



## EVALUACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE EROSIÓN DE EQUILIBRIO AGUAS ABAJO DE CAÍDAS HIDRÁULICAS EN LECHOS COHESIVOS DE LLANURA

**Gerardo A. Riccardi<sup>1,2,3</sup> y Pedro A. Basile<sup>1,2</sup>**

1 Departamento de Hidráulica – Escuela de Ingeniería Civil (FCEIA – Universidad Nacional de Rosario).

2 Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales (FCEIA – Universidad Nacional de Rosario)

3 Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario.

Riobamba 245 bis. (2000) Rosario – Santa Fe - Argentina- Tel: + 54 341 4808541

E-mail: riccardi@fceia.unr.edu.ar

### RESUMEN

Se presenta la evaluación de una serie de formulaciones de cálculo de erosión local aguas abajo de caídas hidráulicas en dos casos de aplicación sobre lechos cohesivos y su comparación con las profundidades de fosas de erosión observadas. Las formulaciones consideradas para la comparación son del tipo simplificadas excluyendo al diámetro del material que constituye el lecho como variable representativa y en algunos casos no reproduciendo las condiciones de modelo y/o prototipo para el cual fueron desarrolladas. Un primer caso de estudio corresponde al proceso erosivo que dio lugar a la fosa de erosión aguas abajo del vertedero, sin platea de disipación de energía, para control de niveles en una microcentral hidroeléctrica ubicada sobre el río Carcarañá, en la ciudad homónima (provincia de Santa Fe) y el segundo caso corresponde al proceso erosivo localizado aguas abajo de la cascada del arroyo Saladillo (Rosario, provincia de Santa Fe), la cual no tiene obra de protección. Los resultados determinados con las formulaciones de Veronese (1937) y Lopardo y Sly (1992) fueron los que mejor aproximaron a las profundidades de erosión observadas en ambos casos de estudio.

### ABSTRACT

The evaluation of a series of equations of local scour downstream of hydraulic drops structures is presented. The formulations have been applied in two cases of hydraulic drops in cohesive bed rivers and were compared with observed scour hole. The formulations considered for comparison are of the simplified type excluding the diameter of the bed constituting material as a representative variable and in some cases not reproducing the model and / or prototype conditions for which they were developed. A first case of study corresponds to the erosive process downstream of a spillway for level control without energy dissipator of a micro hydroelectric plant located in the Carcarañá river, at the homonymous city (Santa Fe province). The second case corresponds to the erosive process located downstream of the Saladillo stream waterfall (Rosario, Santa Fe province), without protection structure. The results have determined that Veronese (1937) and Lopardo and Sly (1992) formulations were ones that best approximated to the scour depths observed in both study cases.

## INTRODUCCIÓN

La evaluación de la acción erosiva tanto en caídas hidráulica naturales sin protección y al pie de obras de descarga en cursos de agua sobre lechos cohesivos en zonas de llanura resulta de particular interés para investigadores de la disciplina y para ingenieros proyectistas que abordan el diseño de obras de control y protección. Desde hace más de 80 años, experimentos en modelos físicos han dado lugar a formulaciones basadas en correlaciones empíricas en flujos de chorros bidimensionales con descarga libre en Schoklitsch (1932), Veronese (1937), Jaeger (1939), Eggenberger (1943), Hartung (1959), Damle et al. (1966), Mason y Arumugan (1985) y descarga ahogada Laursen (1952), Cartens (1966), Breusers (1967), Rajaratnam (1981), Ramirez et al. (1990), Bormann y Julien (1991), entre otros, reportan formulaciones de equilibrio basadas en conceptos de difusión de chorro y estabilidad de partículas en fosas aguas abajo de estructuras de control de caída de flujo. En nuestro país Chividini et al. (1983), Lopardo y Sly, (1992), Marmonti et al., (2014) han abordado la evaluación de la socavación máxima aguas abajo de aliviaderos en salto esquí, en tanto que Lopardo et al. (2003) proponen una metodología no convencional de estimación de erosión aguas abajo de un disipador a resalto con insuficiente nivel de restitución.

Diversos autores coinciden en que las formulaciones de socavación toman la fórmula general (Figura 1):

$$S = K q^a U_e^b H^c / g^d d_s^e \quad (1a)$$

$$D_s = S - Y_d \quad (1b)$$

donde  $S$  es la profundidad de erosión medida desde el tirante de restitución  $Y_d$ ;  $q$  caudal específico;  $U_e$  velocidad entrante del chorro;  $H$  es la diferencia entre los niveles de energía antes y después de la caída;  $g$  aceleración de la gravedad y  $d_s$  diámetro del sedimento y  $K$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$  son constantes de cada formulación;  $D_s$  es la profundidad de la fosa medida desde el fondo aguas abajo sin erosión.

Ramirez et al. (1990) tras una comparación unificada de las fórmulas de socavación, propone una clasificación racional en 3 grupos de las formulaciones empíricas expresadas en forma general por ec.(1a): (I) no dimensionalmente homogéneas y el diámetro de la partícula interviene como parámetro; (II) dimensionalmente homogéneas y el diámetro interviene como parámetro y (III) dimensionalmente homogéneas y el diámetro no interviene como parámetro, constituyendo relaciones límites en el sentido de Veronese (1937).

En este trabajo para la evaluación del comportamiento en lechos de suelos cohesivos se han elegido arbitrariamente formulaciones simplificadas en las cuales no interviene el diámetro:

$$S = 1.90 q^{0.54} H^{0.225} \text{ Veronese (1937)} \quad (2)$$

$$S = 1.19 q^{0.51} H^{0.235} \text{ Wu (1973)} \quad (3)$$

$$S = 1.41 q^{0.50} H^{0.25} \text{ Chividini et al (1983)} \quad (4)$$

$$S = 1.57 q^{0.50} H^{0.25} \text{ Ramirez et al. (1990)} \quad (5)$$

También fue testada la formulación de Lopardo y Sly (1992) que contempla un coeficiente de seguridad del 30% sobre la ec.(4).

La formulación de Veronese (1937) es la más antigua y es considerada del grupo (I) por Ramirez et al (1990) siendo también tomada por HEC-23 (FWA, 2009) para la estimación de la erosión del lecho al pie de una estructura de caída vertical. Ramirez et al. (1990) aclara que dicha fórmula es semejante a las más modernas y solo la omisión de la mecánica del fenómeno lleva a lo no homogéneo. La formulación de Wu (1973) se dedujo a partir de datos de prototipo y la de Chividini et al. (1983) con información de modelos y prototipo. La formulación de Ramirez et al. (1990) es considerada una relación teórica límite (cuando el diámetro de las partículas no tiene influencia importante sobre el fenómeno) y es deducida a partir de la configuración base de la caída libre de un vertedero y bajo el supuesto que la trayectoria correspondiente del chorro es parabólica y en conjunción con la teoría de chorros turbulentos sumergidos. Las 3 últimas formulaciones son consideradas del tipo (III).

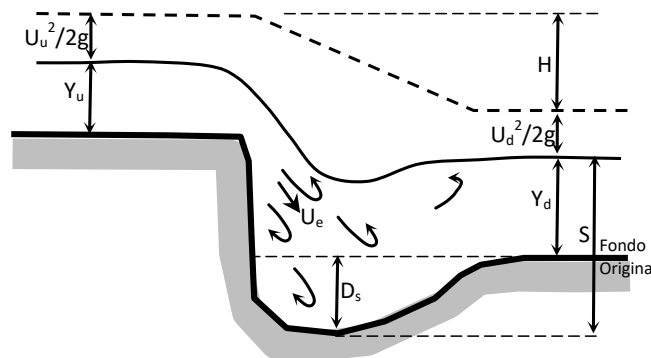


Figura 1.- Fosa de erosión aguas abajo de caída hidráulica

## OBJETIVOS

El objetivo del trabajo fue contrastar las formulaciones seleccionadas donde no interviene el diámetro del sedimento, para la determinación de profundidades de erosión de equilibrio versus fosas de erosión observadas, en dos caídas hidráulicas situadas en cursos de agua con lechos cohesivos en zona de llanura, en el sur de la provincia de Santa Fe. Consiguientemente se focaliza en dotar de confiabilidad a las formulaciones con mejor capacidad de predicción para su posible empleo en diseño y protección de estructuras hidráulicas con características como las estudiadas.

## MATERIALES Y METODOS

Un primer caso corresponde al análisis de la fosa de erosión aguas abajo de un vertedero de control de niveles en una microcentral hidroeléctrica ubicada en sobre el río Carcarañá, en la ciudad homónima (provincia de Santa Fe) y el segundo caso corresponde a la fosa de erosión producida en la cascada del arroyo Saladillo (Rosario, provincia de Santa Fe). Cabe destacar que en este último caso se halla presente además un complejo mecanismo de erosión retrogradante que se analiza en detalle en Basile y Riccardi (2017).

En ambas caídas hidráulicas se producen resaltos que, dependiendo de las características en cada caso de estudio, para caudales en aguas altas operan con diferentes grados de ahogamiento. En lo que concierne al funcionamiento de la descarga como vertederos en el caso de Carcarañá para caudales bajos y medios opera con descarga libre y para caudales extraordinarios opera como vertedero ahogado, en tanto que en la cascada de Saladillo opera mayormente como vertedero con descarga libre.

## Río Caracarañá

En el caso del río Caracarañá se trata de un proceso erosivo localizado al pie de un vertedero de 5.60 m de altura de paramento con una longitud de 42.0 m. La estructura se localiza en coordenadas 32°51'17"S 61°10'22"O en un tramo del río cuando atraviesa la ciudad de Caracarañá provincia de Santa Fe (Figura 2). La estructura hidráulica cumple la función de elevador de nivel para una minicentral hidroeléctrica de pasada que se explota sobre el río con una potencia nominal de 2x868 Kw, con un caudal de operación de 50 m<sup>3</sup>/s. Al pie del vertedero se originó una afectación de la obra debido a procesos erosivos que pusieron ciertamente en riesgo de colapso a la obra.

La información hidrológica e hidrométrica disponible proviene de la estación de aforos Pueblo Andino (32°40'24 S; 60°51'57.4"O) operada por SSRH (2017), ubicada 40 km aguas abajo del punto de estudio y estuvo conformada por series de niveles diarios (1980 a 2016), caudales medios diarios (1980 a 2016) y serie de caudales aforados (1983 a 2016). Para este estudio en particular se determinaron los caudales en el sitio de estudio a partir de relaciones de áreas de aporte. Además se obtuvo información puntual y discontinuada de niveles y caudales correspondientes a la presentación de eventos extremos a partir de información de pobladores y del establecimiento Molino Semino ubicado en la margen derecha del río. Con la información disponible se realizó la estadística de niveles y caudales asociados. En Figura 3 se presenta la curva de permanencia de caudales, en tal sentido el río puede caracterizarse como perenne de alta irregularidad (FCEIA, 2011) donde se determinan caudales asociados a las siguientes permanencias  $Q_{95\%} \leq 25 \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $Q_{60\%} \leq 55 \text{ m}^3/\text{s}$  (referencia para diseño de turbinas de minicentral hidroeléctrica) y  $Q_{5\%} \leq 220 \text{ m}^3/\text{s}$  entre otros. Cabe aclarar que el tratamiento de la información hidrológica e hidrométrica fue realizado hasta diciembre de 2007, fecha en que se realizó el relevamiento de la fosa de erosión. El máximo caudal medio diario estimado desde 1980 a 2007 fue entre 900 a 1000 m<sup>3</sup>/s, presentándose en marzo de 2007. Una sección tipo del río relevada en la zona se presenta en Figura 4, la base de fondo del río se aproximó a 40 m, la pendiente hidráulica aguas abajo considerada fue de 0.0004 m/m.

En lo que concierne a la fosa de erosión se contó con un relevamiento existente al pie del vertedero realizado a fines de 2007 (Figura 5) tras el pasaje de una crecida extraordinaria verificada en marzo de 2007. De tal relevamiento se determinó una profundidad media observada de  $D_{s \text{ obs}} = 4.12 \text{ m}$  con un valor máximo observado de  $D_{s \text{ max obs}} = 6.22 \text{ m}$ . A partir de 2008 comenzó el proyecto y posterior construcción de un dissipador de energía que actualmente funciona mitigando el proceso erosivo al pie de la obra. A partir de consideraciones hidrodinámicas en el tramo, el vertedero manifiesta un funcionamiento a descarga libre para caudales  $Q \leq 600 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Por su parte el lecho se trata de arcillas y limos tipo CL –ML según clasificación unificada de suelos con presencia de nódulos de cementación calcárea, la densidad natural es del orden de  $\gamma_e = 1.50 \text{ g/cm}^3$ , la humedad natural  $\omega = 25\text{-}30\%$ , el límite líquido LL=35-37, límite plástico LP=23, la cohesión toma valores  $c = 28\text{-}50 \text{ N/cm}^2$ , el ángulo de fricción interna  $\phi = 12\text{-}15^\circ$  y el número de golpes en el ensayo de penetración de Terzaghi  $N = 30$ .

A partir de la información disponible y procesada, se llevaron adelante simulaciones de escurrimiento en régimen permanente con caudales variando entre 200 a 1000 m<sup>3</sup>/s. Se plantearon dos hipótesis de distribución de caudal específico, un primer caso correspondió a suposición de (i) caudal específico uniforme a lo largo de la sección transversal y un segundo caso correspondió a asumir (ii) caudal específico con una mayoración de +25% en la zona de máxima erosión observada. Con las configuraciones hidráulicas obtenidas se aplicaron las

formulaciones de cálculo de profundidad de erosión tomando en consideración todo el rango de caudales observado. En la suposición (i) se comparó la profundidad de erosión calculada ( $D_s$ ) con la erosión media observada ( $D_{s\text{ obs}}$ ) y en (ii) se comparó la erosión calculada con la profundidad de erosión máxima observada ( $D_{s\text{ max obs}}$ ).

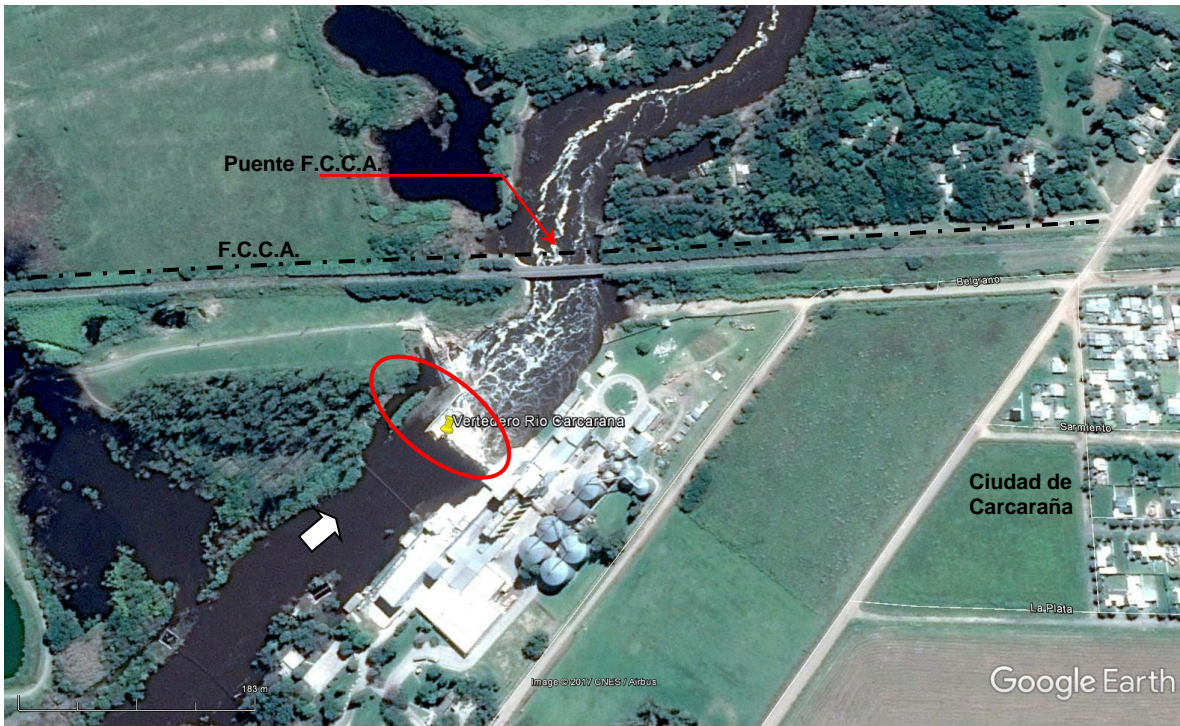


Figura 2.- Vertedero en Rio Carcaraña (32°51'17"S 61°10'22"O). Ciudad de Carcaraña

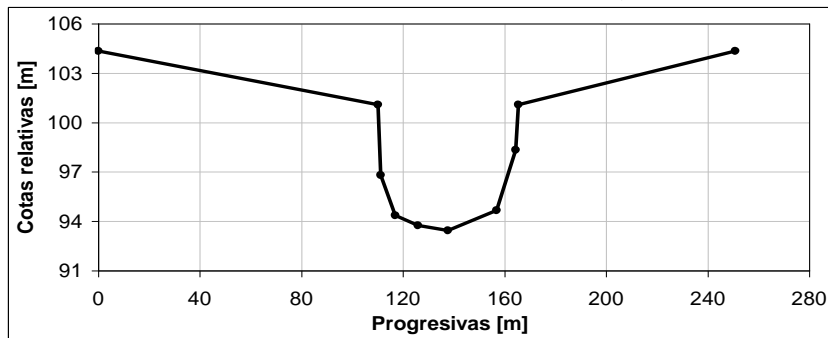


Figura 3.- Sección transversal tipo en tramo en estudio

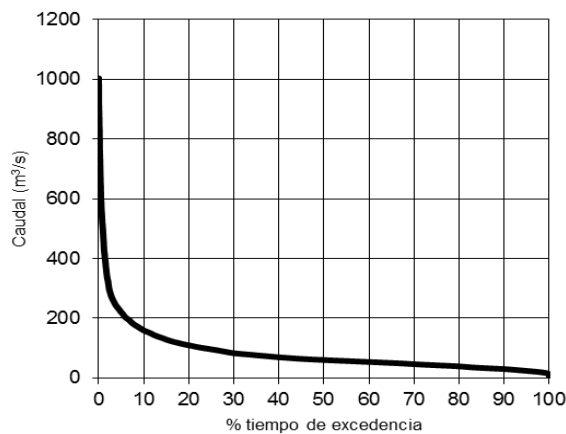


Figura 4.- Permanencia de caudales medios diarios. Rio Carcaraña. Serie 1980-2008. Sitio ciudad de Carcaraña

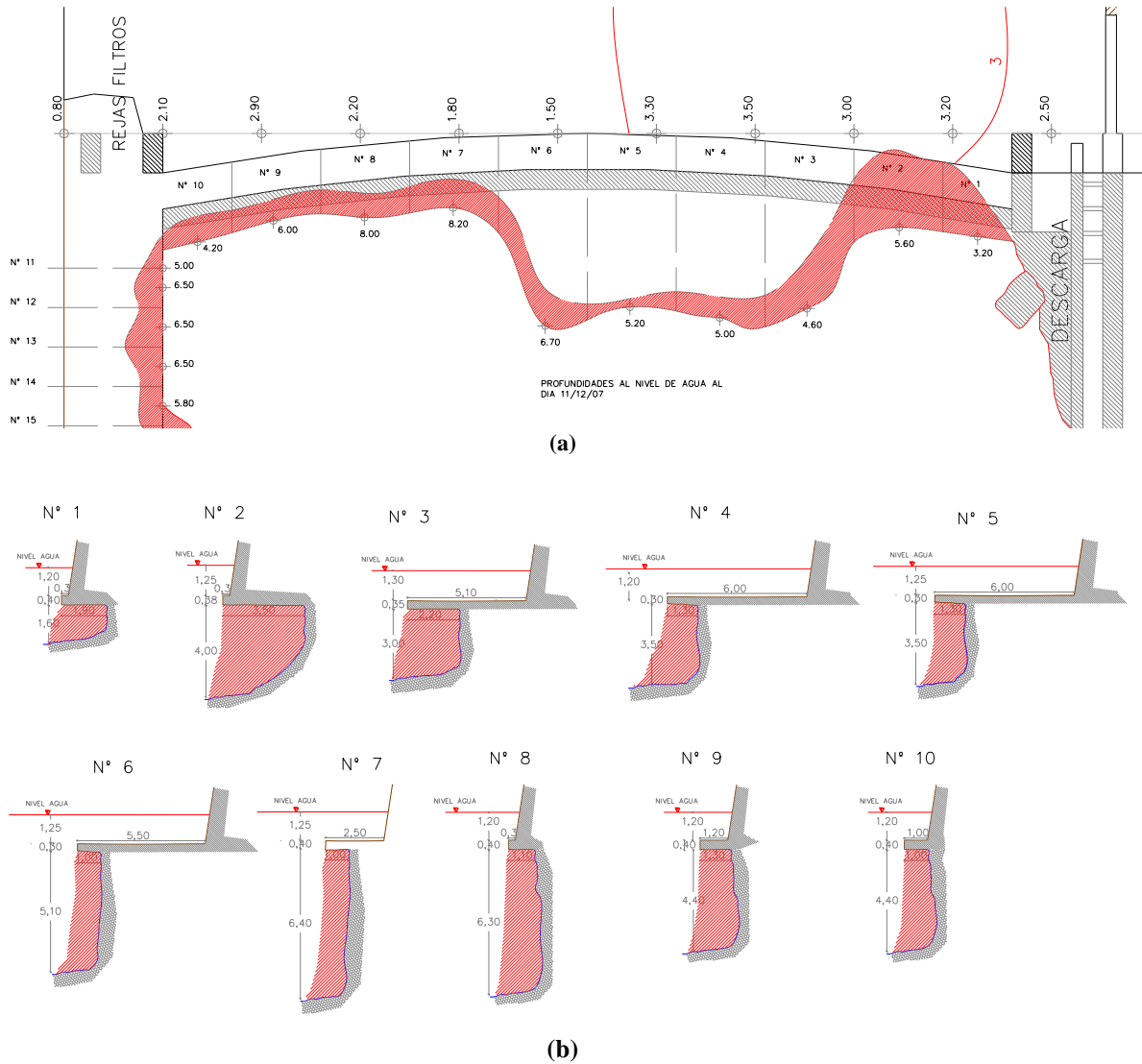


Figura 5. Fosa de erosión relevada el 11/12/2007. (a) Planta; (b) Perfiles de fosa

### Arroyo Saladillo

El arroyo Saladillo es un curso de agua de la provincia de Santa Fe por el que escurre a la altura del sitio en estudio aproximadamente 3200 km<sup>2</sup> de su cuenca tributaria. La cascada objeto de estudio constituye la conexión con el régimen de niveles del río Paraná, en tanto que se localizó en setiembre de 2015 en coordenadas 33° 00' 34.24'' S 60° 37' 54.89'' O, a 2370 m de su desembocadura en el río Paraná (Figura 6). El curso de agua tiene una sección trapecial aguas arriba (resultado de una canalización realizada en año 1999), con una base de fondo de aproximadamente 60 m, una pendiente hidráulica aguas arriba de la cascada de 0.0005 m/m y aguas abajo 0.0004 m/m. El desnivel existente entre el fondo del arroyo aguas arriba y el fondo aguas abajo fuera de la fosa de erosión se estimó en 7.50 m.

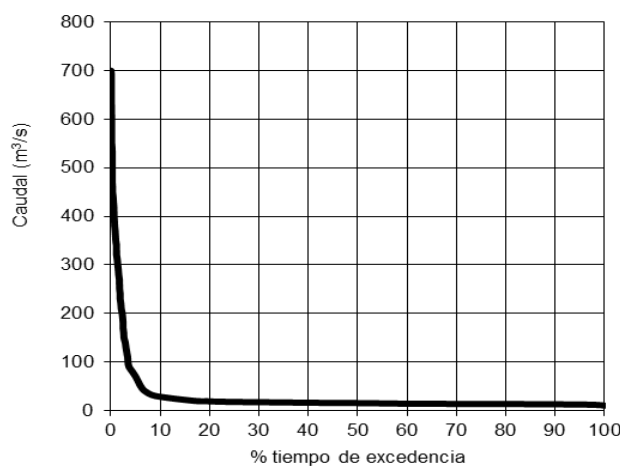
A partir de la recopilación y procesamiento de información proveniente de varias fuentes (DHIS-FCEIA, 1993; FCEIA, 2008; FCEIA, 2011) también se reconstruyeron series de niveles, caudales medios diarios y máximos diarios en el periodo 1984 a 2017 desde datos aforados en la estación Saladillo RP18 (33°01'45.30''S; 60°40'55,30''O) existente aguas arriba del sitio de estudio. La serie de caudales fue completada a partir de registros puntuales

de caudales inferidos indirectamente a partir de registros de velocidades en el período 2007-2015. El máximo caudal observado en la zona corresponde a un evento de 1986 donde se estimó un caudal máximo superior a 1100 m<sup>3</sup>/s. En la Figura 7 se ilustra la representación permanencia de caudales, también en este caso se trata de un curso de agua perenne con alta irregularidad, pudiéndose destacar que el  $Q_{95\%} \leq 12 \text{ m}^3/\text{s}$  y el  $Q_{5\%} \leq 70 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Dado que la estación de aforos está distanciada a 5.5 km del sitio en estudio, el caudal asumido escurriendo por la cascada se determinó calculando el caudal en base a la relación de áreas de aporte. Si bien el tirante aguas abajo está parcialmente condicionado por el régimen de niveles hidrométricos del río Paraná, la descarga de la caída hidráulica es de tipo libre para caudales  $Q \leq 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Figura 6.-** Cascada Arroyo Saladillo (32°51'17"S 61°10'22"O). Región de Rosario



**Figura 7.-** Permanencia de caudales medios diarios. Cascada Arroyo Saladillo año 2015. Serie 2007-2015.

El suelo constitutivo del lecho es de tipo limoso (ML) con cementaciones calcáreas de distintos grados de importancia. La densidad natural asume valores cercanos a  $\gamma_e = 1.80$

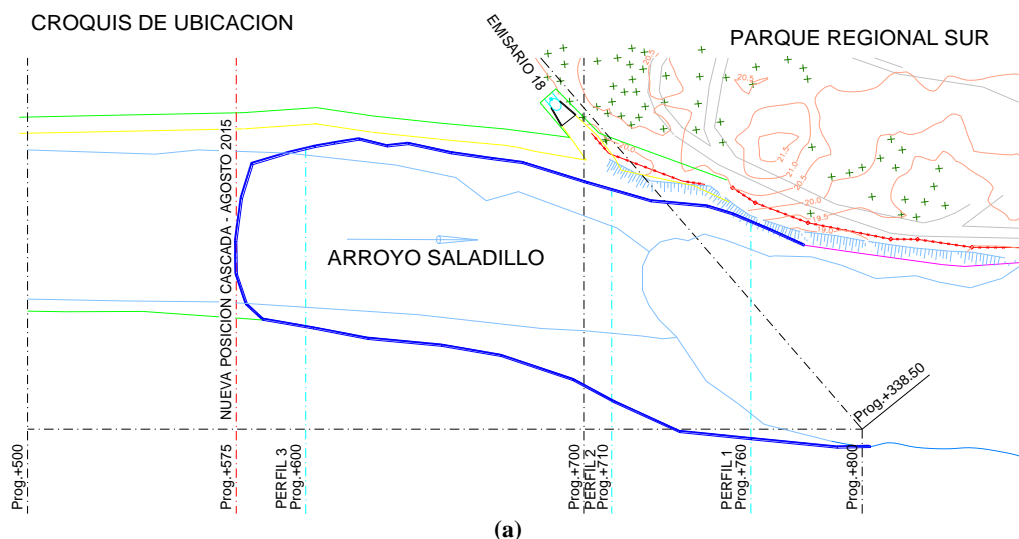
$\text{g/cm}^3$ , en tanto que la cohesión en la zona de la fosa es del orden de  $c = 32 \text{ N/m}^2$ , el ángulo de fricción interna  $\varphi = 22^\circ$ , en tanto que el límite líquido  $LL = 32$ , el límite plástico  $LP = 25$  y el correspondiente índice de plasticidad  $IP = 7$  y  $N = 50$  (DHIS-FCEIA, 1993).

En lo que concierne a la fosa de erosión observada se dispuso de un relevamiento realizado días después de desarrollarse el proceso erosivo en 2015, el valor medio observado se estimó en  $D_{s \text{ obs}} = 3.94 \text{ m}$  con un valor máximo  $D_{s \text{ max obs}} = 6.56 \text{ m}$ . En la Figura 8 se presentan (a) planta; (b) perfil transversal situado 135 m hacia aguas abajo la cascada y (c) correspondiendo a un perfil transversal ubicado 25 m aguas abajo de la cascada y en correspondencia con la transversal donde se localizó la mayor profundidad de erosión.

Como fuera mencionado, la cascada del arroyo Saladillo sufre un proceso de erosión retrogradante, lo que hace particularmente dificultoso asociar las variables hidráulicas, hidrosedimentológicas y morfológicas a un análisis estático del proceso erosivo. En este trabajo se asume que el máximo caudal estimado en agosto de 2015 entre  $500\text{-}550 \text{ m}^3/\text{s}$  fue el que produjera la fosa observada.

Al igual que en el caso anterior se determinaron mediante las formulaciones seleccionadas la profundidades de erosión de equilibrio en un rango de caudales y en particular se comparó aquel valor de fosa de erosión esperable para caudales cercanos al máximo determinado en 2015, bajo las mismas hipótesis planteadas para el caso anterior: (i) caudal específico uniforme en la transversal y (ii) caudal específico mayorado en  $+25\%$ .

Tanto en el análisis en el río Carcaraña como en el arroyo Saladillo los relevamientos de las fosas de erosión se efectuaron en aguas bajas y el error de medición se estimó en  $\pm 0.10 \text{ m}$  en planimetría y en  $\pm 0.30 \text{ m}$  en profundidad. La erosión media en cada caso se determinó por ponderación lineal de las profundidades máximas locales medidas a lo largo de la transversal.





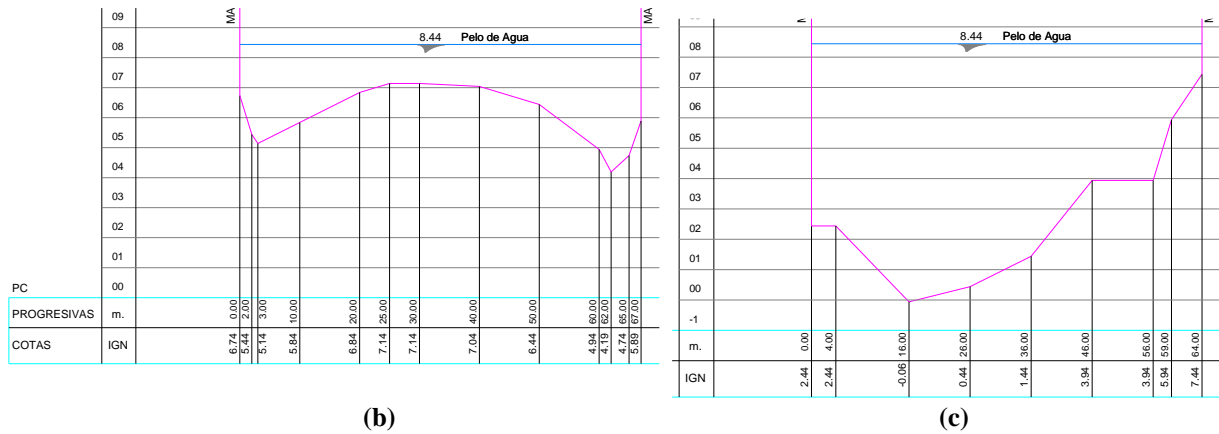


Figura 8. Relevamiento batimetrico fosa de erosión en setiembre 2015. (a) Planta; (b) Perfil 2; (c) Perfil 3

## EVALUACIÓN DE RESULTADOS

En el caso de la erosión en la estructura sobre el río Caracarañá en las Figuras 9 y 10 se presentan los resultados obtenidos mediante la aplicación de las ecuaciones (2) a (5) y la formulación de Lopardo y Sly con coeficiente de seguridad, bajo la suposición de caudal específico uniforme a lo largo del ancho del curso. La Figura 9 corresponde a la valoración de la profundidad de erosión (S) medida desde el tirante de restitución en función de los caudales escurriendo por la estructura, la Figura 10 presenta los valores de la profundidad de erosión de la fosa (D<sub>s</sub>) en función del caudal. Se observa que los valores calculados de la profundidad de erosión medidos desde el fondo crecen hasta llegar a un cierto caudal, luego manifiestan una meseta de valores máximos y luego comienzan a descender. Este comportamiento está directamente relacionado a la evolución simultánea de q, H y el tirante de restitución aguas abajo Y<sub>a</sub>. Se observa que la profundidad máxima de la fosa de erosión se alcanza aproximadamente en el rango de caudales en los cuales puede considerarse la descarga libre del vertedero.

En este caso de estudio, se evidencia que el valor máximo de la formulación de Veronese  $D_s = 4.37$  m se acerca satisfactoriamente al valor medio observado de erosión  $D_{s\text{ obs}} = 4.12$  m, con una diferencia de +6%. Bajo la hipótesis de distribución de caudal específico uniforme, el caudal en que se verifica la máxima profundidad de fosa es  $650 \text{ m}^3/\text{s}$  con un  $q = 16 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  una diferencia de energía  $H = 2.16$  m y una velocidad de entrada del chorro estimada en  $U_e = 6.5 \text{ m/s}$ . En el resto de las formulaciones, la que más aproxima a la media observada es la de Lopardo y Sly (con coeficiente de seguridad)  $D_s = 3.32$  m con una subvaloración de -19.5%, presentándose la máxima fosa para un caudal de  $500 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $q = 12.50 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ .

En la búsqueda de una aproximación al valor máximo de profundidad de la fosa y asumiendo que la no uniformidad en la distribución transversal de la profundidad (Figura 5.b) se debe a una concentración de caudal específico, se procedió a realizar una serie cálculos con las dos formulaciones que arrojaron mejores resultados, suponiendo una mayoración del caudal específico en +25%. Los resultados indican una muy buena aproximación por parte de la formulación de Veronese estableciendo un valor de  $D_{s\text{ max}} = 6.25$  m respecto a  $D_{s\text{ max obs}} = 6.40$  m (diferencia = -2.3%), el caudal específico resulta  $q = 25 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ,  $U_e = 6.50 \text{ m/s}$  y  $H = 2.15$  m. En este caso la formulación de Lopardo y Sly determina un valor de  $4.64$  m (diferencia = -27.5%). En Figuras 11 y 12 se presentan las profundidades S y D<sub>s</sub> en función del caudal para la hipótesis de mayoración del caudal específico en +25%.

En el caso de la cascada del arroyo Saladillo se analizó el rango hasta 500-550 m<sup>3</sup>/s que fuera estimado en 08/2015 cuando se relevara la fosa. Si consideramos como caudal más probable el valor de 500 m<sup>3</sup>/s bajo la hipótesis de distribución de caudal específico uniforme la formulación de Lopardo y Sly es la que mejor aproxima con un valor de  $D_s = 4.14$  m versus el valor medio de la profundidad de fosa relevada de  $D_{s\text{ obs}} = 3.94$  m; lo que significa una diferencia de +5.0%, resultando para esta configuración hidráulica el caudal específico  $q = 8.33$  m<sup>3</sup>/s/m, la diferencia de energía  $H = 7.23$  m y la velocidad de entrada del chorro estimada en  $U_e = 11.9$  m/s. Del resto de las formulaciones, la que mejor aproxima a la media observada es la de Veronese un  $D_s = 4.77$  m con una sobrevaloración de +21%. El rango de caudales analizado corresponde a un vertedero con descarga libre.

En lo que concierne a la suposición de caudal específico mayorado en un 25% la formulación de Veronese establece un  $D_{s\text{ max}} = 5.96$  m versus un valor observado máximo es  $D_{s\text{ max obs}} = 6.56$  m con una diferencia de -9.1% en tanto que la formulación de Lopardo y Sly determina  $D_{s\text{ max}} = 5.15$  m, lo que arroja una diferencia de -21.4%. No obstante la buena aproximación, el valor establecido por las formulaciones corresponde a profundidades de erosión de equilibrio, hipótesis que en el caso de la cascada del arroyo Saladillo no se verifica debido a la baja permanencia del caudal y al desarrollo de un proceso retrogradante que se analiza en detalle en Basile y Riccardi (2017).

A modo ilustrativo en Figuras 17 y 18 se presentan fotografías de los dos sitios de estudio en aguas bajas y en aguas altas respectivamente. Las fotografías en aguas altas corresponden a las crecidas extraordinarias sucedidas antes de los relevamientos de las fosas de erosión.

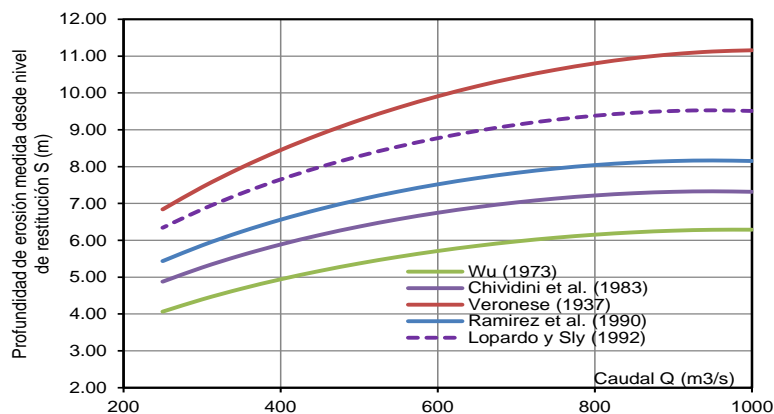


Figura 9 . Profundidad de erosion S (medida desde tirante de restitución) en funcion del caudal en rio Caracaraña con suposición de caudal específico uniforme en el ancho

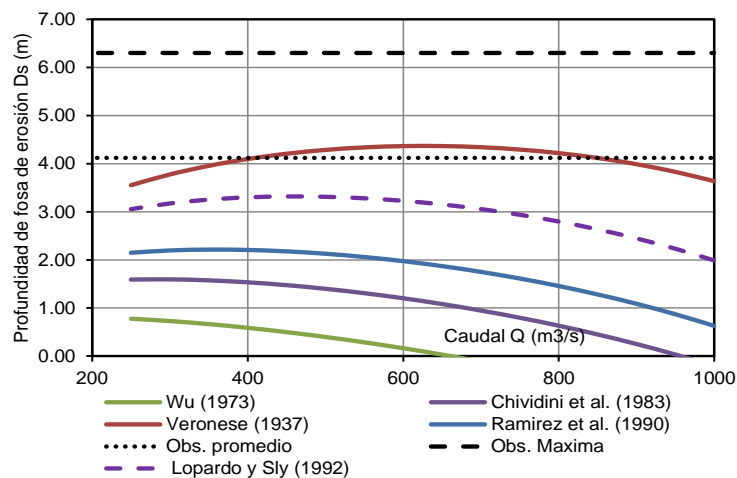


Figura 10 . Profundidad de erosion Ds en funcion del caudal en rio Caracaraña con suposición de caudal específico

uniforme en el ancho

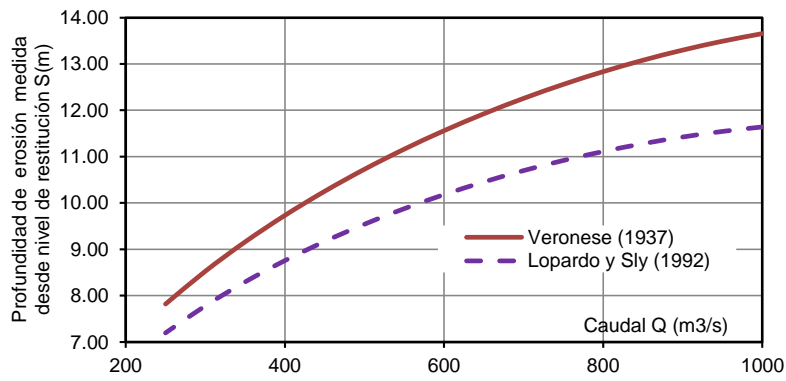


Figura 11 . Profundidad de erosión S (medida desde tirante de restitución) en función del caudal en río Carcaraña con suposición de caudal específico mayorado en +25%

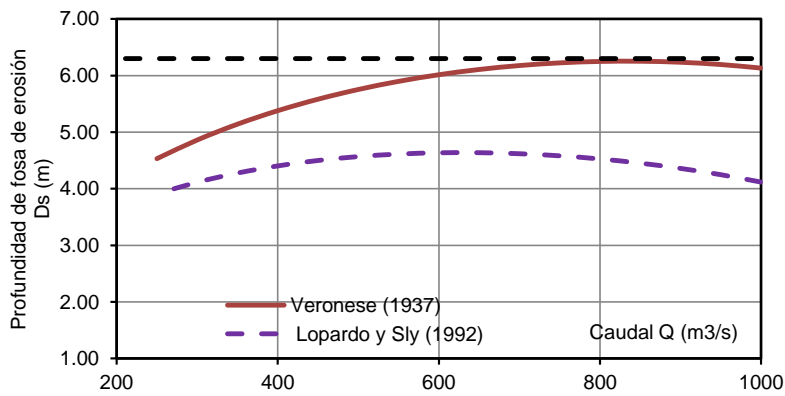


Figura 12 . Profundidad de erosión  $D_s$  en función del caudal en río Carcaraña con suposición de caudal específico mayorado en +25%

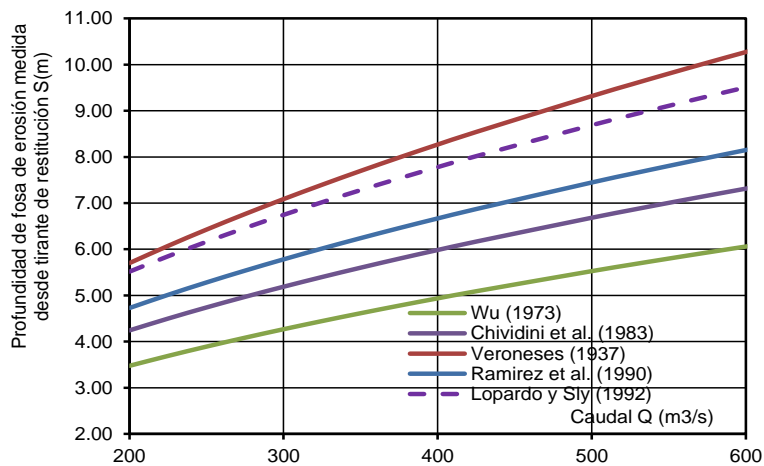
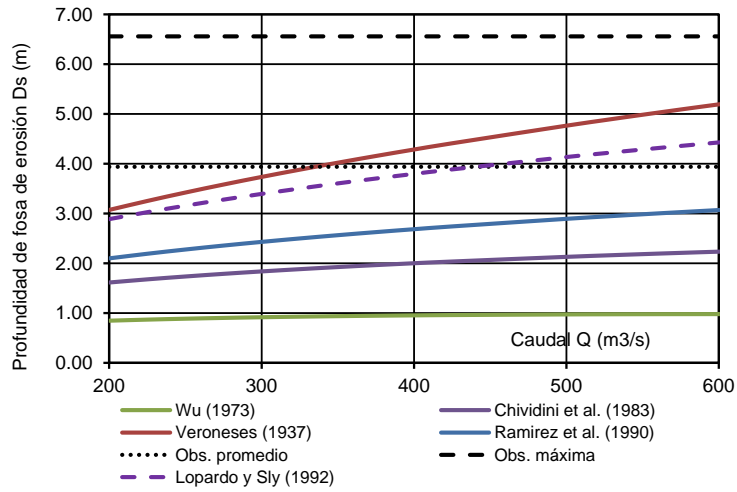
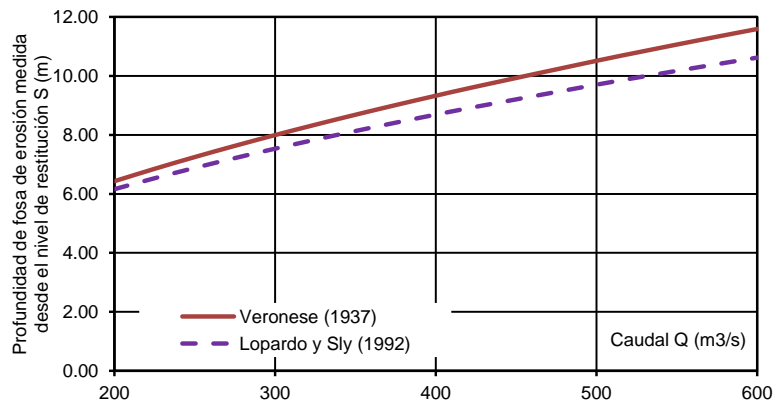


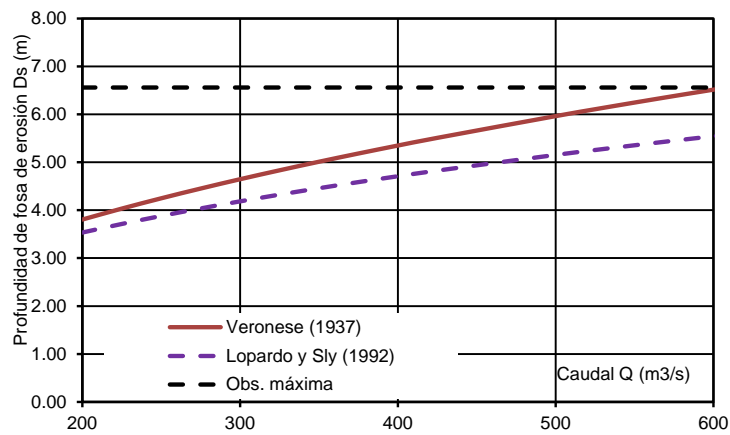
Figura 13 . Profundidad de erosión S (medida desde tirante de restitución) en función del caudal en arroyo Saladillo con suposición de caudal específico uniforme en el ancho



**Figura 14 .** Profundidad de erosión  $D_s$  en función del caudal en arroyo Saladillo con suposición de caudal específico uniforme en el ancho



**Figura 15 .** Profundidad de erosión S (medida desde tirante de restitución) en función del caudal en arroyo Saladillo con suposición de caudal específico mayorado en +25%



**Figura 16 .** Profundidad de erosión  $D_s$  en función del caudal en arroyo Saladillo con suposición de caudal específico mayorado en +25%



**Figura 17** . Vertedero en río Carcarañá. (a) Aguas bajas 10/05/2008; (b) Crecida del 28/03/2007



**Figura 18** . Cascada arroyo Saladillo. (a) Aguas bajas 23/11/2016 ; (b) Crecida del 11/08/2015

## CONCLUSIONES

Se han contrastado formulaciones simplificadas de profundidad de erosión de equilibrio aguas abajo de caídas hidráulicas. Las formulaciones consideradas para la comparación excluyen al diámetro del material del lecho como variable representativa. Se aplicaron en 2 casos de erosiones locales observadas en lechos de suelos cohesivos en zonas de llanura. Tras comparar con profundidades relevadas, se comprueba que las formulaciones de Veronese (1937) y Lopardo y Sly (1992) (con coeficiente de seguridad) aproximan satisfactoriamente a los valores medios observados con una suposición de caudal específico uniforme con una diferencia acotada entre -19.5 % a + 25.0% y a los valores máximos logrados con hipótesis de mayoración de caudal específico en un 25% con un rango de diferencias acotada entre -27.5% a -2.3%.

Si bien los casos de estudio no alcanzan para extrapolar a un universo amplio de suelos cohesivos, puede concluirse que ambas formulaciones resultan de utilidad en proyectos de obras de ingeniería como herramienta de verificación en la determinación de la profundidad esperada de la fosa de erosión de equilibrio en suelos tipos arcillosos-limosos CL-ML.

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

**LISTA DE SÍMBOLOS**

S:	profundidad de erosión medida desde el tirante de restitución (m)
$Y_d$ :	tirante de restitución (m)
Q:	caudal ( $m^3/s$ )
q :	caudal específico ( $m^3/s/m$ )
$U_e$ :	velocidad entrante del chorro (m/s)
H:	diferencia entre los niveles de energía aguas arriba y abajo de la caída (m)
g:	aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )
$d_s$ :	diámetro del sedimento (m)
K, a, b, c, d, e:	constantes (adim)
$D_s$ :	es la profundidad de la fosa medida desde el fondo aguas abajo sin erosión (m)
$D_{s\text{ obs}}$ :	es la profundidad observada media de la fosa de erosion (m)
$D_{s\text{ obs max}}$ :	es la profundidad observada maxima de la fosa de erosion (m)
LL:	Limite liquido (%)
LP:	Limiteplastico (%)
IP:	Indice plástico (%)

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Basile P. y Riccardi G.** (2017). “Modelación Morfodinámica del Proceso de Erosión Retrogradante: aplicación a la Cascada del A° saladillo”, *VIII Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos*. Córdoba, Argentina.
- Bormann N. and Julien P.** (1991). “Scour Downstream of Grade-Control Structures”. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol 17, 5, pp. 579-594.
- Breusers, H.N.** (1967).”Time scale of two-dimensional local scour”. *Proceeding of 12<sup>th</sup> IAHR Congress*, Fort Collins, Colo., 3(32),pp.275-282.
- Carstens, M.R.** (1966). “Similarity laws for localized scour”. *Journal of Hydraulic Division*. ASCE, 92(3), pp.13-34..
- Chividini, M.,** (1983). “Evaluacion de la socavación máxima aguas debajo de aliviaderos en saltos de esquí”. *Anales del XI Congreso Nacional del Agua*. Cordoba, Argentina, Vol. 6 pp-187-210.
- Damle, P.M., Venkatraman and Desai S.C.** (1966). “Evaluation of scour below ski-jump buckets of spilways”. *Proc. Golden Jubilee Symposium*, Poona, India, pp.154-163.
- DHIS-FCEIA** (1993). “Proyecto Ejecutivo Tramo I Arroyo Saladillo”. *Informes Parciales y Finales*. Departamento de Hidráulica e Ingeniería Sanitaria - Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura y Consejo Federal de Inversiones, UNR, Rosario.
- Eggenberger, W.** (1943). “ Die Kolkbildung bei einen Uberstromen und beider Kombination Uberstromen-Unterstromen”. Tesis presentada en ETH Zurich, Suiza (en alemán).
- FCEIA** (2008). “Rehidrologia y Modelo de Simulación aTiempo Real en Ssistema de Alerta Hidrológico en las Cuencas de los Arroyos Ludueña y Saladillo”. *Informes de Avance 1 y 2*. Departamento de Hidraulica, Fac. de Cs. Exactas, Ing. y Agrimensura, UNR, Rosario.
- FCEIA** (2011). “Estudio de Prefactibilidad para El Aprovechamiento del Río Carcarañá como Ruta fluvial Navegable”. *Informe de Avance N° 1 y 2*. Departamento de Hidraulica, Fac.

de Cs. Exactas, Ing. y Agrimensura, UNR, Rosario.

**Federal Highway Administration (FHWA)** (2009). “Bridge Scour and Stream Instability Countermeasures: Experience, Selection, and Design Guidance” HEC-23, US Department of Transportation, Washington (DC), EU.

**Jaeger, C.** (1939) . “Über die Aehnlichkeit bei flussaulichen Modellversuchen”. *Waserkraft und Wasserwirtschaft*, 34(23/24), 269, (en aleman)

**Hartung, W.** (1959). “Die Kolkbildung hinter Überströmen wehrem im Hinblick auf eine beweglich Sturzbettgestaltung”. *Die Wasser Wirtschaft*, 49(1), pp.309-313 (en aleman).

**Laursen E.M.** (1952). “Observations on the nature of scour”. *Proceeding 5<sup>th</sup> Hydr. Conference.,Bull 34*, University of Iowa, Iowa, pp.179-197.

**Lopardo, R.A. y Sly, E.** (1992). “ Constatacion de la profundidad de erosion aguas debajo de aliviaderos en salto de esquí”. *Revista Latinoamericana de Hidraulica*. Sao Paulo, Brazil, n° 4, pp. 7-23.

**Lopardo, R.A., Casado J.M. y Lopardo M.C.** (2003). “ Erosion Local Aguas Abajo de un Disipador a Resalto con Insuficiente Nivel de Restitucion”. *Primer Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos*. Buenos Aires, Argentina.

**Marmonti I., Bacchiega D., Lopardo, M.C, Bernardo T., Barrionuevo D. y Fattor C.** (2014). “Evaluación de la Erosión Local Aguas Abajo de Salto de Esquí Convergentes sin Impacto entre sus Trayectorias”. *Memorias del IFRH 2014*, Ezeiza, Argentina.

**Mason, P.J. and Arumugam, K.** (1985).”Free jet scour below dams and flip buckets”. *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 111,2,pp.220-235.

**Rajaratnam, N.** (1981). “Erosion by plane turbulent jets”. *Journal of Hydraulic Research*.19(4), pp.339-358.

**Ramirez M., Fuentes R. y Aguirre Pe J.** (1990). “Comparacion Unificada de Formulas para la Socavacion al Pie de Presas”. *Anales del XIV Congreso Latioamericano de Hidraulica*. Montevideo, Uruguay. pp.1476-1478.

**Schoklitsch, A.** (1932). Kolkbildung unter Überfallstrahlen. *Die Wasserwirtschaft*, 341 pp. (en aleman).

**SSRH**(2017).”Base de datos hidrológica integrada BDHI”, *Subsecretaria de Recursos Hidricos*. Ministerio del Interior, CABA. <http://bdhi.hidricosargentina.gov.ar>

**Veronese, A.** (1937). *Erosioni di Fondo a Valle di uno Scarico*. Annali dei Lavori Pubblici. Vol. 73, N° 9. Settembre 1937.

**Wu, C.M.** (1973). “Scour at downstream end of dams in Taiwan”. *Proc. Int. Symp. On River Mechanics*. Bangkok, Thailandia, I(A13), pp.1-6.