

DESARROLLO Y APLICACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO HIDROMORFODINÁMICO TEDRI-1D7C

Basile, P.A.^{1,2}; Riccardi, G.^{1,2,3}

¹ Departamento de Hidráulica - Escuela de Ingeniería Civil (FCEIA - UNR)

² Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales (FCEIA - UNR)

³ Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario (CIUNR)

E-Mail: pbasile@fceia.unr.edu.ar

Introducción

Las crecidas catastróficas en ríos con lecho móvil, de sedimentos fuertemente no-uniformes, se relacionan con los elevados caudales líquidos, generados por precipitaciones extraordinarias en la cuenca y, además, con la excesiva cantidad de sedimentos que alimentan el curso principal a través de los numerosos afluentes que conforman la red hidrográfica. La modelación integral, a escala de cuenca, requiere modelos hidromorfodinámicos de tipo operativo, que describan además, procesos a escala de tramo. De esta manera, los mismos pueden ser utilizados en el manejo de riesgo de inundaciones, diseño de obras, planificación y toma de decisiones durante eventos de crecidas extraordinarias, entre otras aplicaciones.

En el presente trabajo se describe el desarrollo y aplicación de un modelo hidromorfodinámico espacialmente semidistribuido a escala de cuenca, denominado TEDRI-1D7C (Basile, 2016), **Transporte y Erosión-Deposición en Ríos - 1 Dimensional 7 Clases** granulométricas. El modelo simula integralmente, desde la transformación lluvia-caudal y la alimentación sólida, en forma espacialmente agregada a escala de subcuenca, hasta la propagación distribuida de caudales (líquidos y sólidos) y los procesos de erosión-deposición en el curso principal. El modelo es capaz de representar, a lo largo del río, la evolución espacial y temporal de: i) caudal líquido (y variables de flujo asociadas), ii) transporte de sedimentos (fondo, suspensión y total) por clases granulométricas, iii) procesos de erosión-sedimentación y iv) cambios de composición granulométrica del lecho; en cuencas relativamente grandes y morfológicamente complejas.

Breve descripción del modelo matemático TEDRI-1D7C

El modelo realiza en primer lugar la transformación lluvia-caudal por subcuencas y la suma de hidrogramas. Sucesivamente, los mismos se propagan en forma distribuida a lo largo del cauce principal, obteniéndose valores de caudal (y variables de flujo asociadas)

en las distintas secciones de cálculo. El aporte de sedimentos, en función del tiempo, se calcula a partir de la hidrodinámica y de las características sedimentológicas de los tramos terminales de cada afluente; según distintas modalidades que se describen más adelante. Los transportes de sedimentos que ingresan lateralmente se van generando a medida que el proceso de cálculo avanza en el tiempo. Los sedimentos que ingresan al cauce principal, se combinan con los transportes encauzados y se propagan, produciendo variaciones del nivel del lecho y cambios de su composición granulométrica. En el cauce principal, las ecuaciones que describen la hidrodinámica y la morfodinámica, se resuelven conjuntamente en forma cuasi-acoplada, a través de aproximaciones en diferencias finitas, utilizando esquemas de predicción-corrección.

Modelación de procesos hidrológicos

La transformación lluvia-caudal se realiza para cada subcuenca mediante la convolución del HUI de Nash o el HUS triangular equivalente del SCS, con el hietograma de lluvia neta (Basile y Zimmerman, 2008). Este último se obtiene mediante el método del número de curva (CN) del Servicio de Conservación de Suelos de EE.UU. Alternativamente, los mismos pueden especificarse como caudales laterales externos. Se pueden simular hasta cincuenta afluentes.

Modelación de procesos hidrodinámicos

La hidrodinámica del cauce principal se representa mediante las ecuaciones de flujo impermanente gradualmente variado 1D de De Saint Venant, donde se desprecian los términos inerciales y de gradiente de presión en la ecuación dinámica. Tal abordaje es totalmente justificado para ríos con pendientes $S_b \geq 0.002$ (Bellos et al., 1995; Chiari, 2010).

Modelación de la morfodinámica del cauce

El modelo representa los procesos de transporte fraccional, erosión-deposición y cambios de composición del lecho, mediante dos tipos diferentes de abordajes (Basile, 2000, 2002):

i) *Modelo de dos estratos*: simula adaptación instantánea del transporte en suspensión a las condiciones hidrodinámicas locales, por lo tanto, el transporte en suspensión puede ser conglobado en el transporte total, el cual se asume en condiciones de equilibrio (capacidad de transporte). Este abordaje se utiliza cuando el paso de integración espacial es mayor que

la longitud de adaptación de las partículas más finas transportadas en suspensión. Y, en general, en todos aquellos casos donde el transporte es predominantemente de fondo.

ii) *Modelo de tres estratos*: simula transporte en suspensión en condiciones de no-equilibrio, por lo tanto, el transporte en suspensión es una incógnita. Este abordaje es útil para simular los procesos morfodinámicos cuando en el aporte sólido preponderan fracciones de sedimentos finos, en el rango de arenas muy finas a finas, y es aplicable en todos aquellos casos donde la longitud de adaptación del sedimento en suspensión es menor que el paso de integración espacial adoptado.

- ***Ecuaciones de transporte de sedimentos implementadas***

El modelo calcula la capacidad de transporte fraccional de sedimentos con cualquiera de las siguientes cuatro ecuaciones: i) Engelund y Hansen (1967), ii) Di Silvio (1983), iii) Van Rijn (1984) y iv) Meyer-Peter y Müller (1948), todas modificadas para calcular el transporte de sedimentos no uniformes por fracciones granulométricas (Basile, 2000). La división del transporte total, en fondo y suspensión, se realiza con la relación de transportes de Van Rijn.

- ***Aporte lateral de sedimentos desde afluentes***

El modelo permite representar el ingreso de transporte ordinario y extraordinario de sedimentos desde los afluentes. Tales modalidades de ingreso dependen de las características morfo-sedimentológicas de los tramos terminales de cada afluente.

- ***Tratamiento de sectores no aluviales del cauce***

En los sectores no aluviales del río (con afloramientos rocosos en el fondo), el modelo no permite que la erosión, del sedimento eventualmente depositado previamente, progrese por debajo del nivel del fondo rocoso en el tramo especificado.

- ***Mapeo estratigráficos de los depósitos del cauce***

Los procesos de sedimentación dan lugar, sobre todo bajo condiciones hidrológicas y sedimentológicas fuertemente variables en el espacio y en el tiempo, a fenómenos de estratificación de los depósitos. Para contemplar este proceso, el modelo almacena la "historia" deposicional, en función de niveles y composiciones granulométricas, para que en el caso de eventuales erosiones de los mismos, se asigne correctamente la composición granulométrica para el cálculo del transporte de cada clase.

Lógica computacional

Todos los parámetros físicos y numéricos son provistos por el usuario a través del archivo de entrada de datos, en formato Excel con extensión csv. Después de la Hidrología e inicialización, se activa la Morfodinámica y llama secuencialmente a Hidrodinámica y Transporte de Sedimentos, en un loop de avance temporal ascendente, con adaptación dinámica del paso de integración temporal. El modelo utiliza 26 subrutinas, programadas en Visual Fortran, que ejecutan todas las operaciones de gestión de datos, los cálculos y las salidas de resultados hidrológicos, hidrodinámicos y morfodinámicos en archivos Excel con extensión csv.

Aplicación del modelo en cuencas reales

Cuenca del Arroyo Marea

La cuenca del A° Marea (Figura 1) se encuentra en la denominada Patagonia extra-andina, en la Provincia del Chubut y drena un área de 187 km². El curso principal, a lo largo de 41 km, recibe el aporte de numerosos afluentes. El inicio del curso principal se ubica en cota 385 m (s.n.m.m) y desemboca en la Bahía Bustamante a cota 4 m (s.n.m.m).



Figura 1. Cuenca A° Marea (izq.) y Sedimentos del lecho cerca de la desembocadura (der.).

Simulación numérica

Se simuló un evento de crecida asociado a una lluvia de recurrencia 50 años. La lluvia de diseño de 71 mm se determinó a partir del estudio estadístico de datos pluviométricos (Estación Comodoro Rivadavia Aero, SMN). El CN se adoptó igual 85. Para la transformación lluvia-caudal se seleccionó el HUI de Nash. Dado que se trata de una cuenca no aforada, los parámetros n y K se estimaron a partir de la morfología de cada subcuenca. El transporte de sedimentos se evaluó con la ecuación de Engelund y Hansen.

Para representar el sedimento del lecho se adoptaron 7 clases granulométricas. La cuenca se subdividió en 10 subcuencas (ver Figura 1) y las entradas de sedimentos desde los afluentes se tipificaron como transporte ordinario. Los datos morfo-sedimentológicos fueron recabados de información existente (Basile et al., 2013). El paso de integración espacial fue $\Delta x=250$ m, quedando conformadas 164 secciones de cálculo. Se adoptó el modelo de tres estratos, dado que la longitud de adaptación estimada del $d_1=0.125$ mm, resulta $\lambda_{*1}\approx 315$ m, es decir, mayor que $\Delta x=250$ m. El tiempo total de la simulación fue de 36 hs.

Evaluación de resultados

En la Figura 2 se presentan los hidrogramas simulados, en diferentes progresivas a lo largo del cauce principal. Se observa que el caudal pico, a la salida de la cuenca (progresiva 41 km), es del orden de $250 \text{ m}^3/\text{s}$, y se alcanza a las 6.9 hs., a partir del tiempo inicial $t=0$ hs.

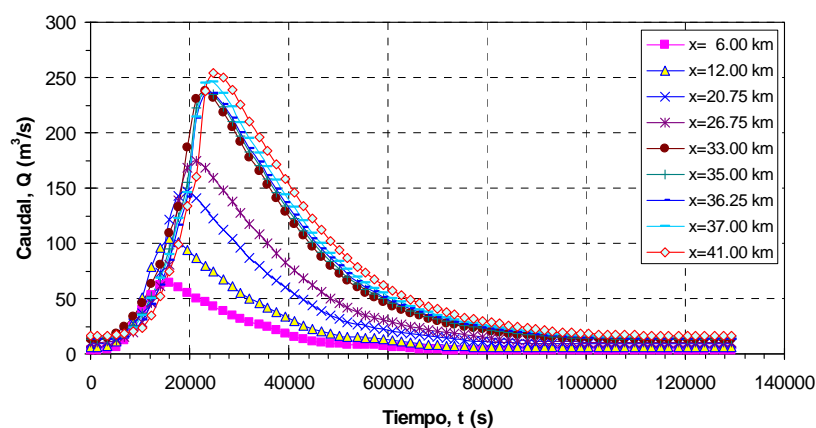


Figura 2. Hidrogramas calculados en distintas progresivas a lo largo del cauce principal.

Los coeficientes de rugosidad de Manning, calculados dinámicamente en función del d_{90} , variaron entre 0.032 y $0.056 \text{ s/m}^{1/3}$. Un caudal pico similar ($220 \text{ m}^3/\text{s}$) fue obtenido aplicando el modelo HEC-HMS, para misma lluvia y CN, y utilizando el HUS del SCS (P-Q) y el método de Muskingum (Q-Q) (Basile et al., 2013).

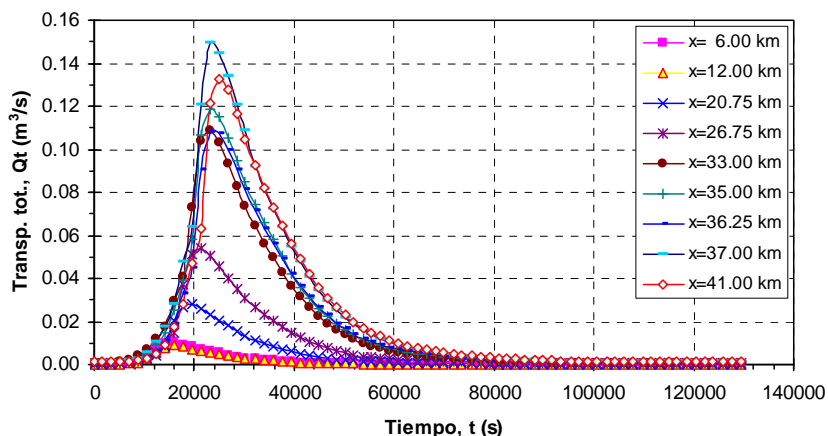


Figura 3. Evolución temporal del transporte total de sedimentos en diferentes progresivas a lo largo del cauce.

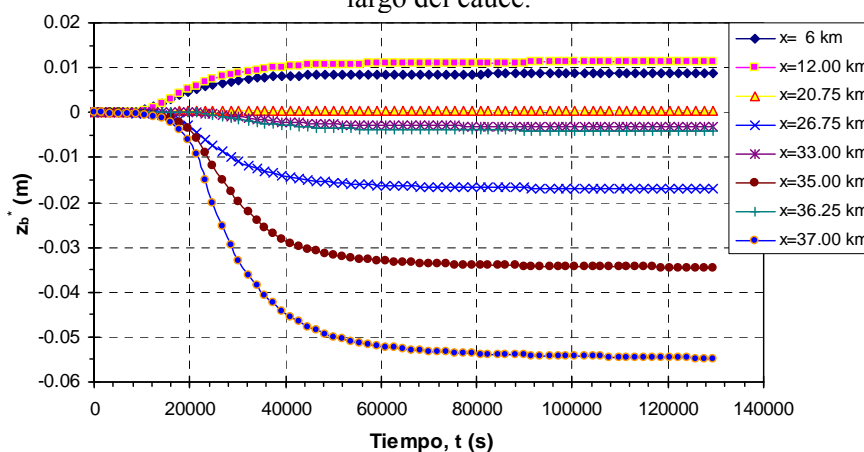


Figura 4. Evolución temporal del nivel del lecho, respecto al nivel inicial, en diferentes progresivas a lo largo del cauce.

En la Figura 3 se observa la evolución temporal del transporte total de sedimentos (fondo + suspensión), sumado sobre el número total de fracciones, en diferentes progresivas a lo largo del cauce. En la Figura 4 se presenta la evolución temporal del nivel del lecho, respecto al nivel inicial, para diferentes progresivas. Se observan procesos de erosión ($z_b^* < 0$) y depósito ($z_b^* > 0$) a lo largo del tramo durante la propagación de la crecida.

Aplicación del modelo en canales experimentales

Experimentos de Wong y Parker (W&P, 2006)

Wong y Parker (2006) analizaron como responde morfodinámicamente el lecho de grava de un canal de laboratorio, ante una serie de ciclos repetidos de hidrogramas. Bajo la hipótesis que, en condiciones de equilibrio de lecho móvil, el nivel del fondo permanece

sustancialmente invariable para los distintos ciclos de hidrogramas triangulares utilizados en los experimentos (ver Tabla 1). El canal utilizado es de ancho $B=0.5$ m y longitud $L=22.5$ m. Para el sedimento utilizaron grava de diámetro medio geométrico $d_g=7.2$ mm y desvío estándar geométrico $\sigma_g=1.2$; con $d_{50}=7.1$ mm, $d_{90}=9.6$ mm y $\rho_s=2550$ kg/m³.

Tabla 1. Condiciones experimentales para el ingreso de caudales líquidos y sólidos (W&P, 2006).

Experimento	Q_{base} (m ³ /s)	Q_{pico} (m ³ /s)	t_{pico} (min)	t_{base} (min)	Q_b (kg/s)
F1-1	0.052	0.086	15	30	0.144
F1-2	0.052	0.086	30	60	0.144
F2-1	0.044	0.083	7.5	15	0.080
F2-2	0.044	0.083	7.5	30	0.080
F2-3	0.044	0.083	7.5	45	0.080
F3-1	0.044	0.065	15	30	0.080
F3-2	0.044	0.083	15	30	0.080
F3-3	0.044	0.102	15	30	0.080

Simulaciones numéricas

El paso de integración espacial se adoptó igual a $\Delta x=0.5$ m, quedando conformadas 45 secciones de cálculo a lo largo del canal de 22.5 m de longitud. El tiempo total de la simulación de cada experimento fue de 20 hs. Se especificaron 7 clases granulométricas y se adoptó el modelo de dos estratos, dado que la longitud de adaptación estimada del $d_1=4.36$ mm, resulta $\lambda_{*1}\approx 0.035$ m, mucho menor que $\Delta x=0.5$ m. Para reproducir la hidrodinámica, el coeficiente de rugosidad de Manning se ajustó a partir de los datos de caudal, pendiente de fondo y profundidades de flujo observadas. Dado que el modelo estima dinámicamente dicho coeficiente a partir del d_{90} del lecho ($n=\alpha d_{90}^{1/6}$), donde $\alpha=EM/26$ y d_{90} (m); para reproducir los coeficientes de rugosidad observados, se ajustó el parámetro EM, el cual varió entre 0.8 y 1.07. El transporte de sedimentos es sustancialmente de fondo, por lo tanto, se seleccionó la ecuación de transporte de Meyer-Peter y Müller. El coeficiente de proporcionalidad se ajustó para reproducir las mediciones de transporte, resultando valores comprendidos entre 1.98 y 2.85.

Evaluación de resultados

En la Tabla 2 se presentan los valores observados y calculados, para equilibrio de lecho móvil, de: i) pendiente del fondo S_b , ii) profundidades de flujo asociadas al caudal base y al caudal pico de los hidrogramas, h_{base} y h_{pico} respectivamente, iii) velocidades de flujo U_{base} y U_{pico} . El modelo representa las situaciones de equilibrio de lecho móvil en forma muy satisfactoria.

Tabla 2. Valores observados y calculados de variables morfológicas e hidráulicas (Exp. W&P, 2006).

Exp.	S_b (%)		h_{base} (m)		h_{pico} (m)		U_{base} (m/s)		U_{pico} (m/s)	
	Obs.	Calc.	Obs.	Calc.	Obs.	Calc.	Obs.	Calc.	Obs.	Calc.
F1-1	1.38	1.39	0.086	0.0851	0.116	0.1187	1.21	1.222	1.48	1.449
F1-2	1.35	1.35	0.080	0.0797	0.109	0.1112	1.30	1.305	1.58	1.547
F2-1	1.08	1.08	0.086	0.0864	0.132	0.1315	1.02	1.019	1.26	1.262
F2-2	1.03	1.05	0.092	0.0900	0.135	0.1376	0.96	0.978	1.23	1.206
F2-3	1.06	1.06	0.099	0.0963	0.139	0.1481	0.89	0.914	1.19	1.121
F3-1	1.18	1.17	0.090	0.0891	0.112	0.1153	0.98	0.988	1.16	1.127
F3-2	1.05	1.03	0.093	0.0906	0.136	0.1386	0.95	0.971	1.22	1.198
F3-3	0.92	0.92	0.103	0.0985	0.162	0.1754	0.85	0.893	1.26	1.163

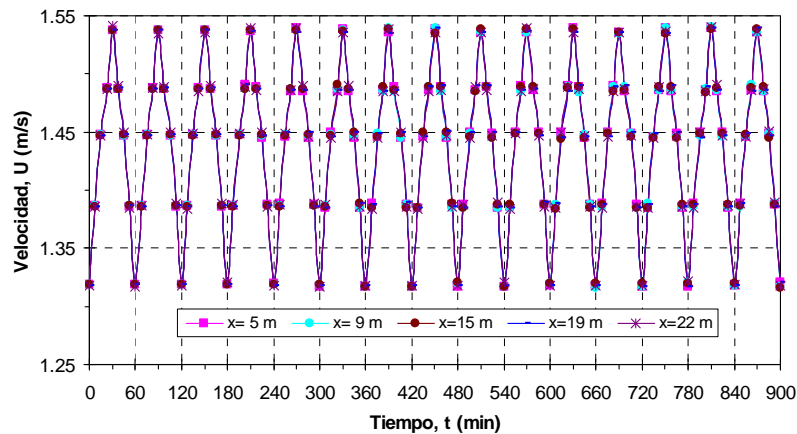


Figura 5. Evolución temporal de la velocidad de flujo, en distintas progresivas del canal, para 15 ciclos de caudales. Experimento F1-2.

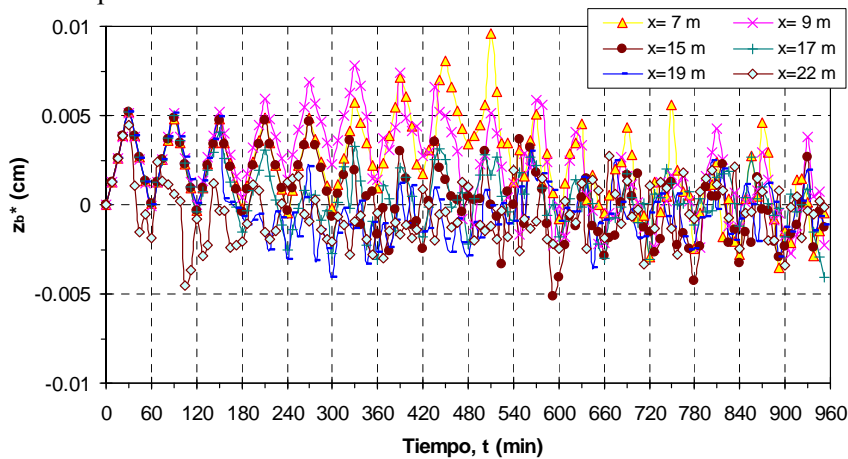


Figura 6. Evolución temporal del nivel del lecho, referido al nivel inicial, en distintas progresivas, para 16 ciclos de caudales. Experimento F1-2

En las Figuras 5 y 6 se presenta la evolución temporal de la velocidad de flujo y del nivel del lecho calculado, referido al nivel inicial, correspondientes al experimento F1-2, respectivamente. Se observa que, efectivamente el lecho móvil de equilibrio (alcanzado a los 780 min.) no experimenta procesos acentuados de erosión o depósito, ante el tránsito de la serie de hidrogramas. El nivel del lecho fluctúa ligeramente entorno al valor $z_b^*=0$, es decir, al

valor inicial, manteniendo su pendiente de equilibrio. En la Figura 7 se presenta la evolución temporal del transporte de fondo a la salida del canal, calculado y observado, para la condición de lecho móvil de equilibrio durante el ciclo de un hidrograma, correspondiente al experimento F1-2. Se observa un acuerdo muy satisfactorio entre los valores calculados y el conjunto de mediciones realizadas.

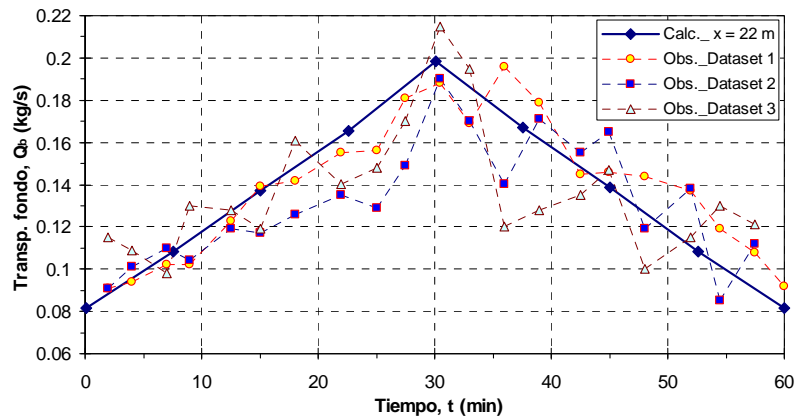


Figura 7. Evolución temporal del transporte de fondo a la salida del canal, calculado y observado, para lecho móvil de equilibrio, durante el vigésimo ciclo de caudales ($t=20$ hs.). Experimento F1-2.

Conclusiones

El modelo TEDRI-1D7C constituye una herramienta robusta y eficiente para simular numéricamente, en forma integral a escala de cuenca, los procesos hidrológicos, hidrodinámicos y morfodinámicos, en ríos aluviales con lechos de sedimentos no-uniformes y pendientes superiores a 0.002. El modelo fue verificado en cuencas reales, con crecidas de diseño extraordinarias y con experimentos de laboratorio; reproduciendo en ambos casos la hidro-morfodinámica en forma satisfactoria.

Agradecimiento. Los autores agradecen a la UNR por el apoyo brindado mediante los PID 19-I368, 19-I358, ING509 e ING514.

Referencias bibliográficas

1. Basile, P.A. (2000). "Revisión de ecuaciones de transporte modificadas para sedimentos heterogéneos". XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica – IAHR, Córdoba, Argentina. Tomo I, pp. 369-378.
2. Basile, P.A. y Riccardi, G.A. (2002). "A Quasi-2D Hydro-Morphological Mathematical Model: An Application to the Argentinean Paraná River". International Journal of Sediment Research, 17 (1), 20-30.
3. Basile, P.A. (2016). "Modelo Hidro-Morfodinámico TEDRI-1D7C". Departamento de Hidráulica y CURIHAM, FCEIA-UNR. Junio 2016. Informe técnico DHC N°1_06-16, 142 p.