

INFLUENCIA DE LA GEOMETRIA EN LA PREDICCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES EN CAUCES NATURALES - CASO RÍO COLORADO

Juan F. Weber*, Leticia Tarrab, Juan Rojas, Lucas Liendo, Héctor I. Paoli

Laboratorio de Hidráulica, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional, Maestro López esq. Cruz Roja, Ciudad Universitaria, CP 5000, Córdoba, Argentina

* además Departamento de Computación, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield 1601, Ciudad Universitaria, CP 5000, Córdoba, Argentina(jweber@efn.uncor.edu)

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es mostrar los resultados obtenidos de la aplicación de dos modelos unidimensionales, el Método del Canal Dividido y el Método de la Distribución Lateral (DCM y LDM respectivamente) para la predicción de la distribución lateral de velocidades en la sección de aforos de Buta Ranquil, Río Colorado, analizando la influencia del contorno móvil. Básicamente se comparan los resultados obtenidos por Weber y Tarrab (2003) en esa sección de aforos, los cuales fueron desarrollados en base a una sección transversal simplificada, con nuevas modelaciones obtenidas en base a la geometría real más compleja, variable para cada aforo, y se analiza el desempeño de los modelos DCM y LDM ante esta variación geométrica. Adicionalmente, se muestra la variación en la calibración de los n de Manning ante los dos escenarios geométricos. Se enuncian conclusiones acerca de la influencia de la geometría relevada sobre la estimación del perfil de velocidades.

ABSTRACT

Results of modeling a natural river cross-section applying two 1D hydrodynamic models (Divided Channel Method - DCM & Lateral Distribution Method - LDM) are presented. The aim of this work is to predict the lateral velocity distribution at the gauging station of Colorado River in Buta Ranquil, and analyze the influence of the mobile bed on the outcome. Modeling results obtained by Weber and Tarrab (2003) for a simplified geometry of this station are compared with predictions for the real geometry, which varies in every gauge. Performance of DCM and LDM models under these new geometry conditions are analyzed. Additionally, values of calibrated Manning's n are compared between two geometric scenarios. Conclusions about the influence of bed geometry on the velocity profile estimation are presented.

INTRODUCCION

Los estudios de ingeniería hidráulica relacionados con crecidas requieren usualmente conocer la distribución lateral de velocidades en cauces naturales. Procesos tales como el transporte de sedimentos y dispersión de contaminantes están íntimamente relacionados con este fenómeno, que representa uno de los problemas más interesantes en flujos geofísicos.

Los modelos numéricos hidrodinámicos bidimensionales son considerados como modelos teóricos apropiados para resolver este problema. De todos modos, como en la mayoría de las aplicaciones la escala longitudinal de variación del flujo es mucho mayor a la escala lateral (dada por el ancho de flujo), las variaciones longitudinales y laterales de flujo son calculadas independientemente. Las primeras, a través de los modelos hidrodinámicos unidimensionales basados en las ecuaciones de Saint – Vénant; en tanto que las segundas, a través de los modelos 1D de distribución lateral.

Uno de los parámetros de entrada de estos modelos es la geometría del contorno, la cual está unívocamente definida en el caso de canales de contornos rígidos. En el caso de cauces

naturales, el problema adquiere un nuevo grado de libertad, desde que el mismo contorno cambia de forma en función de las propiedades del flujo y del material que lo conforma. Esto hace que la predicción de la distribución lateral de velocidades encuentre una dificultad adicional en cuanto a que *a priori* se desconoce la sección transversal del cauce. Es usual en estos casos trabajar con una geometría media, simplificada. En este trabajo se estudia la influencia de esta simplificación sobre la predicción de la distribución lateral de velocidades.

MODELOS HIDRODINAMICOS CONSIDERADOS

En lo que sigue se describen los dos modelos hidrodinámicos considerados en el desarrollo del presente trabajo.

Método del Canal Dividido (DCM)

El Método del Canal Dividido (DCM por sus siglas en inglés) ha sido aplicado en este trabajo a través del programa de dominio público HEC-RAS, del *U.S. Army Corps of Engineers* (HEC, 2001).

Este modelo unidimensional tiene como objetivo la resolución de la ecuación de Bernoulli, para el flujo permanente gradualmente variado, cuya expresión es (1):

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (1)$$

Donde:

$$h_e = L\overline{S_f} + C \left(\frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right) \quad (2)$$

$$\overline{S_f} = \frac{1}{2} (S_{f1} + S_{f2}) \quad (3)$$

Siendo:

Y_i : Tirante o profundidad de flujo en la sección i

Z_i : Cota o elevación del fondo en la sección i

V_i : Velocidad media en la sección i

α_i : Coeficiente de distribución de velocidades o de Coriolis correspondiente a la sección i

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_{fi} : Gradiente longitudinal de pérdidas por fricción en la sección i

C : Coeficiente por pérdidas por contracción – expansión.

La versión utilizada de HEC – RAS (*River Analysis System*) fue la versión 3.0. Para el desarrollo del presente trabajo resulta de interés la forma en que el modelo unidimensional estima una distribución lateral de velocidades.

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

$$Q = KS_f^{1/2} \quad (4)$$

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:

$$K = \frac{AR^{2/3}}{n} \quad (5)$$

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

Se debe indicar al programa que se desea obtener el perfil transversal de velocidades mediante la opción *Flow Distribution*. En ella, se 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 que sigue el programa son los siguientes:

- a) Divide el área de flujo en la cantidad de partes definida por el usuario (Figura 1), y luego calcula el área, perímetro mojado, radio hidráulico y profundidad hidráulica para cada parte.

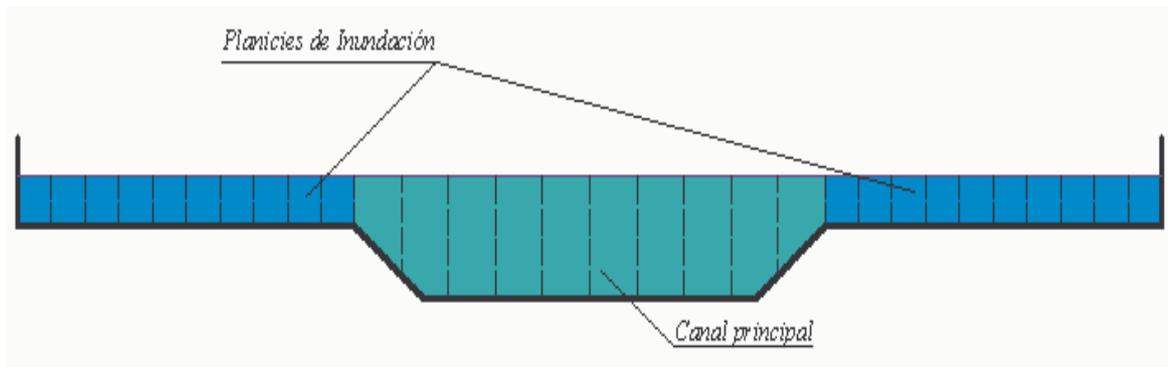


Figura 1.- Subdivisión de la sección transversal en HEC-RAS

- 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.

Método de la Distribución Lateral (LDM)

Una de las principales limitaciones del modelo DCM es la imposibilidad que tiene de considerar las pérdidas energéticas debido a la difusión lateral de cantidad de movimiento. Para poder incluirlas, es necesario plantear un modelo basado en las ecuaciones generales de movimiento o ecuaciones de Navier – Stokes, con las simplificaciones correspondientes. En este caso, es posible obtener una ecuación diferencial que permita predecir la distribución lateral de velocidades en la sección, asumiendo las condiciones de flujo permanente y uniforme y una cierta profundidad de flujo dada. Esta ecuación da lugar al denominado *Lateral Distribution Method* (LDM). La solución de la ecuación diferencial del LDM puede hacerse en forma numérica o analítica. El primer procedimiento fue propuesto por primera vez por Wark et al. (1990). En el segundo caso, el desarrollo original es debido a Shiono y Knight (1988). La integración de la ecuación de cantidad de movimiento en la dirección del flujo (ecuación de Navier – Stokes) en combinación con la ecuación de continuidad, para un flujo permanente y uniforme asumiendo como modelo de turbulencia el de la viscosidad de torbellino o de Boussinesq, da lugar a la ecuación diferencial (6) del denominado método de la distribución lateral (LDM):

$$\rho g S_0 Y - \frac{f}{8} \rho V^2 \sqrt{1 + \frac{1}{s^2}} + \frac{d}{dy} \left[\rho \lambda \sqrt{\frac{f}{8}} Y^2 V \frac{\partial V}{\partial y} \right] = 0 \quad (6)$$

en la cual:

- ρ : Densidad del fluido
- g : Aceleración de la gravedad
- S_0 : Pendiente longitudinal del lecho
- Y : Profundidad de flujo
- V : Velocidad del flujo
- y : Coordenada horizontal medida transversal a la corriente
- s : Talud lateral
- f : Coeficiente de fricción de Darcy
- λ : Viscosidad adimensional de torbellino de Boussinesq

Shiono y Knight (1988) obtienen las siguientes soluciones analíticas de la ecuación (6) (ver Figura 2):

Para fondo plano (horizontal, $s \rightarrow \infty$):

$$V_{(y)} = \sqrt{a_1 e^{ny} + b_1 e^{-ny} + \frac{8gS_0Y}{f}} \quad (7)$$

Para fondo lineal (inclinado, $0 < s < \infty$):

$$V_{(y)} = \sqrt{a_2 Y^\psi + b_2 Y^{-\psi-1} + \omega Y} \quad (8)$$

En estas ecuaciones:

$$\eta = \sqrt{\frac{2}{\lambda}} \sqrt[4]{\frac{f}{8}} \frac{1}{Y} \quad (9)$$

$$\psi = \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{s\sqrt{1+s^2}}{\lambda} \sqrt{8f}} - \frac{1}{2} \quad (10)$$

$$\omega = \frac{gS_0}{\frac{\sqrt{1+s^2}}{s} \frac{f}{8} - \frac{\lambda}{s^2} \sqrt{\frac{f}{8}}} \quad (11)$$

En las ecuaciones (7) y (8), los coeficientes a_i y b_i se obtienen al plantear las condiciones de contorno que corresponden a la de no deslizamiento en los contornos rígidos y las de continuidad y derivabilidad de la función velocidad en cada cambio de pendiente transversal del fondo, llegando de ese modo a un sistema lineal de ecuaciones que permite calcular los valores de estos coeficientes (Weber y Menéndez, 2003).

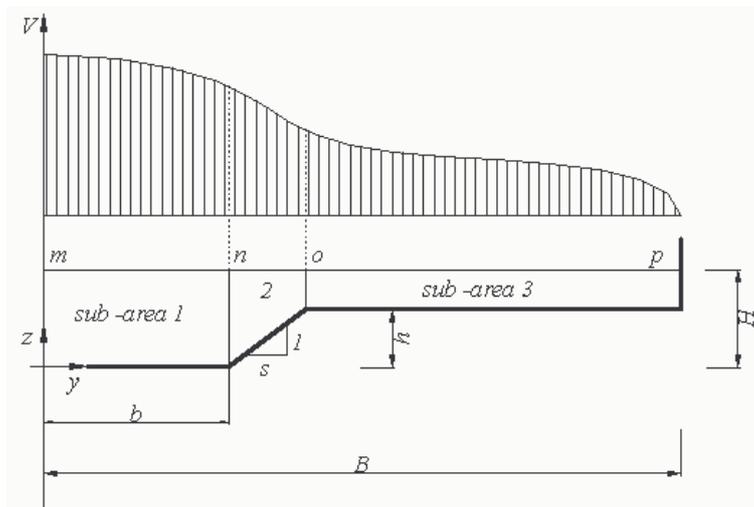


Figura 2.- Subdivisión típica de un canal de sección compuesta.

A partir de la ecuación (6), o de las ecuaciones (7) y (8), es posible ver que para un tramo determinado de la sección transversal, el modelo analítico considerado tiene dos parámetros, uno que pondera la fricción con el contorno fijo (parámetro f) y otro que considera la difusión lateral de *momentum* (parámetro λ). Estrictamente hablando, el modelo tiene $2N$ parámetros, siendo N el número de tramos rectos en que es posible discretizar la sección transversal. De hecho, se deberán definir, por cada tramo recto, un par de valores λ y f .

CASO DE ESTUDIO

El río Colorado, perteneciente al grupo de los sistemas patagónicos de vertiente atlántica, está formado por la confluencia de los ríos Grande y Barrancas a 835 metros sobre el nivel del mar. Desde sus orígenes en la Cordillera de los Andes, hasta su desembocadura en el Océano Atlántico, presenta una extensión de 1200 kilómetros con dirección NO-SE, de los cuales 920

km corresponden al Colorado propiamente dicho. Sus aguas son compartidas por las Provincias de Mendoza, Neuquén, La Pampa, Río Negro y Buenos Aires, que lo convierten en una cuenca hídrica interprovincial (Figura 3). El área de la cuenca imbrífera es de aproximadamente 15300 km², correspondiente al río Colorado aguas arriba de la estación de aforos de Buta Ranquil (esta estación se encuentra a unos 25 km de la confluencia de los ríos Grande y Barrancas).



Figura 3.- Río Colorado y ubicación de la estación de aforos Buta Ranquil.

De régimen nival, su período de creciente se inicia en Octubre, alcanza su máximo en Diciembre y retoma en Marzo niveles menores a la media anual. El caudal medio anual medido en Buta Ranquil, para una serie de 58 años del período 1940-1997 es de 147 m³/s, siendo el derrame medio anual de 4624 hm³, con un caudal máximo diario de 1053 m³/s ocurridos en el año rico 1982-1983 y un caudal mínimo diario de 130 m³/s registrados en el año 1968-1969 muy semejante a lo ocurrido en el período de sequía 1996-1997 (Tarrab, 2004).

Si bien se trata de un río de régimen nival, presenta en algunos años crecidas pluviales, entre Febrero y Agosto. Estas crecidas pueden llegar a superar los 500 m³/s, estando su duración acotada a los días de duración del fenómeno pluvial.

Las características hidrológicas observadas durante el año 2002, muestran que los caudales registrados a lo largo de ese año estuvieron por encima de los valores medios históricos. El caudal pico registrado durante el año 2002 corresponde al 15 de diciembre, con un valor de 658 m³/s, habiéndose registrado el mismo día el caudal medio máximo del año, de 611 m³/s.

En base a los registros pluviales en la estación de aforos de Buta Ranquil la precipitación anual total en Buta Ranquil en el año 2002 fue de 172.2 mm.

En la alta cuenca el río se presenta con orillas escarpadas, corriendo entre estribaciones rocosas, con aparición de rinconadas pequeñas en los lugares donde las barrancas se abren, y

vados e islas en aquellos tramos donde la pendiente disminuye. Aparecen luego valles más amplios, aledaños al curso meandroso, alternándose con riberas barrancosas donde el río escurre encajonado con bardas a pique, en su curso medio presenta un paisaje similar de valles y planicies, disminuyendo progresivamente la pendiente hasta llegar al límite con el sur bonaerense donde la barranca izquierda se aplanan y comienza la zona de médanos y salitrales que se prolonga hasta el mar. En este tramo inferior, definitivamente aplanadas las mesetas que lo acompañaron en todo su recorrido, el río escurre por dentro de los albardones formados por el limo, dividiéndose luego en múltiples brazos en los últimos kilómetros de su curso dando lugar a una desembocadura deltoide en la llamada Bahía Anegada, al sur de Bahía Blanca, en el Mar Argentino.

Descripción de la estación de aforos

La estación de aforos Buta Ranquil está ubicada a 850 m.s.n.m en los 37° 06' de latitud sur y 69° 44' de longitud oeste. Como estación de la Red Hidrometeorológica Nacional se realizan a la fecha lecturas diarias de la altura de escala y en forma mensual se efectúan aforos líquidos y sólidos en suspensión (fracción gruesa y fina). A unos 5 km de la estación de aforos, se encuentra la estación meteorológica, donde se registran 3 lecturas diarias de temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo húmedo y velocidad del viento; y precipitación.

El cauce en esa sección se encuentra encajonado por taludes rocosos (Figura 4) de roca basáltica casi verticales lo cual le confiere una gran estabilidad a la sección a lo largo del tiempo.



Figura 4.- Estación de aforos Buta Ranquil.

Datos experimentales

Se utilizaron datos provistos por EVARSA correspondientes al período Mayo del 2002 -Julio del 2003, los cuales consisten en datos de altura, caudal, pendiente del nivel de agua, y parámetros hidráulicos para esos caudales. En la Tabla 1 se muestran las características de los casos analizados en este trabajo. La numeración de los casos (del 1 al 10) corresponde a caudales en orden creciente.

Tabla 1.- Casos de estudio en Buta Ranquil.

CASO	Fecha	Caudal (m ³ /s)	Altura (m)	S_w* (‰)	Velocidad Media (m/s)	Ancho Superficial (m)	Área (m ²)	Perímetro Mojado (m)	Radio Hidráulico (m)	Relación B/H
1	20-05-03	90.1	1.90	1.28	1.241	62.5	72.6	63.4	1.1	32.9
2	24-07-03	100.6	1.98	1.3	1.296	62.6	77.6	63.6	1.2	31.6
3	14-04-03	108.6	2.04	1.32	1.334	62.7	81.4	63.7	1.3	30.8
4	28-03-03	128.9	2.19	1.32	1.419	63.0	90.8	64.1	1.4	28.8
5	27-06-03	132.3	2.21	0.9	1.436	63.0	92.1	64.2	1.4	28.5
6	18-03-03	144.6	2.28	1.3	1.498	63.1	96.5	64.3	1.5	27.7
7	21-02-03	182.0	2.49	1.24	1.657	63.5	109.8	64.9	1.7	25.4
8	11-02-03	267.2	2.90	1.34	1.965	64.1	135.9	65.9	2.1	22.1
9	28-01-03	331.0	3.20	1.36	2.132	64.6	155.3	66.7	2.3	20.2
10	07-01-03	449.6	3.69	1.4	2.403	65.4	187.1	68.0	2.8	17.7

Velocidades medidas

En cada vertical se midieron diferentes velocidades en función de la profundidad de la vertical considerada según el siguiente criterio:

- Velocidad superficial.
- Velocidad a 0.6 de la profundidad si ésta era menor que 1 metro.
- Velocidad a 0.2 y 0.8 de la profundidad en los casos que la misma estuviese en el rango 1-2 m.
- Velocidad de fondo y a 0.2, 0.4, 0.6 y 0.8 de la profundidad en los casos que la misma superara los dos metros.

Para calcular la velocidad media en la vertical se aplicó la metodología que especifican las Normas ISO en la cual, en función del número de puntos medidos se determina la velocidad.

Datos geométricos

Los datos disponibles corresponden a 10 relevamientos batimétricos de fondo, obtenidos en 23 verticales (en donde se midieron velocidades) en la sección de aforos. Dichos perfiles pueden verse superpuestos en la Figura 5. En la Figura 6 se muestra un perfil promedio de los 10 casos relevados. El perfil original con 22 tramos (23 puntos) se redujo luego de efectuar un conjunto de simplificaciones a 6 tramos (Figuras 6 y 7).

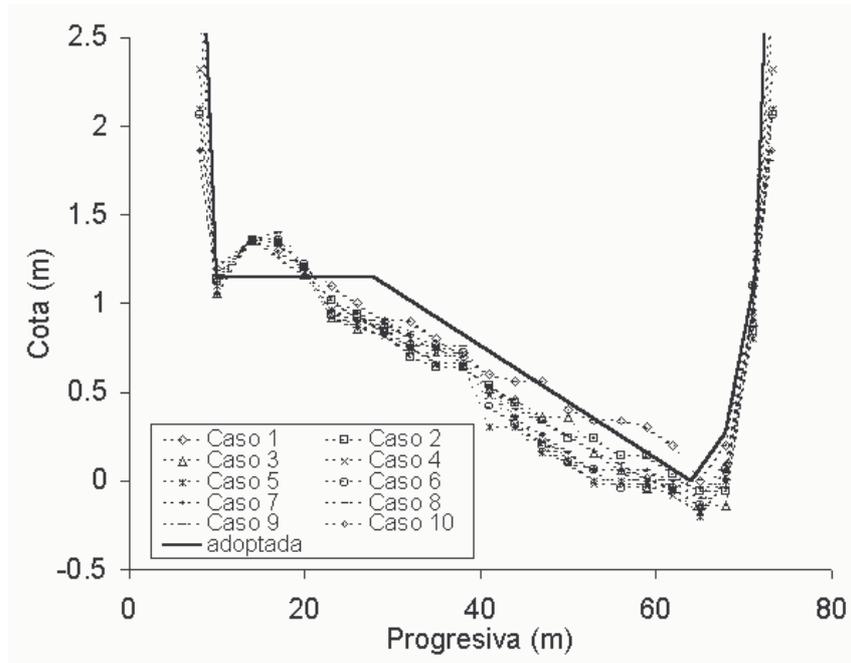


Figura 5.- Secciones medidas en cada caso y sección simplificada.

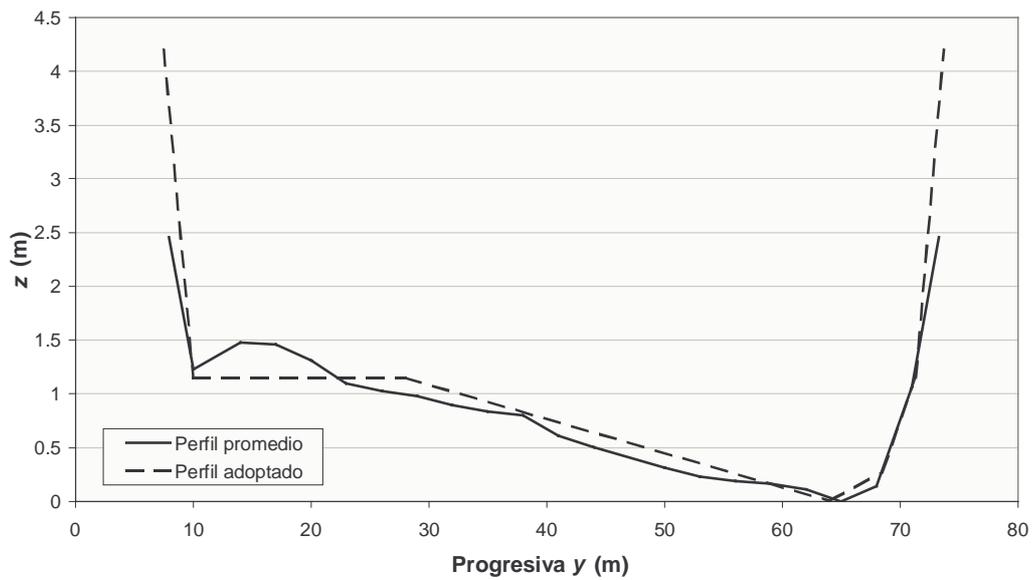


Figura 6.- Sección promedio y sección simplificada.

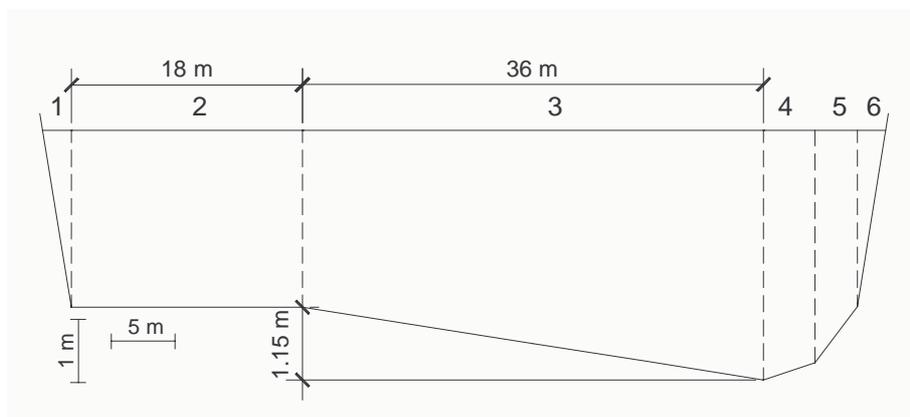


Figura 7.- Sección simplificada.

APLICACIÓN Y RESULTADOS

Para la aplicación de los modelos descriptos, se consideraron tres escenarios de trabajo:

- Escenario A. El constituido por la geometría simplificada de la Figura 7. Sobre esta geometría se calibraron los parámetros n y λ como se describirá más adelante, para el modelo LDM. Comparativamente, se aplicó el modelo DCM con este conjunto de parámetros n con finalidad de comparación.
- Escenario B. El conformado por la geometría real de cada aforo, en conjunto con los parámetros n y λ del Escenario A. Tiene como finalidad observar la influencia de la geometría del contorno en la predicción de la distribución de velocidades de cada modelo.
- Escenario C. El constituido por la geometría real de cada aforo, sobre el cual se ajustaron los parámetros n del modelo LDM, a los fines de comparar la dependencia de la calibración de estos valores de la geometría considerada.

Para la aplicación del modelo DCM, tal como se indicó, se utilizó el *software* HEC-RAS versión 3.1. Para la aplicación del modelo LDM, se utilizó un programa desarrollado en el lenguaje GNU-Octave (Eaton, 1997) siguiendo los lineamientos de trabajos previos (Weber y Menéndez, 2003).

Parámetros de la modelación

En lo que se refiere a la información relacionada con el Escenario A, la misma corresponde a los trabajos desarrollados previamente por Weber y Tarrab (2003) y Tarrab (2004).

Los valores del n de Manning en cada tramo se adoptaron en función de las características del mismo. Para el cauce principal (tramos 2 y 3) se adoptó la siguiente relación potencial de la profundidad relativa Dr :

$$n = 0.02Dr^{-1.1} \quad (12)$$

Donde

$$Dr = \frac{Y_m}{H} \quad (13)$$

Dr Profundidad relativa
 Y_m Profundidad media del tramo
 H Profundidad máxima de la sección (tirante)

Para los demás tramos (márgenes y taludes) se adoptó un valor de n igual a 0.06.

Para la estimación de la viscosidad adimensional de torbellino se utilizó la siguiente fórmula empírica (Tarrab y Weber, 2004):

$$\lambda = 0.015 \left(\frac{B}{H} \right)^{1.058} D_r^{-2.2} \quad (14)$$

Siendo B y H el ancho y la profundidad de flujo en la sección, respectivamente.

Los modelos DCM y LDM fueron aplicados a cada uno de los 10 casos listados en la Tabla 1, aquí se muestran 4 de los más representativos de las distintas condiciones de flujo, correspondientes a los Casos 1, 3 y 10, con caudales en un rango entre $90 \text{ m}^3/\text{s}$ y $450 \text{ m}^3/\text{s}$ y profundidades de flujo entre 1.90 m y 3.70 m . En las Figuras 8 a 11 pueden verse los resultados de la aplicación de los modelos DCM y LDM para los Escenarios A y B, en conjunto con los datos experimentales.

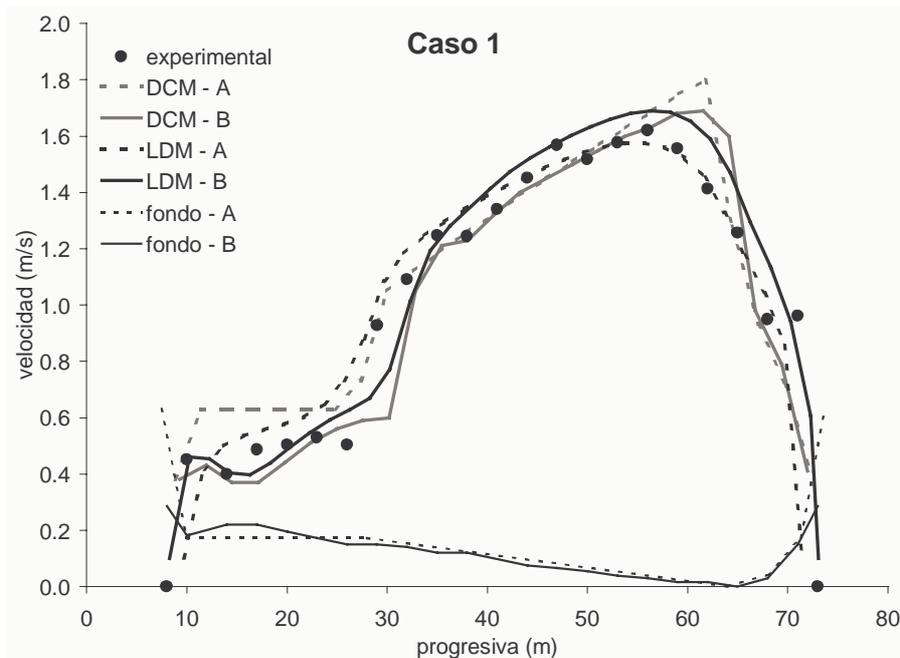


Figura 8.- Resultados de la modelación – Caso 1.

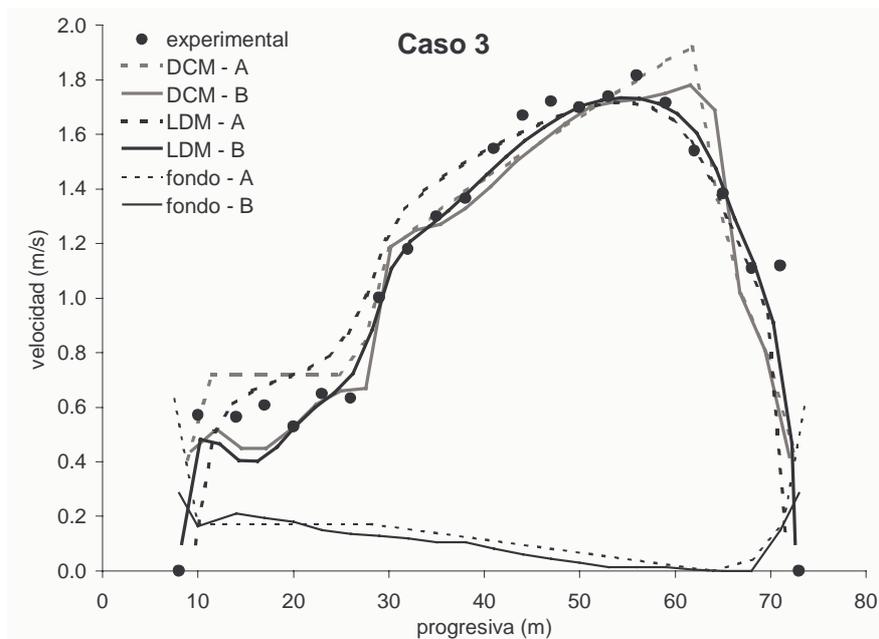


Figura 9.- Resultados de la modelación – Caso 3.

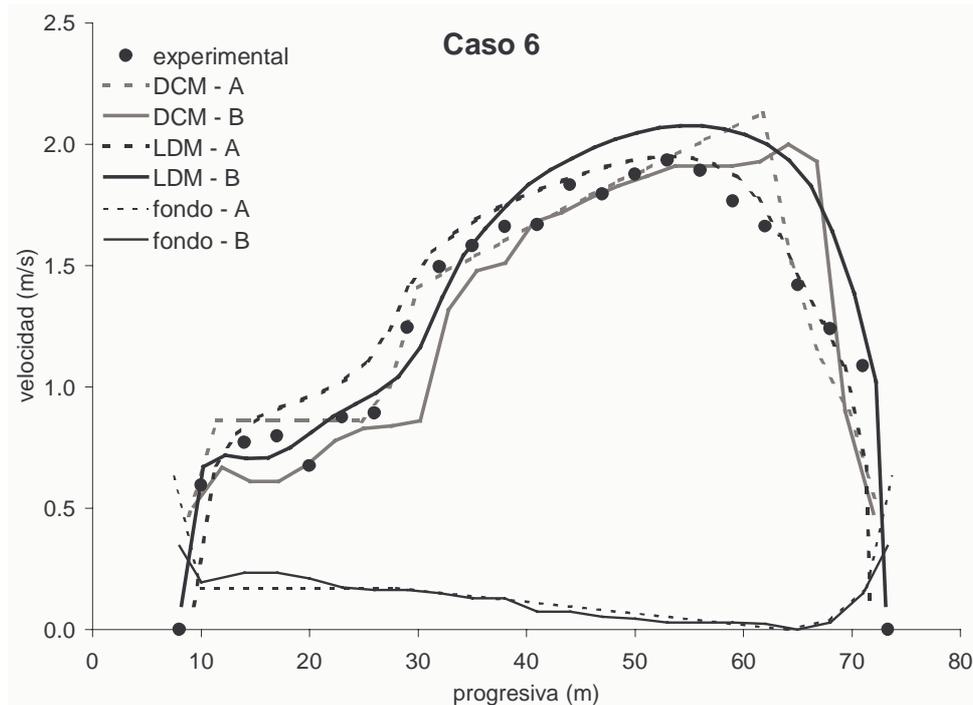


Figura 10.- Resultados de la modelación – Caso 6.

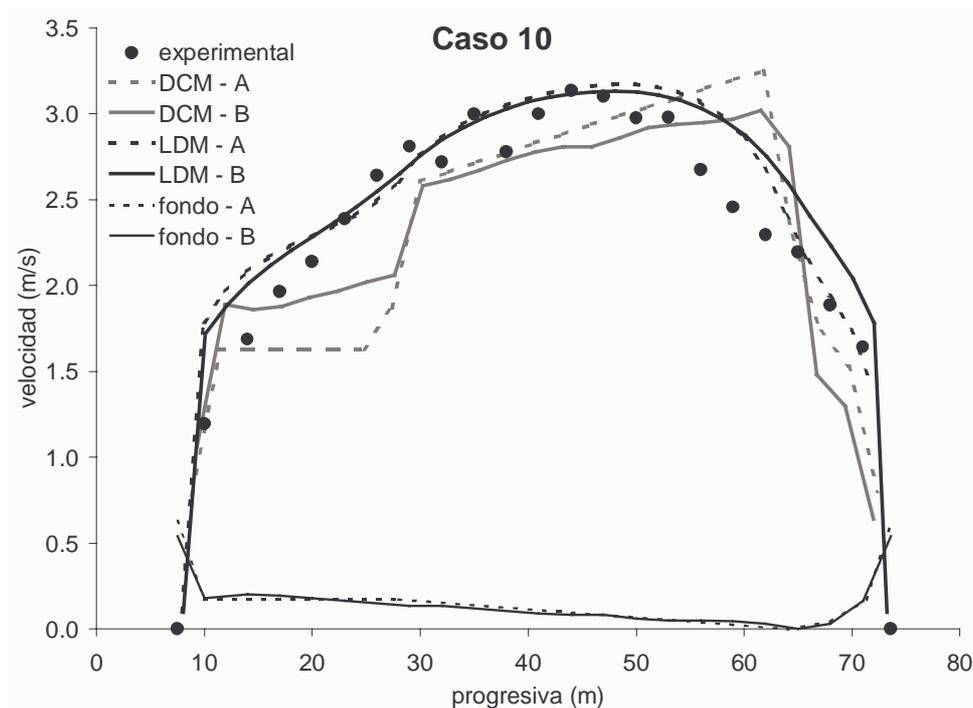


Figura 11.- Resultados de la modelación – Caso 10.

Es evidente que el mejor ajuste se presenta en todos los casos, para el modelo LDM en el Escenario A, que es para el cual fueron calibrados sus parámetros. De todos modos, es interesante ver que el modelo LDM aplicado con el mismo conjunto de parámetros a la geometría del Escenario B, muestra como resultado un perfil lateral de velocidades no muy alejado del anterior (los mayores errores se presentan en el caso 6).

El modelo DCM aplicado al Escenario A, muestra claramente su deficiencia asociada a la ausencia de efectos difusivos, lo que produce picos y quiebres abruptos en el perfil. Sin embargo, en términos generales puede verse que el mismo modelo aplicado al Escenario B, si bien no logra los ajustes del modelo LDM, mejora la predicción frente al DCM /A. En particular resulta de interés en todos los casos la zona de bajas velocidades sobre margen izquierda y la zona de mayores velocidades (sesgada hacia margen derecha).

Esto pone en evidencia que de los dos modelos, el DCM es más fuertemente dependiente de la geometría de entrada, y por lo tanto, de sus incertidumbres.

Escenario C

En este escenario se calibró el modelo LDM en base a la geometría real de cada aforo. Resulta de interés comparar los valores que permiten calibrar el LDM en ambos escenarios geométricos, en particular lo que hace al coeficiente n de Manning. En las Figuras 12 a 15 se muestran los perfiles laterales de velocidades obtenidos con el modelo LDM para el Escenario C, junto con el obtenido por el mismo modelo para el Escenario A (con fines comparativos). Evidentemente los mejores ajustes se logran trabajando con la geometría real de cada aforo junto con un conjunto de parámetros n calibrados en cada caso. En las Figuras 16 a 19 se muestra la variación lateral del coeficiente n de Manning calibrado en el Escenario C para los mismos casos 1, 3 6 y 10 antes considerados.

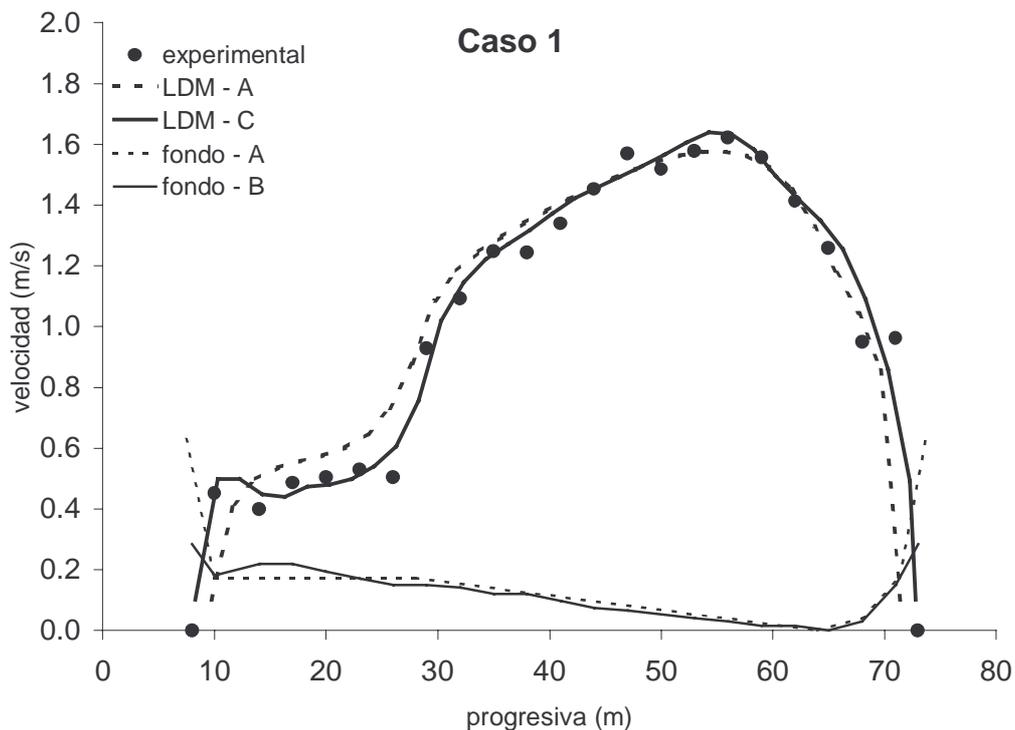


Figura 12.- Resultados de la modelación – Escenario C - Caso 1.

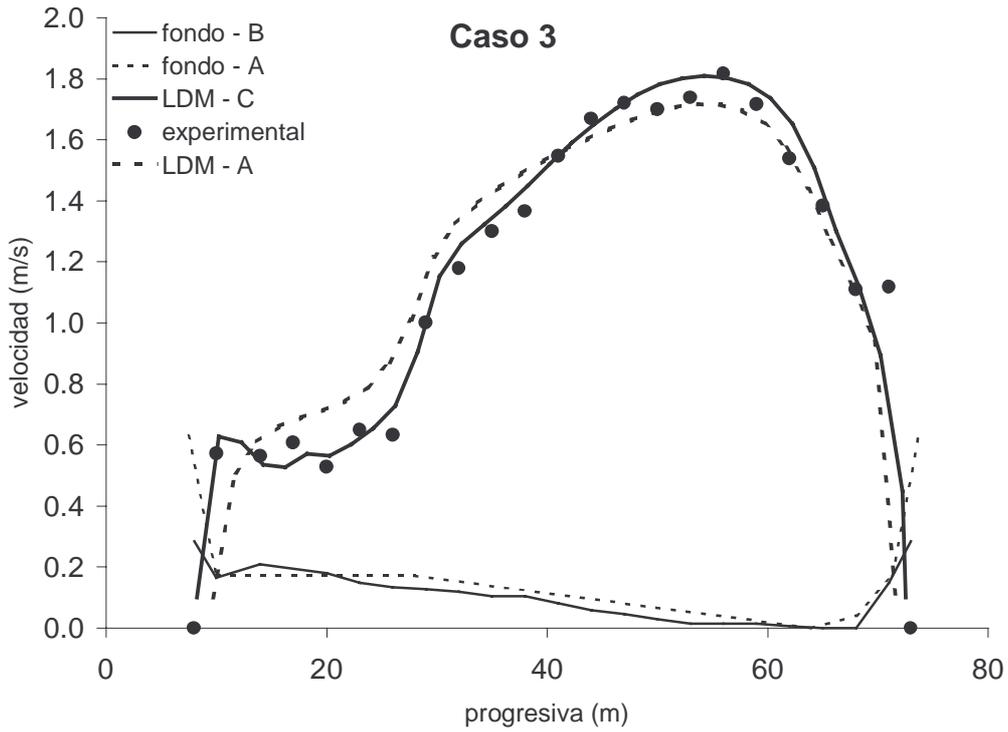


Figura 13.- Resultados de la modelación – Escenario C - Caso 3.

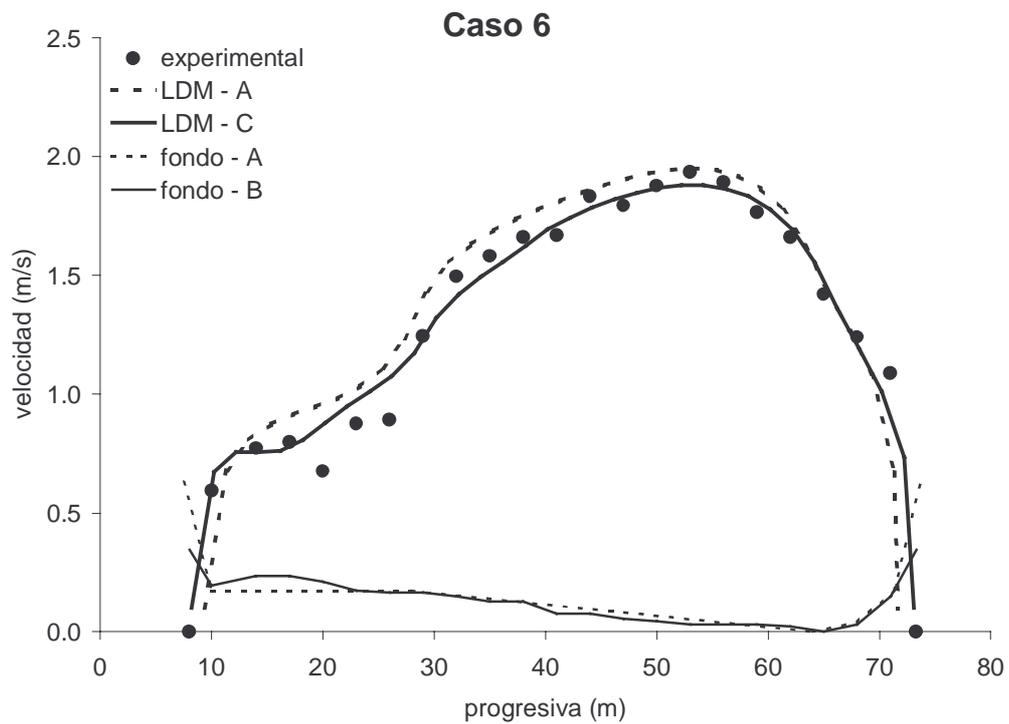


Figura 14.- Resultados de la modelación – Escenario C - Caso 6.

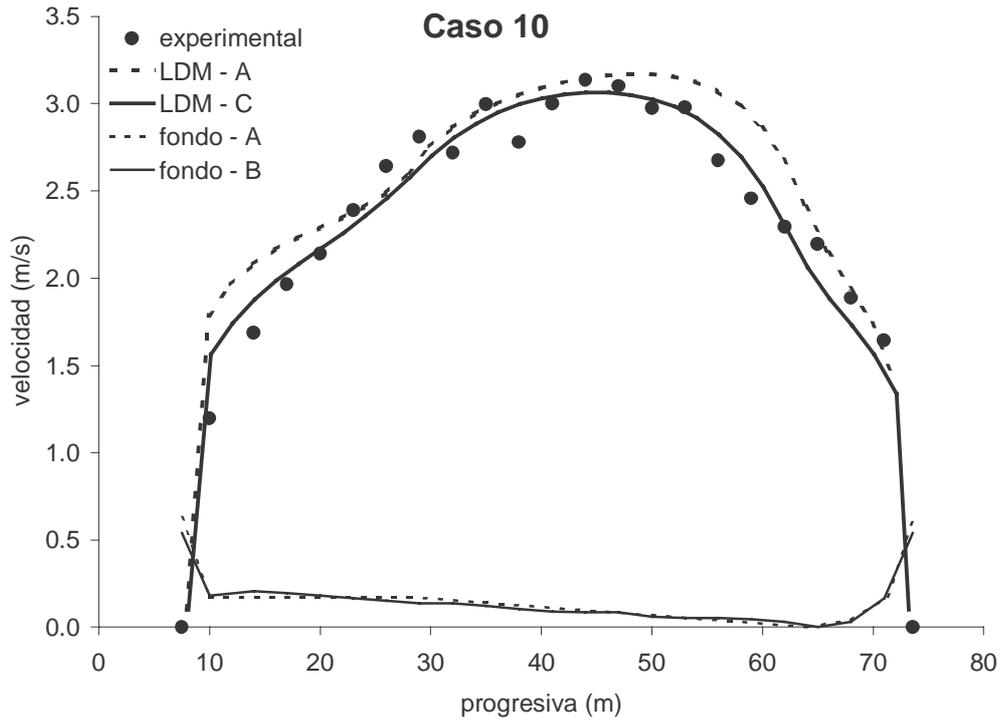


Figura 15.- Resultados de la modelación – Escenario C - Caso 10.

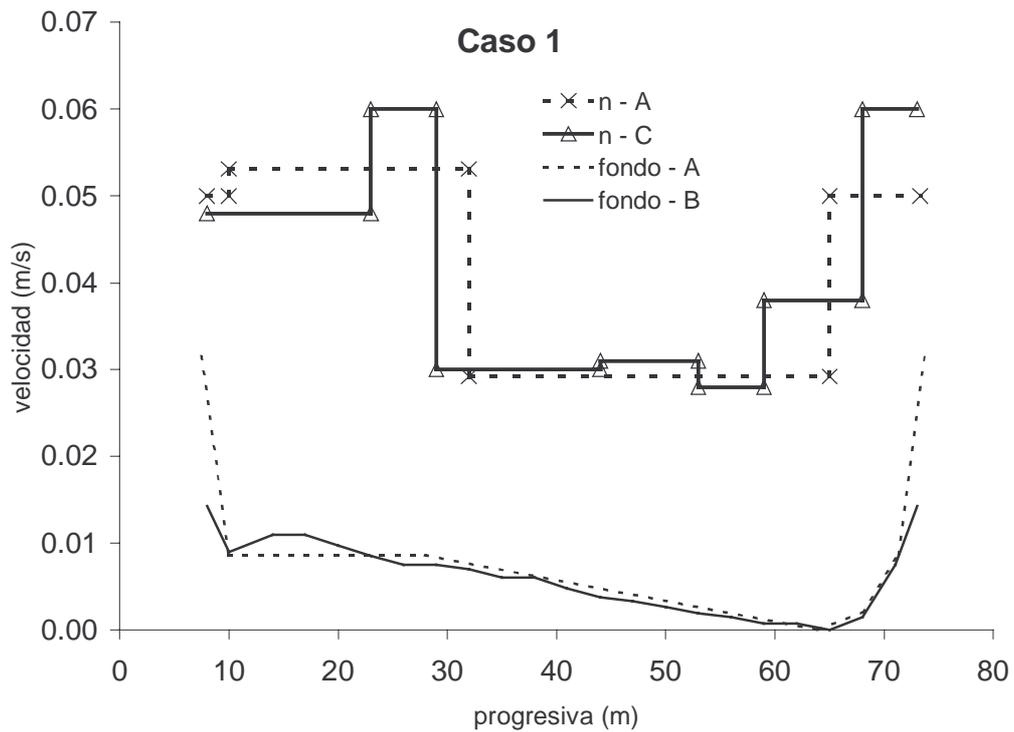


Figura 16.- Variación lateral del n de Manning – calibración para escenarios A y C – Caso 1.

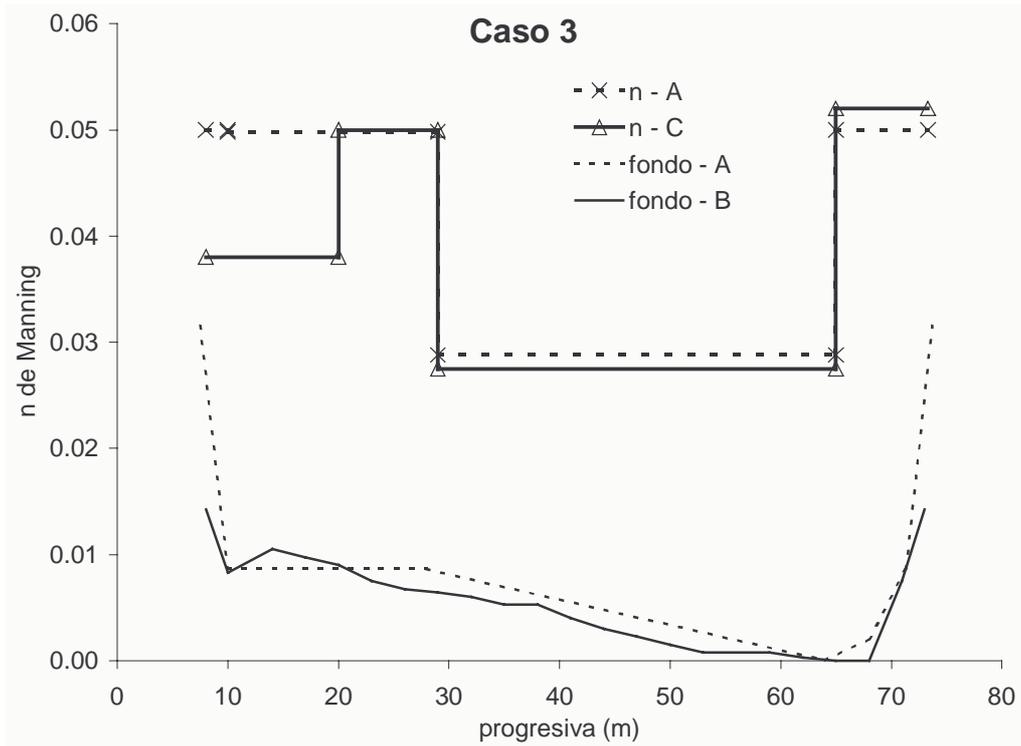


Figura 17.- Variación lateral del n de Manning – calibración para escenarios A y C – Caso 3.

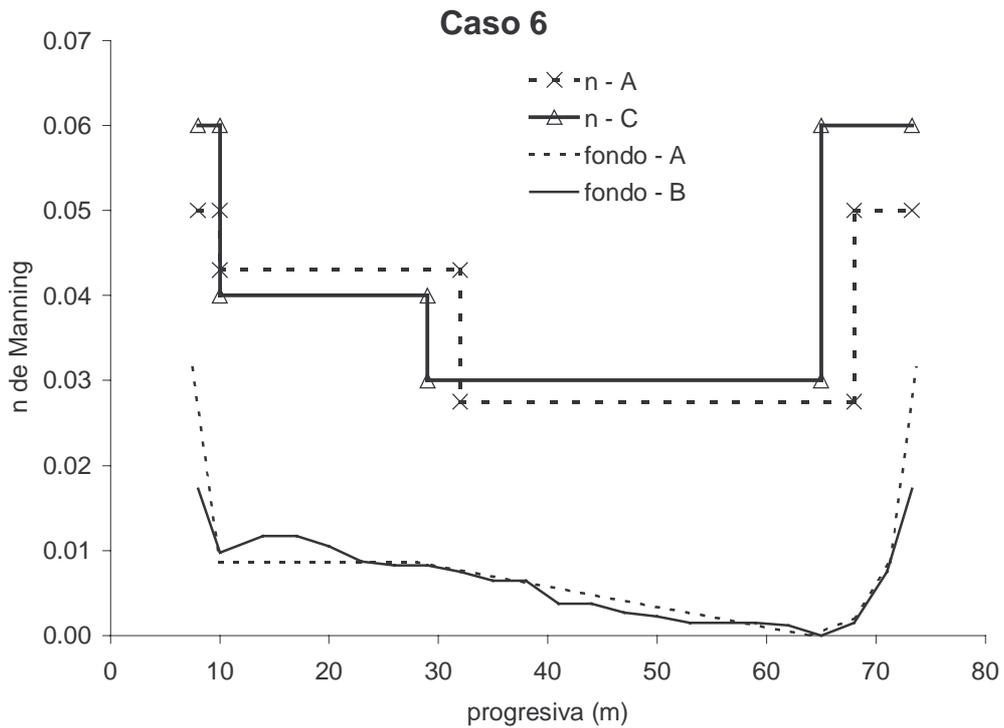


Figura 18.- Variación lateral del n de Manning – calibración para escenarios A y C – Caso 6.

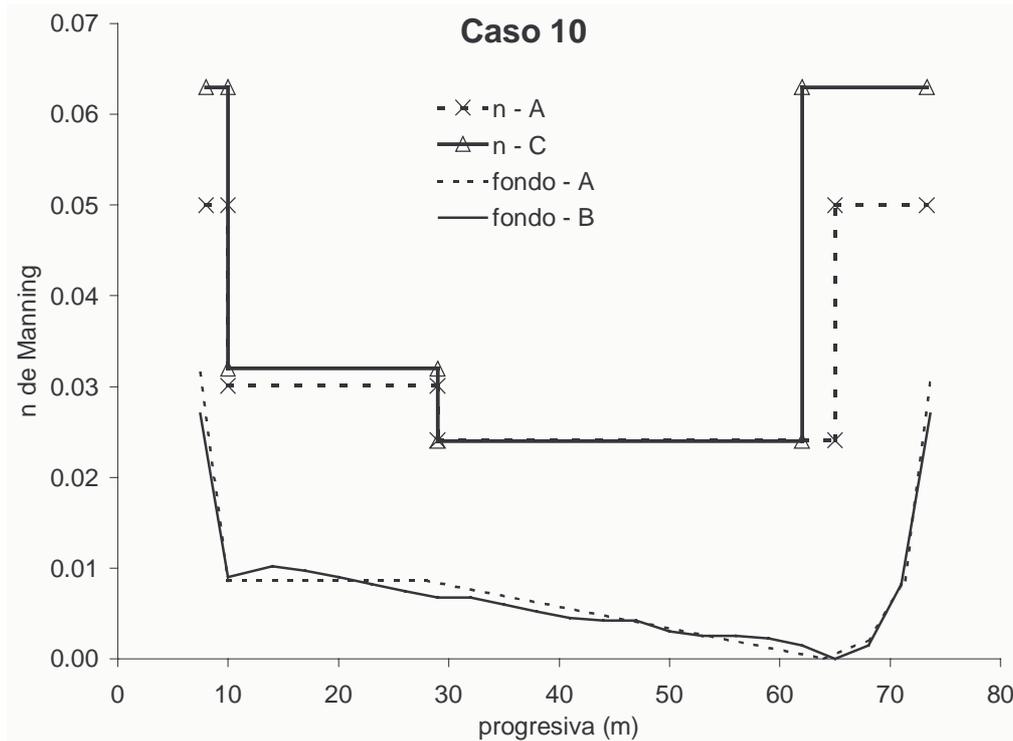


Figura 19.- Variación lateral del n de Manning – calibración para escenarios A y C – Caso 10.

En los gráficos anteriores puede verse que las variaciones porcentuales más importantes entre ambos conjuntos de n calibrados ocurre, en términos generales, en la cercanía de las márgenes.

CONCLUSIONES

- En base a los resultados obtenidos se observa, en general, un mejor comportamiento del modelo LDM con respecto al DCM, tal como lo habían mostrado Weber y Tarrab (2003) y Tarrab (2004).
- Se observa una sensibilidad mucho mayor del modelo DCM (HEC-RAS) a la variación de la geometría del lecho, con respecto al modelo LDM. Se considera que el modelo LDM es menos sensible a la variación de la geometría debido a la presencia de efectos difusivos de la velocidad en la dirección lateral.
- Se muestra cierta sensibilidad del modelo LDM a los valores utilizados para el coeficiente n de Manning. Futuros trabajos deberán permitir encontrar una formulación de base física para la predicción de este parámetro.
- En la sección considerada, y debido a la ausencia de estos procesos difusivos, la localización del máximo en el perfil de velocidades por el modelo DCM se corresponde con el punto de máxima profundidad (tanto para la geometría simplificada como para la real) mientras que el modelo LDM (al igual que los datos experimentales) ubica ese punto hacia el centro de la sección. Este efecto es tanto más notable cuanto mayor es la profundidad de flujo.
- Se puede concluir que, además de lograr una mejor representación de la distribución de velocidades, el modelo LDM es menos sensible a incertidumbres en la representación de la

geometría transversal, las cuales son frecuentes en el caso de cauces naturales. Por otro lado, para obtener una adecuada distribución lateral de velocidades con el modelo DCM, es necesario conocer con cierto detalle la geometría transversal del cauce, lo cual no siempre es técnica ni económicamente posible.

Agradecimiento. Los autores agradecen al Ing. Daniel Lima (EVARSA) por el aporte de los datos que hicieron posible la realización de este trabajo. El primer autor desea agradecer además a la Secretaría de Ciencia y Tecnología, Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Córdoba y al Colegio de Ingenieros Civiles de la Provincia de Córdoba – Regional Capital por el apoyo brindado.

LISTA DE SÍMBOLOS

Q	Caudal
ρ	Densidad del fluido
Dr	Profundidad relativa
g	Aceleración de la gravedad
S_0	Pendiente longitudinal del lecho
Y	Profundidad de flujo
Y_m	Profundidad media del tramo
V	Velocidad del flujo
y	Coordenada horizontal medida transversal a la corriente
s :	Talud lateral
f	Coefficiente de fricción de Darcy
λ	Viscosidad adimensional de torbellino de Boussinesq
Z	Cota o elevación del fondo
α	Coefficiente de distribución de velocidades o de Coriolis correspondiente a la sección i
h_e	Pérdidas de energía en el tramo entre secciones
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
n	Coefficiente de rugosidad de Manning
K	Conductividad hidráulica
A	Área de flujo
R	Radio hidráulico
H	Cota de la superficie de agua

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Eaton, J. W. (1997). *GNU Octave: a high-level interactive language for numerical computations*. <ftp://ftp.che.wisc.edu/pub/octave>.

Hydrologic Engineering Center. (2001). *HEC – RAS Hydraulic Reference Manual*, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, CA.

Shiono, K., Knight, D.W. (1988). “Two Dimensional Analytical Solution for a Compound Channel”, *Proc. 3rd Intl Symp. on Refined Flow Modeling and Turbulence Measurements*, Tokyo, Japan, pp. 503-510.

Tarrab, L. (2004). *Estimación de la distribución lateral de velocidades en cauces naturales: ríos argentinos*. Trabajo final de Ingeniería Civil - Fac. de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Tarrab, L., Weber, J. F. (2004). Predicción del Coeficiente de Mezcla Transversal en Cauces Naturales. *Mecánica Computacional*, **XXIII**, 1343-1355. Asociación Argentina de Mecánica Computacional, San Carlos de Bariloche. ISSN: 1666-6070.

Wark, J. B., Samuels, P. G., Ervine, D. A. (1990). “A practical method of estimating velocity and discharge in compound channels”, *Proceedings of the International Conference on River Flood Hydraulics*, Wiley, U.K, pp. 163-172.

Weber, J. F. (2003). *Modelación integrada uni y bidimensional de flujo en planicies de inundación*. Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería – Mención en Recursos Hídricos - Fac. de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba.

Weber, J. F., Menéndez, A. N. (2003). “Modelo LATERAL para simular la distribución lateral de velocidades en cauces naturales”, *Mecánica Computacional*, Vol. XXII, Bahía Blanca.

Weber, J. F., Tarrab, L. (2003). Modelo analítico de la distribución lateral de velocidades en cauces naturales – caso Río Colorado. *VIII Reunión sobre Recientes Avances en Física de Fluidos y sus Aplicaciones, FLUIDOS 2003*, Tandil, noviembre 2003, Argentina.