

UNA APROXIMACIÓN AL ESCURRIMIENTO EN SECCIONES COMPUESTAS MEDIANTE SIMULACION CUASI-BIDIMENSIONAL

Gerardo Adrián Riccardi

Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales-FCEIA- CIUNR-UNR, José Hernández 986, (2000) Rosario, Argentina. E_mail: riccardi@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

Se presenta la simulación numérica del escurrimiento en una serie de secciones compuestas por secciones principales y planicies de inundación, llevadas a cabo mediante un sistema de modelación cuasi-bidimensional estructurado en celdas. El trabajo comprendió la reproducción de una serie de ensayos llevados a cabo en un canal de laboratorio con secciones transversales en las que la relación ancho de boca/tirante fue inferior a 40, flujos en los cuales cobra importancia la interacción entre el canal principal y la planicie. Si bien el modelo utilizado no contempla el fenómeno en la interface canal-planicie permite simular mediante vinculaciones transversales transferencia de cantidad de movimiento. Fueron modeladas discretizaciones transversales con 3, 5 y 7 celdas. Los resultados obtenidos en las simulaciones con 3 celdas han indicado una adecuada aproximación de parámetros de flujo como caudales, tirantes y velocidades medias en cada planicie y en el canal principal. Un mejoramiento de la solución pudo establecerse mediante el aumento de las celdas transversales.

INTRODUCCION

En zonas de llanura es habitual encontrar arroyos, canales y ríos compuestos por una sección principal con predominancia conductiva del flujo, y planicies de inundación laterales que pueden funcionar como conductores y grandes almacenadores de flujo. Durante una crecida, cuando el río supera el nivel de la sección central quedan definidas dos áreas de escurrimiento: canal principal y planicies de inundación laterales. En las planicies los tirantes son menores y en general las rugosidades mayores por lo que el escurrimiento en la planicie es más lento que en el canal principal. Esta diferencia de velocidades genera una serie de vórtices y flujos secundarios en la interface de las regiones, produciéndose una transferencia de cantidad de movimiento, generalmente del canal a la planicie (Fig 1). El canal principal pierde capacidad de conducción aumentando la capacidad de escurrimiento de las planicies, que generalmente no alcanza a compensar la pérdida de la sección principal.

Los estudios de interacción entre río y planicie datan de la década del 60 hasta recientes trabajos de Villanueva (1997). Los clásicos enfoques para el análisis de escurrimiento en canales compuestos calculan la distribución de velocidades y las tensiones de fondo. Los enfoques pueden ser agrupados en tres categorías: enfoques hidráulicos; distribución de velocidades y modelos de turbulencia.

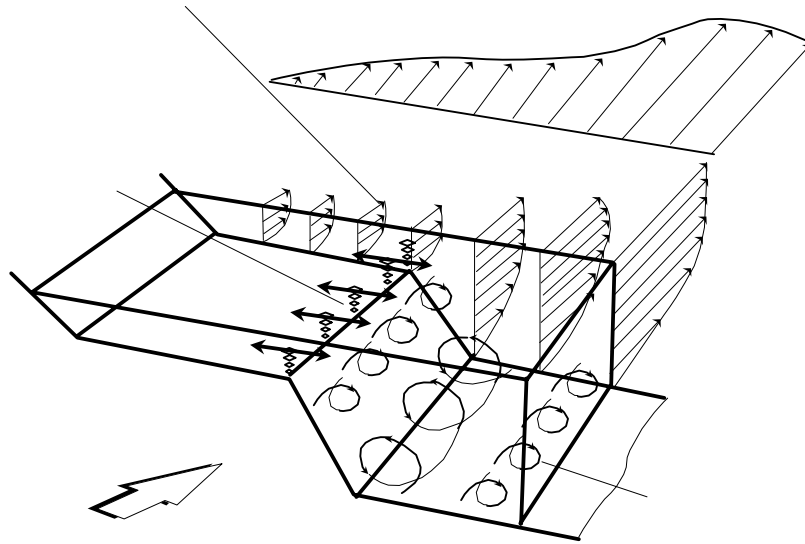


Figura 1. La interacción entre un canal principal y la planicie (Shiono y Knight, 1991)

Los *enfoques hidráulicos* tratan el canal en forma unidimensional. Calculan principalmente la capacidad de escurrimiento del canal, sin mayores detalles en lo que concierne a distribución de velocidades, tensiones turbulentas y distribución de caudales. Son los más antiguos y de acuerdo a algunos autores los de mayor potencial para uso práctico en proyectos de canales y estimaciones de caudales (Villanueva, 1997). Entre éstos encontramos los métodos de división del canal que dividen el canal en subáreas, según líneas trazadas en la interface (Figura 2). Los caudales se calculan en forma independiente y se suman sin tener en cuenta el efecto de la interface. Una alternativa es determinar un coeficiente de resistencia compuesto, pero tiene el inconveniente del efecto producido por un fuerte aumento del perímetro mojado cuando se alcanzan las planicies, resultando en una variación de la rugosidad sin sentido físico. Cuando el valle de inundación funciona predominantemente como almacenador de flujo es adecuado considerar como única sección de conducción el canal principal con prolongación imaginaria de los taludes laterales .



Figura 2. División de una sección de conducción compuesta

El enfoque de la *distribución transversal de velocidades* analiza la relación de esta con la tensión de corte en el fondo (Wark et al., 1991) Villanueva (1997) perfeccionó la solución de Wark et al. (1991), para cuantificar el efecto de la interacción entre canal principal y la planicie de inundación mediante el método de la distribución transversal (LDM, Wark et al., 1991), que calcula la distribución de las velocidades medias en una vertical en una sección transversal. La metodología fue usada en el estudio de la influencia del embalse de Foz do Areia en las inundaciones en Union da Victoria (Brasil).

Los *modelos de turbulencia* estudian el fenómeno mediante modelos $k-\varepsilon$ integrados en la vertical (Keller y Kodi, 1988) (Eiger, 1990) (Colkjat y Younis, 1995).

Villanueva (1997) observó que gran parte de los trabajos revisados suponen explícita o implícitamente hipótesis como: régimen permanente, canales y planicies rectos y de sección constante, igual pendiente en canal y planicie. Dado que en cursos de agua reales no se cumplen algunas de las hipótesis, el campo de utilización de los métodos se limita en gran manera. Asimismo en la mayoría de los estudios se utilizó igual rugosidad en canal y en valle, generando resultados no muy utilizables desde el punto de vista práctico porque en general no son situaciones reales, dado que las rugosidades de las planicies reales son más elevadas. Algunas cuestiones donde Villanueva (1997) estimó necesario profundizar investigaciones son :

- relación ancho/tirante; en canales de laboratorio los valores utilizados son del orden de 30, existiendo en la región cursos de agua con relaciones superiores a 150. Esta relación genera una duda acerca de que la influencia de la interface pueda extenderse en todo el ancho del río.
- en las transiciones geométricas suaves entre el canal principal y la planicie (taludes suaves) y transiciones en rugosidades (en el valle la rugosidad es mayor) puede llegar a despreciarse la influencia de la interface en términos prácticos.

OBJETIVOS

Este trabajo tuvo por objeto cuantificar el grado de aproximación logrado en lo concerniente a tirantes, velocidades medias y caudales, al simular mediante el modelo de celdas cuasi-bidimensional CTSS8 (Riccardi, 1997, 1999; Riccardi et al., 1997; Riccardi et al., 1998), el flujo escurriendo en secciones compuestas de un curso de agua. La modalidad de simulación de este sistema de modelación se enmarca dentro de los enfoques hidráulicos. Asimismo, fue analizado el mejoramiento de la aproximación aumentando la discretización transversal. Para alcanzar el objetivo se llevaron a cabo comparaciones entre resultados observados en pruebas de laboratorio reportados en bibliografía y resultados obtenidos mediante las simulaciones numéricas.

CONSTITUCION DEL MODELO CTSS8 EN CURSOS DE AGUAS CON SECCIONES COMPUESTAS

La modelación con el CTSS8 en secciones compuestas por secciones principales y planicies o valles de inundación se implementa en general desagregando la sección en sus múltiples componentes, correspondiéndole a cada elemento individual una celda de modelado (Fig. 3).

La discretización espacial queda conformada por celdas de planicie de inundación y celdas de cauce principal. Las celdas del valle se vinculan a las celdas de cauce mediante vinculaciones tipo vertedero con escalón de fondo nulo, siendo generalmente establecida como cota de fondo la correspondiente al nivel de desborde de la sección principal. El vertedero puede funcionar de igual forma en un sentido como en otro, permitiendo la simulación de salida del flujo hacia el valle durante la etapa de ascensión de la crecida como de entrada al cauce principal en la etapa de bajante. Esta vinculación, si bien en forma simplificada, permite representar una transferencia de cantidad de movimiento, tal cual ocurre en situaciones reales de escurrimiento.

Tanto las celdas del valle de inundación como del cauce principal se vinculan entre sí mediante vinculaciones tipo río. La cantidad de celdas con que se discretiza el valle está directamente relacionada con el grado de detalle y precisión perseguido y la información disponible de parámetros hidráulicos.

En cada celda y vinculación se calculan en cada intervalo de tiempo un tirante de agua representativo, un caudal y por lo tanto una velocidad media.

Un mayor detalle del sistema de modelación y múltiples aplicaciones pueden encontrarse en Riccardi (1997 y 1999), Riccardi et al. (1997) y Riccardi et al. (1998).

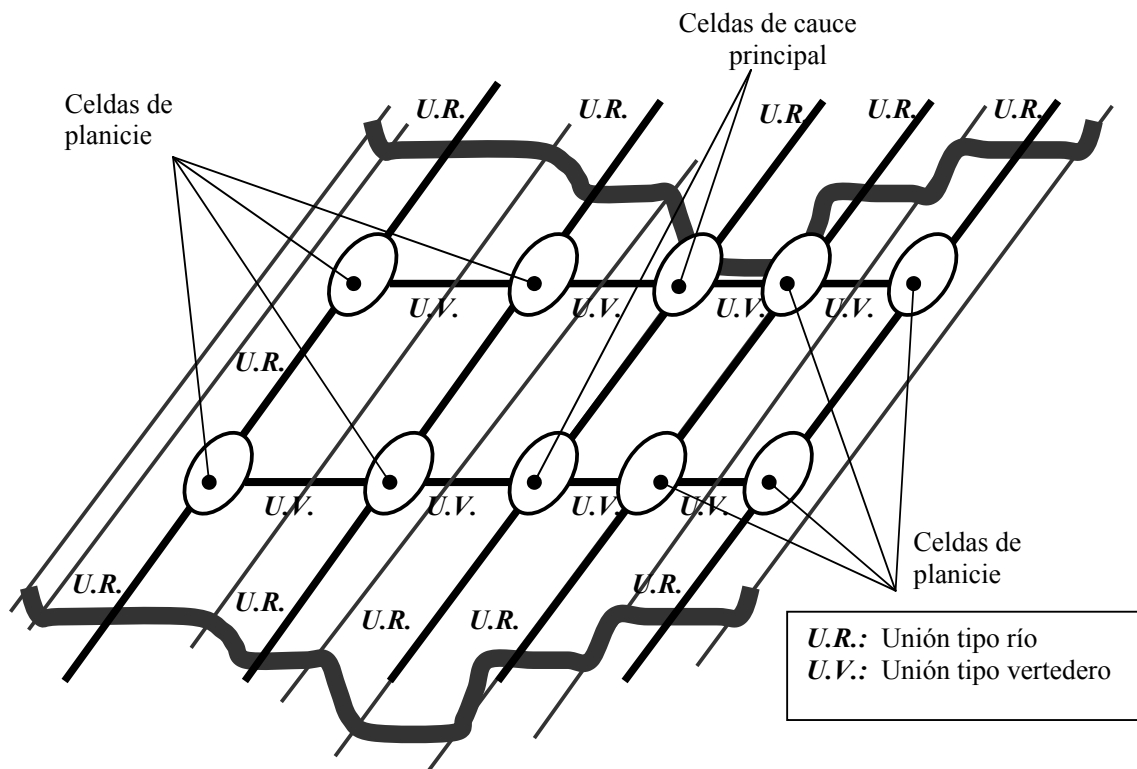


Figura 3. Discretización en celdas de un tramo de río con sección transversal compuesta.

DESCRIPCION DE LOS ENSAYOS

A fin de cuantificar el grado de aproximación logrado al discretizar en celdas una sección transversal compuesta de un curso de agua, se llevaron a cabo comparaciones entre resultados observados en pruebas de laboratorio y resultados obtenidos mediante simulaciones con el CTSS8.

Los ensayos de laboratorio fueron recopilados del trabajo presentados por Wark et al. (1991) y también expuestos por Villanueva (1997). Se trataron de dos geometrías diferentes tipificadas en el trabajo original como 02 y 03. En ambos casos, para una serie de tirantes se

registraron los diferentes perfiles transversales de velocidades medias integradas en la vertical.

Ambas geometrías tuvieron un largo de canal de 56 m, con un ancho de canal principal de 1.50 m y un tirante de desborde de canal principal de 0.15 m. Los taludes del canal principal y de borde de las planicies tuvieron un ángulo de 45° respecto a la vertical.

La geometría 02 (Fig. 4) tuvo un ancho total de 6.30 m (medido a un nivel horizontal correspondiente al fondo de las planicies) y se compararon resultados correspondiente a tirantes (medidos en el cauce) de 0.169 m, 0.198 m y 0.288 m. Estos tirantes correspondieron a anchos de boca y relaciones anchos de boca tirante detallados en la Tabla 1.

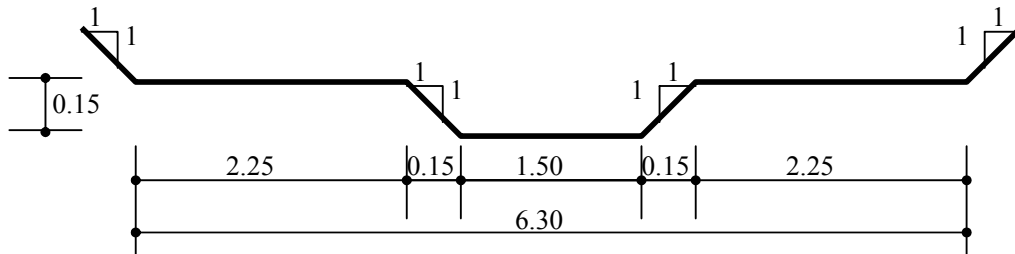


Figura 4. Geometría 02

Tabla 1. Tirantes, anchos de boca y relaciones en ensayos con geometría 02

Tirante (m)	Ancho de boca (m)	Relación ancho de boca/tirante
0.169	6.638	39
0.198	6.696	34
0.288	6.876	24

La geometría 03 (Fig. 5) tuvo un ancho total de 3.30 m (medido a un nivel horizontal correspondiente al fondo de las planicies) y se compararon resultados correspondiente a tirantes (medidos en el cauce) de 0.167 m, 0.199 m y 0.300 m. Estos tirantes correspondieron a anchos de boca y relaciones anchos de boca/tirante que se exponen en la Tabla 2.

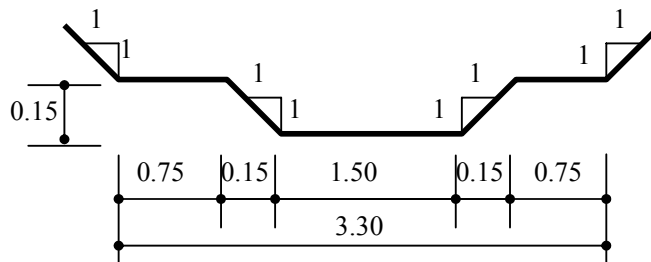


Figura 4.2.5 Geometría 03

Tabla 2. Tirantes, anchos de boca y relaciones en ensayos con geometría 03

Tirante (m)	Ancho de boca (m)	Relación ancho de boca/tirante
0.167	3.634	22
0.199	3.698	19
0.300	3.900	13

En ambos ensayos la rugosidad estimada fue de $\eta = 0.011$ tanto en el cauce principal como en la planicie de inundación.

IMPLEMENTACION DEL MODELO CTSS8

El modelo CTSS8 fue implementado inicialmente mediante 174 celdas y 283 vinculaciones. Las celdas se agruparon en 58 grupos de 3 celdas cada uno. El grupo representó a la sección compuesta: las celdas laterales representaron las planicies de inundación y la central el cauce principal. Cada celda tuvo una longitud de 1 m. Las celdas centrales (del cauce principal), para tirantes superiores al de desborde, se extendieron siguiendo dos líneas imaginarias coincidentes con la prolongación del talud del cauce.

En las vinculaciones tipo río se determinaron las velocidades medias, las que se compararon con las velocidades medias resultantes de los perfiles de velocidades aforados en los ensayos de laboratorio.

Se simularon dos tipos de modalidades de escurrimiento. En el primer caso se impuso un tirante constante en gran parte del tramo correspondiente a los tirantes de laboratorio, dejando como variable el caudal y las velocidades medias. En estas simulaciones se compararon los valores observados y calculados por el CTSS8 de caudales y velocidades medias en cauce principal y planicies, determinándose los errores porcentuales en cada caso.

En la segunda modalidad se determinó el caudal a partir de los diagramas de velocidades presentados en la bibliografía; este caudal se impuso en el tramo simulado dejando como variable al tirante y las velocidades medias. En este caso se compararon los resultados observados y calculados de tirantes en el cauce principal y en las planicies.

En las Figs. 6. a 8. se presentan los perfiles de velocidades observados, las velocidades medias en cauce principal y planicie calculados a partir del perfil observado y las velocidades medias calculadas por el modelo CTSS8, para los 3 tirantes simulados y para la geometría tipificada 02. Las Figs. 9 a 11 corresponden a los resultados de la geometría tipificada 03.

En la Tabla 3 se presentan una síntesis de todos los parámetros de flujo de cada simulación conjuntamente con los errores porcentuales calculados en cada alternativa de flujo.

Tabla 3. Parámetros hidráulicos y errores porcentuales de las simulaciones

	<i>Geometría 02</i>			<i>Geometría 03</i>		
Hcauce obs. (m)	0.169	0.198	0.288	0.167	0.199	0.300
Hvalle obs. (m)	0.019	0.048	0.138	0.017	0.049	0.150
Qtot obs. (*) (m ³ /s)	0.252	0.366	1.108	0.246	0.340	0.768
Qvalle obs. (*) (m ³ /s)	0.022	0.092	0.544	0.007	0.034	0.181
Qcauce obs. (*) (m ³ /s)	0.230	0.274	0.564	0.239	0.307	0.587
Vmedia obs. cauce (*) (m/s)	0.260	0.424	0.876	0.279	0.461	0.805
Vmedia obs. valle (*) (m/s)	0.815	0.817	1.097	0.858	0.907	1.087
<i>Simulación con H impuesto</i>						
Qtot calc. CTSS8 (m ³ /s)	0.253	0.365	1.109	0.246	0.341	0.767
Qvalle calc. CTSS8 (m ³ /s)	0.022	0.091	0.546	0.007	0.033	0.180
Qcauce calc. CTSS8 (m ³ /s)	0.231	0.274	0.563	0.239	0.307	0.587
Vmed. valle calc. CTSS8 (m/s)	0.258	0.423	0.879	0.274	0.459	0.798
Vmed. cauce calc. CTSS8 (m/s)	0.818	0.814	1.094	0.859	0.908	1.087
Error % veloc. valle	-0.775	-0.236	0.341	-1.824	-0.436	-0.877
Error % veloc. cauce	0.3667	-0.369	-0.274	0.116	0.110	0
Error % Q total	0	-0.761	0.331	0.050	0.215	-0.191
Error % Q valle	0	-0.761	0.331	-1.592	-0.775	-0.911
Error % Q cauce	0.316	-0.120	-0.115	0.057	-0.001	-0.003
<i>Simulación con Q impuesto</i>						
Hcauce calc. CTSS8 (m)	0.169	0.198	0.287	0.167	0.199	0.300
H valle calc. CTSS8 (m)	0.019	0.048	0.138	0.017	0.049	0.150
Error % H valle	-1.03	0.454	0.001	-0.203	0.343	0.041
Error % H cauce	0.048	-0.221	-0.136	0.054	0.099	0.003

(*) Los caudales no se presentaron en la bibliografía y fueron estimados mediante la integración de los diagramas de velocidades observados. Para desagregar los caudales parciales sobre cauce principal y valle se estableció una divisoria conformada por la prolongación de una línea ficticia de los taludes del cauce principal.

Los errores en valores absolutos máximos se sintetizan en la Tabla 4.

Tabla 4. Errores máximos de parámetros calculados con CTSS8

<i>Simulación con H impuesto</i>	Máximo error porcentual (%)	<i>Simulación con Q impuesto</i>	Máximo error porcentual (%)
Vcauce	0.37	Hcauce	0.22
Vvalle	1.82	Hvalle	1.03
Qtotal	0.29		
Qcauce	0.31		
Qvalle	1.59		

CONCLUSIONES

Los errores de los parámetros de flujo calculados en las simulaciones con 3 celdas por sección transversal son en todos casos menores a 1,9% con lo cual puede afirmarse que el grado de aproximación a los valores medios observados en las pruebas de laboratorio es altamente satisfactorio. Si bien el modelo no reproduce punto a punto los diagramas de velocidades, permite aproximar con precisión los valores medios de velocidades integradas en la vertical. Los mayores errores se presentan en velocidades medias en los ensayos de la geometría 03 donde la relación ancho/tirante ≤ 22 .

Las relaciones ancho/tirante ensayadas (<39) corresponden a secciones donde se manifiesta con importancia el fenómeno de interacción en la interface cauce principal-planicie, con lo cual adquiere mayor relevancia el grado de aproximación alcanzado. Estas relaciones son bastante inferiores a los valores encontrados en los cursos de agua de la región de la pampa ondulada (> 150), ambiente para el cual fue desarrollado el presente modelo. De todos modos no es objetivo del modelo un grado de detalle en lo que respecta a perfiles transversales de velocidades integradas en la vertical dentro de cada vinculación.

Los coeficientes de descarga de las uniones transversales tipo vertederos fueron ajustados en el rango de 0.16 a 0.20, valores totalmente similares a los calibrados en anteriores aplicaciones del modelo en secciones compuestas (Riccardi, 1997; Riccardi et al. 1997 y Riccardi, 1999).

Se evidencia un mejoramiento de la aproximación cuando se aumenta el número de celdas que conforman una sección transversal. El error máximo de todos los parámetros descendió al 1% al implementar el modelo con 7 celdas en cada sección transversal.

Una mejor aproximación al perfil transversal de velocidades observado en laboratorio pudo lograrse introduciendo el concepto de rugosidad ficticia tanto en el valle de inundación como en el curso principal. Esta rugosidad adicional ficticia positiva o negativa no tiene un significado físico concreto y compensa parcialmente en términos de resistencia la falta de capacidad del modelo para representar la influencia de la interface. Los estudios concernientes a la cuantificación de rugosidades ficticias en los casos específicos de escurrimientos que aquí se presentan están aún en una faz de producción de resultados por lo que a la fecha no se cuenta con valoraciones concluyentes. Resultados preliminares indican un aumento de la

rugosidad en los laterales del curso principal y disminución en la zona de la planicie próxima a la interface en un rango del 20% al 30%.

LISTA DE SIMBOLOS

Q : caudal (m^3/s)

H : tirante (m)

V : velocidad de flujo (m/s)

η : coeficiente de resistencia de Manning

REFERENCIAS

Colkjat D. y Younis B. (1995), Compound Channel flow: A parametric study using a Reynolds-stress transport closure, *Journal of Hydraulic Research*, **33**, N° 33, 307-320.

Eiger , S. (1990) , Simulação de escoamento uniforme em canais de seção comosta com modelos de turbulência, *XIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, IAHR-LAD, Montevideo.

Keller , R. y Kodi, W. (1988), Prediction of flow characteristic in main channel/flood plain flows. *Journal of Hydraulic Research*, **26**, N° 4, 457-474.

Riccardi, G. A. (1997), El Mapeo de Riesgo de Inundación por medio de la Modelación Matemática Hidrodinámica, *Revista Ingeniería del Agua*, **4**, N° 3, ISSN 1134-2196, UPV, Valencia, España, pp. 45-56.

Riccardi, G. (1999), *Un Sistema de Modelación Hidrológica-Hidráulica cuasi-bidimensional multicapa para ambientes rurales y urbanos*, Informe de Tesis Doctoral, FCEFyN, UNC, (289)p.

Riccardi, G., Zimmermann E. y Navarro, R. (1997), Zonification of Areas with Inundation risk by means of Mathematical Modelling in the Rosario Region, Argentina, en *Destructive ater: ater-Caused Natural Disasters, their Abatement and Cotrol*, Red Book, IAHS Publication Nro 238, ISSN 0144-7815, Wallingford, UK, pp. 123-136

Riccardi, G. A., Zimmermann, E. D. y Maurig, R. (1998), Mathematical Modelling of flood propagation for the delimitacion of rural, semiurbanized and urbanized zones with inundation risk, en *Runoff computations for water projects*, Edit. A.V. Rozhdestvensky, IHP-V Technical Documents in Hydrology N° 9, UNESCO, Paris, pp.127-138.

Shiono, K. Y Knight, D. (1991), Turbulent Open-Channel Flows with variable Depth across the Channel, *Journal of Fluid Mechanic*, pp. 617-646.

Villanueva, A. (1997) Simulação de áreas de inundaçao dinâmicas: canais compostos e wetlands, Tesis de Doctorado en Ingeniería, Instituto da Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, Porto Alegre, Brasil, (164)p.

Wark , J., Slade , J. Y Ramsbottom, D., (1991), Flood Discharge Assessment by the Lateral Distribution Method, Report SR 277, HRW, Wallingford, UK.

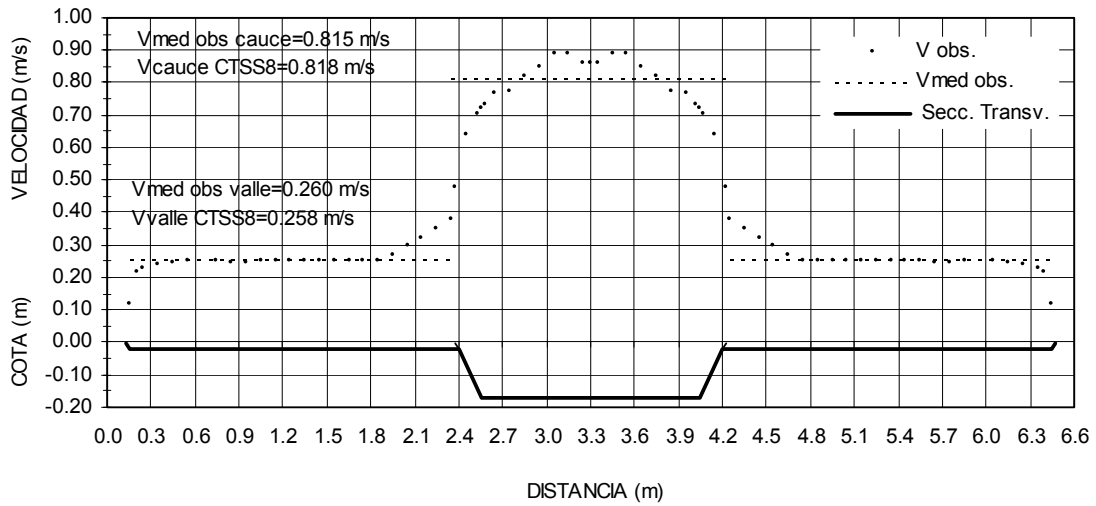


Figura 6 Geometría G2; Hmax=0.169 m; Qtot=0.252 m³/s

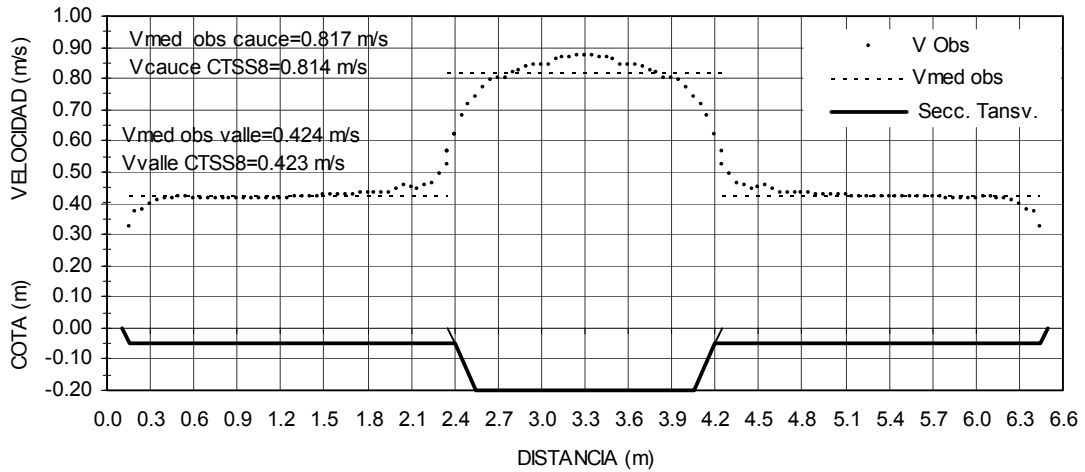


Figura 7. Geometría G2; Hmax=0.198 m; Qtot=0.366 m³/s

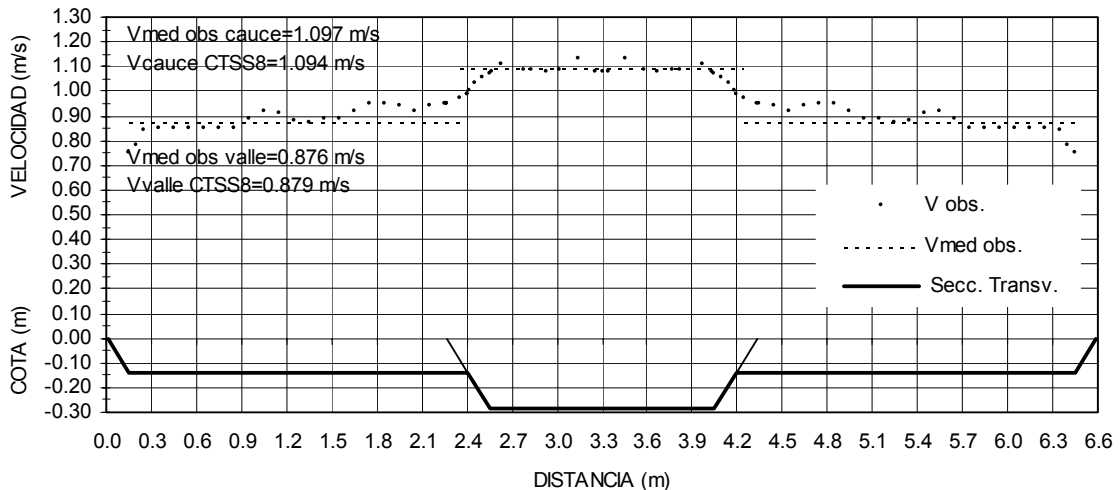


Figura 8. Geometría G2; Hmax=0.288 m; Qtot=1.108 m³/s

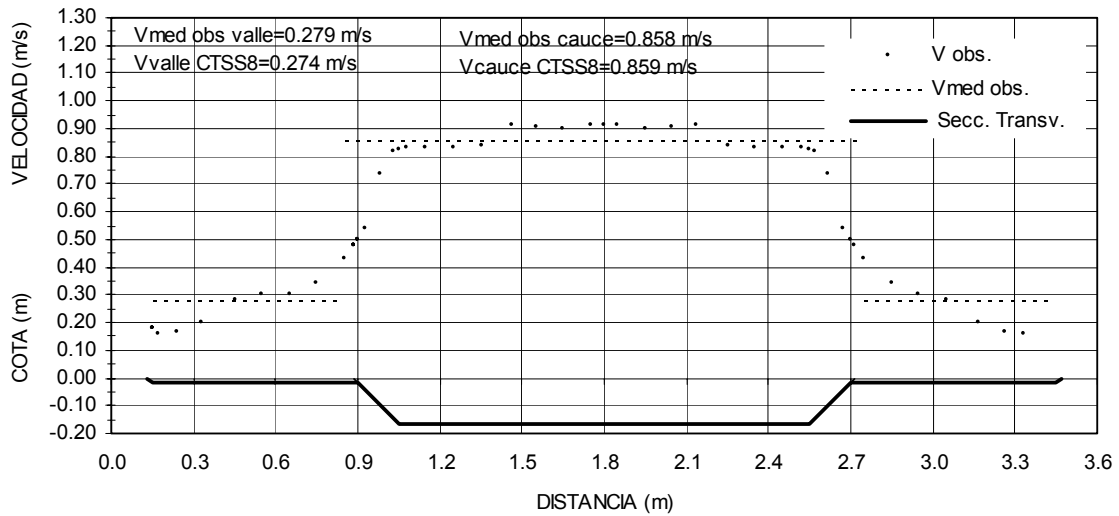


Figura 9. Geometría G3; Hmax=0.167 m; Qtot=0.246 m³/s.

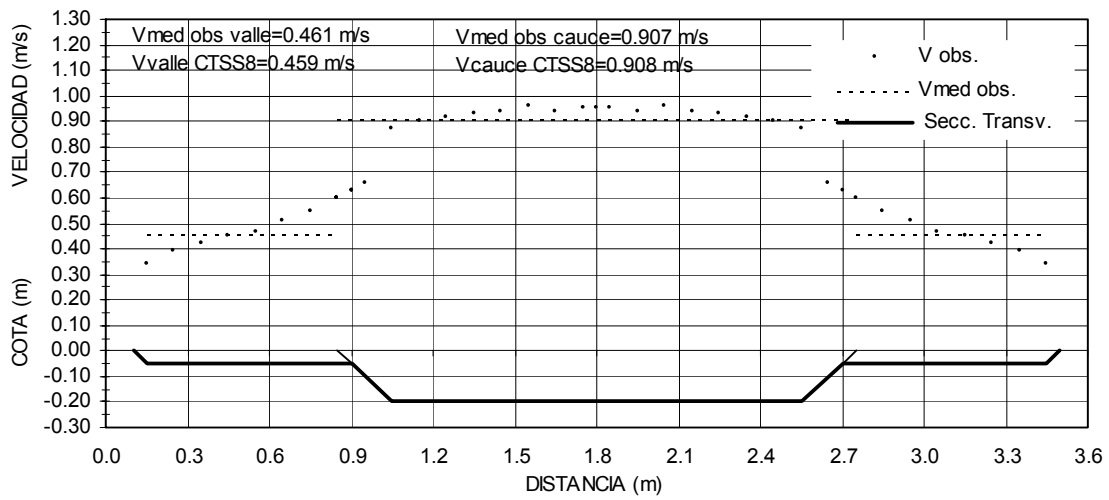


Figura 10. Geometría G3; Hmax=0.199 m; Qtot=0.340 m³/s.

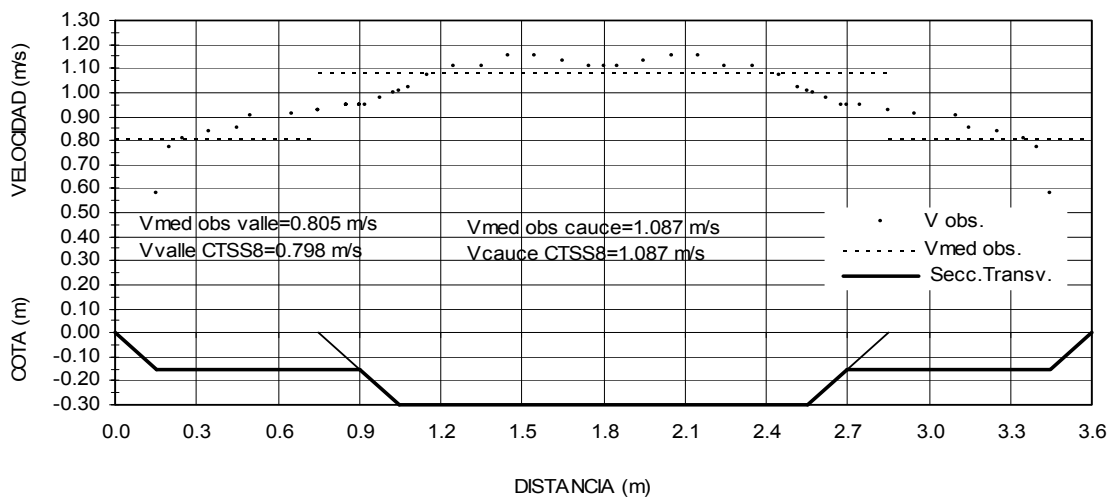


Figura 11. Geometría G3; Hmax=0.300 m; Qtot=0.768 m³/s.