCPlata#10 - Miercoles-Marzo 28/01



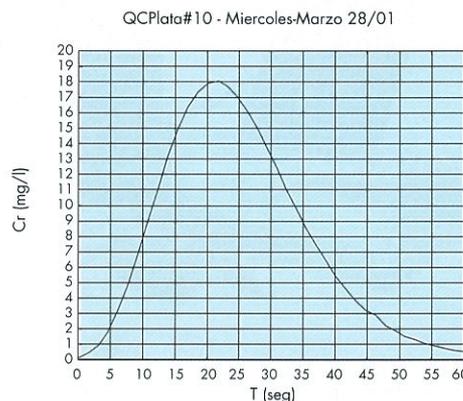
Curva experimental

Experimento Canal "Chorro de Plata" a X=50 mts. y M=10 Gramos

$Q=0.0227\text{m}^3/\text{s}$ $U_x=0.71\text{ m/s}$ $t=70.4\text{ s.}$
 $\tau=15.3\text{ s}$ $\phi=0.304$



Modelo teórico



Curva experimental

2. EVALUACIÓN DEL NÚMERO DE MANNING

Para el segundo experimento sobre el canal, en donde se puede asumir razonablemente una condición de flujo uniforme, con los datos del instrumento se calcula un área promedio en el tramo:

$$A = \frac{Q}{U_x} = \frac{0.0227}{0.71} = 0.032\text{ m}^2$$

Se puede calcular ahora el Radio hidráulico si se conoce la anchura media del canal, tomada por INTELEAT: $W = 0.36\text{ m}$ y si la profundidad media es:

$$h = \frac{A}{W} = \frac{0.032}{0.36} = 0.089\text{ m}$$

Por lo tanto, el Radio Hidráulico medio será:

$$R = \frac{A}{2h + W} = \frac{0.032}{2 \times 0.089 + 0.36} = 0.0595\text{ m}$$

Se calcula el coeficiente de dispersión, mediante la ecuación (5):

$$E = \frac{\phi^2 U_x^2 \tau}{2} = \frac{(0.304)^2 (0.71)^2 (0.217 \times 70.4)}{2} = 0.356\text{ m}^2/\text{s}$$

Utilizando la ecuación (6) verificamos el Coeficiente de resistencia de Chezy para el canal en cuestión, sabiendo que este tiene una pendiente de 0.007.

$$C = \frac{1}{\phi} \sqrt{\frac{2E}{RS}} = \frac{1}{0.304} \sqrt{\frac{2 \times 0.365}{15.3 \times 0.0595 \times 0.007}} = 35.2\text{ m}^{1/2}/\text{s}$$

Por lo tanto Manning da:

$$n = \frac{R^{1/6}}{C} = \frac{(0.0595)^{1/6}}{35.2} = 0.01775$$

Esta cifra está muy de acuerdo con las apreciaciones del especialista en hidráulica que señala una condición de desgaste en el revestimiento del canal.

A partir de este número de Manning se puede calcular el número de Reynolds que vale para este cauce, teniéndose:

$R_e = 171000$ Cifra muy cercana a la que se obtiene de aplicar las fórmulas clásicas de Darcy

CONCLUSIONES

Se pueden formular las siguientes conclusiones preliminares sobre el desarrollo y la aplicación de la tecnología IMHE:

1. Corresponde a un proyecto que se orienta a dar soluciones en el área de mediciones hidráulicas y ambientales, mediante un instrumento electrónico digital multivariable.
2. Dentro de su ejecución se encontraron interesantes expresiones teóricas sobre los mecanismos generales de la dispersión turbulenta, que permiten ampliar el nivel de conocimiento sobre la hidráulica de ríos y la teoría de transporte.
3. Dichas expresiones fueron puestas a examen experimental, con una gran concordancia entre los valores previstos teóricamente y las realidades experimentales.
4. El instrumento permite entonces ampliar el panorama de las mediciones en el recurso agua, facilitando su entendimiento, control y mejoramiento.

RECONOCIMIENTOS

Se quiere reconocer la importante ayuda científica y técnica brindada en Colombia por: Corporación Ambiental del Valle del Cauca (C.V.C), Universidad Autónoma de Occidente (C.U.A.O.), Incubadora de empresas de base tecnológica de Cali (Incubar futuro) y COLCIENCIAS.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] CONSTAÍN, A.; LEMOS, R.; CARVAJAL, A., 2000, "Medición de los factores de resistencia y el de difusión turbulenta en cauces fluviales", *XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Córdoba, Argentina, Tomo I*, Pp: 737-745
- [2] CONSTAÍN, A.; LEMOS, R.; CARVAJAL, A., 2001. "Second Chezy equation: A new approach to dispersion" enviado a *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, USA*.
- [3] CONSTAÍN, A.; LEMOS, R.; CARVAJAL, A., 2000. "Fundamentación física para el diseño de un instrumento para medición de coeficientes de difusión turbulenta", *IX Congreso Latinoamericano de Control Automático, y Congreso Internacional de Metrología METROLOGIA 2000, Guadalajara, México*.