

Efectos de la contracción del cauce, lecho no cohesivo y pendiente de ríos, en la profundidad de socavación en estructuras de captación

Effects of the contraction of the channel, non-cohesive bed and slope of rivers, in the depth of scouring in collection structures

¹Luis Vásquez Ramírez, ²Rosa Haydee Llique Mondragón

¹Docente del Departamento de Recursos Hídricos, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cajamarca.

²Docente Principal, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cajamarca. Av. Atahualpa 1050, Cajamarca. Perú

Recibido: 14-09-18

Aceptado: 10-10-18

Resumen

Se realizaron estudios experimentales para estimar el incremento de la profundidad de socavación en la descarga de estructuras de captación emplazadas en ríos con lechos no cohesivos, influenciados por el incremento de la velocidad de flujo en la zona crítica de cambios de rigidez entre la poza disipadora y el material del lecho del río, generado por la contracción del cauce y la no uniformidad del lecho no cohesivo así como la variación de la energía cinética en el cauce debido a la pendiente del río aguas abajo. Los resultados obtenidos en la investigación se fundamentan en la teoría de similitud hidráulica y modelamiento físico y numérico del entorno de la estructura de captación, pues para sedimentos del lecho no cohesivo cuya gradación es no uniforme con presencia de arenas y gravas en el orden del 30% al 60%, se genera un efecto aditivo en la profundidad de socavación, incrementándose ésta para mayores concentraciones de finos y viceversa, además se corrobora que dicha profundidad de socavación en la descarga de estructuras de captación está influenciada en forma directa por la pendiente del cauce del río aguas abajo, pues para diferentes condiciones de contracción de cauce al pasar de pendientes suaves del orden del 0,1% a pendientes mayores del orden del 2,4%, la profundidad de socavación se incrementa en el orden del 75% hasta el 300%.

Palabras clave: *Contracción, lecho del río, erosión, socavación.*

Abstract

Experimental studies were carried out to estimate the increase in the depth of scour at the discharge of catchment structures in rivers with no cohesive beds, influenced by the increase in the rate of flow in the critical area of changes of stiffness between the dissipating basin and the river bed material, generated by contraction of the runway and not uniformity of the not cohesive bed as well as the variation of the kinetic energy on the runway due to the slope of the river downstream. The results obtained in the research are based on the hydraulic similarity theory and physical and numerical modeling of the environment of the structure of the catchment, as for the not cohesive bed sediments whose gradient is non-uniform presence of sands and gravel in the range from 30% to 60%, generates an additive effect on the depth of scour, increasing this to higher concentrations of fine and vice versa, was also corroborated that the depth of scour at the discharge of catchment structures is influenced directly down the slope from the river downstream, because for different conditions of contraction of runway passing soft slopes on the order of 0.1% to slopes greater of 2.4%. The scour depth increases in the order from 75% to 300%.

Keywords: *Contraction, river bed, erosion, scour.*

Introducción

Los lechos de cauces naturales al pasar el tiempo y estar expuestos a los fenómenos naturales y antrópicos, experimentan cambios naturales y/o artificiales; el estrechamiento del cauce en canales naturales es común, muchas veces por condiciones naturales y otras por efectos antrópicos debidos al posicionamiento de distintos tipos de estructuras, como puentes y presas que son derivadoras de agua al ser emplazadas sobre el lecho natural que se convierten en elementos obstructores.

Para estructuras con flujos en condiciones naturales de río, los investigadores Straub, Laursen, Ashida, Komura, Gill y Webby, citados por Subhasish & Raikar (2006), reportan ecuaciones empíricas, las cuales permiten estimar los niveles de erosión bajo condiciones de aguas claras, sin considerar los estrechamientos por efectos de la construcción de estructuras, que al depender del emplazamiento, forma, tamaño, capacidad hidráulica, tipo de lecho, pendiente del cauce, entre otros, generan erosión local y por tanto incrementan la erosión general en su entorno.

En los últimos años, investigadores como Mason & Arumugam (1985), Johnston (1990), Mossa (1998), Liriano & Day (2001), Azamathulla, Deo & Deolalikar (2008), Guven & gunal (2008), Azamathulla & Ghani (2010), Tuna & Emiroglu (2011), Zhang, Pang & Wang (2014), Shayan & Farhoudi (2015), y Hamidifar, Nasrabadi & Omid (2017), conscientes de la complejidad de las condiciones hidrológicas, hidráulicas y morfológicas en cada entorno de estructura con cauce natural, han desarrollado metodologías en base a la experimentación, utilizando la teoría del modelamiento físico y numérico con ajuste a ecuaciones empíricas de predicción y otras bajo el enfoque de la programación genética, todas fundamentadas en una gama de resultados obtenidos en el modelo o prototipo.

El criterio de causa efecto que permiten estimar la erosión y socavación local así como la

erosión general en el lecho del cauce natural, generados principalmente por los cambios de rigidez entre el material de la estructura hidráulica en la descarga con el material en el lecho natural, se fundamenta en una variable muy importante como es el grado de homogeneidad del sedimento, mucho más si éste es granular no cohesivo, es así que Bormann & Julien (1991), Guven & Gunal (2008), Guna (2008), Abdelhaleem (2013), Amin (2015), Mohamed, Abdel & Nasr (2016), Pagliara & Palermo (2017), centran su investigación en la erosión para condiciones de lecho vivo, con granulometrías de sedimento variables.

La elección del diámetro representativo del proceso de erosión es disperso, es así que Ali & Lim (1986), Bormann & Julien (1991), Ghodsian, Mehraein & Ranjbar (2012), Bazargan & Kalantari (2015), Shayan & Farhoudi (2015) y Pagliara & Palermo (2017), presentan estudios experimentales con chorros turbulentos bidimensionales y tridimensionales inyectados que simulan la descarga de una estructura sobre lechos de ríos arenosos con el uso del diámetro representativo como el D90, D85, D50 y otros según el tipo de sedimento, para analizar las distribuciones de la velocidad asociándola con el desarrollo del agujero de erosión.

El hidrograma de máximas avenidas en la descarga de la estructura hidráulica que genera un comportamiento dinámico variable en el lecho receptor, ha despertado el interés de algunos investigadores como Breusers (1966), Farhoudi & Smith (1982), Balachandar & Kells (1997), Nugroho, Achiari & Harlan (1998), Balachandar, Kells & Thiessen (2000), Ghodsian, Mehraein & Ranjbar (2012), Gendaszek et al (2013) y Vásquez (2016), que han generado programas experimentales para escalas de tiempo relacionándolos con la erosión local y consecuente socavación en la descarga de estructuras hidráulicas emplazadas en el lecho de ríos no cohesivos.

Es común en los diseñadores que al no contar con una metodología general, para determinar la profundidad de socavación total en la descarga de estructuras de captación, sumar la erosión local, la erosión general en el río y la erosión por contracción estimados en forma individual, sin un fundamento teórico, por ello surge la interrogante ¿Es posible cuantificar en conjunto, los efectos de la contracción del cauce de ríos con lecho no cohesivo, para pendientes variables, en la profundidad de socavación por la presencia de estructuras de captación de río?

Esta investigación se desarrolla en el ámbito de la cuenca media y alta de los ríos Mashcón, Chonta y Cajamarquino que se encuentran en la zona norte del Perú, cuyos lechos no cohesivos, tienen diferentes pendientes de fondo, con profundidades de socavación que han sido influenciada por el estrechamiento del cauce debido a la presencia de estructuras de captación. Por ende, el objetivo principal está orientado a determinar los efectos de la contracción del cauce, el lecho no cohesivo y pendiente del río en la profundidad de socavación en la descarga de las estructuras de captación.

Materiales y método

La investigación fue del tipo experimental, cuantitativa de campo y laboratorio de nivel correlacional.

Localización: Ámbito de las estructuras de captación emplazadas en la cuenca media del río Cajamarquino, en un espacio geográfico para las cuencas de los ríos Mashcón, Chonta y Cajamarquino, entre las coordenadas UTM 770000 a 786000 Este, y 9190000 a 9215000 Norte.

Materiales: Se utilizaron sedimentos no cohesivos de río de consistencia dura, modelos de concreto simple y granito a escala 1:20 y 1:40, sistema de recirculación de agua, canal de pendiente variable de sección rectangular, correntómetro y vertederos de pared delgada.

Metodología: La investigación fue planteada en seis etapas, fundamentada en el análisis dimensional y la teoría de similitud hidráulica entre modelo y prototipo.

Primera etapa: Identificación de la zona de estudio; con visitas de campo en época de estiaje para tomar datos de socavación existente y luego en época de máximas avenidas para visualizar los tipos de flujo y fenómenos colaterales que pueden influenciar el fenómeno de erosión y/o socavación.

Segunda etapa: Levantamiento de Información geométrica, hidrométrica, Topográfica y Geológica, mediante mediciones en campo (in-situ). La información geométrica y topográfica se la tomará en época de estiaje con una estación total, winchas y otros instrumentos; mientras que la información geológica se la obtendrá por observación, tomando como base la información regional existente de estudios anteriores; la información hidrométrica, se considera aquella que genera el máximo caudal que puede pasar por la sección donde está emplazado el azud.

Tercera etapa: Diseño experimental de campo y laboratorio. Para el diseño de los experimentos de campo, se utilizarán modelos físicos a escala apropiada según la disponibilidad del terreno. Posteriormente, con la información de campo y la teoría de modelamiento físico se procederá a realizar una calibración auxiliar en un modelo en campo a una escala grande para representar el fenómeno observado en campo con mayor precisión. Además, se considerará un grupo de control para descartar la influencia de variables no significativas en el experimento.

Cuarta etapa: Luego de la calibración del modelo con la información del modelamiento auxiliar se procede al tratamiento de la información en el grupo experimental, el tipo de modelamiento es multivariado de cuatro bloques con una matriz de combinaciones de $4 \times 4 \times 4$.

Quinta etapa: La información obtenida en formatos adecuados que servirá para

representar los resultados en gráficos y esquemas, en el que se analizará su consistencia mediante procesos estadísticos.

Sexta etapa: Luego de sistematizada la información, se procederá a la determinación de las variables intervinientes, las cuales, aplicando la teoría de similitud geométrica, cinemática, dinámica y sedimentológica entre modelo y prototipo, se procede a la generalización para encontrar una metodología aplicable a la

población en estudio.

Resultados y discusión:

En los trabajos de campo se identificaron 24 estructuras de captación de agua, de las cuales 11 están emplazadas en el lecho del río Chonta, 10 en el río Mashcón y 3 en el río Cajamarquino; en forma aleatoria se seleccionaron 4 estructuras de las cuales 2 correspondieron al río Chonta, una en el río Mashcón y una en el río Cajamarquino, en las que se planteó el trabajo experimental.



Figura 1. Concentración de sedimentos según tamaño en lecho de río, para cada estructura.

Como se puede apreciar en la figura 1, los sedimentos para el lecho no cohesivo del prototipo están representados por mezclas de sedimentos con una gradación no uniforme (desde arenas finas hasta piedras pequeñas), dado que la concentración de sedimentos finos como son las arenas y gravas muestreadas oscilan entre el 30% y 60%; a partir de los experimentos, se encontró que generan un efecto aditivo en la profundidad de socavación, incrementándose ésta para mayores concentraciones de finos y viceversa.

Los resultados observados en la investigación contrastan con los obtenidos por Bormann & Julien (1991) y los de Ghodsian, Mehraein & Ranjbar (2012), ya que en sendas investigaciones experimentales, encontraron que el agujero de socavación generado por chorros de agua bidimensionales se expandieron en

todas las direcciones con una alta tasa, además de visualizar que la mayoría de los sedimentos finos de las partículas fueron transportados aguas abajo como carga suspendida mientras que las partículas de sedimento más gruesas se transportaron río abajo por arrastre; al aumentar el parámetro de no uniformidad del sedimento, disminuyen las condiciones de estabilidad en la poza de socavación hasta alcanzar el equilibrio entre flujo y sedimento.

Levantada la información de campo, se procedió a identificar las variables incidentes en el fenómeno de estudio, clasificándolos como sigue:

- Según su geometría: Ancho del cauce del río (b) y ancho de la estructura de captación (B).
- Según características del agua y flujo: Densidad del Agua (ρ), viscosidad cinemática (ν), viscosidad dinámica (μ), tirante del flujo (Y_n), aceleración de la gravedad (g).

- Según características del cauce: Pendiente del río (S), diámetro representativo del sedimento (D_s), densidad del Material (ρ_s), profundidad de socavación (Y_s), tensión cortante ($\tau_{(0,)}$), velocidad crítica (V^*).

Luego se procedió a la etapa de modelamiento hidráulico de las cuatro estructuras

seleccionadas, verificando que se cumpla la similitud geométrica, cinemática, dinámica y sedimentológica. Para el proceso de calibración de los modelos en campo se utilizaron escalas de 1:20 y la similitud sedimentológica en laboratorio a escala de 1:40.



Figura 2. Modelamiento físico de estructura de captación. Para condición de prueba (izquierda); poza de erosión y socavación en estructura (derecha).

Tomando como base lo fundamentado por Maza y Springall (1968), se verificó la similitud sedimentológica entre modelo y prototipo puesto que consiguió que el índice de densidad de Froude para modelo y Prototipo tenga el mismo valor en los cuatro modelos, consiguiendo además la verificación del mismo tipo de fondo (antidunas) según el diagrama de Shields.

Según Yalin y Karahan, citado en Martínez (2001), como los valores de R^* (Reynolds del sedimento) para modelo y prototipo son superiores a 70, la similitud se verifica solamente con la igualdad del índice de Froude.

Por lo tanto, el modelo cumplió con las condiciones mínimas de similitud, lo que nos permite asegurar que los resultados obtenidos en el modelamiento son compatibles con los obtenidos en campo y con los proyectados para la investigación.

El diseño experimental de campo y laboratorio, fue realizado para escenarios con combinaciones de cuatro tipos de sedimentos con concentraciones de sedimentos diferentes, cuatro pendientes de lecho del río y cuatro condiciones de contracción de cauce, obteniéndose la información según esquema siguiente:

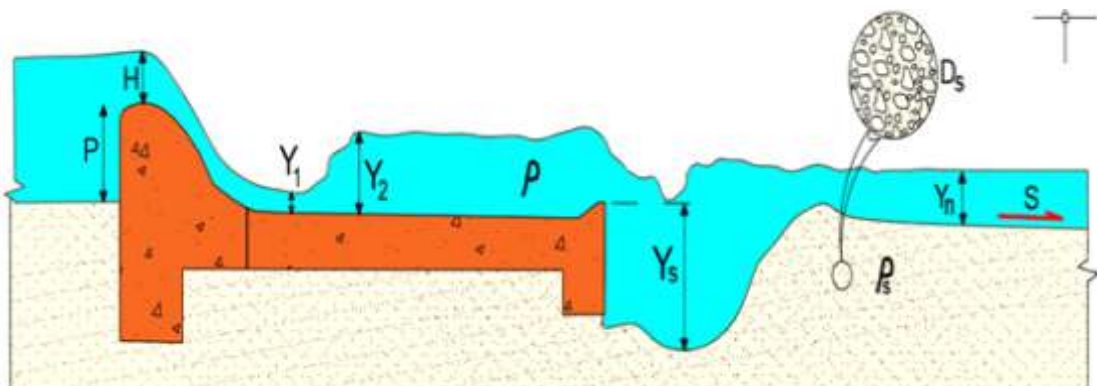
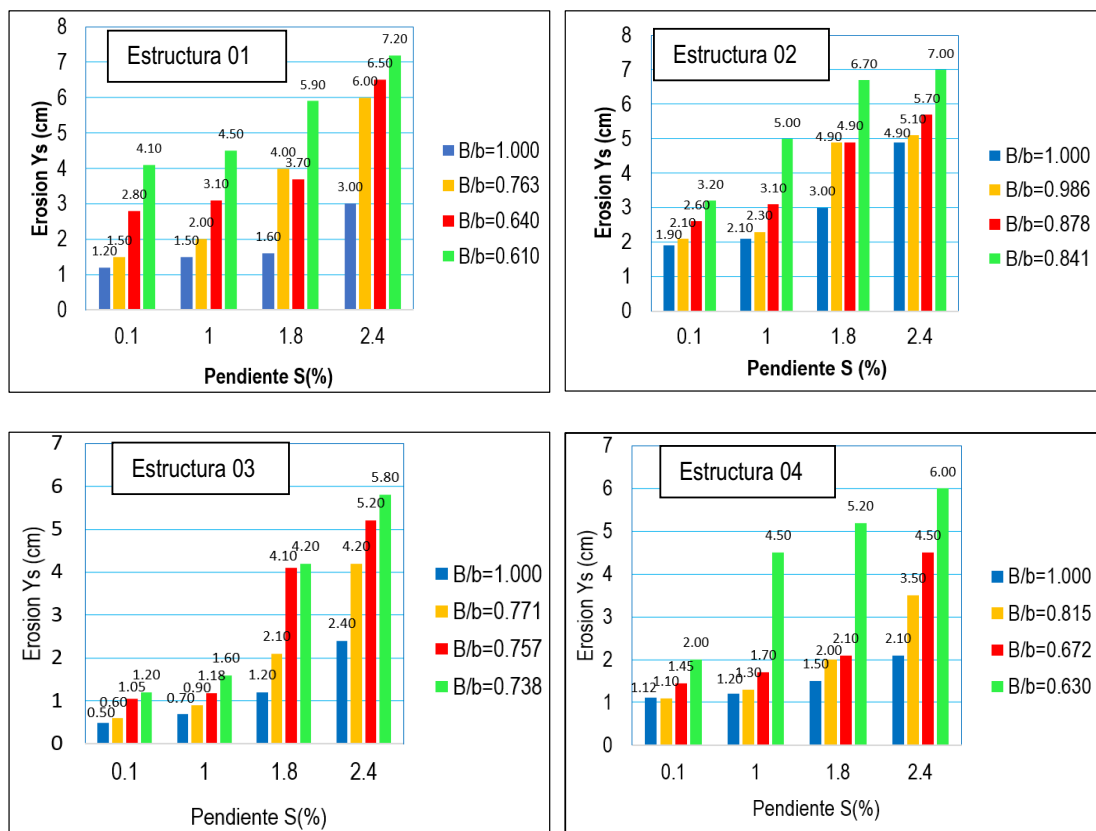


Figura 3. Parámetros intervinientes en la investigación.

Tabla 1. Profundidad erosionada por variación de pendiente para diferentes valores de contracción del cauce, obtenidas por experimentación en estructura 04.

Pend. S(%)	Ys (cm)	1-B/b	Ys (cm)	1-B/b	Ys (cm)	1-B/b	Ys (cm)	1-B/b
0,1	1,120	1,000	1,100	0,815	1,450	0,672	2,000	0,630
1,0	1,200	1,000	1,300	0,815	1,700	0,672	4,500	0,630
1,8	1,500	1,000	2,000	0,815	2,100	0,672	5,200	0,630
2,4	2,100	1,000	3,500	0,815	4,500	0,672	6,000	0,630

**Figura 4.** Profundidad de erosión “Ys” versus pendiente “S”, para diferentes condiciones de contracción de cauce “B/b”.

En cuanto a la variable pendiente del cauce, los resultados experimentales permiten visualizar que la profundidad de socavación en las estructuras de captación está influenciada en forma directa por la pendiente del cauce del río aguas abajo, pues para diferentes condiciones

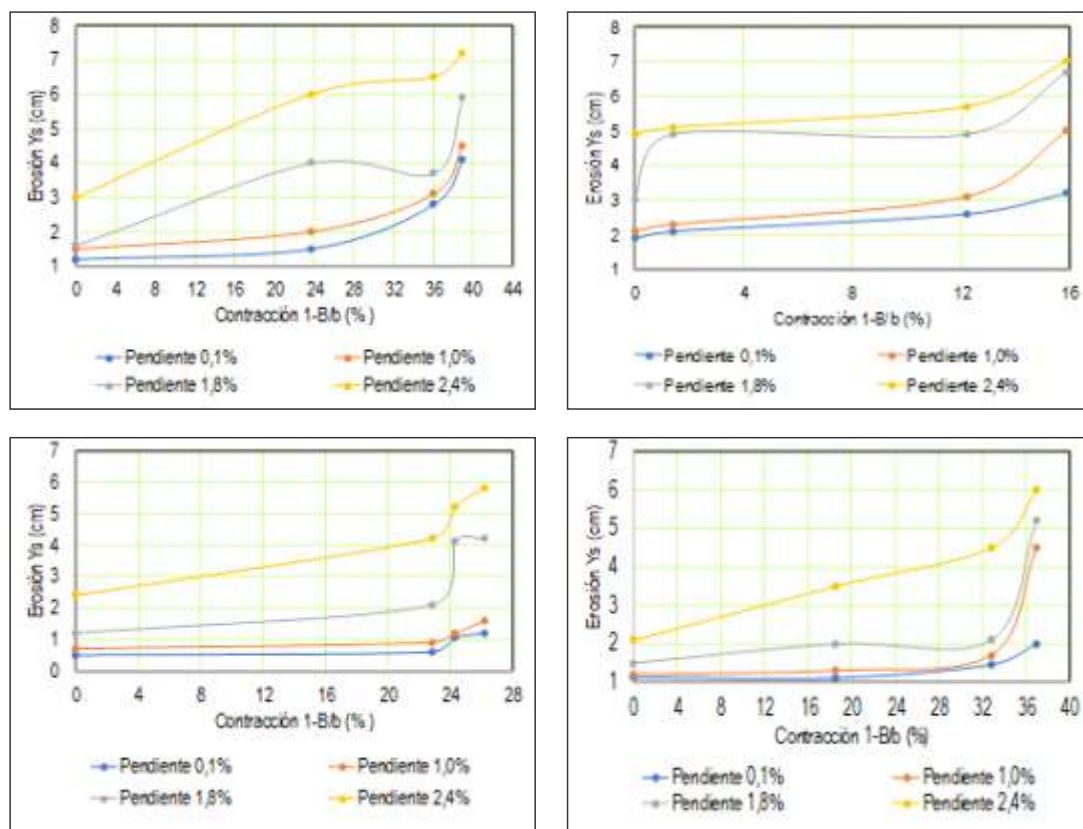
de contracción de cauce al pasar de pendientes suaves del orden del 0.1% hasta pendientes fuertes del orden del 2.4%, la profundidad de socavación se incrementa en el orden del 75% hasta el 300%.

Tabla 2. Profundidad erosionada por variación de contracción del cauce para diferentes pendientes del cauce, en estructura 04.

Pendiente 0,1%		Pendiente 1,0%		Pendiente 1,8%		Pendiente 2,4%	
1-B/b (%)	Ys(cm)	(1-B/b) (%)	Ys(cm)	(1-B/b) (%)	Ys(cm)	(1-B/b) (%)	Ys(cm)
0,0	1,120	0,0	1,200	0,0	1,500	0,0	2,100
18,5	1,100	18,5	1,300	18,5	2,000	18,5	3,500
32,8	1,450	32,8	1,700	32,8	2,100	32,8	4,500
37,0	2,000	37,0	4,500	37,0	5,200	37,0	6,000

La contracción del cauce (1-B/b) y la profundidad máxima de socavación (Ys), fueron obtenidos del trabajo experimental en cada modelo físico ensayado en el laboratorio de recursos hídricos de la Universidad Nacional de

Cajamarca, los cuales fueron medidos en forma directa en el canal de pendiente variable para cuatro pendientes representativas (0,1%; 1%; 1,8% y 2,4%).

**Figura 5.** Profundidad de erosión “Ys” versus contracción cauce “1-B/b”.

La contracción del cauce para todas las condiciones de lecho no cohesivo, generan un incremento en la profundidad de socavación, pues los resultados obtenidos de los ensayos en

modelos físicos a escala reducida para contracciones del cauce natural, entre el 16% hasta 39% por la presencia de la estructura de captación, generan incrementos en la

profundidad de socavación del orden del 43% hasta 269% más que la profundidad de socavación al construir una estructura de captación sin contracción en el cauce.

Se puede notar en los resultados experimentales para los cuatro tipos de sedimentos que la profundidad de socavación está directamente relacionada con la contracción y pendiente del cauce, encontrándose que, a mayor contracción y pendiente, mayor es la profundidad de socavación; e inversamente proporcional al diámetro promedio del sedimento. Subhasish & Raikar (2006), cuando presenta sus resultados experimentales, encuentra que las ecuaciones de predicción de socavación en contracciones largas de Laursen, Lim y Gill, arrojan resultados extremos sobre o muy por debajo de los reales, ya que sus ecuaciones no hacen intervenir la pendiente del cauce.

Ghodshian, Mehraein & Ranjbar (2012), Investigaron el efecto de parámetros

$$\frac{Y_s \cdot \rho}{D_s \cdot \rho_s} = f\left(\frac{D_s \cdot \sqrt{g \cdot Y_n \cdot S}}{v}; \frac{Y_n \cdot S}{D_s}; \frac{B}{b}\right)$$

La data del modelamiento hidráulico obtenida en laboratorio fue procesada para dar valores

importantes que incluyen gradación de sedimentos en el agujero de socavación generado por la caída libre descendente, aplicando ecuaciones empíricas conocidas, como la de Veronese, Jeager, Schoklitsch, Eggenburger, Hartunge, Martins, Mason and Arumugam, Azar, Ghodshian y D'Agostino and Ferro, cuyos resultados muestran que existe una gran variabilidad de valores para la profundidad de socavación por lo que se planteó desarrollar nuevas ecuaciones predictivas de socavamiento considerando el efecto de la gradación de sedimentos, la cual está relacionada directamente con la pendiente del cauce aguas abajo de la poza de socavación.

Los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, fueron llevados a los prototipos para proceder a su generalización según las condiciones estudiadas, del análisis dimensional se llegó a determinar cinco números adimensionales, los cuales fueron relacionados por la ecuación:

numéricos a los números adimensionales intervinientes en la investigación.

Tabla 3. Valores numéricos para los parámetros adimensionales identificados en el proceso de la investigación.

CÓDIGO	$\frac{D_s \cdot \sqrt{g \cdot Y_n \cdot S}}{u}$	$\frac{Y_n \cdot S}{D_s}$	$\frac{B}{b}$	$\frac{Y_s \cdot \rho}{D_s \cdot \rho_s}$
E.LB-01	15141.706	0.008	1.000	119.955
E.LB-02	43710.341	0.066	1.000	149.944
E.LB-03	56248.942	0.110	1.000	159.940
E.LB-04	57458.735	0.114	1.000	299.888
E.LB-05	16119.577	0.009	0.763	149.944
E.LB-06	49452.605	0.085	0.763	199.925
E.LB-07	63161.064	0.138	0.763	399.850
E.LB-08	63523.021	0.140	0.763	599.775
E.LB-09	16354.912	0.009	0.840	279.895
E.LB-10	50219.358	0.087	0.840	309.884
E.LB-11	64240.819	0.143	0.840	389.861
E.LB-12	67715.768	0.159	0.840	649.756
E.LB-13	17484.136	0.011	0.610	409.846
E.LB-14	52452.409	0.095	0.610	449.831
E.LB-15	67376.339	0.157	0.610	589.779
E.LB-16	69056.805	0.165	0.610	719.730
E.LB-17	14304.790	0.010	1.000	214.024
E.LB-18	41050.746	0.084	1.000	236.553
E.LB-19	47896.657	0.113	1.000	337.933
E.LB-20	52387.112	0.136	1.000	551.957
E.LB-21	14513.630	0.010	0.986	236.553
E.LB-22	41777.364	0.087	0.986	259.082
E.LB-23	47696.657	0.113	0.986	551.957
E.LB-24	53748.043	0.143	0.986	574.486
E.LB-25	15515.724	0.012	0.878	292.875
E.LB-26	43193.946	0.093	0.878	349.197
E.LB-27	56050.216	0.156	0.878	551.957
E.LB-28	58878.031	0.172	0.878	642.073
E.LB-29	16273.028	0.013	0.841	360.462
E.LB-30	45235.719	0.101	0.841	563.222
E.LB-31	57950.760	0.167	0.841	754.717
E.LB-32	60092.139	0.179	0.841	788.510
E.LB-033	14337.650	0.008	1.000	50.994
E.LB-034	40189.286	0.059	1.000	71.392
E.LB-035	51410.308	0.097	1.000	122.387
E.LB-036	53086.338	0.104	1.000	244.773
E.LB-037	14840.878	0.008	0.771	61.193
E.LB-038	41976.341	0.065	0.771	91.790
E.LB-039	53919.586	0.107	0.771	214.176
E.LB-040	54730.452	0.110	0.771	428.353
E.LB-041	16029.980	0.009	0.757	107.088
E.LB-042	48470.103	0.086	0.757	120.347
E.LB-043	56317.171	0.117	0.757	418.154
E.LB-044	57860.392	0.123	0.757	530.342
E.LB-045	16702.857	0.010	0.738	122.387
E.LB-046	46930.975	0.081	0.738	163.182
E.LB-047	58616.770	0.126	0.738	428.353
E.LB-048	62260.975	0.143	0.738	591.536
E.LB-049	11762.360	0.008	1.000	134.172
E.LB-050	34215.203	0.070	1.000	143.756
E.LB-051	43768.235	0.114	1.000	179.695
E.LB-052	47945.699	0.137	1.000	251.572
E.LB-053	12206.378	0.009	0.815	131.776
E.LB-054	35736.614	0.076	0.815	155.735
E.LB-055	45904.512	0.126	0.815	239.593
E.LB-056	50539.205	0.152	0.815	419.287
E.LB-057	12843.655	0.010	0.672	173.705
E.LB-058	38569.955	0.089	0.672	203.654
E.LB-059	47945.699	0.137	0.672	251.572
E.LB-060	51787.274	0.160	0.672	539.084
E.LB-061	13647.145	0.011	0.630	239.593
E.LB-062	41265.088	0.102	0.630	539.084
E.LB-063	49903.466	0.149	0.630	622.941
E.LB-064	54197.259	0.175	0.630	718.778

Con la sistematización de los resultados obtenidos, aplicando una correlación lineal múltiple, nos permitió generar una ecuación empírica para estimar los efectos de la

contracción del cauce, lecho no cohesivo y pendiente del río en la profundidad de socavación (Y_s).

$$Y_s = \frac{D_s \cdot \rho_s}{\rho} (493,49 - 0,0062 \frac{D_s \cdot \sqrt{g \cdot Y_n \cdot S}}{u} + 4475,83 \frac{Y_n \cdot S}{D_s} - 360,38 \frac{B}{b})$$

Conclusiones

1. La profundidad máxima de socavación en la descarga de las estructuras de captación en estudio, se incrementa desde 43% hasta 269% para contracciones del cauce natural entre 16% hasta 39% siendo estos porcentajes variables según la concentración de sedimentos.
2. El lecho no cohesivo del prototipo está representado por mezclas de sedimentos con una gradación no uniforme (desde arenas finas hasta piedras pequeñas), dado que la concentración de sedimentos finos como son las arenas y gravas muestreadas oscilan entre el 30% y 60%, a partir de los experimentos, se encontró que generan un efecto aditivo en la profundidad de socavación, incrementándose ésta para mayores concentraciones de finos y viceversa.
3. La profundidad de socavación en las estructuras de captación está influenciada en forma directa por la pendiente del cauce del río aguas abajo, pues para diferentes condiciones de contracción de cauce al pasar de pendientes suaves del orden del 0.1% hasta pendientes fuertes del orden del 2.4%, la profundidad de socavación se incrementa en el orden del 75% hasta el 300%.
4. La contracción del cauce, el diámetro medio del lecho no cohesivo y pendiente del río tienen un efecto aditivo a la profundidad de socavación en la descarga de las estructuras de captación, correlacionándose numéricamente a partir de una correlación lineal múltiple.

Referencias bibliográficas

- Abdelhaleem, F. (2013). Effect of semi-circular baffle blocks on local scour downstream clear-overfall weirs. *Ain Shams Engineering Journal*, 4(4), 675-684.
- Amin, A. (2015). Physical model study for mitigating local scour downstream of clear over-fall weirs. *Ain Shams Engineering Journal*, 6(4), 1143-1150.
- Azamathulla, H., Deo, M., & Deolalikar, P. (2008). Alternative neural networks to estimate the scour below spillways. *Advances in Engineering Software*, 39(8), 689-698.
- Azamathulla, H., & Ghani, A. (2010). ANFIS-based approach for predicting the scour depth at culvert outlets. *Journal of pipeline systems engineering and practice*, 2(1), 35-40.
- Balachandar, R., & Kells, J. (1997). Local channel in scour in uniformly graded sediments: the time-scale problem. *Canadian journal of civil engineering*, 24(5), 799-807.
- Balachandar, R., Kells, J., & Thiessen, R. (2000). The effect of tailwater depth on the dynamics of local scour. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27(1), 138-150.
- Bazargan, J., & Kalantari, M. (2015). Presenting Relations for Estimate the Scour Depth Due to Free Falling Jets.
- Breusers, H. (1966). Conformity and time scale in two-dimensional local scour.
- Bormann, N., & Julien, P. (1991). Scour downstream of grade-control structures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(5), 579-594.
- Farhoudi, J., & Shayan, H. K. (2014). Investigation on local scour downstream of adverse stilling basins. *Ain Shams Engineering Journal* 5(2):361-375.
- Gendaszek, A., Magirl, C., Czuba, C, y Konrad, C. (2013). El tiempo de socavación y relleno en un río con grava medido con

- acelerómetros enterrados. *Revista de hidrología*, 495, 186-196.
- Ghodsian, M., Mehraein, M., & Ranjbar, H. (2012). Local scour due to free fall jets in non-uniform sediment. *Scientia Iranica*, 19(6), 1437-1444.
- Güven, A., & Günel, M. (2008). Prediction of scour downstream of grade-control structures using neural networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(11), 1656-1660.
- Hamidifar, H., Nasrabadi, M., & Omid, M. (2017). Using a bed sill as a scour countermeasure downstream of an apron. *Ain Shams Engineering Journal*.
- Johnston, A. (1990). Scourhole developments in shallow tailwater. *Journal of hydraulic research*, 28(3), 341-354.
- Liriano, S., & Day, R. (2001). Prediction of scour depth at culvert outlets using neural networks. *Journal of hydroinformatics*, 3(4), 231-238.
- Mason, P., & Arumugam, K. (1985). Free jet scour below dams and flip buckets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(2), 220-235.
- Martínez, E. (2001). *Hidráulica Fluvial: Principios y Práctica*. 1ª Edición. Madrid, España, Bellisco. 382 p.
- Maza, J. y Springall, R. (1968). *Modelos fluviales de fondo móvil y su calibración*. México, DF, Instituto de Ingeniería, 20 p.
- Mohamed, Y., Abdel-Aal, G., Nasr-Allah, T., & Shawky, A. (2016). Experimental and theoretical investigations of scour at bridge abutment. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 28(1), 32-40.
- Mossa, M. (1998). Experimental study on the scour downstream of grade-control structures. *Proc., 26th Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, 581-594.
- Nugroho, J., Achiari, H., & Harlan, D. (1998). Preliminary Study on Scouring at parallel pipelines river crossing. Research Division of Water Resources Engineering Institute Technology Bandung.
- Pagliara, S., & Palermo, M. (2017). Scour process caused by multiple subvertical non-crossing jets. *Water Science and Engineering*, 10(1), 17-24.
- Shayan, H., & Farhoudi, J. (2015). Local scour profiles downstream of adverse stilling basins. *Scientia Iranica. Transaction A, Civil Engineering*, 22(1), 1.
- Subhasish, D., & Raikar, R. (2006). Live-bed scour in long contractions. *International Journal of Sediment Research*, 21(2), 166-170.
- Tuna, M., & Emiroglu, M. (2011). Scour profiles at downstream of cascades. *Scientia Iranica*, 18(3), 338-347.
- Vásquez, L. (2016). *Influencia de la contracción del cauce en la profundidad de socavación en la descarga de la estructura de captación Huayrapongo en el río Cajamarquino*. Tesis de Maestría. Cajamarca Perú, U. N. C. 71 p.
- Zhang, S., Pang, B., & Wang, G. (2014). A new formula based on computational fluid dynamics for estimating maximum depth of scour by jets from overflow dams. *Journal of Hydroinformatics*, 16(5), 1210-1226.