

MODELO INTEGRADO PARA CALCULAR LA EVOLUCIÓN MORFOLÓGICA DE CANALES, INCLUYENDO EROSIÓN EN MÁRGENES COHESIVAS

Pablo E. García, José Rodríguez, Angel N. Menéndez, Martín Sabarots Gerbec

PHC-Laboratorio de Hidráulica-INA, AU Ezeiza-Cañuelas, Tramo J. Newbery Km 1,620, CP 1804, Ezeiza, Argentina

LaMM-Facultad de Ingeniería-UBA, Av. Las Heras 2214, CP 1127, Ciudad de Buenos Aires, Argentina

E-mail: angel.Menéndez@speedy.com.ar - Web: <http://www.fi.uba.ar/laboratorios/lmm>

RESUMEN

Se presenta un modelo integrado hidrodinámico-sedimentológico-morfológico para simular el proceso de evolución morfológica de un canal en sentido transversal, incluyendo la erosión de márgenes con un estrato cohesivo. Este último proceso se representa como la erosión progresiva del sustrato granular subyacente, que provoca la pérdida de apoyo del estrato cohesivo suprayacente, con las consecuentes fallas por tracción y corte. Se describe la validación del modelo, tras lo cual se presentan resultados de un ensayo numérico.

ABSTRACT

An integrated hydrodynamic-sedimentologic-morphologic model to simulate the process of morphological evolution of a channel in the transversal direction, including erosion of banks with a cohesive stratum, is presented. This last process is represented as a progressive erosion of the underlying granular substratum, which leads to a loss of support for the upper cohesive stratum, with the consequent traction and cutting failures. The model validation is described. Results of a numerical experiment are presented.

INTRODUCCIÓN

Los cambios morfológicos de cauces de ríos y arroyos producidos por la erosión de sus márgenes constituyen un problema muy difundido, muchas veces inducidos o acelerados por efectos del desarrollo de las actividades antrópicas. Esos cambios determinan efectos negativos sobre el propio ‘sistema antrópico’ (amenazas a asentamientos humanos, destrucción de obras de infraestructura, arrasamiento de zonas de explotación agrícola o ganadera, sedimentación sobre vías de navegación, etc.) así como sobre el ‘sistema natural’ (destrucción de hábitats de fauna íctica, contaminación de las aguas). Para controlar este proceso, es necesario aumentar el conocimiento de los mecanismos involucrados, generando al mismo tiempo herramientas que permitan una evaluación de los riesgos y consecuencias.

Los continuos procesos de erosión a los que se encuentran sometidas las márgenes terminan afectando su estabilidad. Cuando una margen tiene un sustrato base granular sobre el que se encuentra un estrato cohesivo, el mecanismo de falla consiste en la erosión progresiva del estrato granular subyacente, que provoca la pérdida de apoyo del estrato cohesivo suprayacente, con consecuentes fallas por tracción y corte.

Para simular numéricamente este proceso, es necesario formular un modelo integrado hidrodinámico-sedimentológico-morfológico. En este trabajo se presenta dicho modelo, y se muestran resultados de experiencias numéricas.

MODELO INTEGRADO

El modelo matemático integrado propuesto para abordar el problema de la erosión de márgenes incluye tres módulos interconectados: un módulo hidrodinámico, uno sedimentológico y uno morfológico, los cuales se describen a continuación.

Módulo Hidrodinámico

Tal como se explicó en detalle en trabajos anteriores (Laciana & Menéndez 2002, Menéndez et al. 2003, 2005 y 2006), el módulo hidrodinámico está compuesto por un submodelo longitudinal y otro transversal. El primero está basado en el Método de Distribución Lateral (Wark et al. 1990), proveyendo la distribución lateral de la velocidad longitudinal del flujo. El submodelo transversal se basa en el modelo paramétrico de Kikkawa et al. (1976) para las corrientes secundarias en una curva, que provee la velocidad del flujo secundario en el fondo (ya que la misma es de relevancia para determinar el transporte de sedimentos de fondo transversal, el cual es el responsable de la erosión del sustrato no cohesivo). La transición entre este submodelo paramétrico y la condición de impenetrabilidad en la margen se realiza mediante la aplicación de una función moduladora o máscara (Menéndez et al., 2005 y 2006).

Módulo Sedimentológico

El módulo sedimentológico se basa en la aplicación del modelo de Kovacs & Parker (1994) para el transporte de material no cohesivo. Se trata de un modelo mecanístico, en contraposición a los clásicos tratamientos con fórmulas empíricas. Su implementación para canales, incluyendo corrientes transversales debido a efectos de curvatura, ha sido presentada en otros trabajos (Menéndez et al. 2005 y 2006).

Módulo Morfológico

El módulo morfológico consta de tres componentes. La primera componente tiene en cuenta el desbalance en el transporte lateral del material del sustrato no cohesivo, y se representa a través de la ecuación de Exner (Laciana & Menéndez 2002, Menéndez et al., 2003, 2005 y 2006).

La segunda componente del módulo morfológico considera el mecanismo de deslizamiento del material del sustrato no cohesivo cuando la pendiente lateral del lecho supera al ángulo de reposo (ω_c , donde $\omega_c = \tan^{-1} \mu$). Este mecanismo es el que eventualmente produce la erosión de las partes no cohesivas de las márgenes. Se implementó a través del siguiente algoritmo, que garantiza la conservación de la masa de suelo:

- a) Después del cálculo con la primera componente del módulo morfológico, se verifica la pendiente lateral entre nodos sucesivos de la sección transversal, comenzando desde el talweg y siguiendo en dirección hacia cada una de las márgenes.
- b) Si la pendiente es menor que la crítica (dada por el ángulo de reposo del material

del lecho, es decir $\omega_c = \tan^{-1} \mu$), no se toma ninguna acción para ese segmento particular.

- c) Por el contrario, si se encuentra alguna pendiente mayor a la crítica, la altura del nodo más alto de ese segmento particular de la sección transversal se baja hasta que la pendiente sea crítica. Esto determina una pérdida del volumen del suelo (figura 1a), que debe ser distribuido pendiente abajo. Esta distribución se realiza levantando la altura del nodo más bajo del segmento subsiguiente en dirección al talweg de la sección transversal, a fin de acomodar el volumen de suelo deslizado (figura 1b).
- d) Si el deslizamiento de suelo ocurre en el segmento adyacente a una margen (lo que implicaría que la altura del nodo extremo de la margen debería ser bajada) se agrega un nuevo nodo al dominio del cálculo (hacia el exterior del canal; renumerándose los nodos si esto ocurriese en la margen izquierda), nivelado con la altura original del nodo extremo de la margen (que es la altura de la superficie del agua), para representar la nueva localización de la margen (es decir, se convierte en el nodo extremo de la margen para el próximo paso de cálculo). En el caso de que la superficie de agua no esté a la misma altura que la margen, al volumen deslizado se le agrega el volumen de suelo de la margen por sobre el nivel de agua (en ese caso solo se necesita saber la altura de la margen), con la porción seca de la margen tomando una pendiente igual a la crítica (figura 1c).
- e) Debido a que el deslizamiento del volumen de suelo en dirección al talweg puede conducir a que se produzcan pendientes transversales del lecho mayores a la crítica, el algoritmo propuesto se repite iterativamente para cada paso de cálculo hasta que no se encuentren pendientes mayores a la crítica.

En caso de existir un estrato cohesivo por encima del estrato no cohesivo, el retraimiento de éste último puede producir una eventual falla por voladizo. Se realiza un análisis geotécnico de la estabilidad, el cual, siguiendo los lineamientos de Darby & Thorne (1996), incluye los efectos de la presión positiva del agua de poro en la porción saturada, de la presión negativa del agua de poro en la porción no saturada, y de la presión hidrostática confinada debido al nivel del agua en el río. Se supone una falla de tipo plana, lo que es común para márgenes desestabilizadas por la degradación severa del fondo del lecho (Darby et al. 2000), con el plano de falla pasando a través del punto superior del estrato no cohesivo de la margen. Se consideran todas las posibilidades con respecto a las elevaciones relativas de la superficie del agua, del nivel freático y de la profundidad de la grieta de la tensión, según lo indicado por Darby & Thorne (1996), pero adaptadas a este tipo de modelo de falla, como se muestra en la figura 2 (Rodríguez Ardila et al., 2006). Luego se realiza una búsqueda, barriando toda la gama de posibles ángulos de falla. Una vez que el factor de seguridad es menor a uno, el ángulo que corresponde a la cohesión mínima se selecciona como el ángulo de falla. Este mecanismo de falla se encuentra implementado en un software denominado *SOCAVA*, y el mismo puede descargarse libremente de la página Web del grupo de trabajo PHC-LaMM (www.fi.uba.ar/laboratorios/lmm).

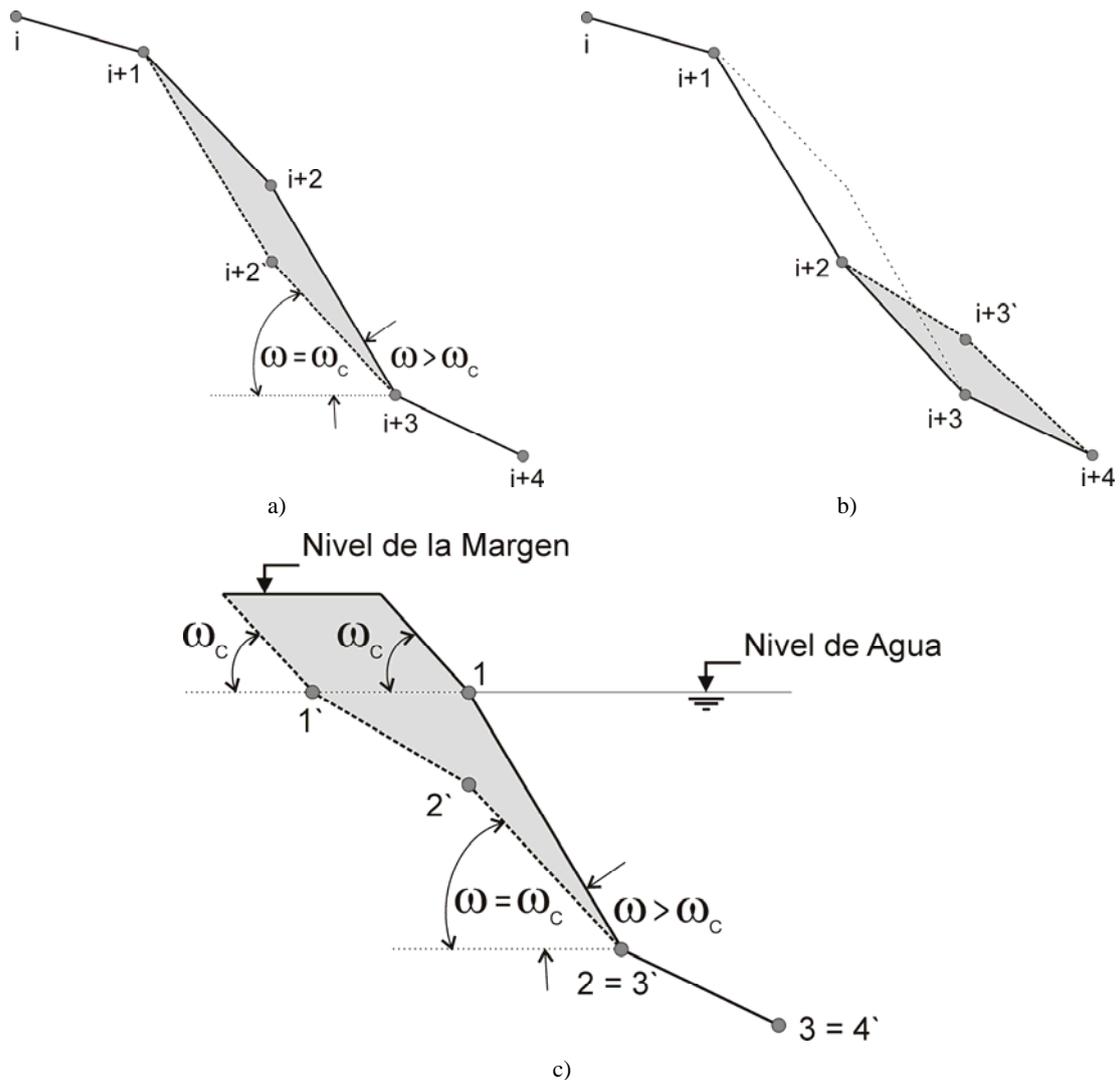
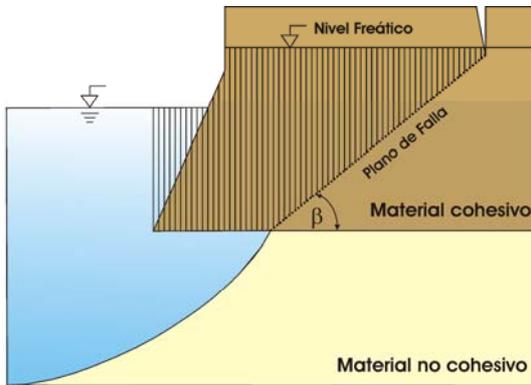
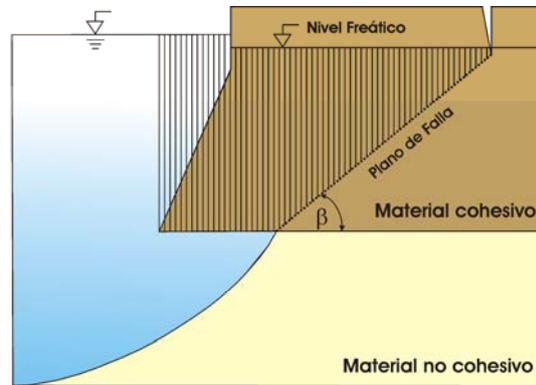


Figura 1.- Algoritmo de falla de margen no cohesiva

El tratamiento computacional del estrato cohesivo es relativamente simple: se utilizan cinco nodos por margen para definirlo, según lo mostrado en la figura 3 (nodos blancos). Cuando se produce una falla, el nodo inferior se mueve para coincidir con el nodo extremo del estrato no cohesivo (círculo negro), mientras que los nodos superiores se sitúan de forma de definir el ángulo de falla. La fracción gruesa del material fallado se considera que cae en el pie de la margen, y se la distribuye lateralmente según su ángulo de reposo (figura 4), según lo propuesto por Darby et al. (2002), mientras que la fracción fina se supone incorporada a la carga de lavado, y por lo tanto no se la tiene en cuenta. Al material fallado se lo trata en lo sucesivo como material no cohesivo de un diámetro diferente al asociado al sustrato original.

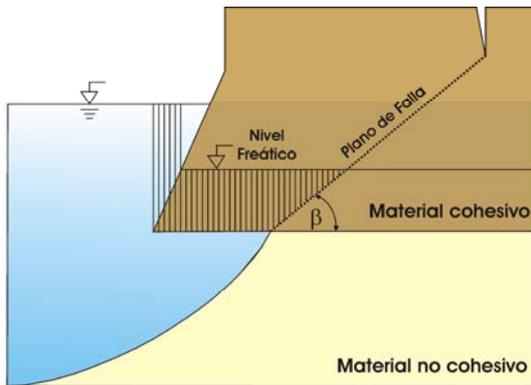


a.1) Superficie de agua debajo de la grieta de tensión

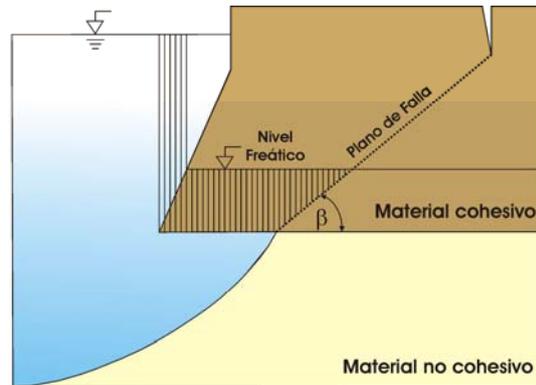


a.1) Superficie de agua sobre la grieta de tensión

a) Nivel Freático por sobre la grieta de tensión

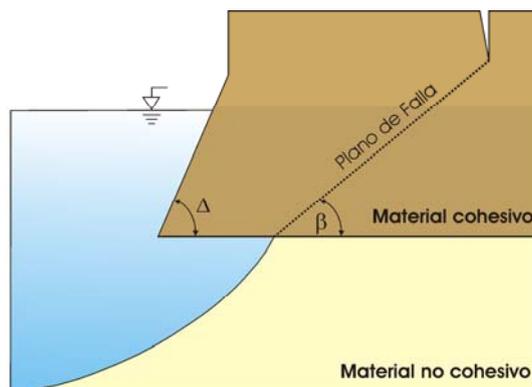


b.1) Superficie de agua debajo de la grieta de tensión



b.1) Superficie de agua sobre la grieta de tensión

b) Nivel Freático por debajo de la grieta de tensión



c) Ausencia de agua en el suelo

Figura 2.- Distintos casos de falla de margen

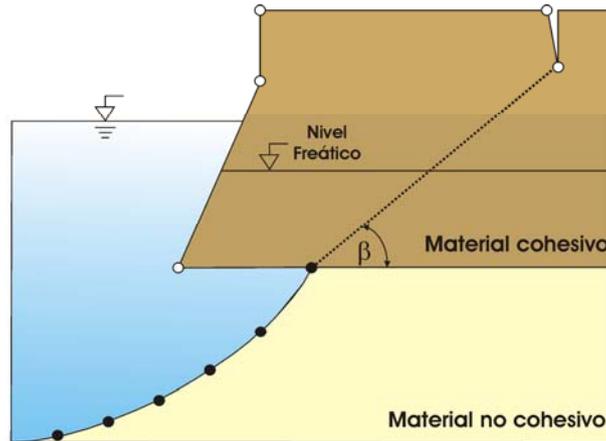


Figura 3.- Tratamiento computacional del estrato cohesivo

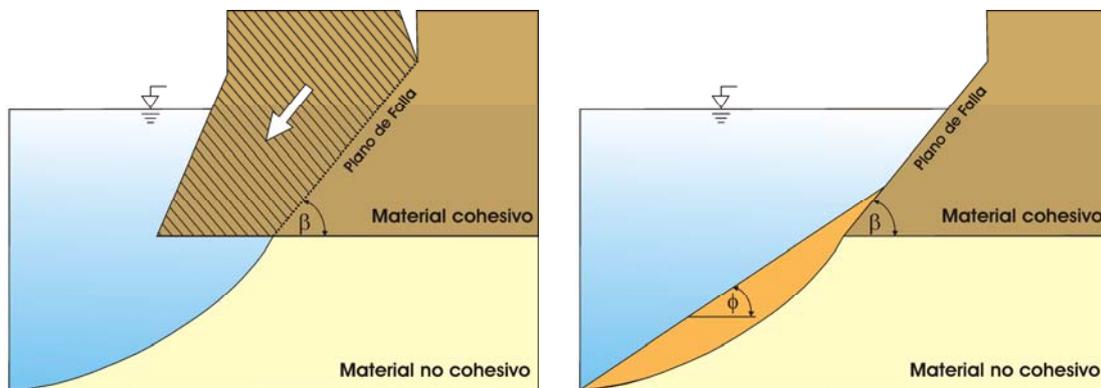


Figura 4.- Distribución del material fallado

VALIDACIÓN

Estrategia de la validación

La validación del modelo integrado propuesto se ha efectuado tratando de separar los efectos de los principales mecanismos de erosión, y comparando las predicciones del modelo para cada problema con datos experimentales existentes y/o resultados previos.

En primer lugar se consideró un canal recto con las márgenes no cohesivas, comprobándose que el modelo representa correctamente la erosión de márgenes en ausencia de un estrato cohesivo (Laciana & Menéndez, 2002 - Menéndez et al., 2003, 2005 y 2006).

En segundo lugar, se tomó un canal curvo de márgenes fijas, validándose el tratamiento para los efectos erosivos de la corriente secundaria (Menéndez et al., 2005 y 2006).

La tercera prueba de la validación consistió en comparar el ángulo de falla del estrato cohesivo según lo predicho por el actual modelo y el de Darby et al. (2000) (el software fue puesto a disposición gentilmente por los autores), para el caso particular en que el plano de falla pase por el pie del estrato (la única situación comparable entre los dos modelos). Como

altura del estrato se tomó 5.86 m, con una pendiente inicial prácticamente vertical de la margen (89°), a fin de garantizar condiciones inestables, y una profundidad de la grieta de tensión de 2 m. Los parámetros del suelo fueron los siguientes: cohesión = 14.9 kN/m^2 , ángulo de fricción = 29° y peso específico = 20.9 kN/m^3 . Se tomaron en cuenta dos profundidades del nivel freático y diversas profundidades de la superficie del agua. La tabla 1 muestra las comparaciones entre los resultados obtenidos por ambos modelos. Se observa que los ángulos de falla proporcionados por ambos son muy similares (tener en cuenta que se produce un error de truncamiento durante la búsqueda del ángulo de falla), por lo que la actual formulación se considera como validada.

Tabla 1.- Ángulos de falla para diferentes niveles freáticos y distintos niveles de superficie de agua

Experimento	1	2	3	4	5	6
Profundidad del nivel freático [m]	1.27	1.27	1.27	3.27	3.27	3.27
Profundidad del nivel de agua [m]	4.27	3.27	2.27	5.27	4.27	3.57
Ángulo de falla obtenido del Modelo de Darby [°]	59	59	59	59	59	59
Ángulo de falla obtenido del Presente Modelo [°]	57	56	55	58	59	58

ENSAYO NUMÉRICO

Se realizó un experimento numérico para un canal recto inicialmente muy inestable, de forma trapezoidal, con un ancho de solera de 40 m, una profundidad de 2.25 m y pendientes en las márgenes granulares de 20° . El estrato inferior no cohesivo tiene un espesor de 1.5 m, y su material está representado con un $d_{50} = 0.09$ milímetros. El estrato cohesivo (en ambas márgenes) tiene un espesor de 1 m y una cohesión de 15 kN/m^2 . El nivel freático se consideró igual en ambas márgenes, e igual a 2 m. Un esquema del canal de ensayo se puede ver en la figura 5.

Para discretizar la sección transversal se utilizaron 101 nodos, lo que da un paso espacial de 0.495 m. El paso temporal es de 0.5 segundos, para asegurar la estabilidad numérica.

En la figura 6 se muestra la evolución de la sección transversal para distintos instantes de tiempo (1 hora, 4 horas, 8 horas, 16 horas y 2 días). Como era de esperarse, se puede notar un notorio aplanamiento del fondo del lecho junto con un aumento de su nivel. La asimetría que se observa en la sección transversal para 1 hora de evolución se debe a errores de redondeo en los diferentes cálculos numéricos, que accionan a veces la falla de una margen con una diferencia de un paso de tiempo de cálculo respecto de la otra (en este caso en particular se ve como se distribuyó el material cohesivo fallado en la margen izquierda).

En las figuras 7 y 8 se muestra en detalle como opera el mecanismo de falla de márgenes implementado para el presente caso.

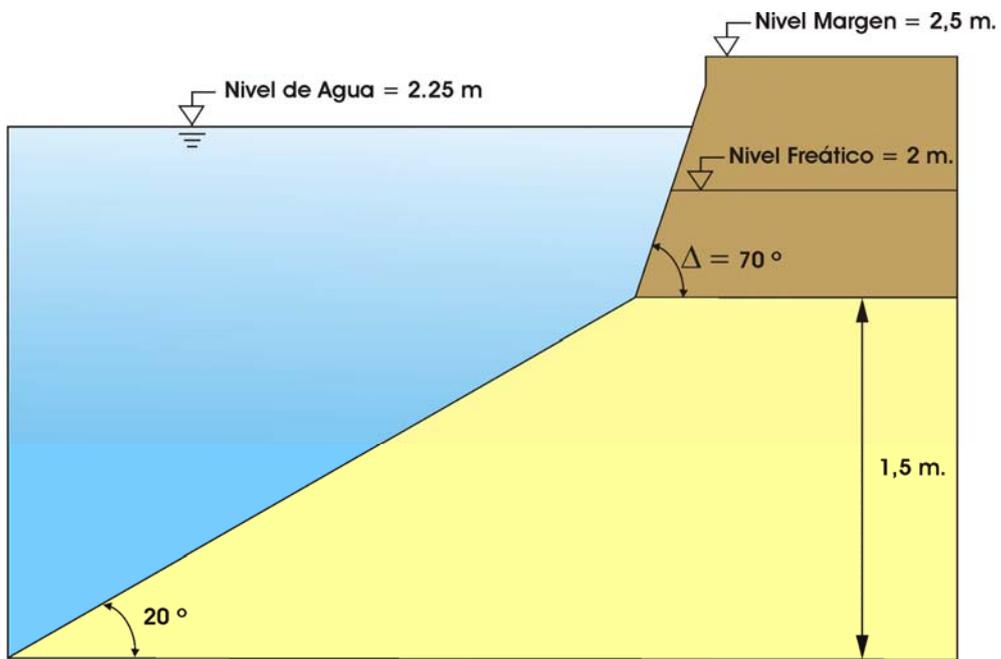


Figura 5.- Esquema del canal de ensayos numéricos.

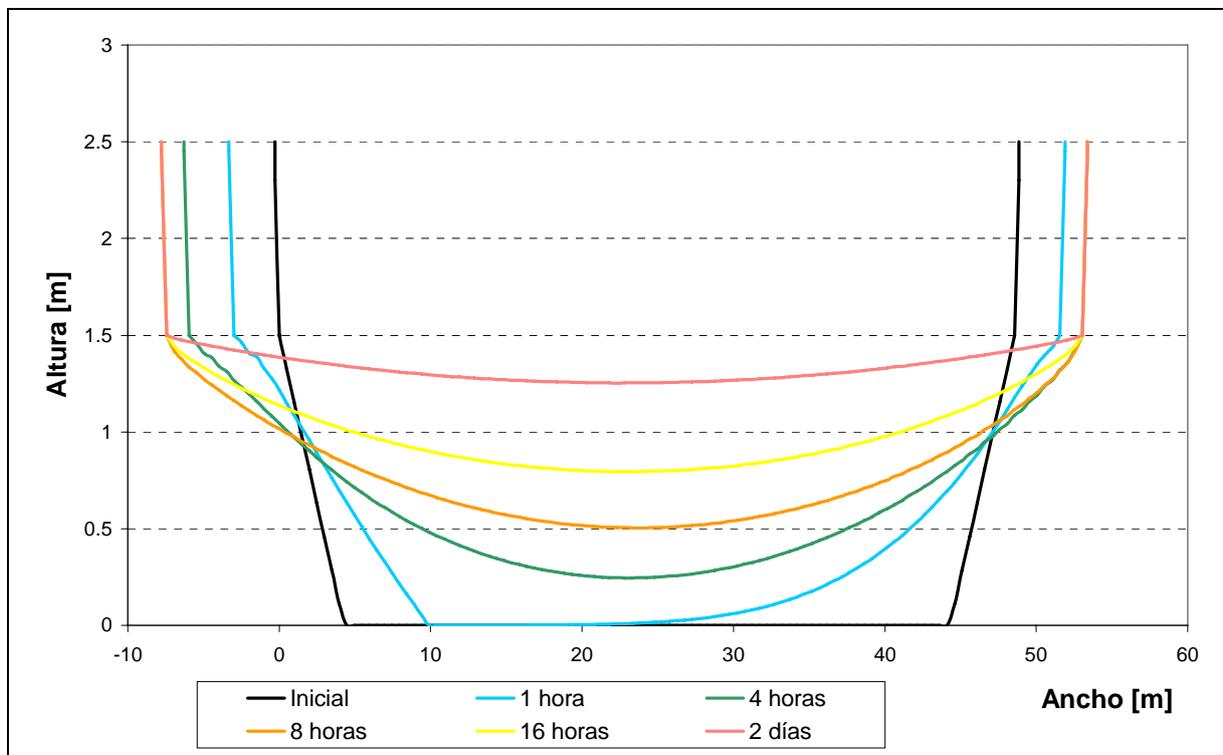


Figura 6.- Evolución de la sección transversal del canal para distintos tiempos.

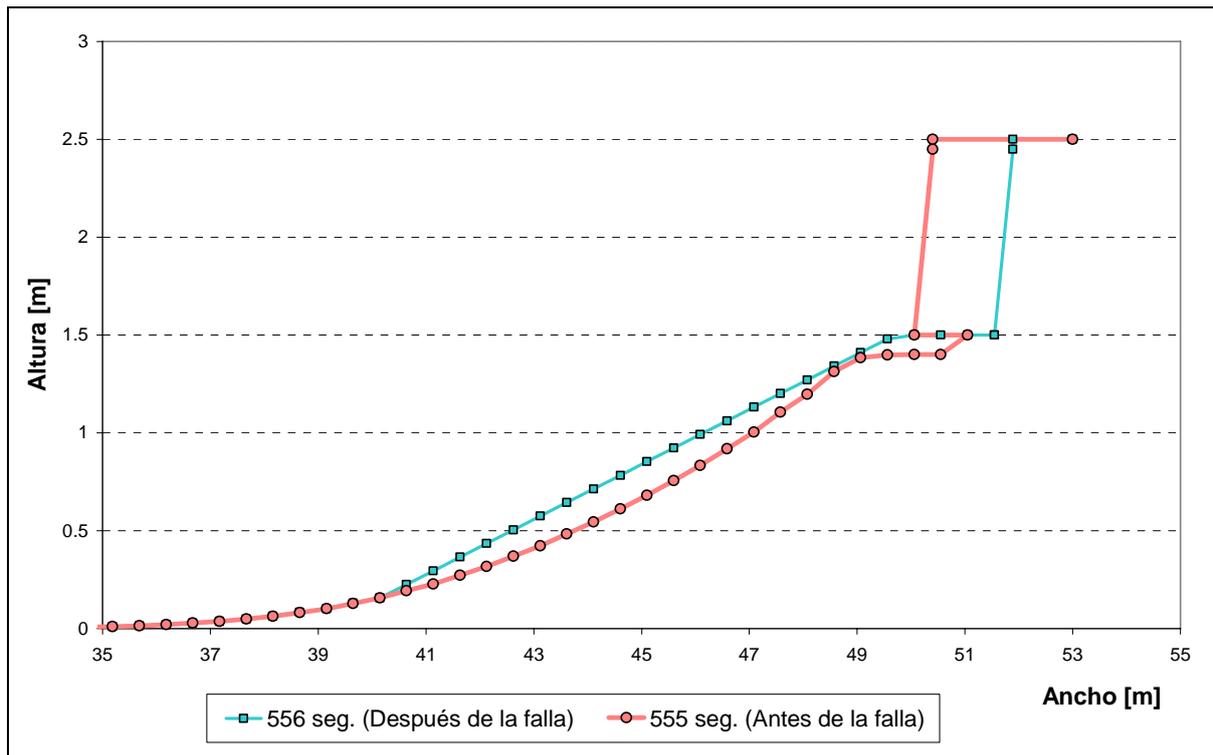


Figura 7.- Detalle del mecanismo de falla de márgenes del modelo.

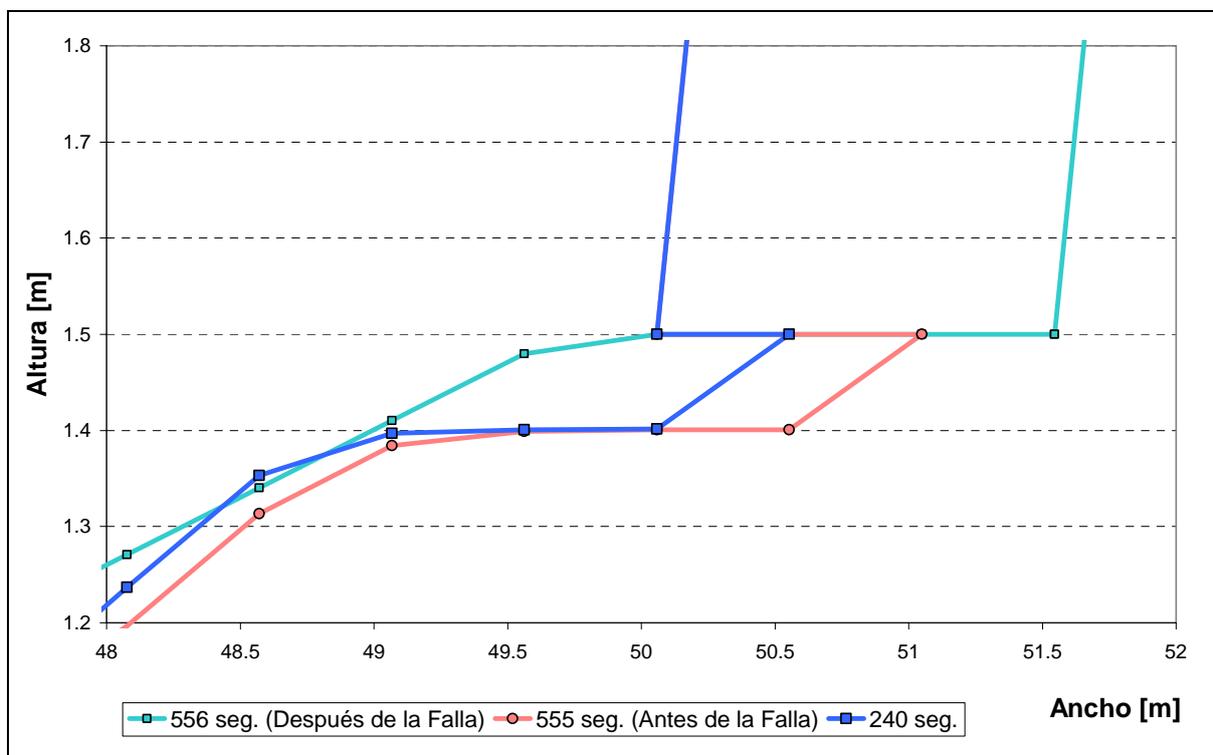


Figura 8.- Detalle del mecanismo de falla de márgenes del modelo.

CONCLUSIONES

El modelo integrado propuesto en el presente trabajo constituye una herramienta precisa y eficiente para simular la evolución morfológica de las secciones transversales de canales en situaciones prácticas. Presenta la novedad de tratar márgenes con un estrato cohesivo. El modelo está basado en una formulación con fuerte contenido físico (de primeros principios), pero preserva la simplicidad al considerar sólo los mecanismos más relevantes. Se sigue trabajando en la incorporación del material de falla.

Agradecimiento. Este estudio fue financiado a través de los subsidios PICT 12138 de la ANPCT e I010 de la UBA .

LISTA DE SÍMBOLOS

y : coordenada lateral
 ω : ángulo correspondiente a la pendiente lateral del canal
 μ_c : factor de fricción dinámica de Coulomb

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Darby, S.E. & Thorne, C.R.** (1996). "Development and Testing of Riverbank-Stability Analysis", *Jr. of Hydr. Eng.*, 122, 8, August, 443-454.
- Darby, S.E., Gessler, D. & Thorne, C.R.** (2000). "Computer Program for Stability Analysis of Steep, Cohesive Riverbanks", *Earth Surface Processes and Landforms*, 25, 175-190.
- Darby, S.E., Alabyan, A.M. & Van de Wiel, M.J.** (2002). "Numerical simulation of bank erosion and channel migration in meandering rivers" *Water Resources Research*, 38, 9.
- Kalkwijk, J.P.Th. & Booij, R.** (1986). "Adaptation of secondary flow in nearly-horizontal flow", *Jr. Hydr. Research*, 24, 1, 19-37.
- Kikkawa, H., Ikeda, S. & Kitagawa, A.** (1976) "Flow and Bed Topography in Curved Open Channels", *Journal of the Hydraulics Division*, 102, HY9, September, 1327-1343.
- Kovacs, A. & Parker, G.** (1994). "A new vectorial bedload formulation and its application to the time evolution of straight river channels", *J. Fluid Mech.*, 267, 153-183.
- Laciana, C.E., Menéndez, A.N.** (2002). "Modelación de la evolución de márgenes de material suelto.", Proc., XX Latin-American Congress on Hydraulics (CD-Rom), IAHR, La Habana, Cuba, 11 pages.
- Menéndez, A.N., Laciana, C.E., García, P.E.** (2003), "Una estrategia de modelación para problemas con erosión de márgenes", Primer Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos RIOS 2003, Buenos Aires, Argentina.

Menéndez, A.N., Laciana, C.E., García, P. (2005), “Generalización del modelo de Kovacs-Parker para incluir efectos de curvatura”, Segundo Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos RIOS 2005, Neuquén, Argentina.

Menéndez, A.N., Laciana, C.E., García, P.E., Rodríguez Ardila, J., Sfriso, A. (2006), “An integrated model for the evolution of channel morphology, including cohesive bank erosion”, River Flow 2006, Proceedings of the Third International Conference on Fluvial Hydraulics, Lisboa, Portugal.

Rodríguez Ardila, J., Sfriso, A., Menéndez, A.N. (2006). “Software para análisis de estabilidad de márgenes cohesivas”, III Congreso Iberoamericano sobre Control de la Erosión y los Sedimentos, IECA, Buenos Aires, Argentina.

Wark, J.B., Samuels, P.G. & Ervine, D.A. (1990). “A practical method of estimating velocity and discharge in a compound channel”, *River Flood Hydraulics*, W.R. White, ed., John Wiley & Sons, Inc., Chichester, UK, 163-172.