

DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN MODELO MORFODINÁMICO DE SIMULACIÓN DE EROSIÓN RETROGRADANTE

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

Universidad Nacional de Rosario

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

Introducción

La erosión retrogradante, asociada a la migración aguas arriba de cascadas no estabilizadas, puede causar un gran número de problemas económicos y ambientales, tales como pérdida de suelo, colapso de infraestructuras (puentes, acueductos, edificaciones, etc.), alteración de habitats acuáticos, captura de cursos de otras cuencas (coalescencia), etc.. El proceso de erosión retrogradante es complejo e involucra la acción morfodinámica combinada de erosión fluvial localizada al pie de la cascada y el mecanismo de colapso masivo por inestabilidad geotécnica.

En este trabajo se presenta la formulación, implementación computacional, calibración y validación de un modelo morfodinámico, que simula el proceso de erosión retrogradante de cascadas en suelos cohesivos, ubicadas en arroyos y ríos sujetos a crecidas de corta duración, denominado ERCAS-SC (**Erosión Retrogradante CAScadas-Suelos Cohesivos**). El modelo contempla el efecto morfodinámico combinado de la erosión efectiva del lecho al pie de la cascada, la socavación de la base por el vórtice de retroceso, la profundidad de la grieta de tracción, el contenido de agua en el suelo y el mecanismo de colapso masivo por inestabilidad geotécnica asociada a falla por ménsula. En el modelo se contempla la influencia de la cohesión y de la fricción en las fuerzas resistentes y el efecto desestabilizador inducido por el agua contenida en el suelo. El modelo fue calibrado y validado utilizando seis crecidas observadas en el A° Saladillo (Prov. de Santa Fe), para las cuales se contó con las migraciones aguas arriba que experimentó la cascada.

Descripción del modelo matemático

Evolución temporal de la erosión al pie de la cascada

La profundidad de erosión local de equilibrio, z_{se} (m), al pie de la cascada, respecto al nivel del lecho no perturbado, se calcula mediante (Veronese, 1937):

$$z_{se} = c_1 q^{c_2} H^{c_3} - h_2 \quad (1)$$

donde $c_1=1.9$, $c_2=0.54$ y $c_3=0.225$, q : caudal específico (m^2/s), H : diferencia entre la energía aguas arriba y aguas abajo del salto (m) y h_2 : profundidad de flujo normal aguas abajo (m). Durante una crecida, la erosión de equilibrio se alcanza generalmente si la permanencia de caudales es suficiente como para que la hoya de erosión entre en régimen. En lechos cohesivos consolidados y crecidas de corta duración, típicas de los arroyos del sur de Santa Fe, es improbable que se alcance tal erosión, es decir, la profundidad de erosión efectiva está limitada por la duración de cada caudal que conforma el hidrograma y es menor que la profundidad de erosión de equilibrio. Para determinar la evolución temporal de la erosión efectiva $z_s(t)$, al pie de la cascada, se propone la siguiente ecuación:

$$z_s(t) = z_{se} \left(1 - e^{-\alpha t_*^\beta} \right) \quad , \quad t_* = \frac{t U_1}{\delta Z_0} \quad (2a),(2b)$$

donde $\alpha=0.025$, $\beta=0.33$ y $\delta=0.25$ son coeficientes adimensionales, ajustados con observaciones de la cascada del A° Saladillo; t_* : tiempo adimensional, siendo t : tiempo (s), U_1 : velocidad media aguas arriba del salto (m/s), Z_0 : altura del salto (m), ver Figura 1.

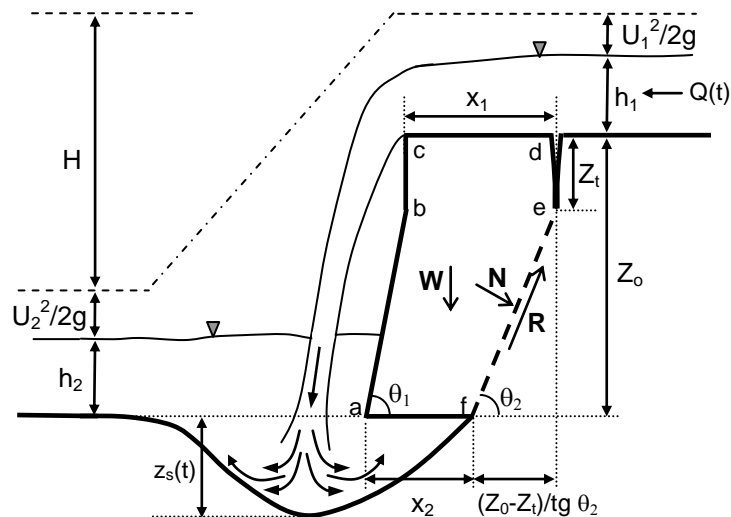


Figura 1. Representación esquemática de variables de flujo, geometría del perfil y fuerzas intervinientes en el proceso morfoodinámico de erosión retrogradante del modelo ERCAS-SC.

La evolución temporal de la erosión efectiva al pie de la cascada $z_s(t)$, durante el tránsito de un hidrograma $Q(t)$, se determina considerando condición de flujo cuasi-permanente, es decir, el caudal se mantiene constante en cada Δt de discretización del mismo.

En primer lugar, para cada uno de los caudales del hidrograma discretizado: $Q(n\Delta t)$, $n=1,2,3$, etc., se determinan las variables hidráulicas y los correspondientes valores de z_{se} (ec. (1)). Luego se aplican las ecuaciones (2a) y (2b) en forma recursiva. Para el primer caudal del hidrograma ($t=1\Delta t$):

$$z_s^n = z_{se}^n \left\{ 1 - EXP \left[-\alpha \left(\frac{U_I^n \Delta t}{\delta Z_0} \right)^\beta \right] \right\} \quad (3)$$

Para los caudales sucesivos ($t=2\Delta t$, $3\Delta t$, etc.), utilizando (2a) y (2b) y considerando la erosión efectiva obtenida en el tiempo anterior, se calcula un tiempo de referencia t_r , cuya función es determinar el tiempo que le insume al flujo, con las nuevas condiciones hidráulicas en $t=(n+1)\Delta t$, alcanzar una erosión efectiva igual a la calculada en el tiempo anterior $t=n\Delta t$. El t_r y la profundidad de erosión efectiva en $t=(n+1)\Delta t$ se determinan mediante:

$$t_r = \frac{\delta Z_0}{U_I^{n+1}} \left[-\frac{1}{\alpha} \ln \left(1 - \frac{z_s^n}{z_{se}^{n+1}} \right) \right]^{1/\beta}, \quad z_s^{n+1} = z_{se}^{n+1} \left\{ 1 - EXP \left[-\alpha \left(\frac{U_I^{n+1} (t_r + \Delta t)}{\delta Z_0} \right)^\beta \right] \right\} \quad (4),(5)$$

En general, se observa que la profundidad de erosión efectiva durante la crecida, va aumentando en el tiempo hasta alcanzar en forma asintótica un valor máximo, inmediatamente después que transita el pico del hidrograma, y se detiene cuando su valor es igual a la profundidad de erosión de equilibrio correspondiente a un cierto caudal de la rama descendente del hidrograma. Tal evolución de la profundidad de erosión efectiva es posible solo si la cascada se mantiene fija en su posición original. En cambio, si la profundidad de erosión efectiva, en un tiempo genérico $t=n\Delta t$, es de tal magnitud que induce el colapso masivo (que describiremos a continuación), se asume que parte del bloque de suelo colapsado llena completamente la hoya de erosión al pie y otra parte se vuelca aguas abajo de la hoya. En ese caso, en el modelo se anula el tiempo de referencia en $t=(n+1)\Delta t$ y se recomienza el cálculo desde allí, hasta que eventualmente se produzca un nuevo colapso masivo, y así sucesivamente.

Evolución temporal del colapso masivo de la cascada

La estabilidad geotécnica se determina mediante un modelo de colapso masivo por ménsula (Basile, 2005; Patsinghasanee et al., 2016), considerando los efectos de cohesión y fricción del suelo. La geometría del perfil de la cascada considera la profundidad de la grieta de tracción Z_t ; la erosión efectiva del lecho al pie $z_s(t)$, la socavación de la base del bloque x_2 , la erosión retrogradante x_1 y los ángulos θ_1 y θ_2 , como se esquematiza en la Figura 1. Las fuerzas actuantes sobre el bloque de suelo que puede colapsar son: el peso del bloque W , la fuerza resistente actuante a lo largo de la superficie de falla R y la fuerza normal a la superficie de falla N . La estabilidad geotécnica se modela definiendo un factor de seguridad F_s , que se expresa mediante la relación entre la fuerza resistente R y la fuerza desestabilizadora D , actuantes sobre el bloque: $F_s=R/D$. Si $F_s>1$ el bloque es estable y si $F_s<1$ es inestable y colapsa.

El factor de seguridad generalizado (Basile, 2005) puede expresarse como:

$$F_s = \frac{c Z_0 (1 - z_{ta})}{\gamma_{g^*} V \text{sen}^2 \theta_2} + \frac{\gamma_{f^*} \text{tg } \phi}{\gamma_{g^*} \text{tg } \theta_2} \quad (6)$$

donde c : cohesión (N/m^2), z_{ta} : profundidad adimensional de la grieta de tracción, $z_{ta}=Z_t/Z_0$, la cual varía entre 0 y 0.5 y puede ser sujeta a calibración; θ_2 : ángulo de la superficie de falla (grados), ϕ : ángulo de fricción interna del suelo (grados). V : volumen por unidad de ancho (m^3/m) y los pesos específicos globales γ_{g^*} y γ_{f^*} , se expresan como:

$$\gamma_{g^*} = g [\rho_s (1 - p) + \eta \rho_w p] \quad , \quad \gamma_{f^*} = g (\rho_s - \eta \rho_w) (1 - p)$$

donde p : porosidad (-), g : aceleración de la gravedad (m/s^2), ρ_w : densidad del agua (kg/m^3), ρ_s : densidad del suelo (kg/m^3) y el coeficiente η varía entre 0 (suelo seco) y 1 (suelo saturado).

En cada tiempo $t=n\Delta t$, $n=1,2,\dots,M$; se determina la geometría del bloque susceptible de colapsar, computándose las longitudes x_2 (socavación de la base) y x_1 (erosión retrogradante potencial), y el correspondiente volumen por unidad de ancho V , mediante:

$$x_2 = \xi z_s(n\Delta t) \quad (7)$$

$$x_1 = x_2 + \frac{Z_0 - Z_t}{\text{tg } \theta_2} - \frac{Z_0 - Z_t}{\text{tg } \theta_1} \quad (8)$$

$$V = x_1 Z_t + \left(x_2 + \frac{Z_0 - Z_t}{\text{tg } \theta_2} \right) (Z_0 - Z_t) - \frac{1}{2} \frac{(Z_0 - Z_t)^2}{\text{tg } \theta_2} - \frac{1}{2} \frac{(Z_0 - Z_t)^2}{\text{tg } \theta_1} \quad (9)$$

El vórtice de retroceso (antihorario), que se desarrolla en la hoya de erosión, tiene un gran poder erosivo y produce el ensanchamiento de la hoya por debajo del pié de la cascada. En el modelo, la socavación de la base de la cascada, indicada como x_2 , se relaciona con la erosión efectiva $z_s(t)$ mediante un parámetro de amplificación \square . En principio, el mismo es mayor que 1 y puede ser considerado como un parámetro de calibración. De esta manera, mediante (6) se calcula la evolución temporal del factor de seguridad, que determina la estabilidad geotécnica al colapso masivo. Durante el tránsito del hidrograma $Q(t)$, a medida que se incrementa la profundidad de erosión efectiva al pié de la cascada $z_s(t)$, se van incrementando los valores de x_2 (esta socavación va dejando al bloque superior sin soporte en la base) y de x_1 ; por lo tanto, se va incrementando el volumen del bloque. El factor de seguridad va disminuyendo progresivamente, hasta que para $F_s < 1$ el bloque colapsa, produciendo la erosión retrogradante efectiva x_1 . Como explicado anteriormente, el bloque que colapsa llena la hoya de erosión localizada al pié de la cascada y recomienza el proceso de erosión al pié, iniciando nuevamente el proceso que conducirá a otro episodio de colapso masivo, y la consiguiente migración de la cascada aguas arriba.

Aplicación del modelo

El modelo fue aplicado para simular la migración aguas arriba que experimenta la cascada del A° Saladillo, ubicada en la zona del Parque Regional Sur de Rosario, la cual se encuentra actualmente 190 m aguas abajo del puente Molino Blanco de calle Ayacucho (Figura 2). Se utilizaron datos geotécnicos del cauce y topográficos (DHIS, 1993) e información de relevamientos topobatimétricos realizados en el año 2015 por el MASPyMA (Santa Fe), los cuales se complementaron con visitas periódicas al lugar entre los años 2015 y 2017.

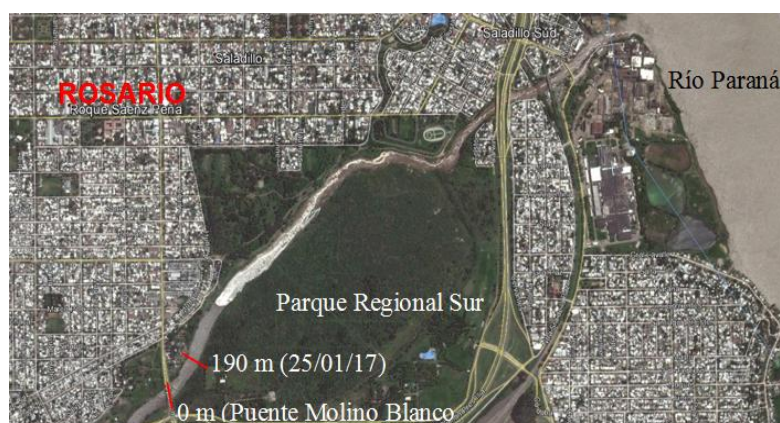


Figura 2. Ubicación Cascada del Arroyo Saladillo, actualmente 190 m aguas abajo del puente Molino Blanco.

Se seleccionaron 6 crecidas del arroyo, 3 se utilizaron para la calibración y las 3 restantes para la validación. Los hidrogramas se determinaron convirtiendo los datos de niveles hidrométricos, registrados en la RP18 (Base de datos Hidrológica Integrada, SSRH de la Nación), en caudales a partir de la construcción de una curva h-Q en dicha sección. Sucesivamente, los hidrogramas se propagaron hasta la sección del arroyo en correspondencia del puente Molino Blanco, donde se les adicionaron los caudales generados por el sector de la cuenca aguas abajo de la RP18. Además, se utilizaron imágenes satelitales cronológicas de Google Earth® para determinar los desplazamientos de la cascada en correspondencia con los eventos hidrológicos seleccionados.

En la Tabla 1 se resumen las características de las 6 crecidas seleccionadas, especificando el período, el caudal pico del hidrograma Q_p , el tiempo de base t_b , el volumen del hidrograma V_h y las longitudes observadas de la migración de la cascada L. Este último dato se presenta agregado temporalmente, para las 3 crecidas de calibración y para las 3 de validación, ya que no se contaron con los datos específicos entre los períodos de cada crecida.

Tabla 1. Resumen de características de las crecidas y desplazamientos observados

Crecida	Período	Q_p (m ³ /s)	t_b (hs)	V_h (hm ³)	L (m)
C1 (calib.)	02/03/15 – 14/03/15	423.3	288	220.7	115
C2 (calib.)	02/05/15 – 12/05/15	298.0	240	166.0	
C3 (calib.)	08/08/15 – 16/08/15	505.5	192	149.8	
C4 (valid.)	24/12/16 – 01/01/17	686.9	216	273.2	394
C5 (valid.)	01/01/17 – 12/01/17	665.7	264	234.3	
C6 (valid.)	12/01/17 – 25/01/17	655.2	336	265.2	

Para representar adecuadamente la evolución temporal del proceso de erosión retrogradante se adoptó $\Delta t=0.5$ hs, con el cual se discretizaron los hidrogramas y se determinaron las variables hidráulicas, representando condiciones de flujo cuasi-permanente, mediante la integración de la ecuación de flujo permanente gradualmente variado 1D para cada caudal.

Se especificó un coeficiente de rugosidad de Manning igual a $0.03 \text{ s/m}^{1/3}$, y pendiente del cauce, aguas arriba y aguas abajo del salto, iguales a 0.0005 y 0.0004 respectivamente. Se consideró sección rectangular con ancho $B=60 \text{ m}$. Aguas arriba del salto se impuso como condición de borde la profundidad crítica en el frente de la cascada. Mientras que, aguas abajo del salto, se especificó el nivel asociado a la profundidad normal en el extremo aguas abajo del tramo inferior del arroyo. Para la calibración se especificaron: $Z_0=7.5 \text{ m}$, $c_1=1.9$, $c_2=0.54$ y $c_3=0.225$, $\alpha=0.025$, $\beta=0.33$, $\delta=0.25$, $c=32360 \text{ N/m}^2$, $\phi=22^\circ$, $\rho_s=2800 \text{ kg/m}^3$, $\rho_w=1000 \text{ kg/m}^3$, $g=9.81 \text{ m/s}^2$, $p=0.4$, $\eta=1$, $\theta_1=80^\circ$, $\theta_2=70^\circ$. Se ajustaron los valores de profundidad adimensional de grieta de tracción z_{ta} y del parámetro de amplificación ξ , para reproducir con las tres crecidas C1, C2 y C3, el valor del desplazamiento de la cascada observado. Los valores ajustados de dichos parámetros, en el proceso de calibración, fueron: $z_{ta}=0.32$ y $\xi=1.15$. Para la validación; todos los coeficientes y parámetros se mantuvieron invariados respecto a los obtenidos en la calibración.

Análisis de resultados

En la Tabla 2 se resumen los resultados obtenidos en la calibración y validación, donde, para cada crecida, se consignan: caudal pico específico q_p , volumen del hidrograma V_h , diferencia de energía asociada al caudal pico H_p , profundidad no perturbada aguas abajo del salto para el caudal pico h_{2p} , profundidad de erosión de equilibrio $z_{se p}$, profundidad de erosión efectiva máxima $z_s(t)_{m\acute{a}x}$, desplazamiento de la cascada calculado $L_{i,cal.}$, desplazamiento de la cascada calculado agregado temporalmente $\sum L_{i,cal.}$, desplazamiento de la cascada observado agregado temporalmente $L_{obs.}$ y error relativo Er entre valores calculados y observados del desplazamiento.

Tabla 2. Resumen de resultados de la calibración y validación del modelo morfodinámico.

Crecida	q_p (m^2/s)	V_h (hm^3)	H_p (m)	h_{2p} (m)	$z_{se p}$ (m)	$z_s(t)_{m\acute{a}x}$ (m)	$L_{i,cal.}$ (m)	$\sum L_{i, cal.}$ (m)	$L_{obs.}$ (m)	Er (%)
C1 (calib.)	7.06	220.7	7.25	4.11	4.40	3.19	51.6	129.2	115	12
C2 (calib.)	4.97	166.0	7.30	3.34	3.73	2.85	28.9			
C3 (calib.)	8.43	149.8	7.23	4.58	4.79	3.38	48.7			
C4 (valid.)	11.45	273.2	7.17	5.51	5.54	4.26	156.4	360.2	394	-9
C5 (valid.)	11.10	234.3	7.18	5.40	5.45	3.93	98.1			
C6 (valid.)	10.92	265.2	7.18	5.35	5.41	4.04	105.7			

Los errores relativos, entre valores calculados y observados, del desplazamiento agregado para el período de las tres crecidas, son iguales a 12% para la calibración y -9% para la validación. En la Figura 3 se presenta la evolución temporal de las profundidades de erosión de equilibrio y erosión efectiva para cascada fija, conjuntamente con el hidrograma y la profundidad de erosión efectiva para cascada móvil, correspondiente a la simulación de

la crecida: a) C1 y b) C5. En ambos casos se observa que la profundidad de erosión efectiva para cascada fija, va aumentando en el tiempo hasta alcanzar en forma asintótica un valor máximo, inmediatamente después que transita el pico del hidrograma y se detiene cuando su valor es igual a la profundidad de erosión de equilibrio correspondiente a un caudal de la rama descendente del hidrograma. Se observa que, el inicio del proceso de erosión retrogradante se da para un caudal de la rama ascendente del hidrograma de $260 \text{ m}^3/\text{s}$ (C1) y de $320 \text{ m}^3/\text{s}$ (C5), a partir del cual la erosión efectiva asociada a cascada móvil comienza un ciclo de oscilaciones, que se verifican con cada episodio de colapso. Se nota un incremento en el tiempo del número de colapsos para los caudales de la zona del pico del hidrograma, respecto a los que se verifican para caudales intermedios de las ramas de ascenso y descenso del hidrograma. Resultados similares se observan para las otras crecidas simuladas. En la Figura 4 se presenta la evolución temporal del desplazamiento aguas arriba $L(t)=\sum x_1(t)$ de la cascada, correspondiente a la simulación de la crecida: a) C1 y b) C5.

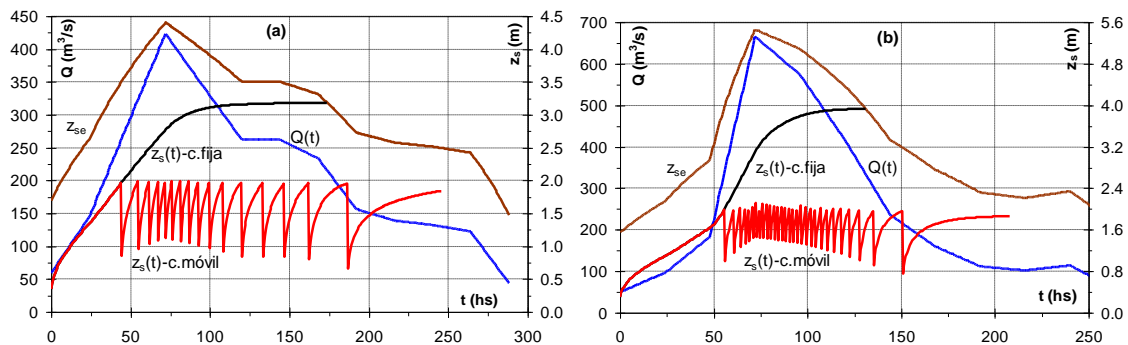
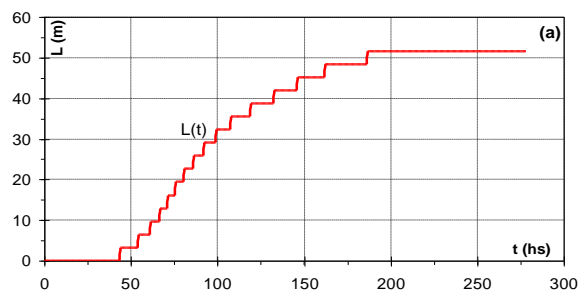


Figura 3. Evolución $Q(t)$, z_{se} , $z_s(t)$ cascada fija y $z_s(t)$ cascada móvil, para: (a) Crecida C1, (b) Crecida C5.



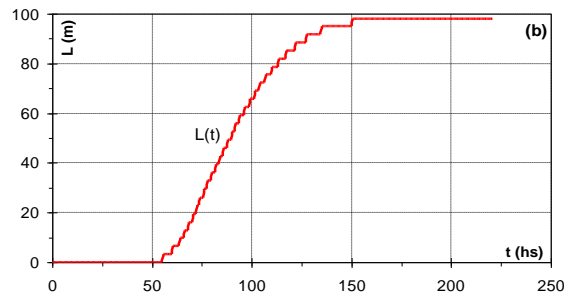


Figura 4. Evolución de L(t), para: (a) Crecida C1, (b) Crecida C5.

Conclusiones

El modelo morfodinámico propuesto simula satisfactoriamente el proceso de erosión retrogradante de cascadas en suelos cohesivos. El modelo fue aplicado a la cascada del Arroyo Saladillo, obteniéndose errores relativos, entre valores calculados y observados del desplazamiento aguas arriba, agregado para el período de las tres crecidas utilizadas en la calibración y las tres crecidas de validación, iguales a 12% y -9% respectivamente. La erosión retrogradante se inicia con caudales del arroyo en el rango de $260 \text{ m}^3/\text{s}$ - $320 \text{ m}^3/\text{s}$.

Agradecimiento. Los autores agradecen a la UNR por el apoyo mediante los PID ING514 e ING509.

Bibliografía

1. BASILE, PA. (2005). Modelación de la Erosión de Márgenes por Mecanismo de Colapso Masivo Asociado a Falla Plana. XX Congreso Nacional del Agua, Mendoza, Argentina.
2. DHIS (1993). Proyecto Ejecutivo Tramo I Arroyo Saladillo. Informes de Avance y Final. Convenio entre Consejo Federal de Inversiones y FCEIA, UNR.
3. PATSINGHASANEE, S., KIMURA, I. and SHIMIZU, Y. (2016). Numerical simulation of a cantilever failure with the effect of slump blocks for cohesive riverbanks. J. of Japan Soc. of Civil Engineers, 72(4), 493-498.
4. VERONESE, A. (1937). Erosioni di Fondo a Valle di uno Scarico. Annali dei Lavori Pubblici. 75 (9), 717-726.

APLICACIÓN EN INGENIERÍA FORENSE DE LA MODELACIÓN DE IMPACTOS DE VEHÍCULOS AUTOMOTORES PARA LA RECONSTRUCCIÓN DE SINIESTROS VIALES

Bersano C; Simon R; Medina M.

Laboratorio Ingeniería Mecánica Forense. Escuela de Posgrado y Educación Continua.

Facultad de Ciencias Exactas Ingeniería y Agrimensura.

Universidad Nacional de Rosario.

E mail ingcb45@gmail.com

El objetivo del presente trabajo es desarrollar las bases para la formalización de un modelo de reconstrucción de impactos entre vehículos automotores que permita obtener los parámetros del impacto, siendo quizás lo más importante, las velocidades de los rodados intervinientes al momento del impacto. Dichas velocidades, junto con sus correspondientes incertidumbres, deberán ser utilizables de forma confiable a partir de los datos que usualmente se cuentan en la práctica con el fin de mejorar la calidad de los dictámenes técnicos-periciales. El estudio del impacto de cuerpos se remonta al siglo XIX, con los estudios sobre la mecánica clásica de contacto realizados por Heinrich Hertz, en 1882. A partir de la década del 70 del siglo XX, la evolución de la ingeniería forense trajo aparejado que se desarrollaran diversos modelos teóricos siguiendo dos líneas claramente definidas. La primera sobre la base del estudio del coeficiente de restitución y la segunda sobre estudios de deformaciones basados en los resultados de choques de barrera. Estas líneas de investigación no llegan a resolver por sí mismas todos los aspectos de un choque o impacto, al obviar la incertidumbre inherente a determinaciones o estimaciones. Por ello se analiza la cinemática y la dinámica de una colisión general y se estudia en forma integral el proceso de impacto y post-impacto, incluyendo su tipificación y diversas variantes posibles. Este análisis es realizado desde el punto de vista físico y también desde el aspecto forense, ya que no debe perderse de vista que el objetivo es *la reconstrucción de un siniestro que ya sucedió*. De esta forma, se logra conformar un panorama de cuáles variables y coeficientes pueden ser considerados como determinísticos y cuáles como probabilísticos, de modo de poder utilizar principios de modelación estocástica para mejorar la calidad de los resultados finales. Además se generan pautas necesarias para que durante el trabajo de campo, o sea la recolección de rastros que es el primer paso de una reconstrucción forense, estos