

MODELACIÓN NUMÉRICA DE LA DISTRIBUCIÓN DEL FLUJO A SUPERFICIE LIBRE EN SECCIONES COMPUESTAS

Juan F. Weber^{*}, Ángel N. Menéndez[†], y Sergio A. Elaskar^{*}

^{*} Dpto de Hidráulica – Fac. de Cs. Exactas, Físicas y Naturales
Univ. Nac. de Córdoba - Av. Vélez Sársfield 1601 – Ciudad Universitaria – C.P. 5000 – Córdoba –
Tel / Fax: +54 (351) 4334415 – e-mail: jweber@efn.uncor.edu - selaskar@efn.uncor.edu

[†] INA – Lab. de Hidráulica – C.C. 21, 1802 – Aeropuerto Ezeiza - e-mail: menendez@satlink.com

Palabras clave: hidráulica computacional, modelación hidrodinámica, ríos de llanura.

Resumen. *En este trabajo se obtienen resultados de modelos numéricos difundidos en el medio ingenieril para problemas de flujo a superficie libre en canales de sección compuesta, y se los compara con una solución analítica conocida y con datos experimentales disponibles. La comparación se centraliza en la variación lateral de la magnitud de la velocidad media sobre la vertical. Se han utilizado dos modelos hidrodinámicos: uno unidimensional (HEC-RAS) y otro bidimensional (RMA2). En el primero es posible estimar una distribución lateral de velocidades a través de un algoritmo especial. En general, se observa que para profundidades relativas bajas en la planicie de inundación, el modelo 1D representa mejor la distribución de flujo, en tanto que para valores altos de esa profundidad el modelo 2D da mejores resultados. Se destaca la buena performance de la solución analítica, lo que sugiere tratar de extender su aplicación a secciones más complejas que la analizada.*

Abstract. *In this paper, we obtain results from commonly-used numerical engineering models for open-channel flow in compound sections, and we compare it with a well-known analytical solution and experimental data. This comparison is focused on lateral variation of depth-mean velocity in the flow direction. Two hydrodynamic models are used: a one-dimensional (HEC – RAS) and a two-dimensional (RMA2) model. Through a special algorithm, the one-dimensional model can estimate the lateral distribution of depth-mean velocity. For a small floodplain relative depth, the 1D-model fits better than the 2D-model; instead the 2D-model fits better than the 1D-model when the floodplain relative depth is large. We highlights the good performance of the analytical solution, that suggests its extension to more complex geometries.*

1 INTRODUCCION

En numerosas aplicaciones de la ingeniería hidráulica es necesario estimar la distribución transversal de la velocidad en canales de sección compuesta, típicamente constituidas por el canal principal y planicies de inundación a ambas márgenes. Asociado a este fenómeno de distribución de velocidades, aparece vinculada la existencia de tensiones de corte transversales y corrientes secundarias. Estos temas han sido estudiados por varios investigadores, tanto en forma experimental^{1,2} como numérica³.

En los últimos años se vienen utilizando en aplicaciones ingenieriles modelos numéricos que permiten obtener una estimación de la distribución de velocidades promediadas en la vertical; algunos, como los modelos 2D, la obtienen como un resultado inherente al problema a resolver, en tanto que otros, de formulación 1D, permiten inferirla a partir de una extensión de la aplicación de las ecuaciones constitutivas originales.

En este trabajo, se comparan los resultados obtenidos a partir de la utilización de modelos numéricos difundidos en nuestro medio aplicados a problemas con solución analítica conocida y con datos experimentales disponibles, de modo de determinar la bondad de la simulación.

2 PLANTEO DEL PROBLEMA

La sección típica de un río puede considerarse constituida por dos partes principales: el canal principal y las planicies o llanuras de inundación. El primero se define como el cauce que normalmente ocupa el río en periodo de estiaje o crecidas moderadas, en tanto que las segundas son las áreas inundadas durante eventos de magnitud. Es un hecho conocido que la velocidad del flujo en el cauce principal es mayor que en las planicies de inundación, lo cual trae aparejada la existencia de una “capa de corte” en la vecindad entre las dos regiones, con una tensión de corte que usualmente se expresa de acuerdo a la relación:

$$\tau = \mu \frac{dU}{dy} \quad (1)$$

donde:

τ	Tensión de corte
μ	Viscosidad de torbellino absoluta
U	Velocidad en la dirección del flujo
y	Coordenada transversal al flujo

Es posible idealizar y parametrizar la sección compuesta del modo indicado en la Figura 1⁴.

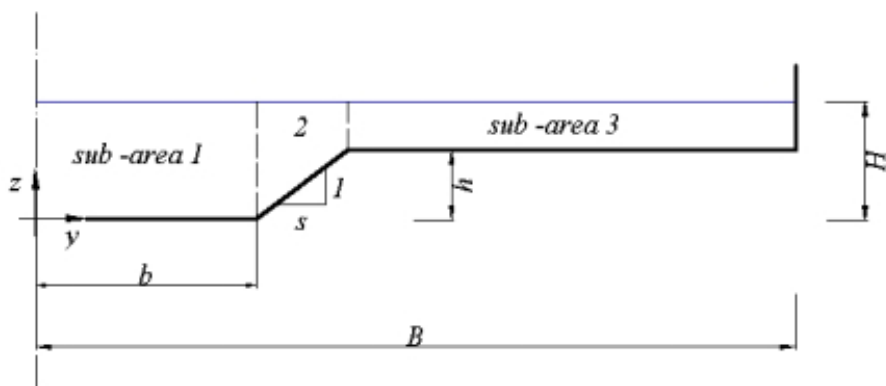


Figura 1: esquema básico

Se pretende encontrar una función $U(y)$ que describa apropiadamente la distribución transversal de velocidades para una serie de casos de estudio, para los cuales existen datos experimentales.

Las características geométricas e hidráulicas consideradas para los casos de estudio están indicadas en la Tabla 1.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8
b (m)	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
B (m)	3.15	3.15	3.15	3.15	3.15	1.65	1.65	1.65
h (m)	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
H (m)	0.169	0.178	0.187	0.198	0.2879	0.1667	0.1987	0.30
s	1	1	1	1	1	1	1	1
$S_0(10^{-3})$	1.027	1.027	1.027	1.027	1.027	1.027	1.027	1.027
n mc	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011
n fp	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011
Q(m ³ /s)	0.226	0.265	0.308	0.368	1.056	0.221	0.326	0.758

Tabla 1: casos de estudio

Los casos corresponden a los experimentos realizados en el Flood Channel Facility del Science and Engineering Research Council (SERC)⁴. Se cuenta para todos ellos con perfiles transversales de velocidad medidos.

3 DATOS EXPERIMENTALES

Los datos experimentales utilizados fueron obtenidos de las referencias^{4,5}. Se da una breve descripción de la instalación utilizada.

El SERC Flood Channel Facility (SERC-FCF) consiste en un canal de 56 m de longitud, 10 m de ancho con una capacidad de 1,1 m³/s. Dispone de lados móviles lo cual le permite modelar diversas geometrías. A su vez es posible modificar la rugosidad y la permeabilidad del mismo. El mismo se encuentra en las instalaciones de Hydraulics Research, Reino Unido.

Mediante la utilización de micromolinetes de 10 mm de diámetro, con un tiempo de medición de 1 min, se determinaron las velocidades promediadas en el tiempo a lo largo de la transversal de una sección ubicada a 34 m aguas abajo del inicio del canal.

Los resultados así obtenidos fueron publicados adimensionalizados con respecto a la velocidad media de toda la sección.



Figura 2: Flood Channel Facility, Hydraulics Research, UK

4 SOLUCION ANALÍTICA

4.1 Descripción

Shiono y Knight^{4,5} presentan la solución analítica de la variación transversal de la velocidad promediada en la vertical, para canales de sección compuesta, en régimen uniforme y permanente. Partiendo de plantear la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento a un elemento prismático diferencial, integrando en la vertical, y asumiendo una ley de fricción cuadrática como la de Darcy – Weisbach, se puede llegar a la siguiente solución:

Para las áreas 1 y 3 (dominio de profundidad constante):

$$U = \sqrt{A_1 e^{2y} + A_2 e^{-2y} + \frac{8gS_0 Y}{f}(1 - \beta)} \quad (2)$$

Para el área 2 (dominio de profundidad linealmente variable):

$$U = \sqrt{A_3 Y^{\alpha_1} + A_4 Y^{-\alpha_2} + \omega Y} \quad (3)$$

Donde:

$$\gamma = \sqrt{\frac{2}{\lambda}} \sqrt[4]{\frac{f}{8}} \frac{1}{Y} \quad (4)$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{s\sqrt{1+s^2}}{\lambda} \sqrt{8f} \mp \frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$\omega = \frac{gS_0}{\frac{\sqrt{1+s^2}}{s} \frac{f}{8} - \frac{\lambda}{s^2} \sqrt{\frac{f}{8}}} \quad (6)$$

$$Y = \begin{cases} H & \text{para } y < b \\ H - \frac{y-b}{s} & \text{para } b < y < b+sh \\ H-h & \text{para } y > b+sh \end{cases} \quad (7)$$

f Factor de fricción de Darcy – Weisbach

λ Viscosidad adimensional de torbellino

β Coeficiente representativo del gradiente lateral de la fuerza de corte debida al flujo secundario

El coeficiente de fricción de Darcy – Weisbach y el parámetro de Manning están relacionados por:

$$f = \frac{8gn^2}{\sqrt[3]{Y}} \quad (8)$$

El parámetro adimensional λ se puede expresar como:

$$\varepsilon_{yx} = \lambda H \sqrt{\frac{f}{8}} U \quad (9)$$

Donde ϵ_{yx} es la viscosidad de torbellino de Boussinesq.

Los coeficientes A_1 , A_2 , A_3 y A_4 surgen como resultado del sistema lineal de ecuaciones que se obtiene al plantear las siguientes condiciones de borde:

a) Condición de simetría

$$\frac{\partial U}{\partial y} = 0, \text{ para } y = 0 \quad (10)$$

b) Condición de no deslizamiento

$$U = 0, \text{ para } y = B \quad (11)$$

c) Condición de continuidad en la función

U calculada a partir de la ecuación (2) debe ser igual a U calculada a partir de la ecuación (3), tanto para $y = b$ como para $y = b+sh$.

d) Condición de continuidad en la derivada de la función

$\partial U/\partial y$ calculada a partir de la ecuación (2) debe ser igual a $\partial U/\partial y$ calculada a partir de la ecuación (3), tanto para $y = b$ como para $y = b+sh$.

4.2 Implementación y resultados

Se implementó la solución analítica descrita para los 8 casos de estudio mencionados. Para ello, y en cada caso de estudio, se plantearon la matriz de coeficientes y la de términos independientes del sistema lineal de ecuaciones surgido de aplicar las condiciones de borde antes mencionadas. Se resolvió dicho sistema, considerando los siguientes valores^{4,5}:

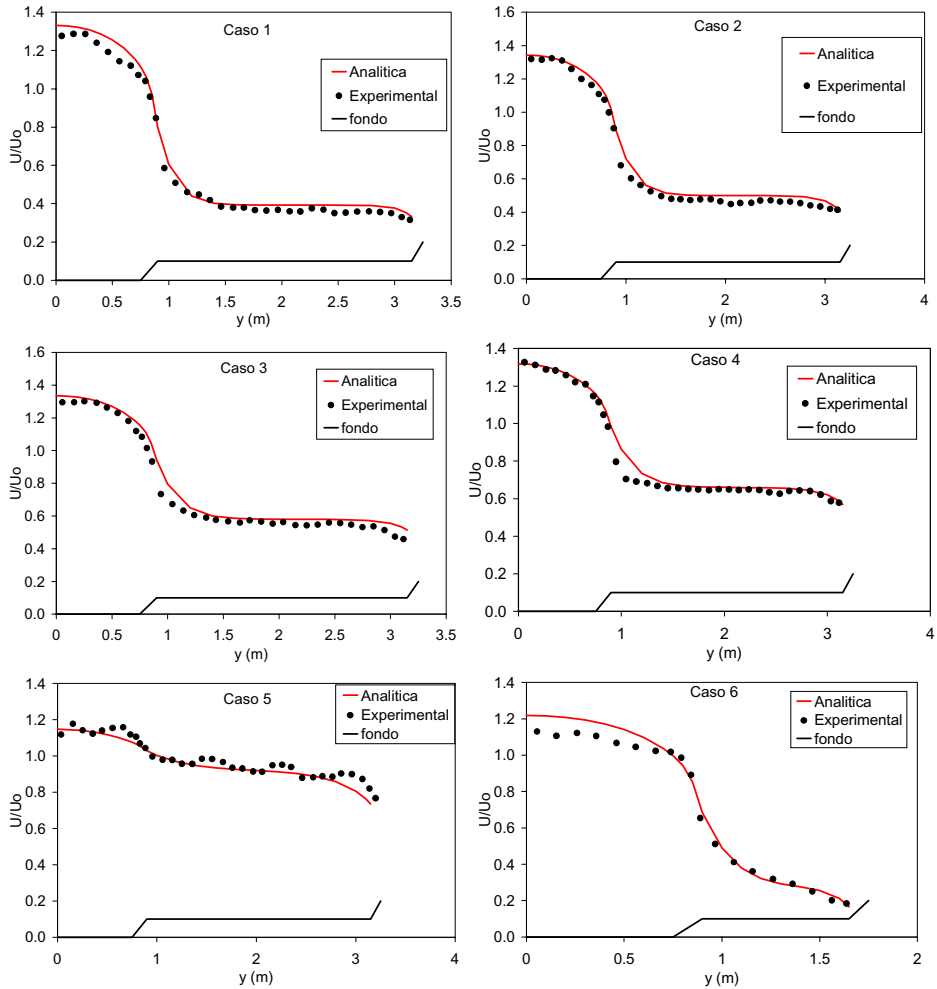
$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 0.47 \\ \lambda_2 &= \lambda_3/D_r^{1,5} \\ \lambda_3 &= 0.2 \\ \beta_1 &= 0.15 \\ \beta_3 &= -0.25 \end{aligned}$$

Donde los subíndices identifican las áreas de la sección, y D_r es

$$D_r = \frac{H-h}{H} \quad (12)$$

En la Figura 3 se muestran los resultados de la aplicación de la solución analítica, adimensionalizados respecto a la velocidad media en la sección, comparados con los datos experimentales disponibles. En general podemos observar un muy buen ajuste de la solución

analítica de Shiono y Knight. Es de destacar que en todos los casos analizados los valores de los coeficientes λ y β se mantuvieron constantes. Con el objeto de representar el efecto de la capa límite presente en el contorno exterior de la sección, y teniendo en cuenta que la sección del SERC-FCF posee un talud adicional en las márgenes de las planicies de inundación, se fijó la condición de no deslizamiento a una coordenada algo mayor del valor de B. Ese incremento artificial no es mayor en ningún caso al 10% del ancho original.



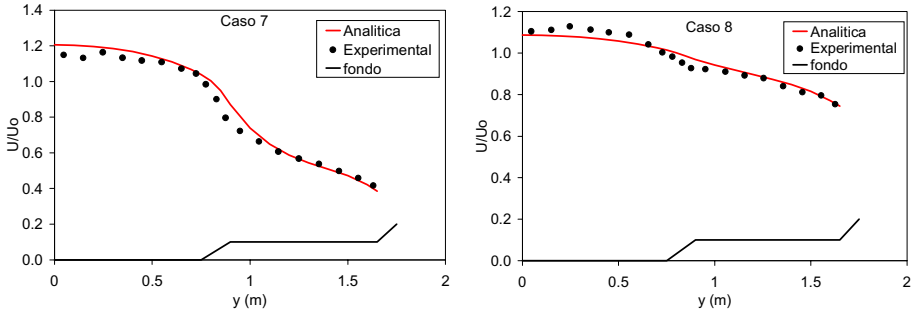


Figura 3: Resultados de la solución analítica comparados con datos experimentales

5 MODELO UNIDIMENSIONAL

5.1 Descripción

El modelo unidimensional utilizado se basa en la aplicación de la ecuación de Bernoulli, para el flujo permanente gradualmente variado:

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (13)$$

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left(\frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right) \quad (14)$$

$$\bar{S}_f = \frac{1}{2} (S_{f1} + S_{f2}) \quad (15)$$

Donde

Y	Tirante o profundidad de flujo
Z	Cota o elevación del fondo
V	Velocidad media en la sección
α	Coefficiente de distribución de velocidades o de Coriolis
h_e	Pérdidas de energía en el tramo entre las secciones 1 y 2
L	Longitud del tramo entre las secciones 1 y 2
S_f	Gradiente longitudinal de pérdidas por fricción
C	Coefficiente por pérdidas por contracción – expansión

Y los subíndices hacen referencia a dos secciones contiguas 1 y 2.

El programa utilizado es HEC – RAS (River Analysis System) del U.S. Army Corps of

Engineers, en su version 3.0 (enero del 2001).

Para el problema que nos ocupa, nos interesa en particular la forma en que el modelo unidimensional estima una distribución transversal de velocidades.

Todas las leyes empíricas de pérdidas de energía utilizadas en hidráulica de canales abiertos pueden ser escritas en la forma:

$$Q = KS_f^{1/2} \quad (16)$$

Donde Q es el caudal, S_f es la pendiente de la línea de energía y K es la conductividad hidráulica, que si se utiliza la ecuación de Manning para estimar pérdidas por fricción, se puede expresar como:

$$K = \frac{AR^{2/3}}{n} \quad (17)$$

Donde A es el área de flujo, R el radio hidráulico y n el coeficiente de rugosidad de Manning.

El usuario debe indicar al programa que desea obtener el perfil transversal de velocidades mediante la opción “Flow Distribution”. En ella, debe indicar el número de puntos en los que desea obtener los valores de la velocidad promediada en el área de influencia de cada uno de ellos.

Suponiendo conocidos los valores de S_f y el nivel del agua en una sección determinada (los cuales fueron calculados al resolver el perfil de flujo en el problema dado), los pasos seguidos por el programa son los siguientes⁶:

- a) Divide el área de flujo en la cantidad de partes definida por el usuario, y luego calcula el área, perímetro mojado, radio hidráulico (área sobre perímetro) y profundidad hidráulica (área sobre ancho superficial) para cada parte.

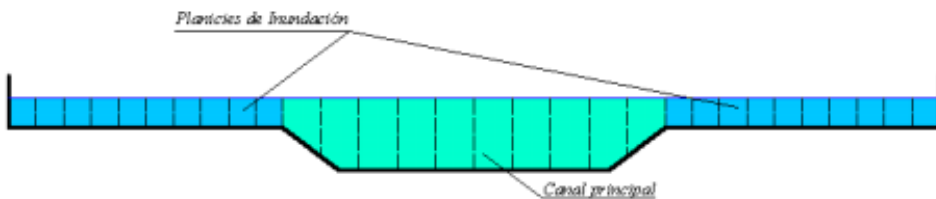


Figura 4: Subdivisión de la sección transversal en HEC – RAS – cada zona se divide en n partes

- b) Con los valores calculados previamente, y el valor del n de Manning correspondiente, calcula la conductividad y el porcentaje de flujo en cada parte.
- c) Suma las conductividades de cada parte. En general, esta suma será distinta a la conductividad de la sección completa. Para corregir esta diferencia, calcula la

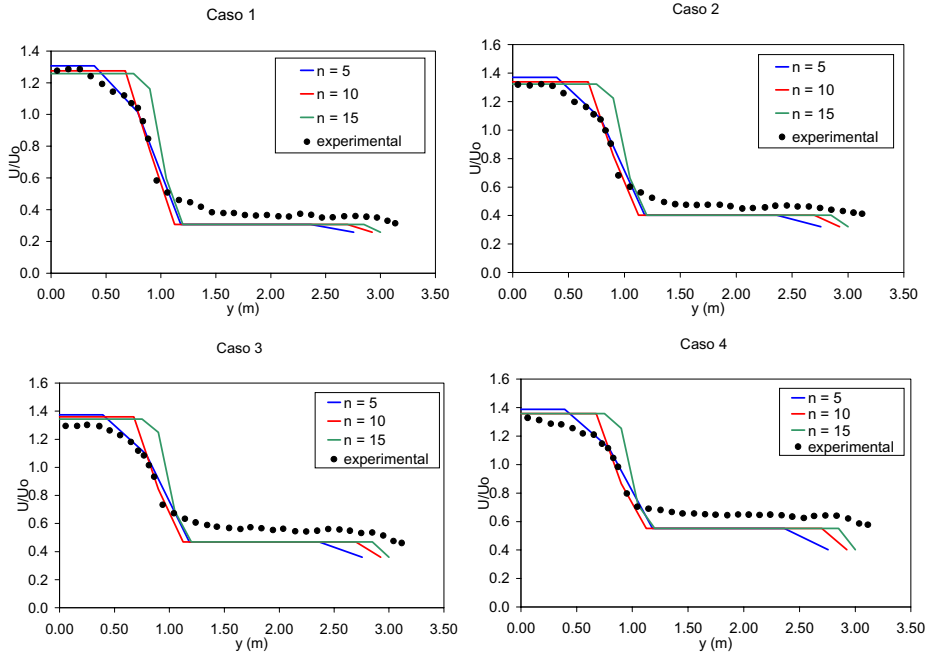
relación entre la conductividad de la sección completa y la suma de las conductividades parciales. Luego multiplica la conductividad de cada sector por esa relación. Con esa conductividad determina el caudal en cada sector.

- d) Por último, calcula la velocidad media en cada sector como el cociente del caudal parcial antes determinado y el área correspondiente.

5.2 Implementación y resultados

Se corrió el programa HEC – RAS para los 8 casos indicados, obteniendo de ese modo los perfiles transversales de velocidades correspondientes.

Además se realizó un análisis de sensibilidad al número de partes o sectores en que se dividió la sección transversal. Para ello, se tomaron los casos 1 a 5 indicados anteriormente y se subdividió a la sección transversal en 15, 30 y 45 partes o sectores. En la Figura 5 se pueden apreciar los resultados de HEC RAS conjuntamente con los datos experimentales.



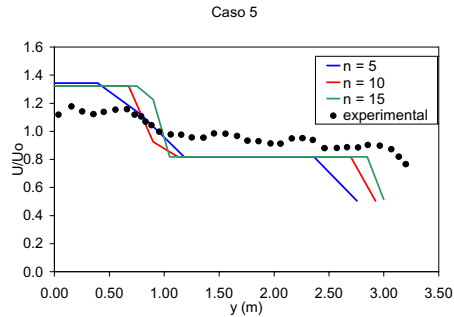


Figura 5: Sensibilidad de la distribución del modelo 1D al número de subdivisiones ($3n$)

Puede verse que para los casos analizados, no hay gran variación en el perfil transversal de velocidades estimado a partir del modelo 1D cuando se varía el paso de discretización; en los valores correspondientes al cauce principal, las diferencias son siempre inferiores al 3%, en tanto que en la planicie son prácticamente nulas. Sí son más notables las diferencias en la zona del talud del cauce principal, ya que un mayor número de subdivisiones parece provocar la aparición de mayores gradientes de velocidad; en general valores de n menores a 10 representan mejor dicha variación.

Es interesante y a la vez sorprendente ver que el modelo 1D, que utiliza una formulación tan simplificada, representa con un ajuste bastante aceptable los datos experimentales disponibles. Puede observarse también que este ajuste es tanto mejor cuanto menor es el valor de D_r . De todos modos, debe notarse que en este último caso se forzó al modelo 1D a pasar por la profundidad de flujo conocida, y debido a las limitaciones del modelo 1D a representar adecuadamente la profundidad de flujo para un caudal dado, no siempre fue posible obtener la condición de flujo uniforme necesaria para la aplicación de la solución analítica, tal como se muestra en los perfiles de flujo de la Figura 9.

En prácticamente todos los casos considerados el modelo 1D sobreestima las velocidades en el cauce principal y las subestima en las planicies de inundación. Es de suponer que la sobreestimación citada se deba a la incapacidad del modelo de tener en cuenta las pérdidas por torbellinos de eje vertical que se producen en la zona de altos gradientes de velocidad (shear layer region), que disminuyen la conductividad hidráulica del cauce, y por conservación de masa, y en consecuencia, se produce en las planicies una disminución de las velocidades. Este efecto es tanto mayor cuanto mayor es la profundidad de flujo en la sección.

6 MODELO BIDIMENSIONAL

6.1 Descripción

El modelo bidimensional utilizado se basa en las ecuaciones de aguas poco profundas (shallow water equations), que surgen de la integración en la vertical de las ecuaciones de Reynolds:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (18)$$

$$h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left(E_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + gh \left(\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{g u n^2}{h^{1/3}} (u^2 + v^2)^{1/2} = 0 \quad (19)$$

$$h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left(E_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + gh \left(\frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{g v n^2}{h^{1/3}} (u^2 + v^2)^{1/2} = 0 \quad (20)$$

La ecuación (18) es la de conservación de masa, en tanto que la (19) y la (20) son las ecuaciones de cantidad de movimiento en las direcciones x e y , respectivamente, donde:

- h Profundidad de flujo
- u, v Componentes de la velocidad en las direcciones cartesianas
- x, y, t Coordenadas cartesianas y tiempo
- ρ Densidad del fluido
- E Coeficiente de viscosidad turbulenta
- xx : dirección normal al plano xz - yy : dirección normal al plano yz
- xy e yx : dirección de corte en cada superficie
- g Aceleración de la gravedad
- a Cota del fondo
- n Coeficiente de rugosidad de Manning

El modelo numérico utilizado es el RMA2⁷ (U.S. Army Corps of Engineers – Waterways Experiment Station – Hydraulics Laboratory). En éste, las ecuaciones (18), (19) y (20) son resueltas por el método de los elementos finitos usando el método de Galerkin de los residuos ponderados. Las funciones de forma son cuadrática para la velocidad y lineal para la profundidad. La integración en el espacio se realiza por integración gaussiana. Las derivadas temporales son reemplazadas por una aproximación no lineal en diferencias finitas. Se asume que las variables varían a lo largo de cada intervalo de tiempo en la forma:

$$f_{(t)} = f_{(0)} + at + bt^c \quad t_0 \leq t < t_0 + \Delta t \quad (21)$$

La cual es derivada respecto del tiempo, y termina en una forma en diferencias finitas. Los parámetros a , b y c son constantes.

La solución es totalmente implícita y el conjunto de ecuaciones simultáneas es resuelto por el método de Newton Raphson.

6.2 Implementación y resultados

El modelo 2D no ha podido implementarse en los casos 1 y 6, ya que se presentan inestabilidades numéricas en las simulaciones vinculadas a la poca profundidad de flujo (milímetros en la planicie de inundación) y principalmente a la pendiente transversal abrupta que se da en los taludes del cauce principal. Dichas causas (principalmente la segunda) ha sido ampliamente citada en la literatura especializada⁷. Este tipo de problemas hace que sea cada vez más necesario pensar en una modelación integrada 1D – 2D de este tipo de geometrías⁸.

Fue necesario diseñar un pequeño programa interactivo para generar las mallas de elementos finitos a utilizar en el cálculo, en el formato requerido por el preprocesador geométrico del RMA2, el programa GFGEN. Permite fijar las dimensiones básicas de la sección transversal, la longitud del canal (que surge como una solución de compromiso entre la necesidad de lograr obtener una solución no perturbada por las condiciones de borde, y a su vez limitar el tamaño de la malla a resolver), y además las condiciones de borde hidrodinámicas asociadas al problema de análisis, que por tratarse en todos los casos de flujo subcrítico consistieron en un caudal de entrada aguas arriba estacionario y distribuido proporcionalmente a la profundidad de flujo, y aguas abajo el nivel final a alcanzar, estimado a partir de la solución analítica. Se eligió una malla lineal rectangular, de paso $\Delta x = 0.1$ m, Δy en el canal principal de 0.05 m, Δy en el talud de 0.025 m y Δy en la planicie de 0.1 m. De ese modo se obtuvieron las siguientes características de las mallas:

Caso	Nº de elementos	Nº de nodos	Tiempo de cálculo (min)
2 a 5	4998	15317	30
7 y 8	3213	9932	15

Tabla 2: dimensiones de la malla de elementos finitos

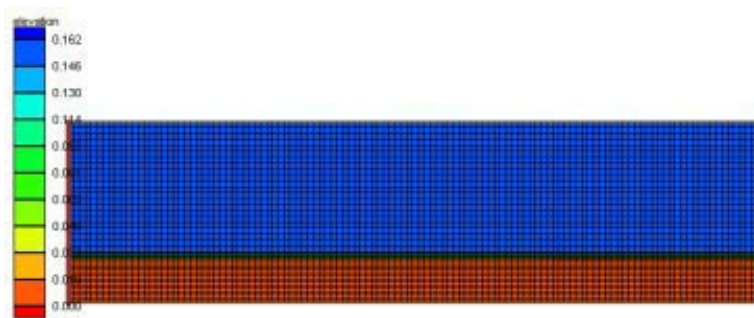


Figura 6: Malla de elementos finitos para los casos 1 a 5, con la cota del fondo en escala de colores

El número máximo de iteraciones permitidas se fijó en 12, si bien en la mayoría de los casos no fue necesario llegar a ese número. Esto llevó al tiempo de máquina de simulación, para una condición de arranque en frío (coldstart), a los valores aproximados indicados en la Tabla 2, en un procesador Pentium II Intel de 266 MHz con 64 MB de memoria RAM, por cada caso.

En la Figura 7 se muestran los resultados.

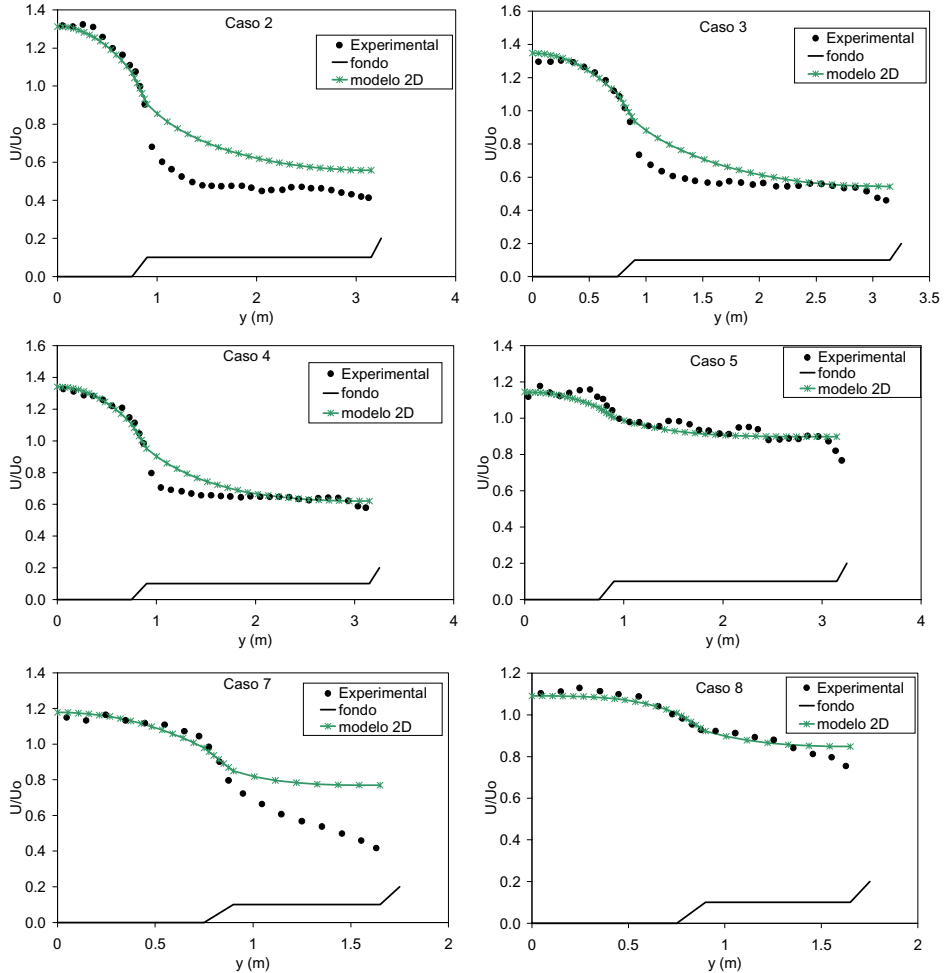


Figura 7: resultados del modelo 2D, junto con los datos experimentales

En general debió trabajarse con valores bajos de la viscosidad de torbellino. Este valor fue asignado en forma variable a lo largo de la malla, estableciendo el valor del número de Peclet (Pe), dado por

$$Pe = \frac{\rho U dx}{E} \quad (22)$$

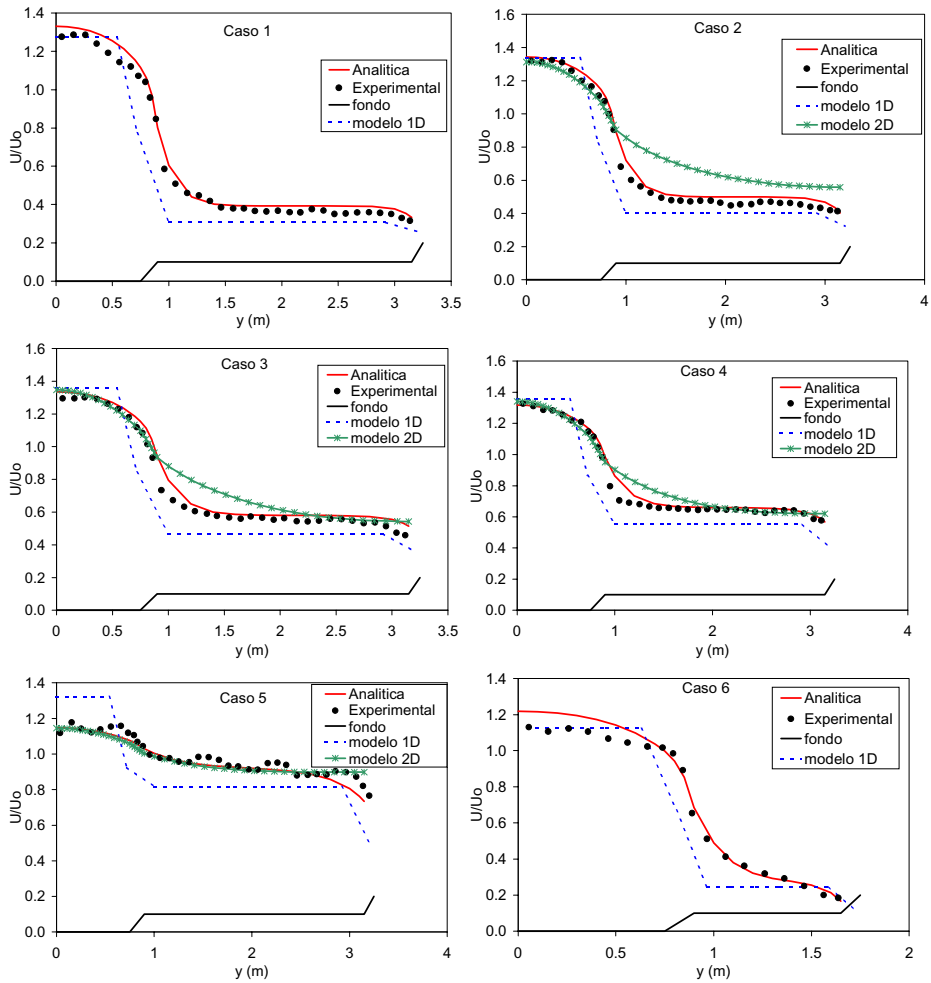
Los valores recomendados⁷ del número de Peclet están comprendidos entre 15 y 40. En algunos casos, fundamentalmente cuando D_r toma los valores más bajos, fue necesario asignar valores de Pe de 10 y hasta de 8. En general estos valores dieron magnitudes de la viscosidad de remolino E (que se asumió isotrópica) entre 3 y 20 Pa.seg. Es visible el efecto de estas viscosidades altas, fundamentalmente en los casos 2,3 y 7, en los cuales el modelo 2D no representa convenientemente las velocidades en la planicie.

7 COMPARACION Y ANALISIS

En los siguientes gráficos (Figura 8) se pueden ver los resultados obtenidos mediante la aplicación del modelo analítico y de los modelos numéricos 1D y 2D (para los casos en los que fue posible calcular), contrastados con los datos experimentales del SERC Flood Channel Facility.

Sin dudas el mejor ajuste lo produce la solución analítica, en todos los casos analizados. De todos modos es de destacar que, justamente, los coeficientes de viscosidad adimensional de torbellino y de gradiente lateral de la fuerza de corte (λ y β) fueron ajustados a esos experimentos. Surge entonces como posible línea a seguir el análisis de esta solución para secciones más complejas, por ejemplo secciones de cauces naturales^{11,12}.

Las limitaciones observadas al modelo 2D se vinculan, como ya se mencionó, al incremento artificial de la viscosidad de torbellino necesaria para estabilizar la solución numérica, condicionada por los importantes gradientes de U e Y en el talud lateral de la sección transversal. Es interesante plantear, entonces, el problema de solucionar geometrías con gradientes geométricos más suaves y profundidades de flujo mayores, tanto analíticamente como numéricamente, eventualmente podrían utilizarse para este análisis secciones naturales donde existan mediciones de campo.



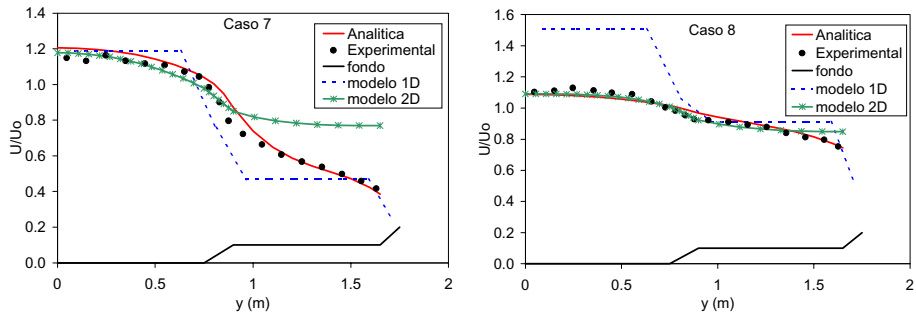


Figura 8: Distribución de la velocidad en la transversal – casos 1 a 8

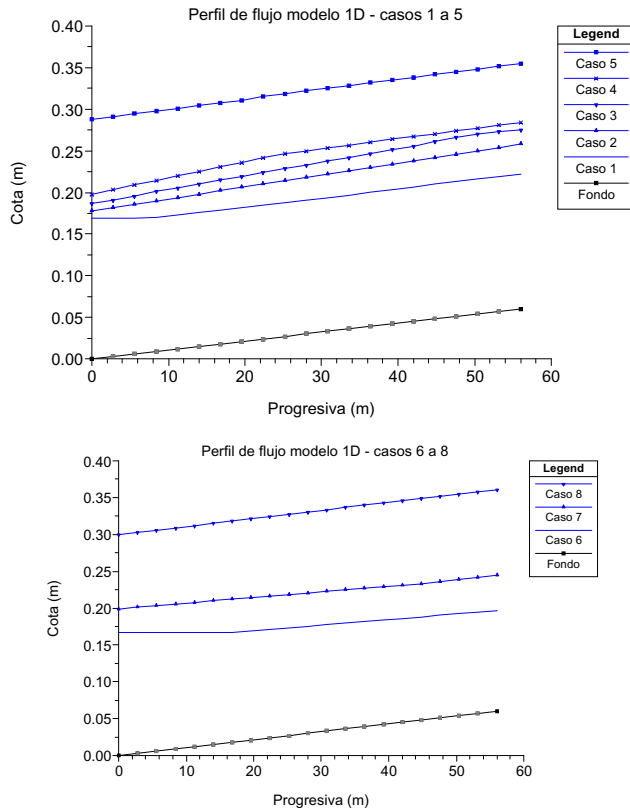


Figura 9: Perfiles de flujo – modelo 1D – casos 1 a 8

8 CONCLUSIONES

Las siguientes son las principales conclusiones obtenidas de este trabajo:

- a) La buena performance observada de la solución analítica de Shiono y Knight sugiere tratar de extender su aplicación a secciones más complejas, incluso contrastándola con otras soluciones más modernas¹⁰.
- b) El modelo unidimensional representa bien los valores de la velocidad en el cauce principal y las planicies para velocidades bajas; si las velocidades se incrementan, la solución de este modelo se aleja de los valores experimentales; eventualmente, es posible modificar el único parámetro de este modelo, el coeficiente n de Manning para su ajuste; dicha modificación no es fácilmente estimable. Su uso, pues, debe ser realizado en forma criteriosa.
- c) El número de subdivisiones considerado en el modelo unidimensional no afecta sensiblemente los valores característicos del cauce principal y las planicies de inundación, pero sí su distribución.
- d) El modelo bidimensional funciona satisfactoriamente para los casos con mayor valor de la profundidad relativa D_r ; no siendo posible aplicarlo en los casos con menor valor de dicho parámetro, fundamentalmente porque se producen grandes gradientes en la zona del talud que inestabilizan la solución; pudiendo ser aplicado en los casos con valores de D_r intermedios, aumentando artificialmente la viscosidad de torbellino, con el correspondiente alejamiento entre el perfil calculado y el perfil medido.
- e) En general, se observa que para valores bajos de la relación D_r el modelo 1D representa mejor la distribución de flujo que el 2D, en tanto que para valores altos de D_r ocurre lo contrario.

9 AGRADECIMIENTOS

El autor agradece el apoyo recibido por la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Córdoba a través del Programa de Becas de Formación Superior.

10 REFERENCIAS

- [1] D.W. Knight and J.D. Demetriou, "Flood Plain and Main Channel Flow Interaction", *J.Hyd. Engng*, **112.4**, 1073-1091 (1983).
- [2] P.R. Wormleaton, J. Allen and P. Hadjipanos, "Discharge Assessment in Compound Channel Flow", *J.Hyd. Div*, **108.9**, 975-993 (1982).
- [3] B.G. Krishnappan and Y.L. Lau, "Turbulence Modeling of Flood Plain Flows", *J.Hyd. Engng*, **112.4**, 251-265 (1986).
- [4] K. Shiono and D.W. Knight, "Turbulent open-channel flows with variable depth across

- the channel”, *J.Fluid Mech.*, **222**, 617-646 (1991).
- [5] K. Shiono and D.W. Knight, “Two Dimensional Analytical Solution for a Compound Channel”, *Proc. 3rd Intl Symp. On Refined Flow Modeling and Turbulence Measurements, Tokyo, Japan*, 503-510 (1988).
- [6] Hydrologic Engineering Center, “HEC – RAS Hydraulic Reference Manual”, *U.S. Army Corps of Engineers*, Davis, CA (2001).
- [7] B.P. Donnell (Ed.), “User’s Guide to RMA2 WES Version 4.3”, *U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station – Hydraulic Laboratory* (1996).
- [8] A.N. Menéndez, “Simulación numérica del impacto hidrodinámico de obras viales que atraviesan valles de inundación”, *XII Congreso sobre Métodos numéricos y sus aplicaciones – ENIEF* (2001).
- [9] D. Bousmar and Y. Zech, “Momentum transfer for practical flow computation in compound channels”, *J.Hyd. Engng*, **125.7**, 696-706 (1999).
- [10] D.A. Ervine, K. Babaeyan-Koopaei and R.H.J. Sellin, “Two-dimensional solution for straight and meandering overbank flows”, *J.Hyd. Engng*, **126.9**, 653-669 (2000).
- [11] D.W. Knight, K. Shiono and J. Pirt, “Prediction of depth mean velocity and discharge in natural rivers with overbank flow”, *Intl. Conf. Hydraulic and Environmental Modeling of Coastal, Estuarine and River Waters, Bradford University, England*, 419-428 (1989).
- [12] D.W. Knight, P.G. Samuels and K. Shiono, “River flow simulation: research and developments”, *J.Inst. Water Environ. Management*, **4**, 163-175 (1990).