

MODELADO A FONDO MOVIL DE AZUDES PARA PROTECCIONES DE PILAS DE PUENTES EN EL RÍO CUARTO, CÓRDOBA, ARGENTINA

Moya,G., Diaz,A., Rodriguez,A., Muratore,H., Gaspari,E., Martínez,R., Hillman,G., Corral, M., Castello, E. , Plencovich, G., Pozzi, C.

Laboratorio de Hidráulica. Universidad Nacional de Córdoba
Av. Velez Sarsfield 1601, ciudad Universitaria. CP: 5000. Córdoba
E-mail: gmoya@com.uncor.edu

RESUMEN

En el presente trabajo se presentan los resultados obtenidos por el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba, de los ensayos realizados sobre dos modelos físicos tridimensionales a fondo móvil de los azudes del Puente Carretero y Puente Ferroviario ambos emplazados en la ciudad de Río Cuarto.

Se detallan las metodologías e hipótesis utilizadas en la ejecución de los modelos físicos, calibración y verificación del funcionamiento de los mismos para los rangos de escenarios de modelación propuestos.

Se presentarán los resultados obtenidos de las modelaciones matemáticas que representan las características hidrodinámicas del flujo en las proximidades de la zona en estudio, siendo estos resultados útiles para la pre-calibración y calibración de los modelos físicos correspondientes.

Finalmente se presentarán las conclusiones derivadas de las observaciones del funcionamiento de la estructura y su entorno, entendiéndose por estructura al conjunto formado por el azud, terraplenes y protecciones proyectadas.

ABSTRACT

In this paper results of hydraulic (numerical and physical) models of two Rio Cuarto small dams downstream of Carretero and FFCC bridges are presented. The methodology and results details of physical movable bed models for the design conditions are included. Numerical results from hydrodynamic modelling of the river reach were used for estimation of boundary conditions and physical model pre calibration. Finally the results for each structure are summarised, including flow pattern, local erosion near piles and structure, and banks and bed protections.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se ha observado un continuo descenso generalizado del cauce natural del río Cuarto, lo cual ha comprometido la estabilidad de diversas estructuras emplazadas sobre el cauce del río. Un ejemplo de éste fenómeno lo constituyen los puentes Carretero y Ferroviario, que emplazados en la ciudad de Río Cuarto, presentan importantes descensos del lecho en las proximidades de las pilas. Ver Figura N° 1.



Figura 1: Descalce de las pilas del Puente Carretero por descenso del cauce del Río Cuarto.

Por esta razón, y aguas abajo de los puentes Carretero y Ferroviario, se ha proyectado la ejecución de dos azudes, denominados *Azud del Puente Carretero* y *Azud del Puente Ferroviario*, en correspondencia a los puentes que protegen. Estos azudes, proyectados a 145 y 27 m aguas abajo de los puentes Carretero y Ferroviario respectivamente, tienen como función principal la de restituir localmente la cota de fondo del lecho en las proximidades de las pilas de los puentes, protegiéndolas del descenso del río, y asegurando por lo tanto la estabilidad estructural de los puentes.

El azud denominado Azud del Puente Carretero tiene un vertedero de umbral fijo a cota 432,80 msnm, nivel hasta el cual se producirá el embanque y levantamiento del lecho, resguardando de esta manera la erosión de las pilas. El cuerpo principal del azud tiene un ancho de 161,80 m y 367,70 m incluyendo los terraplenes escalonados laterales, siendo la longitud del azud de 39,00 m. Ver Figura N° 2.

Si bien el volumen previsto de arena embancada en los primeros años, no tendrá suficiente densidad para aumentar la capacidad portante del pilote, se detendrá el proceso erosivo en la zona próxima del puente.



Figura 2: Planimetría del Azud del Puente Carretero.

En el caso del denominado Azud del Puente Ferroviario éste tiene el umbral del vertedero fijo a cota 427,10 msnm. El cuerpo principal del azud tiene un ancho de 144,10 m y 499,70 m incluyendo los terraplenes escalonados laterales, siendo la longitud del azud de 39,24 m,

provocando un embanque que levantará el lecho del río en la zona del puente, llegando hasta las proximidades del Puente Nuevo. Ver Figura N° 3.

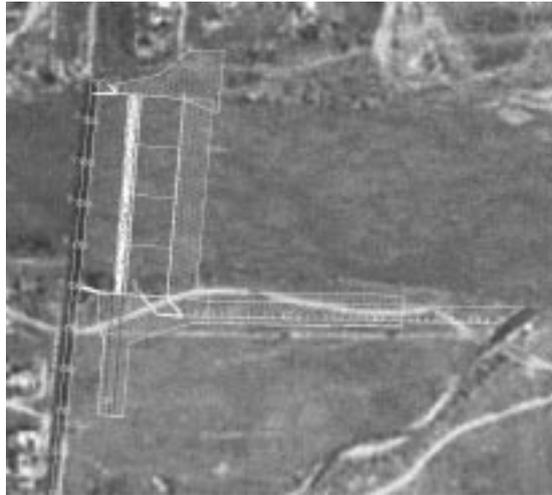


Figura 3: Planimetría del Azud del Puente Ferroviario.

Ambos azudes están formados por un cuerpo de hormigón armado, un vertedero flexible inflable y un cuenco amortiguador de hormigón armado. La estructura de este cuenco está formada por una losa alivianada y vigas de hormigón fundadas sobre pilotes, complementadas por protecciones transversales y longitudinales a la salida del cuenco dissipador.

Dada la cercanía presente entre las pilas de los puentes y los mismos azudes, principalmente en el caso del Azud del Puente Ferroviario, se genera un complejo mecanismo de *interacción hidromorfológica Pila-Azud*, de difícil cuantificación por métodos convencionales. Por esta razón se planteó la necesidad de desarrollar dos modelos físicos a fondo móvil que permitan cuantificar la interacción entre las estructuras, además de posibilitar el estudio y análisis del diseño hidráulico óptimo, que verifique un correcto desempeño para diferentes escenarios hidrológicos.

Objetivos

Los objetivos planteados sobre los estudios de los modelos físicos a fondo móvil de los azudes de la ciudad de Río Cuarto son:

- Cuantificación de la interacción hidromorfológica Pila-Azud para distintos escenarios hidrológicos y de sedimentación aguas arriba de cada azud;
- Verificación del comportamiento de las protecciones proyectadas aguas abajo tanto a la salida del azud, como en ambas márgenes por el ingreso de caudales provenientes de las planicies de inundación;
- Medición de las erosiones inmediatamente aguas arriba y aguas abajo del azud, en las pilas de los puentes y en el terreno próximo a ambas estructuras;
- Determinación de las presiones hidrodinámicas totales actuantes sobre las estructuras para diferentes escenarios hidrológicos;
- Determinación de la curva Altura – Descarga (H-Q) en ambas estructuras;
- Verificación del comportamiento hidrodinámico del cuenco dissipador y su resalto hidráulico para distintos escenarios hidrológicos;

Metodología

Para el desarrollo del trabajo se consideró la modelación de los modelos físicos para cuatro escenarios de caudales, 161, 700, 1900 y 2900 m³/s, pero dadas las grandes superficies de inundación involucradas para los escenarios de caudales mayores, y considerando las instalaciones disponibles en el laboratorio, conjuntamente con los requerimientos de semejanza recomendados por la bibliografía especializada, se construyeron cuatro modelos físicos, dos para cada azud, en escalas E_L 1:30 y 1:60, siendo estos, bidimensional fondo fijo y tridimensional a fondo móvil respectivamente.

La construcción de los modelos bidimensionales radica en la necesidad de analizar el comportamiento hidráulico de la estructura para caudales menores a 500 m³/s, no factibles de ser ensayados en los modelos tridimensionales por restricciones en la escala adoptada.

El modelo físico tridimensional del Azud del Puente Ferroviario representa un tramo de río de 582 m de longitud y 544 m de ancho, incluyendo al Puente Ferroviario, el Azud, protecciones y todas sus estructuras auxiliares. Ver Figura N° 4.

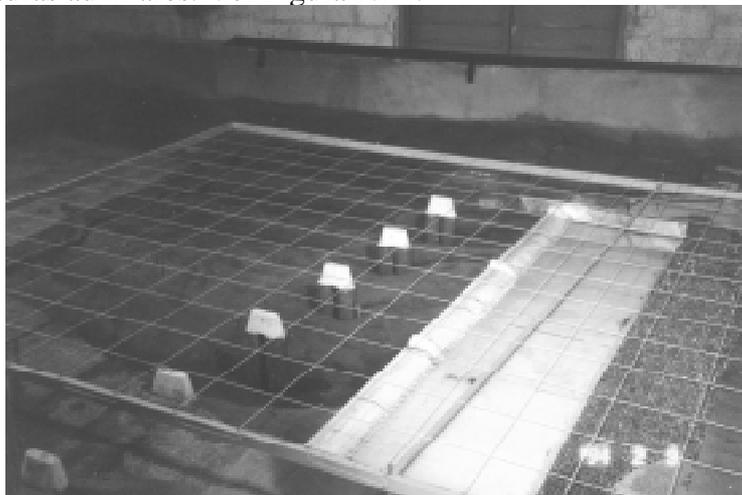


Figura 4: Modelo físico tridimensional del Azud del Puente Ferroviario.

En el caso del modelo físico del Azud del Puente Carretero, este representa un tramo de río de 582 m de longitud y 417 m de ancho, incluyendo al Puente Carretero, el Azud, protecciones y todas sus estructuras auxiliares. Ver Figura N° 5.



Figura 5: Modelo físico tridimensional del Azud del Puente Carretero.

Los modelos físicos ensayados, representan la realidad en sus características hidráulicas, las fronteras del modelo hidráulico en cada una de sus partes, así como el patrón de flujo conformado por líneas de corrientes, responde a la similitud geométrica con el prototipo. La semejanza de los campos de velocidad y aceleraciones conducen a satisfacer la semejanza del campo de fuerzas, de inercia, de gravedad, etc.

En estudios sobre estructuras de control, donde el escurrimiento es a pelo libre, la fuerza que domina el fenómeno hidráulico sobre vertederos, es la gravedad, siendo las otras fuerzas, tales como viscosidad, capilaridad, elasticidad, etc. despreciables en sus efectos tomando ciertas precauciones.

Según estas consideraciones, para el desarrollo de los modelos físicos tridimensionales se ha seleccionado la *Ley de Semejanza de Froude* que satisface las características principales del modelo, respetando la condición de similitud dinámica para el caso de flujo en modelo y prototipo exclusivamente gobernado por la gravedad.

En el flujo de los fluidos reales (viscosos), la fricción interna actúa siempre, simultáneamente con la gravedad, pero si el modelo es geoméricamente semejante, igualmente que las condiciones de contorno, entonces la semejanza está asegurada no sólo entre las fuerzas debidas a la gravedad sino también, en un amplio rango, las resistencias debidas a la fricción.

Para evitar el efecto negativo de ésta fuerzas internas, se ha asegurado el cumplimiento de diversas normativas recomendadas. Entre ellas tenemos:

- Cumplir con igual rango de *Nº de Reynolds*: sea de fronteras hidráulicamente rugosas, lisas o de transición;
- El calado del flujo en el modelo *h* debe ser *mayor a 25mm* ($h > 25\text{mm}$), evitándose así los efectos de tensión superficial

A partir de esta igualdad es posible deducir las relaciones clásicas de escalas para otras magnitudes de interés, expresadas en función de la escala de longitud (EL):

Tabla N° 1: Relación escalas de modelación y la escala de longitud.

Magnitud Física	Escala	
Longitud	E_L	60
Área	$E_A = E_L^2$	3600
Velocidad	$E_V = E_L^{1/2}$	7,75
Tiempo	$E_T = E_L^{1/2}$	7,75
Caudal	$E_Q = E_L^{5/2}$	27885,5
Coef. Manning	$E_n = E_L^{1/6}$	1,98
Presión	$E_P = E_L$	60
Fuerza	$E_F = E_L^3$	$2,16 \times 10^5$

Los modelos respetan semejanza de rugosidad en sus contornos rígidos tanto en cauce principal, como en la planicie de inundación, mediante calibración *ad hoc*. La calibración de rugosidad del cauce y la planicie se ha realizado ajustando los valores del tirante medidos en el modelo físico sin azud, a los simulados numéricamente con los resultados derivados del modelo matemático unidimensional de flujo (HEC-RAS) asumiendo un valor equivalente al coeficiente de Manning de 0,027 para el cauce y tres veces su valor para la planicie de inundación. (Estos valores son usualmente recomendados por el estado del arte ante falta de

mediciones directas en condiciones de crecida).

La condición de contorno de aguas abajo se ha impuesto mediante una compuerta que permite ajustar los niveles medidos aguas abajo del azud a los simulados para el caudal de diseño de $700 \text{ m}^3/\text{s}$ con el modelo matemático unidimensional, el cual ha sido recalibrado considerando las características tridimensionales observadas en los modelos físicos.

Las condiciones de contorno de aguas arriba se materializaron mediante un canal transversal aquietador con ingreso inferior y deflectores de flujo a nivel del cauce, cuya separación y orientación permitió reproducir el patrón simulado previamente mediante el modelo matemático bidimensional de flujo (RMA-2)

El modelo respeta rigurosamente semejanza de densidades para las protecciones del cauce principal, utilizando geotextil y piezas de vidrio, que simultáneamente satisfacen la altura de rugosidad de los bloques del prototipo.

El sedimento utilizado en el área central a fondo móvil es arena natural cuasi uniforme, (lavada y tamizada) con d_{50} cercano a $0,57 \text{ mm}$, y una densidad relativa de $2,65$. La profundidad del cuenco a fondo móvil es de $0,5 \text{ m}$ (a escala $1:60$ equivale a 30 m) es suficientemente mayor al espesor de lecho activo estimado para el prototipo. Estas consideraciones permiten analizar adecuadamente fenómenos de erosión local (no erosión general ni procesos de transporte de sólido).

Los ensayos se realizaron con agua clara, sin alimentación en el transporte de sedimentos, por ser objeto de estudio las erosiones locales.

Los caudales de ensayo se miden en un vertedero triangular, y se mantienen el tiempo necesario para conocer el estado final de evolución del fondo, de manera de conocer las erosiones locales máximas esperables.

La terminación y control de calidad de la geometría y textura (extremadamente lisa cumpliendo la escala de Manning) de los azudes, perfil de vertedero, dientes, como así también de las pilas, cabezales y pilotes fue altamente rigurosa para garantizar la semejanza geométrica.

Como se hubiera comentado, el lecho del cuenco, fue simulado a fondo móvil con material granular para poner en evidencia las erosiones producidas en las estructuras ensayadas. Para ello es necesario el estudio de escalas correspondientes, teniendo en cuenta el hecho de interés fundamentalmente los efectos de erosión local y no de transporte de sólido en general.

Análisis de la similitud del sedimento

A efectos de determinar los parámetros fundamentales de similitud, se detallan las variables específicas, y se ampliará posteriormente el análisis dimensional.

- Las características del material del fondo, pueden ser representadas por tamaños característicos de su curva granulométrica. Para este análisis se considerará como parámetro característico $d_s=d_{50}$ (tamaño de la malla que permite pasar el 50% de la muestra).

- Las características dinámicas del escurrimiento en cuanto a su acción sobre el lecho pueden resumirse en dos variables fundamentales, la velocidad de corte en el lecho v^* , que tiene en cuenta la tensión tangencial τ ejercida contra el borde sólido.

$$v^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} = \sqrt{g \cdot h \cdot i} \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde:

i = pendiente

g = aceleración de la gravedad.

h = tirante con el que escurre el agua sobre el fondo granular .

- La naturaleza del fluido, dada por la capacidad de transmitir cantidad de movimiento, e interpretada por la difusividad de cantidad de movimiento γ (*viscosidad cinemática*).
- Las fuerzas de masa (acciones internas con atracción, que pueden considerarse aplicadas en el centro de gravedad de las partículas) actuantes se resumen en la gravedad relativa.

$$\frac{g \cdot (\gamma_s - \gamma)}{\gamma} = g \cdot (s - 1) \quad \text{donde } s = \frac{\rho_s}{\rho} \quad (\text{Ecuación 2})$$

que aparece en todos los casos de problema de dos fases, pues tiene en cuenta los pesos sumergidos. Luego la función que interpreta el fenómeno de iniciación de arrastre de partículas sólidas sobre el lecho resulta:

$$\phi(d_s, v_*, h, \gamma, g(s-1)) \quad (\text{Ecuación 3})$$

y por definición ya existe un parámetro adimensional a priori

$$s = \frac{\rho_s}{\rho} = \pi_4 \quad (\text{Ecuación 4})$$

que deberá agregarse a los que resulten del análisis dimensional. Si se recuerda que con cinco variables y tres dimensiones principales, se determinarán tres nuevos parámetros adimensionales, y se eligen como variables repetidas d_s y v^* resulta:

$$\pi_1 = \frac{v_* \cdot d_s}{\gamma} = R_* \quad (\text{Ecuación 5})$$

$$\pi_2 = \frac{v_*^2}{g(s-1) \cdot d_s} = Y \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$\pi_3 = \frac{d_s}{h} = Z \quad (\text{Ecuación 7})$$

y con el antedicho

$$\pi_4 = \frac{\rho_s}{\rho} = S \quad (\text{Ecuación 8})$$

resuelven el problema. R_* es denominado *Número de Reynolds de Corte de Grano*, y tiene en cuenta la influencia de la capa límite en el fenómeno de arrastre. De acuerdo con la curva de

Shields, solo puede despreciarse cuando, $R_p^* > R_m^* > 70$, el parámetro “Y” no depende mas de R^* . El parámetro de movilidad del grano “Y” es sin duda el más importante, pues involucra las acciones externas sobre la masa del grano sólido, es también llamado *Número de Froude de Corte de Grano*.

$$Y = \frac{v_*^2}{g(s-1)ds} \quad (\text{Ecuación 9})$$

La relación d_s/h (Ecuación 7) implica que la escala de diámetros debe coincidir con la de alturas líquidas.

$$E_d/E_h=1, E_d=E_h \quad (\text{Ecuación 10})$$

El incumplimiento de esta condición trae aparejada una distorsión en las formas de fondo (dunas, rizos, bancos), que inciden en la resistencia al escurrimiento. En cuanto al número adimensional π_4 que es la relación de masa específica “s”, tiene en cuenta los fenómenos de inercia. Si en un modelo se prevén grandes aceleraciones y desaceleraciones del escurrimiento, será preferible mantener en él la misma relación “s” que la del prototipo, es decir una única escala de densidades.

El incumplimiento de las cuatro condiciones fijadas, en forma simultánea, lleva como única solución a la imposibilidad de realizar el modelo ($E_L=1$).

Por ello en cada caso habrá que analizar cuales son los parámetros cuya igualdad entre prototipo y modelo puedan obviarse.

A efectos de resolver el caso planteado se recuerda que R^* podrá ser despreciada para la semejanza, cuando

$$R_p^* > R_m^* > 70 \quad (\text{Ecuación 11})$$

En este caso

$$Y_p=Y_m \quad (\text{Ecuación 12})$$

lleva a

$$E_{v^*}^2=E_{(s-1)} E_{ds} \quad (\text{Ecuación 13})$$

Si $E_s=1$, necesariamente $E_{(s-1)}=1$, se obtiene

$$E_{v^*}^2=E_{ds} \quad (\text{Ecuación 14})$$

y como

$$v^*=\sqrt{\frac{\tau}{\rho}} = \sqrt{g \cdot h \cdot i} \quad (\text{Ecuación 15})$$

$$E_{v^*} = \sqrt{E_g \cdot E_L \cdot E_i} \quad (\text{Ecuación 16})$$

$$E_{v^*}=E_L^{1/2} \quad (\text{Ecuación 17})$$

de donde se verifica que la escala de diámetros coincide con la de longitudes

$$E_{ds}=E_L=1:60 \quad (\text{Ecuación 18})$$

De la observación del proceso de erosión local aguas abajo de estructuras de disipación, surge

que sólo son importantes los torbellinos de grandes dimensiones y bajas frecuencias. Es decir que la macroturbulencia del flujo es la principal responsable del fenómeno. Como la viscosidad no tiene influencia apreciable sobre estos remolinos el proceso en general estará bien simulado si se asegura que el modelo responde a la estructura de la turbulencia del prototipo.

La escala de diámetro es obtenida sobre la base del criterio de iniciación de arrastre, lo que implica que en prototipo y modelo se producirá el movimiento inicial del material del fondo granular para condiciones homólogas de escurrimiento. Esto resulta importante por la eventual formación de barras del material erosionado aguas abajo de la fosa de erosión cuya estabilidad resultará así adecuadamente interpretada.

Por otra parte, el diámetro del grano en modelo no resulta un factor decisivo en el estudio de erosión local a tiempo indefinido. Diversos autores marcan la independencia entre la profundidad máxima de erosión y el tamaño del material del lecho. El diámetro mínimo resulta de satisfacer la condición de evitar en el modelo la generación de rizos parásitos. Para ello debe cumplirse:

$$Dx = d_{\min} \left(\frac{g(s-1)}{\gamma^2} - \right)^{1/3} \geq 15 \quad (\text{Ecuación 19})$$

que para $s=2.65$ y $\gamma = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ lleva al valor $d_{\min}=0,6\text{mm}$. A pesar de lo expuesto se considera que una proporción de material inferior al calculado es admisible, siempre que se mantenga el diámetro d_{50} mayor que ese valor.

Por último el diámetro d_{90} es el utilizado para computar la rugosidad del lecho. Los efectos de rozamiento son productos de causas bien diferentes: la variación de la geometría del río (meandros bifurcaciones, cambios de sección), la presencia de obstáculos naturales o artificiales (vegetación de márgenes, pilas de puentes etc.), la existencia de formas de fondo (dunas, rizos, etc.) y la rugosidad proveniente de los granos que conforman el lecho del río. Este último efecto puede ser tenido en cuenta a partir de una expresión tipo Stricler.

$$n = \frac{d_{90}^{1/6}}{\varphi} \quad (\text{Ecuación 20})$$

que teniendo en cuenta la relación antes mencionada se obtiene :

$$E_{d_{90}} = E_L \quad (\text{Ecuación 21})$$

Adoptando para el material del modelo el mismo peso específico del prototipo.

Modelación matemática del tramo

Previamente a la construcción y ensayos sobre los modelos físicos, se desarrollaron modelos matemáticos uni y bidimensionales con la finalidad de calibrar diversos parámetros y características hidráulicas de los modelos físicos, entre ellos podemos nombrar:

- *Modelo unidimensional de flujo (HEC-RAS 3.1);*
- *Modelo bidimensional de flujo (RMA-2);*
- *Modelo unidimensional de erosión generalizada (HEC-6).*

Modelo unidimensional de flujo

El U.S. Army Corps of Engineers River Analysis System (HEC-RAS) es un software que permite la modelación hidráulica e hidrodinámica unidimensional de flujo permanente e impermanente en canales naturales y artificiales a superficie libre. El mismo fue desarrollado por el Hydrologic Engineering Center (HEC), una división del Institute for Water Resources (IWR), U.S. Army Corps of Engineers. HEC-RAS supersede al software HEC-2, el cual es un modelo unidimensional que permite el cálculo del perfil del flujo permanente.

Para este modelo es requerida información sobre la topografía de la zona a estudiar, una estimación de los niveles de rugosidad presente en el cauce y planicies, infraestructura presente, la cual impacta sobre los patrones de flujo del río, además de los escenarios de caudales a modelar. Las principales características del modelado unidimensional del río IV son:

- Análisis del comportamiento hidráulico del río en un tramo de 14,5 Km;
- Incorporación de 5 puentes en tramo analizado;
- Utilización de una topografía detallada en las proximidades de los azudes, y más general en la región restante;
- Simulación el comportamiento de los azudes, tanto en su sección vertedora, como en el cuenco de disipación, aplicando una discretización seccional en detalle de la geometría de los mismos.

La rugosidad del río se estableció a partir de un número de Manning de $0,027$ para el cauce principal y tres este valor para las planicies de inundación. Los resultados de esta modelación son utilizados para la calibración de los modelos bidimensionales de flujo, unidimensionales de erosión y para la calibración de los modelos físicos bidimensionales y tridimensionales. Cabe destacar que este modelo, al igual que los otros modelos matemáticos y físicos, fue continuamente recalibrado de manera de considerar aspecto bidimensionales y tridimensionales de flujo, mejorando la representatividad de los resultados obtenidos.

Modelo bidimensional de flujo

Para una mejor representatividad hidrodinámica de los modelos físicos tridimensionales fue necesario reproducir a la entrada de los mismos, los patrones de flujo (dirección y velocidad) propios de la sección, considerando la influencia del tramo de río ubicado aguas arriba de la sección analizada.

Para establecer éstas características en cada escenario de caudal analizado, las cuales se resumen en la dirección de los patrones de flujo y caudales relativos transportados en distintos tramos del ancho del río, se desarrolló un modelo bidimensional de flujo, utilizando los datos topográficos resultantes de la modelación digital de terreno, e hidrológicos previstos.

Dentro de las limitaciones del programa utilizado (RMA-2 v4.32) se destaca la imposibilidad de modelar flujos críticos y supercríticos, los cuales se desarrollan sobre el coronamiento y cuenco disipador respectivamente, estableciéndose como sección de control aguas abajo del modelo, la asociada al cuerpo vertedor, cuyo funcionamiento hidráulico se obtuvo a través de la curva Altura – Descarga establecida por el modelo físico bidimensional correspondiente.

El programa mencionado, es un modelo numérico hidrodinámico en elementos finitos bidimensional promediado en la vertical, que calcula las cotas de la superficie libre y las componentes horizontales de velocidad para flujo subcrítico en campos bidimensionales de flujo. RMA-2 calcula la solución por elementos finitos de las ecuaciones de Navier – Stokes bajo la forma de Reynolds para flujos turbulentos. Las pérdidas friccionales se estiman a través de la ecuación de Manning, mientras que para caracterizar la turbulencia se utilizan coeficientes de viscosidad de remolino. Se pueden analizar problemas tanto en flujo permanente como impermanente.

En las tablas siguientes se presenta un resumen de los datos obtenidos de la modelación matemática bidimensional del tramo de río en las proximidades del Azud del Puente Carretero. En estas tablas se observan, para los caudales de 700, 1900 y 2900 m³/s las velocidades y direcciones de los vectores de flujo, conjuntamente con los caudales parciales transportados en todo el ancho de río.

Tabla N° 2: Resultados de la modelación bidimensional para Q: 700 m³/s.

	Coordenadas		Progr. (m)	Vel X (m/s)	Vel Y (m/s)	Vel (m/s)	Dir. Rel. (°)	Prof (m)	Cota (msnm)	Qi (m ³ /s)	Q Rel (m ³ /s)
	X	Y									
MI1	4374649	6336363	0.00	0.00	0.00	0.000		0.00	435.84		3.84
	4374642	6336359	7.91	0.00	0.00	0.000		0.00	435.76	0.00	0.5%
	4374636	6336354	15.41	0.00	0.00	0.000		0.00	435.67	0.00	
	4374630	6336348	23.89	0.00	0.00	0.000		0.00	435.15	0.00	
	4374625	6336342	32.03	-0.28	0.40	0.485	79.28	0.35	434.97	0.69	
	4374618	6336336	40.88	0.28	-0.59	0.652	69.87	0.74	434.94	3.14	
Cauce	4374612	6336331	49.02	1.10	-1.25	1.667	85.85	1.13	434.91	12.66	694.68
	4374608	6336325	56.12	1.52	-1.95	2.472	82.31	1.28	434.86	21.16	98.7%
	4374603	6336320	63.23	1.77	-2.22	2.843	82.98	1.44	434.81	27.47	
	4374598	6336314	71.01	1.54	-2.70	3.111	74.19	1.59	434.77	36.60	
	4374592	6336309	78.44	1.76	-2.81	3.313	76.58	1.74	434.73	40.98	
	4374587	6336303	86.25	1.78	-2.69	3.227	77.86	1.85	434.76	45.24	
	4374582	6336298	94.03	1.64	-2.73	3.182	75.45	1.96	434.78	47.14	
	4374576	6336292	101.81	1.67	-2.53	3.031	77.86	1.95	434.81	46.09	
	4374571	6336286	109.62	1.65	-2.43	2.939	78.60	1.94	434.83	44.69	
	4374566	6336281	117.39	1.56	-2.48	2.927	76.55	2.06	434.84	45.58	
	4374560	6336275	125.17	1.68	-2.44	2.966	79.04	2.18	434.84	48.91	
	4374555	6336270	132.95	1.69	-2.53	3.040	78.24	2.12	434.83	50.81	
	4374550	6336264	140.38	1.68	-2.55	3.049	77.86	2.06	434.83	47.34	
	4374544	6336258	148.52	1.69	-2.54	3.047	78.15	2.06	434.82	51.08	
	4374539	6336253	156.30	1.60	-2.41	2.893	78.12	2.06	434.81	46.37	
4374533	6336247	164.08	1.48	-2.15	2.609	78.98	2.03	434.80	41.50		
4374528	6336242	171.86	1.00	-1.30	1.644	82.04	2.00	434.79	25.74		
4374521	6336234	182.12	0.56	-0.71	0.902	82.42	1.32	434.78	15.33		
MD1	4374514	6336227	192.02	0.06	-0.54	0.540	51.24	0.64	434.78	5.22	5.22
	4374507	6336220	202.28	0.00	0.00	0.000		0.00	434.48	0.00	0.7%
	4374500	6336212	212.53	0.00	0.00	0.000		0.00	434.81	0.00	
	4374493	6336205	222.43	0.00	0.00	0.000		0.00	434.76	0.00	
MD2	4374486	6336198	232.69	0.00	0.00	0.000		0.00	434.71	0.00	0.00
	4374478	6336190	243.30	0.00	0.00	0.000		0.00	434.64	0.00	0.0%
	4374471	6336183	253.20	0.00	0.00	0.000		0.00	434.56	0.00	
	4374464	6336176	263.46	0.00	0.00	0.000		0.00	434.56	0.00	
	4374457	6336168	273.72	0.00	0.00	0.000		0.00	434.56	0.00	
	4374450	6336161	283.62	0.00	0.00	0.000		0.00	434.92	0.00	
	4374443	6336154	293.88	0.00	0.00	0.000		0.00	435.27	0.00	

Tabla N° 3: Resultados de la modelación bidimensional para Q: 1900 m³/s.

	Progresiva Modelo	Coordenadas		Progr. (m)	Vel X (m/s)	Vel Y (m/s)	Vel (m/s)	Dir. Rel. (°)	Prof (m)	Cota (msnm)	Qi (m²/s)	Q Rel (m²/s)
		X	Y									
MI1		4374653	6336375	0.00	0.00	0.00	0.000		0.00	436.31		47.42
		4374646	6336367	10.63	0.00	0.00	0.000		0.00	436.01	0.00	2.5%
		4374639	6336358	21.64	0.32	-0.19	0.373		0.56	436.26	1.16	
		4374632	6336350	32.27	0.39	-0.38	0.546	89.66	1.11	436.27	4.87	
		4374625	6336342	42.90	0.67	-0.85	1.085	81.62	1.66	436.28	15.98	
		4374619	6336337	50.68	1.16	-1.31	1.751	84.83	2.07	436.27	25.41	
Cauce	0.00	4374614	6336331	58.11	1.51	-1.80	2.344	83.42	2.49	436.27	39.72	1750.10
		4374609	6336325	66.25	1.79	-2.38	2.978	80.40	2.65	436.23	62.28	91.5%
		4374603	6336320	74.03	2.11	-2.83	3.531	80.23	2.82	436.19	75.12	
		4374598	6336314	81.81	2.36	-3.22	3.994	79.74	2.98	436.16	90.07	
		4374593	6336309	89.24	2.55	-3.50	4.332	79.48	3.14	436.13	98.58	
		4374587	6336303	97.02	2.66	-3.62	4.496	79.77	3.24	436.14	111.59	
		4374582	6336298	104.80	2.73	-3.73	4.620	79.72	3.34	436.16	118.15	
		4374576	6336292	112.58	2.77	-3.81	4.715	79.50	3.29	436.14	121.47	
		4374571	6336286	120.39	2.76	-3.92	4.791	78.67	3.24	436.13	122.11	
		4374566	6336281	128.16	2.73	-3.85	4.723	78.79	3.39	436.16	121.72	
		4374560	6336275	135.94	2.73	-3.76	4.647	79.37	3.54	436.20	125.13	
		4374555	6336270	143.72	2.68	-3.79	4.641	78.67	3.46	436.17	126.24	
		4374550	6336264	151.15	2.61	-3.73	4.548	78.43	3.38	436.15	115.58	
		4374544	6336258	159.29	2.45	-3.50	4.272	78.48	3.40	436.16	117.83	
		4374539	6336253	167.07	2.20	-3.18	3.866	78.20	3.41	436.16	102.41	
	4374533	6336247	174.85	1.85	-2.73	3.298	77.49	3.38	436.15	87.12		
	4374528	6336242	182.63	1.43	-2.05	2.500	78.29	3.34	436.13	65.33		
	4374521	6336234	192.89	0.90	-1.34	1.612	77.45	2.66	436.13	49.66		
MD1		4374514	6336227	202.79	0.67	-0.99	1.195	77.32	1.99	436.13	27.51	64.35
		4374507	6336220	213.05	0.51	-0.75	0.905	77.98	1.66	436.14	16.93	3.4%
		4374500	6336212	223.30	0.35	-0.65	0.734	71.96	1.33	436.14	11.27	
		4374493	6336205	233.20	0.30	-0.57	0.642	71.19	1.39	436.15	8.64	
MD2		4374486	6336198	243.46	0.25	-0.55	0.607	67.59	1.44	436.15	8.79	50.35
		4374478	6336190	254.07	0.21	-0.55	0.588	64.49	1.51	436.14	9.18	2.6%
		4374471	6336183	263.97	0.19	-0.52	0.549	63.92	1.58	436.14	8.38	
		4374464	6336176	274.23	0.17	-0.46	0.487	64.29	1.58	436.14	7.88	
		4374457	6336168	284.49	0.16	-0.39	0.417	65.60	1.58	436.14	6.76	
		4374450	6336161	294.39	0.16	-0.36	0.398	67.07	1.22	436.14	5.52	
		4374443	6336154	304.65	0.14	-0.33	0.360	65.89	0.86	436.13	3.84	

Tabla N° 4: Resultados de la modelación bidimensional para Q: 2900 m³/s.

	Progresiva Modelo	Coordenadas		Progr. (m)	Vel X (m/s)	Vel Y (m/s)	Vel (m/s)	Dir. Rel. (°)	Dir. Media (°)	Prof (m)	Cota (msnm)	Qi (m²/s)	Q Rel (m²/s)
		X	Y										
MI1	-0.98	4374653	6336375	0.00	0.16	-0.34	0.37	68.17	65.58	0.68	436.99		96.23
		4374646	6336366	11.01	0.16	-0.38	0.41	66.25		0.98	436.98	3.77	3.3%
		4374639	6336358	21.64	0.03	-0.47	0.47	46.65		1.27	436.97	5.60	
		4374632	6336350	32.27	0.65	-0.44	0.79			1.81	436.97	12.92	
		4374625	6336342	42.90	-0.76	-0.06	0.77			2.35	436.97	16.92	
		4374619	6336337	50.68	1.77	-2.28	2.88	81.25		2.74	436.94	57.02	
Cauce	0.00	4374614	6336331	58.11	2.60	-3.06	4.01	83.79	77.32	3.13	436.91	87.51	2620.25
		4374609	6336326	65.18	2.24	-3.46	4.12	76.35		3.33	436.91	93.99	90.0%
		4374604	6336321	72.62	2.82	-4.17	5.04	77.55		3.54	436.91	128.51	
		4374598	6336315	81.10	2.97	-4.42	5.32	77.38		3.73	436.91	163.97	
		4374593	6336309	89.24	2.57	-4.34	5.04	74.14		3.91	436.90	156.69	
		4374587	6336303	97.02	2.96	-4.36	5.27	77.59		4.07	436.97	163.58	
		4374582	6336298	104.80	2.66	-4.14	4.92	76.15		4.22	437.04	158.46	
		4374576	6336292	112.58	2.98	-4.35	5.27	77.86		4.12	436.98	170.91	
		4374571	6336286	120.39	2.73	-4.46	5.23	74.94		4.03	436.92	166.31	
		4374564	6336280	129.94	2.77	-4.36	5.17	75.90		4.19	436.96	202.82	
		4374560	6336275	135.96	3.32	-4.08	5.26	82.61		4.34	437.00	135.06	
		4374555	6336270	143.74	2.89	-4.45	5.31	76.43		4.29	437.01	178.23	
		4374550	6336264	151.17	2.67	-4.21	4.99	75.82		4.24	437.01	158.08	
		4374544	6336258	159.31	2.83	-4.25	5.11	77.18		4.20	436.96	175.27	
		4374539	6336253	167.09	2.82	-4.39	5.22	76.18		4.15	436.90	169.32	
	4374533	6336247	174.87	2.80	-4.08	4.95	77.91		4.12	436.89	159.11		
	4374528	6336242	182.64	1.78	-2.72	3.25	76.72		4.08	436.87	103.74		
	2.23	4374521	6336235	192.20	0.76	-1.13	1.36	77.19		3.41	436.88	48.69	
MD1		4374515	6336228	201.75	0.65	-0.97	1.16	77.27	73.16	2.75	436.89	34.17	101.24
		4374507	6336220	212.36	0.48	-0.85	0.97	72.99		2.40	436.88	26.55	3.5%
		4374500	6336212	223.32	0.46	-0.85	0.97	72.02		2.06	436.87	23.71	
		0.68	4374493	6336205	233.22	0.37	-0.73	0.81	70.35		2.12	436.88	16.82
MD2		4374486	6336198	243.48	0.29	-0.66	0.72	67.03	62.78	2.17	436.88	15.73	93.62
		4374478	6336190	254.09	0.24	-0.70	0.73	62.20		2.24	436.88	17.19	3.2%
		4374471	6336183	263.99	0.24	-0.68	0.73	63.13		2.31	436.87	16.33	
		4374464	6336176	274.25	0.23	-0.59	0.63	64.73		2.31	436.87	15.04	
		4374457	6336168	284.51	-0.01	-0.46	0.46			2.32	436.88	10.89	
		4374450	6336161	294.40	0.08	-0.44	0.45	53.81		1.96	436.87	9.56	
		1.19	4374443	6336154	304.66	0.19	-0.45	0.49	65.77		1.60	436.87	8.89

En las figuras siguientes se presentan gráficamente dos de las soluciones establecidas por la modelación matemática bidimensional para cada azud y para un caudal de 2900 m³/s.

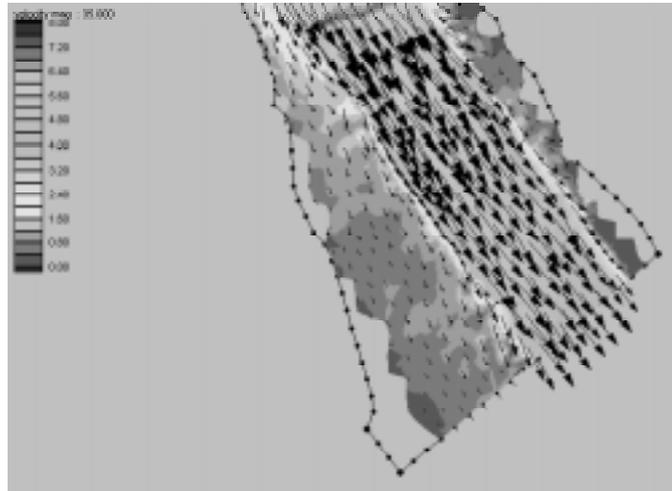


Figura 6: Modelo del azud del Puente Carretero. Vectores de Velocidad para caudal de 2900 m³/s.

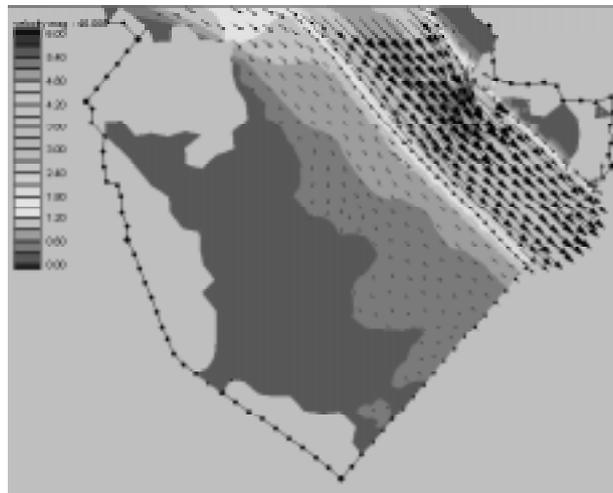


Figura 7: Modelo del azud del Puente Ferroviario. Vectores de Velocidad para caudal de 2900 m³/s.

Modelo unidimensional de erosión

En esta sección se evaluará la erosión general del tramo en estudio sin la presencia de obras de ingeniería, analizándose posteriormente el comportamiento del tramo de río con la implementación de las obras de los azudes. Además para la ocurrencia de eventos extremos se estima la erosión local al pie del cuenco de los azudes, la erosión local en las pilas de los puentes y la sedimentación aguas arriba de los azudes. Para la facilidad en su comprensión se desarrolla el trabajo en las siguientes etapas:

- Erosión general del cauce sin la presencia de obras de ingeniería, es decir se utilizará la geometría del cauce en su estado natural. Para el cumplimiento del objetivo planteado se utilizarán las herramientas HEC-6 y planilla de Excel con fórmulas semiempíricas planteadas a partir del caudal formativo del tramo analizado.
- Sedimentación aguas arriba de los azudes para verificar los resultados esperados en la modelación física del cauce. Para la estimación del nivel del lecho se utilizó la simulación numérica aportada por HEC-6, considerando un caudal de régimen permanente establecido como formativo.
- Procesos de erosión local tanto al pie del cuenco de los azudes como en las proximidades de las pilas de los puentes, evaluando la ocurrencia de los eventos extremos. La estimación de fenómenos locales se realiza con el modelo ELEHCA y se corroboran sus resultados con fórmulas empíricas.

Modelo HEC-6

El programa HEC-6 (modelo unidimensional de transporte de sedimentos) estima la erosión o sedimentación a fondo móvil en períodos de tiempo regulares (típicamente en años), utilizando datos geométricos o topográficos de las secciones transversales del tramo de estudio, propiedades de los sedimentos (granulometría, d_{50} , etc.), distintas ecuaciones de capacidad de transporte y datos hidrológicos (caudales, hidrogramas, temperatura del agua y duración del evento).

En cada sección se computan las variables hidráulicas como elevación de la superficie del agua, línea de energía, velocidad del flujo, profundidad que se determinan a través de formulaciones empíricas la capacidad de transporte de sedimentos. El modelo HEC-6 combina las ecuaciones hidrodinámicas de régimen permanente (HEC-2/HEC-RAS) con las ecuaciones de transporte sólido, realizando el balance en cada sección transversal del tramo analizado. HEC-6 resuelve la hidrodinámica mediante la ecuación de energía unidimensional, utilizando para las pérdidas friccionales la ecuación de Manning e incorporando las pérdidas por contracción ó expansión. La condición de borde aguas abajo se puede especificar con una relación altura-caudal de la sección transversal ó por la elevación de la superficie del agua.

Las expresiones que cuantifican el transporte de sedimentos son en primer lugar una ecuación de transporte (Meyer-Peter-Muller, Yang, Chang, Laursen, etc) combinada con la ecuación de continuidad del sedimento.

Se deben además conocer las condiciones del cauce para limitar los sectores expuestos a la erosión de la sección, como así también la máxima profundidad de erosión por la presencia de material no degradable dado que la erosión y depositación sólo pueden ocurrir entre los límites del fondo móvil.

El tramo inicial de estudio comprendía 14 Km, pero por razones operativas se redujo a aproximadamente 5 Km (desde Prog. 7500 a Prog.11500) tomando 700 m de la zona de influencia aguas abajo del azud del Puente Ferroviario y 1200 m aguas arriba del Puente Carretero teniendo en cuenta los resultados de la simulación hidráulica realizada con HEC-RAS, los cuales verificaban la existencia de flujo uniforme en estas dos secciones límites.

Como condición de borde en la sección aguas abajo se utilizó la relación altura - caudal generada por el modelo HEC-RAS considerando los distintos caudales de proyecto (161, 700, 1900, 2900 m^3/s).

Para determinar la capacidad de transporte del río se utilizó la formulación semiempírica propuesta por Meyer - Peter - Muller, con las condiciones hidráulicas resueltas por HEC-RAS, y los resultados son:

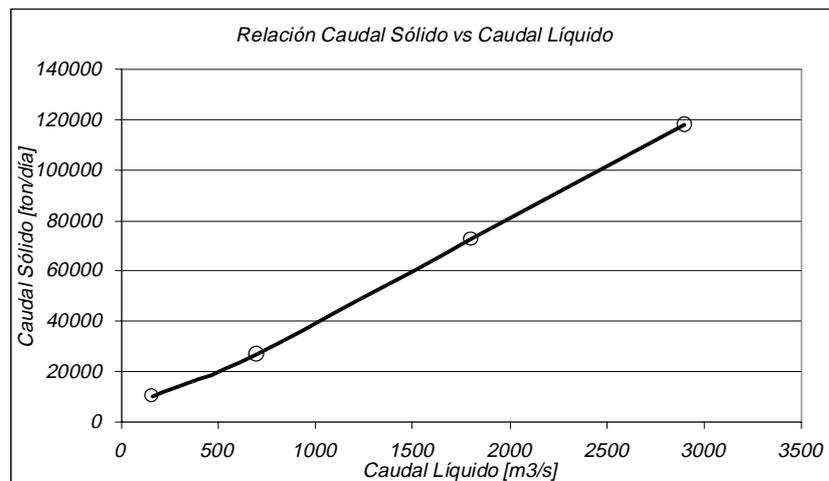


Figura 8: Relación Caudal líquido - Caudal sólido, Río Cuarto. Prog. 7500

Dado que en el problema en estudio, la carga de sólidos aportada por la cuenca es de suma importancia y establece las condiciones de borde de la sección de control aguas arriba de la modelación, se establecieron escenarios en donde se utiliza la expresión de Meyer - Peter - Muller como límites máximos o capacidad potencial de transporte.

Las simulaciones realizadas presentan el comportamiento del cauce ante escenarios conservadores (caudal sólido despreciable) y no conservadores (caudal sólido potencial) realizando alternativas intermedias en función de la carga de sólidos actuante que comprenden el 25%, 50%, 75% de la capacidad de transporte.

En general las duraciones de las simulaciones fueron de 60 días con un paso de tiempo de 0,01 fracción de día (aproximadamente 15 min) teniendo en cuenta la integración de la ecuación de transporte y verificándose el equilibrio individual de las secciones (condición de equilibrio).

Debido a que los caudales planteados se corresponden con eventos extraordinarios, y el objetivo general del presente consiste en la estimación de la erosión general a largo plazo, para la implementación del modelo HEC-6 y por consideraciones prácticas se adoptó 160 m³/s como representativo del caudal formativo del cauce, estableciéndose este caudal a régimen permanente.

Los escenarios planteados y la metodología de resolución se resumen en:

- Erosión general del cauce sin obras para un caudal líquido de 160 m³/s considerado como formativo. En el escenario planteado se aplica la planilla Excel para la hipótesis de agua limpia y estableciendo una configuración de sección que no provoque el transporte de sedimentos (condición de inicio de transporte). Las fórmulas empíricas utilizadas en Excel son:

Shields - Manning -Strikler

Lischtvan-Levedieu

Laursen (1963)

Blench (1969)

Maza Alvarez

Como complemento se utilizó el modelo HEC-6 considerando la variación de los caudales sólidos y utilizando la ecuación de Meyer - Peter - Muller para determinar la capacidad de transporte.

- Erosión general con obras (azudes y puentes) y depositación en azudes para caudal líquido de 160 m³/s. La aplicación del modelo HEC-6 considera la fórmula de Meyer - Peter - Muller para determinar la capacidad potencial de transporte y la variación mencionada con anterioridad de caudales sólidos.
- Erosión local aguas abajo del cuenco de disipación en ambos azudes, con la aplicación de modelo ELEHCA y diversas fórmulas para los eventos de 700, 1900 y 2900 m³/s.

Los resultados de la simulación para los distintos escenarios planteados se pueden ver en los gráficos que se presentarán a continuación.

- *Erosión general del cauce sin obras*

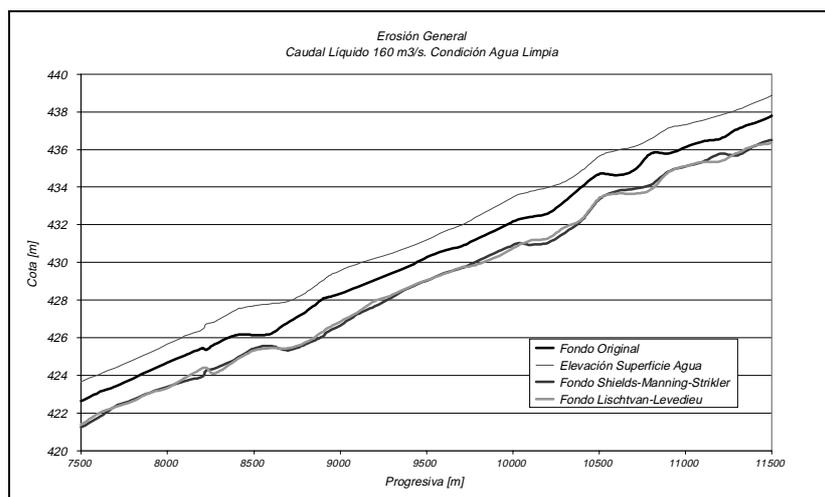


Figura 9: Erosión general del cauce. Escenario sin obras (Excel)

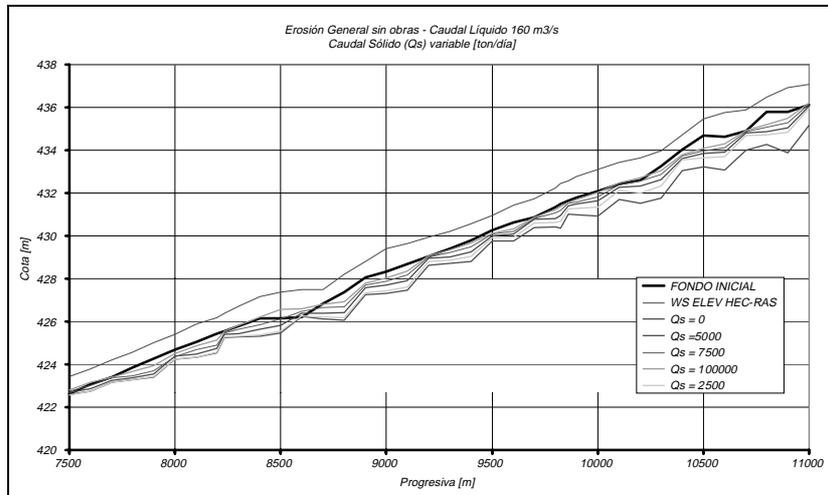


Figura 10: Erosión general del cauce. Escenario sin obras (HEC-6)

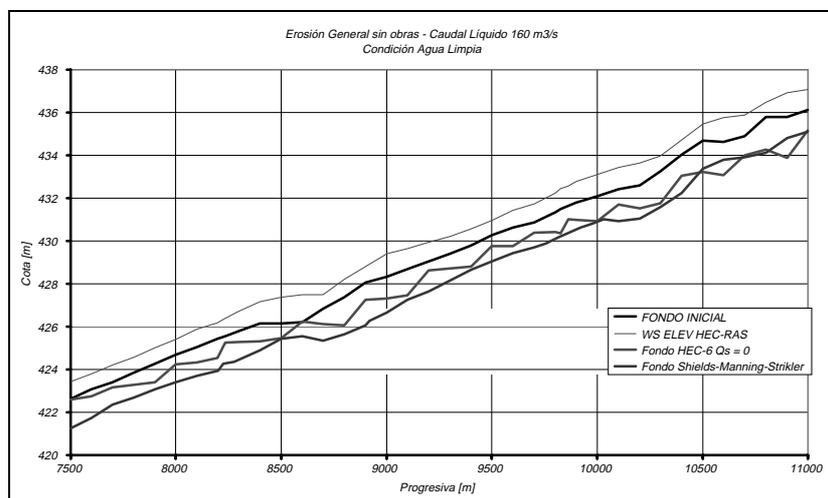


Figura 11: Erosión general del cauce. Escenario sin obras (Excel y HEC-6)

De la observación de los anteriores gráficos se destaca que los valores medios de erosión simulados por HEC-6 (Prog. 7500 hasta Prog. 11000) oscilan entre un mínimo de 1,00 m hasta un máximo de 1,80 mts. En términos medios la erosión general del tramo aportada por HEC-6 (0,85 m) se compara con la obtenida por los criterios de Shields - Manning -Strikler y de Lischtván-Levedieu de aproximadamente 1,30 m.

Otro aspecto importante es que los resultados del modelo HEC-6 permiten visualizar que para condiciones de caudal sólido máximo (capacidad de transporte) la configuración del cauce, en general su pendiente longitudinal, mantiene las condiciones originales por lo que podemos asegurar que la capacidad de transporte se encuentra estimada con una buena aproximación. Además se destaca que la variación de caudal sólido permite estimar la erosión general para condiciones intermedias, por lo que se pueden plantear distintos escenarios.

De la comparación de los resultados aportados por Excel y por HEC-6 se pone de manifiesto que si los datos de entrada y las hipótesis de modelación son las mismas, los resultados presentados por Excel y por el modelo HEC-6 son, en términos generales muy similares, aunque se destaca que la implementación HEC-6 posibilita la incorporación de caudales sólidos variables.

- *Erosión general con obras y depositación en azudes*

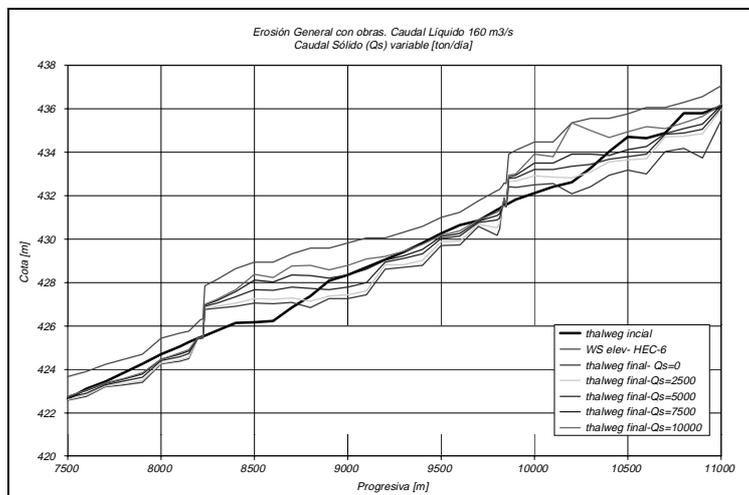


Figura 12: Erosión general del cauce. Escenario con obras (HEC-6)

De la observación del gráfico anterior se concluye que el emplazamiento de los azudes en el cauce del Río Cuarto provoca los efectos físicos deseados, ya que se produce la colmatación de los mismos (Figura 12).

Se observa que en la zona de influencia de los azudes se produce una erosión generalizada en cada uno de los tramos aguas abajo de los mismos. Se verificó en la modelación el cumplimiento de la ecuación de continuidad de la fase sólida en cada sección transversal, lo que asegura que las condiciones finales resultantes presentan una condición de estabilidad local del cauce dado que la configuración final adoptada depende solamente de las condiciones hidráulicas impuestas y de la tasa de aporte de sedimentos, independizándose de la duración de la modelación.

El tiempo de colmatación de los azudes depende exclusivamente de la magnitud de los aportes sólidos, y éstos se encuentran íntimamente relacionados con el régimen pluvial de la cuenca y el impacto de las actividades antrópicas en el cauce. Un aspecto importante de destacar es que la pendiente del tramo influenciado por el remanso, copia la pendiente longitudinal de la superficie del agua.

Además se destaca que en las secciones no influenciadas por el remanso producido por los azudes, la erosión general es prácticamente la misma que en la situación sin azudes.

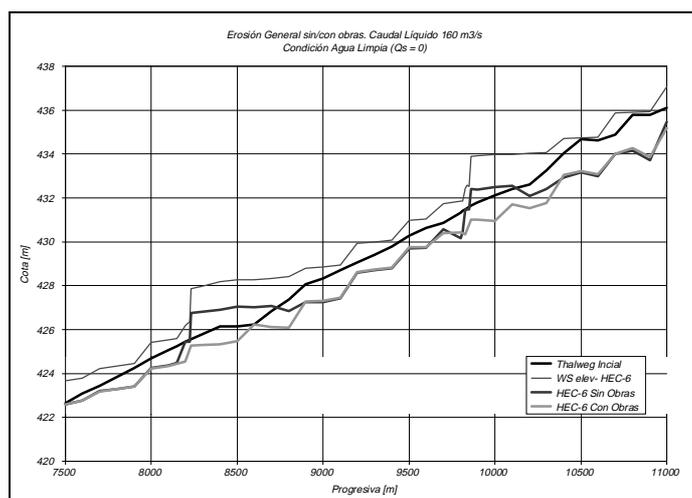


Figura 13: Erosión general. Comparación Escenario sin y con obras (HEC-6)

- Erosión local aguas abajo del cuenco de dissipación

Tabla 5: Erosión local ELEHCA

CAUDALES	Puente Carretero	Puente Ferroviario
	<i>EROSION MAX y_{max}</i>	<i>EROSION MAX y_{max}</i>
<i>m³/s</i>	<i>m</i>	<i>m</i>
160	1.19	1.42
700	9.74	No puede calcular
1900	18.59	18.59
2900	25.79	25.04

Los resultados aportados por ELEHCA, parecerían ser bastantes exagerados ya que las profundidades de erosión, por ejemplo para caudal de 2900 m³/s es del orden de 25 m. En general las fórmulas de erosión general tienen la siguiente forma:

$$y_{max} = k \cdot q^a \cdot \Delta h \cdot d^c \quad (\text{Ecuación 22})$$

donde:

q : caudal específico

Δh : diferencia de carga entre el nivel del embalse h y el tirante de restitución

d : diámetro representativo (d_{90} ó d_{50})

Los coeficientes y las constantes para la fórmula tienen distintos órdenes de magnitud siendo los que tienen más dispersión o influencia la constante k , variando entre 1,20 y 23. El coeficiente c varía entre -0.06 y -0.4, y también produce una gran dispersión en los resultados para caudales de 2900 m³/s, resultando entre 5 m (Ivanisevich y Machado) hasta 77 m (Egember y Muller).

Tabla 6: Erosión local Puente Carretero

	$y_o + y_{max}$ (m)			
Caudal [m ³ /s]	160	700	1900	2900
Caudal específico [m ² /s]	1.07	4.67	12.67	19.33
Fórmulas				
Veronese	1.26	3.63	6.93	9.34
Wu	0.77	2.13	3.97	5.31
Martins	1.28	3.48	6.65	8.84
Cheedar y Padyar	1.31	4.70	10.34	14.84
Ivanisevich y Machado	0.63	1.88	3.60	4.91
INCYTH	0.39	1.76	4.00	6.08
Schoklish	2.16	6.31	12.26	16.61
Jagger	2.43	8.51	18.77	27.04
modelo fisico trid		5.01	9.93	10.22

Tabla 7: Erosión Puente Ferroviario

	$y_o + y_{max}$ (m)			
Caudal [m ³ /s]	160	700	1900	2900
Caudal específico [m ² /s]	1.07	4.67	12.67	19.33
Fórmulas				
Veronese	2.16	5.09	9.33	11.97
Wu	1.35	3.04	8.73	11.07
Martins	1.63	4.05	7.59	9.87
Cheedar y Padyar	2.38	6.85	14.39	19.55
Ivanisevich y Machado	1.33	3.02	5.46	6.95
INCYTH	1.92	4.80	9.62	12.64
Schoklish	3.48	8.52	15.97	20.70
Jagger	3.98	11.34	23.98	33.34
modelo fisico trid		7.14	8.99	12.92

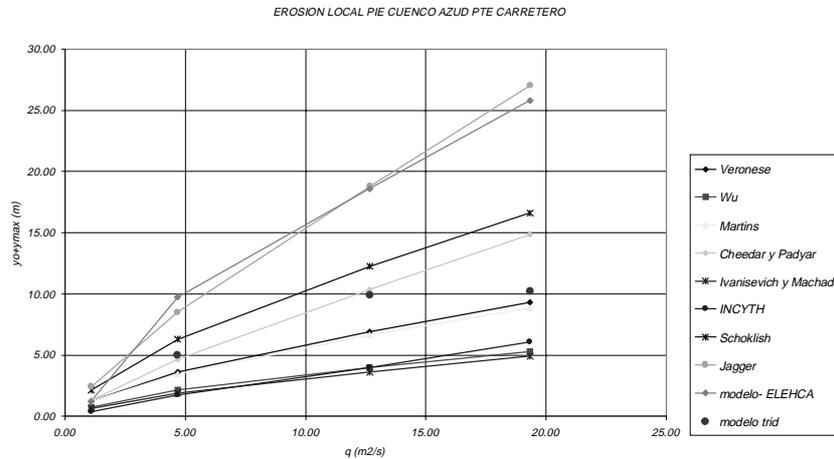


Figura 14: Erosión Local. Comparación de fórmulas en Puente Carretero.

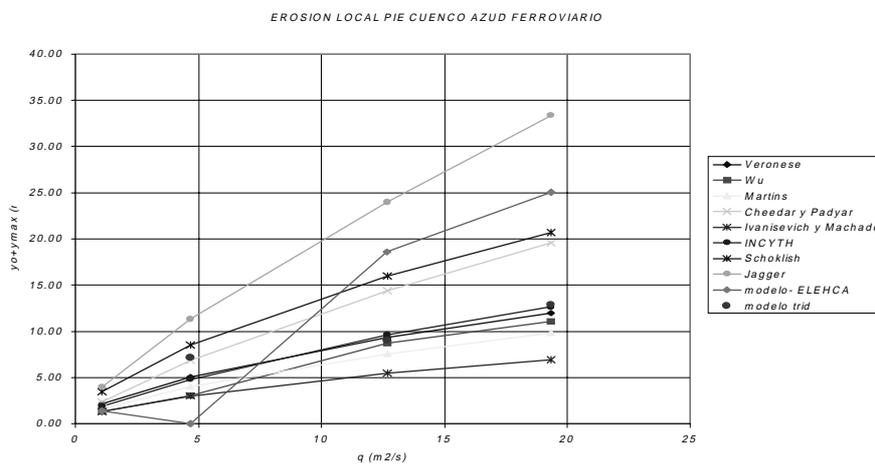


Figura 15: Erosión Local. Comparación de fórmulas en Puente Ferroviario.

En base a los criterios seleccionados, las hipótesis adoptadas, los escenarios planteados y la metodología de resolución propuesta se concluye que:

- Los resultados obtenidos para erosión general del modelo HEC-6 y de la planilla de cálculo Excel son confiables y permiten su utilización para caracterizar y cuantificar la colmatación de los azudes, aunque es importante destacar que en todos los casos se utilizó la ecuación propuesta por Meyer - Peter - Muller y que sólo se realizaron para un caudal considerado como el formativo del tramo analizado.
- En los fenómenos de erosión local se recomiendan las fórmulas de erosión local propuestas por Veronese, Wu, Martins, Cheedar y Padyar, Ivanisevich y Machado, Incyth, siendo bastante elevados los resultados expuestos por las fórmulas de Eggember y Muller, Schoklish, Jagger, haciendo la salvedad que en estas últimas tres el resalto actúa sobre el lecho o sea que no existe la estructura del cuenco de disipación.

Calibración de los Modelos Físicos

Previo al inicio de los ensayos en azudes se procedió a calibrar, para el escenario de caudales de 700 m³/s, los dispositivos que controlan las condiciones de contorno de los modelos físicos. En ambos azudes la condición de aguas abajo se encuentra establecida por una

compuerta basculante, que controla los tirantes aguas abajo del azud. Su posición fue establecida de manera de obtener en el modelo físico los mismos tirantes calculados de la modelación unidimensional del flujo. Cabe destacar que este modelo matemático fue continuamente recalibrado de manera de representar fielmente las observaciones y resultados observados en los modelos tridimensionales.

En el caso particular del modelo físico del Azud del Puente Ferroviario, previo a la instalación del cuerpo del azud, se realizó una verificación de las rugosidades utilizadas para el cauce y planicies de inundación. Para su verificación se procedió a establecer, para cada nivel de caudal a ensayar, los tirantes en distintos puntos del tramo del río. Estos tirantes fueron posteriormente cotejados con los obtenidos a partir de los modelos matemáticos de flujo, los cuales fueron también recalibrados de manera de considerar los aspectos tridimensionales del flujo.

Finalmente para cada escenario de caudal se observó que los tirantes medidos en el modelo físico y aquellos calculados en los modelos matemáticos, para los distintos escenarios de caudal, eran iguales o muy próximos, siendo el error relativo entre ellos menor al admisible verificándose que la rugosidad ejecutada en los modelos físicos es correcta y representa fielmente aquella considerada para el tramo bajo análisis del Río IV.

Resultados de los Ensayos

Se han realizado 22 ensayos en ambos modelos físicos, considerando diversos escenarios de caudales, de condiciones de sedimentación aguas arriba del azud y protecciones proyectadas contra las erosiones. A estos ensayos se suman todos aquellos realizados para la calibración y verificación del correcto funcionamiento del azud y sus estructuras accesorias.

En la tabla siguiente se presenta un resumen de todos los ensayos realizados en los modelos físicos de los Azudes de los Puentes Carretero y Ferroviario de la ciudad de Río Cuarto, conjuntamente con las mediciones sobre éstos ensayos realizadas.

Tabla 8: Ensayos realizados sobre el Azud del Puente Carretero.

	Código de Ensayo	Medición
Azud del Puente Carretero	E0_MTC_700_SS	<ul style="list-style-type: none"> • Evolución erosión en pilas; • Evolución velocidad aguas arriba del azud; • Presión en cauce, azud y protección; • Relevamiento de erosión final del cauce; • Relevamiento de erosión final frente azud;
	E1_MTC_700_CS	
	E2_MTC_1900_CS	
	E3_MTC_1900_SS	
	E4_MTC_2900_SS	
	E5_MTC_2900_CS	
	E6_MTC_H-Q_SS	<ul style="list-style-type: none"> • Determinación de la curva Altura-Descarga en sección del azud
	E7_MTC_H-Q_CS	
	E8_MTC_700_SS_SF	<ul style="list-style-type: none"> • Medición de la erosión aguas abajo del azud sin protección de Flexmat
	E9_MTC_700_SS_SF	
E10_MTC_700_SS_SF		

Tabla 9: Ensayos realizados sobre el Azud del Puente Ferroviario.

	Código de Ensayo	Medición
Azud del Puente Ferroviario	E0_MTF_700_SS	<ul style="list-style-type: none"> • Evolución erosión en pilas; • Evolución velocidad aguas arriba del azud; • Presión en cauce, azud y protección; • Relevamiento de erosión final del cauce; • Relevamiento de erosión final frente azud;
	E1_MTF_700_CS	
	E2_MTF_1900_SS	
	E3_MTF_1900_CS	
	E4_MTF_2900_SS	
	E5_MTF_2900_CS	
	E3_MTF_H-Q_SS	<ul style="list-style-type: none"> • Determinación de la curva Altura-Descarga en sección del azud
	E4_MTF_H-Q_CS	
	E6_MTF_700_SS_SF	<ul style="list-style-type: none"> • Medición de la erosión aguas abajo del azud sin protección de Flexmat
	E8_MTF_700_SS_SF	
E9_MTF_700_SS_SF		

En los párrafos siguientes se presentan, por azud, los resultados y observaciones obtenidas de cada ensayo realizado. Cabe destacar que la duración de los ensayos fue establecida igual al tiempo requerido hasta lograr la estabilización de la erosión en las pilas de los puentes correspondientes.

Alturas Piezométricas

Las alturas piezométricas representan las presiones medias medidas en 17 puntos establecidos del azud. Estas presiones puntuales son medidas por tomas piezométricas construidas siguiendo la normativa recomendada por la literatura especializada, en dos secciones transversales, ubicadas al centro y margen izquierda del cuerpo del azud, permitiendo conocer la distribución de presiones en el ancho del azud.

Estas presiones, al igual que las otras variables relevadas, se miden en forma secuencial, lo cual permite establecer su evolución en el tiempo, por modificaciones en la geometría del cauce. En las tablas siguientes se presentan las presiones medias totales medidas en cada toma piezométrica del azud.

Tabla 10: Presiones piezométricas medidas sobre el Azud del Puente Carretero.

Toma	Progresiva (msnm)	Cota (msnm)	Sin Sedimento			Con Sedimento		
			700	1900	2900	700	1900	2900
1	0.00	432.43	1.57	3.36	3.96	3.01	3.67	3.85
2	1.32	432.68	1.46	3.12	3.32	2.44	3.23	3.70
3	2.67	432.73	1.47	2.18	3.66	2.39	3.13	3.73
4	3.80	432.80	0.51	1.75	2.09	1.42	1.83	2.25
5	4.70	432.63	0.23	1.64	2.17	1.44	1.77	2.41
6	5.81	432.13	-0.52	1.87	2.78	1.53	2.12	3.04
7	6.93	431.38	1.06	2.80	3.38	1.99	2.92	3.92
8	7.82	430.58	2.52	3.84	4.68	2.95	3.99	4.82
9	8.55	430.30	3.47	4.55	5.19	3.65	4.61	5.25
10	10.86	430.30	2.57	3.74	4.98	3.04	4.13	5.17
11	15.10	430.30	2.52	3.93	4.81	3.18	4.10	5.08
12	19.35	430.30	2.84	4.06	4.92	3.20	4.24	5.12
13	23.59	430.30	3.01	4.27	5.17	3.27	4.07	5.29
14	27.83	430.30	2.84	4.23	5.15	3.19	4.41	5.26
15	32.07	430.30	2.84	4.21	5.11	3.11	4.37	5.24
16	36.31	430.30	2.84	4.34	5.27	3.01	4.49	5.32
17	38.00	431.30	1.57	3.77	4.31	2.97	3.70	4.09

Tabla 11: Presiones piezométricas medidas sobre el Azud del Puente Ferroviario.

Toma	Progresiva (msnm)	Cota (msnm)	Sin Sedimento			Con Sedimento		
			700	1900	2900	700	1900	2900
1	0.00	427.04	1.20	3.53	1.62	1.64	1.54	1.62
2	1.12	426.98	1.09	2.77	2.36	1.80	2.24	2.65
3	2.48	427.03	1.05	1.49	2.25	1.63	2.02	2.33
4	3.60	427.10	0.19	0.45	0.48	0.92	0.45	1.01
5	4.72	426.89	-0.27	0.61	0.51	0.75	0.37	0.37
6	5.83	426.40	-0.56	0.92	1.13	0.65	1.04	1.31
7	6.85	425.68	0.89	1.67	2.69	1.17	2.25	2.23
8	7.87	424.91	2.11	3.22	4.05	2.68	3.68	3.96
9	8.56	424.60	3.32	4.31	4.94	3.18	4.51	4.84
10	10.88	424.60	2.39	3.74	4.33	2.65	3.90	4.17
11	15.12	424.60	2.51	3.74	4.14	2.86	3.87	4.09
12	19.37	424.60	2.82	4.12	4.56	2.91	4.22	4.46
13	23.61	424.60	2.96	4.31	4.78	2.63	4.41	4.52
14	27.85	424.60	2.94	4.58	4.99	3.07	4.57	4.81
15	32.09	424.60	3.08	4.58	5.15	3.14	4.70	4.84
16	36.33	424.60	3.26	4.91	5.51	3.27	4.97	5.26
17	38.02	425.60	1.96	2.77	3.04	2.30	2.89	4.74

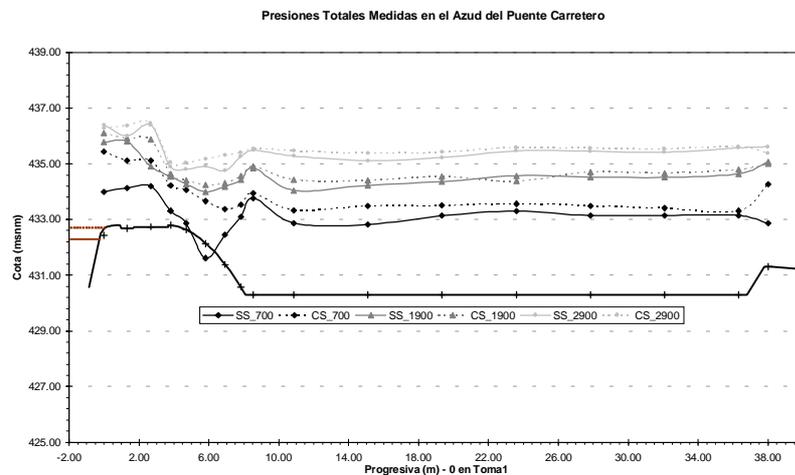


Figura 16: Presiones piezométricas medidas en el Azud del Puente Carretero.

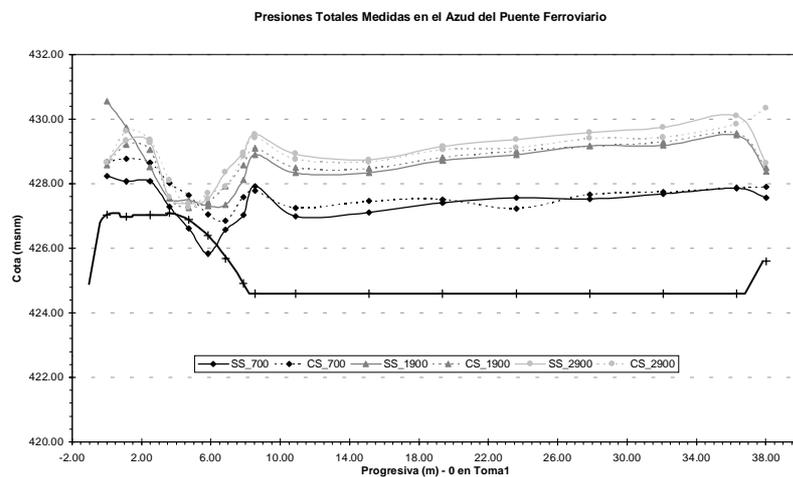


Figura 17: Presiones piezométricas medidas en el Azud del Puente Ferroviario.

Velocidades de aproximación

Se midieron las velocidades medias de aproximación en una sección transversal a 72 y 80 m aguas arriba de los azudes de los puentes Carretero y Ferroviario respectivamente. Las mediciones de velocidades se establecieron utilizando un mini molinete a una profundidad de 0,6 del tirante en cada punto y con series de medición de 30 segundos.

Las velocidades medias resultantes se presentan en la tabla siguiente. En ésta las progresivas corresponden a la distancia existente entre el punto de medición sobre la sección transversal y el muro de ala de la margen derecha.

Tabla 12: Velocidades medias medidas en 72 m aguas arriba del Azud del Puente Carretero.

Escenario.	Progr.	7.30	19.30	31.30	43.30	55.30	67.30	79.30	91.30	103.30	115.30	127.30
700	SS	2.09	2.80	2.83	2.52	1.89	2.49	2.52	1.71	2.26	1.94	1.52
	CS	2.20	2.57	2.91	2.88	2.92	2.96	2.61	2.77	2.94	2.73	2.85
1900	SS	2.51	2.62	2.91	2.39	2.63	2.68	2.17	2.88	2.64	2.38	2.53
	CS	2.75	3.19	3.21	2.78	2.79	3.03	2.81	3.03	3.16	2.95	2.92
2900	SS	3.28	3.19	2.94	2.80	2.84	2.65	2.58	2.90	2.73	2.62	2.25
	CS	3.48	3.48	3.16	3.08	3.06	3.17	2.94	3.22	3.24	2.86	2.67

Tabla 13: Velocidades medias medidas en 80 m aguas arriba del Azud del Puente Ferroviario.

Escenario.	Progr.	24.94	36.94	48.94	60.94	72.94	84.94	96.94	108.94	120.94	132.94	144.94
700	SS	1.02	2.48	2.11	1.94	1.75	1.62	1.58	1.60	1.72	1.58	1.05
	CS	1.58	2.70	2.97	2.84	2.80	2.80	2.70	2.67	2.60	2.48	2.19
1900	SS	0.10	3.30	3.39	2.81	3.15	2.99	2.80	2.45	2.33	1.20	0.44
	CS	0.10	2.37	3.10	3.14	3.19	3.12	3.07	2.80	3.01	2.59	1.44
2900	SS	0.10	2.89	2.73	2.69	2.58	2.68	2.42	2.73	2.62	2.74	2.50
	CS	0.10	3.52	3.10	3.02	3.03	3.01	3.09	2.82	3.30	3.06	2.60

Profundidad de Erosión en Pilas del Puente Carretero

Durante los ensayos realizados sobre los modelos físicos tridimensionales a fondo móvil de los Azudes de los Puentes Carretero y Ferroviario se han relevado secuencialmente y en distintos periodos temporales, las profundidades de erosión en cada una de las pilas ubicadas sobre el cauce del río.

Estas mediciones permiten determinar la evolución de las profundizaciones del lecho en las proximidades de las pilas, considerándose la estabilización del ensayo en el instante en que ha finalizado la erosión en éstas, o bien la magnitud del cambio de profundidad se encuentra dentro del rango de precisión de la metodología empleada para su relevamiento.

El relevamiento de las profundidades de erosión se realizó aguas arriba, aguas abajo y en ambos laterales de cada pila. En la tabla siguiente se presentan la erosión final aguas arriba y aguas abajo de cada pila, numerándose las mismas de margen izquierda a margen derecha, y quedando dentro del cauce

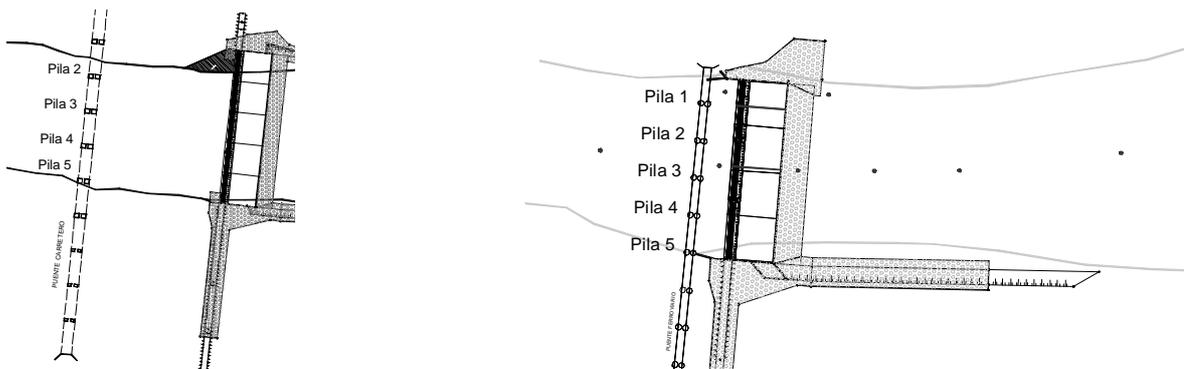


Figura 18: Ubicación de las pilas relevadas en los Puentes Carretero y Ferroviario.

Tabla 14: Profundidades máximas de erosión en pilas de los Puentes Carretero y Ferroviario.

		Sin Sedimentación				Con Sedimentación				
		Caudal	Pila 2	Pila 3	Pila 4	Pila 5	Pila 2	Pila 3	Pila 4	Pila 5
Puente Carretero	Frente	700	428.48	428.00	427.52	427.34	428.54	428.66	428.54	427.94
		1900	428.72	426.98	427.70	428.00	428.60	426.74	427.40	426.56
		2900	429.56	425.84	426.98	422.72	429.32	427.76	427.70	423.56
	Atrás	700	431.78	431.78	430.46	430.28	431.18	429.92	430.46	431.84
		1900	431.00	429.14	429.80	429.74	430.22	428.24	429.14	428.30
		2900	431.90	427.40	428.12	423.92	432.08	428.60	429.80	424.16
Puente Ferroviario	Frente		Pila 1	Pila 2	Pila 3	Pila 4	Pila 1	Pila 2	Pila 3	Pila 4
		700	423.80	423.98	423.50	420.26	422.78	421.70	422.84	419.72
		1900	421.34	420.74	419.96	416.78	422.06	421.64	422.18	416.06
	2900	419.00	419.78	419.84	412.88	419.96	420.62	420.56	413.12	
	Atrás	700	425.18	424.16	424.34	424.16	425.06	423.68	425.24	422.51
		1900	422.12	422.42	421.40	419.42	423.50	423.68	422.60	418.64
2900		420.38	420.80	422.12	415.46	422.24	423.08	421.52	415.70	

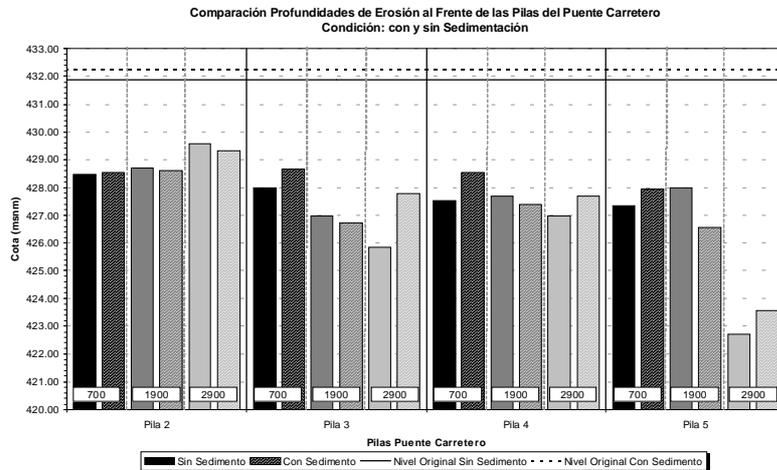


Figura 18: Comparación de erosiones máximas en pilas del Puente Carretero.

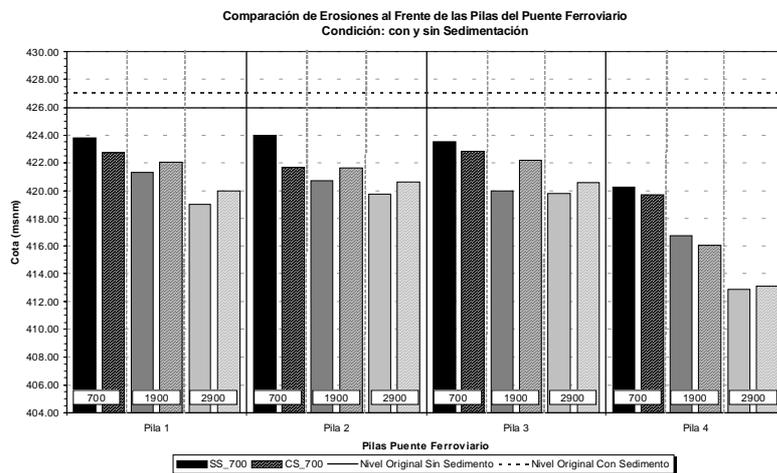


Figura 20: Comparación de erosiones máximas en pilas del Puente Ferroviario.

Erosión al frente a los azudes

Finalizado el ensayo se procede a relevar las profundidades de erosión en una sección ubicada inmediatamente aguas arriba del azud. En la siguiente tabla se presenta las profundidades de erosión medidas al frente de los Azudes de los Puentes Carretero y Ferroviario.

Tabla 15: Profundidades máximas de erosión frente de los Azudes de los Puentes Carretero y Ferroviario.

Azud	Q	Pr.	7.30	19.30	31.30	43.30	55.30	67.30	79.30	91.30	103.30	115.30	127.30	139.30	151.30
Puente Carretero	700	SS	431.24	432.74	432.20	432.38	428.90	430.88	430.82	430.88	431.00	431.00	430.88	432.32	432.32
		CS	431.96	432.38	432.26	432.32	431.72	432.02	432.38	432.38	432.50	432.80	432.14	432.32	432.32
	1900	SS	429.08	430.88	431.78	431.78	426.92	430.28	430.28	430.76	429.26	428.00	428.00	432.32	432.32
		CS	427.34	431.84	431.90	431.96	429.14	431.84	431.78	431.24	431.24	431.84	431.84	432.32	432.32
	2900	SS	423.50	424.10	426.56	429.02	427.70	428.66	429.20	428.60	429.02	430.28	430.94	432.32	432.32
		CS	421.10	421.49	427.22	429.56	426.65	429.44	430.88	430.46	429.86	428.96	430.10	432.32	432.32
Azud	Q	Pr.	0.94	12.94	24.94	36.94	48.94	60.94	72.94	84.94	96.94	108.94	120.94	132.94	144.94
Puente Ferroviario	700	SS		425.06	425.84	423.80	424.70	424.70	424.76	424.64	424.94	424.64	424.52	424.82	425.24
		CS		426.20	426.62	425.12	422.12	424.88	426.02	423.44	426.44	425.06	424.76	426.08	423.86
	1900	SS		424.46	425.60	422.84	420.86	423.26	424.34	422.42	421.70	424.04	425.60	425.78	424.58
		CS	420.74	424.40	425.78	426.14	417.08	418.28	423.26	419.36	423.08	425.30	423.56	425.18	426.62
	2900	SS		420.49	422.59	415.69	413.29	415.15	420.07	421.57	423.85	420.49	423.55	421.52	425.65
		CS		420.50	423.32	415.70	413.24	414.02	419.06	420.20	422.24	423.68	424.94	423.98	425.24

Curva Altura – Descarga

Para cada condición de sedimentación de los azudes se procedió a determinar la ley Altura – Descarga del conjunto Azud-Terraplén, relevándose para cada escenario de caudal el nivel aguas arriba de la estructura. Según recomendaciones de la bibliografía especializada, la ley H-Q se determinó cuidando que la carga sobre el vertedero en el modelo no fuera menor a 2,5cm evitando así errores en las mediciones por efectos viscosos y de tensión superficial.

En la tabla siguiente se presentan para cada azud, los pares Altura-Descarga para cada condición de sedimentación aguas arriba del azud. Estos pares de valores se establecieron aplicando ecuaciones potenciales de aproximación establecidas a través de valores relevados en los escenarios ensayados.

Tabla 16: Pares Altura-Descarga para ambas condiciones de sedimentación de los Azudes de los Puentes Carretero y Ferroviario.

H (m)	Carretero			Ferroviario		
	(msnm)	SS	CS	(msnm)	SS	CS
1.20	434.00	543	730	428.30		
1.40	434.20	705	890	428.50		
1.60	434.40	887	1061	428.70		
1.80	434.60	1090	1244	428.90	570.68	482.36
2.00	434.80	1314	1438	429.10	714.02	607.58
2.20	435.00	1558	1642	429.30	873.35	747.12
2.40	435.20	1822	1858	429.50	1048.66	900.98
2.60	435.40	2107	2085	429.70	1239.95	1069.17
2.80	435.60	2412	2323	429.90	1447.24	1251.69
3.00	435.80	2738	2572	430.10	1670.51	1448.53
3.20	436.00	3084	2832	430.30	1909.76	1659.69
3.40	436.20	3451	3103	430.50	2165.01	1885.18
3.60	436.40	3838	3385	430.70	2436.23	2124.99

Erosiones aguas debajo de los azudes

Para verificar la eficiencia de las protecciones proyectadas aguas abajo de los azudes se realizaron 6 nuevos ensayos (3 para cada azud) sin las correspondientes protecciones al pie del azud. La duración de estos ensayos se estableció igual a la respectiva para cada escenario caudal antes ensayado. Finalizado el ensayo se procedió a relevar las erosiones aguas abajo de cada azud en cinco sectores (tres centrales y dos laterales). Los valores máximos de erosión relevados aguas debajo de cada azud se presentan en la tabla siguiente.

Tabla 17: Erosión máxima relevada aguas abajo de cada azud con y sin protección, para cada condición de caudal.

	Caudal (m ³ /s)	Margen Derecha		Lateral Derecho		Centro		Lateral Izquierdo		Margen Izquierda	
		CP	SP	CP	SP	CP	SP	CP	SP	CP	SP
Carr.	700	430.16	429.32	430.28	429.02	429.74	429.08	429.62	429.20	430.40	428.12
	1900	430.40	423.38	429.92	425.90	429.98	425.30	430.16	425.90	430.10	426.20
	2900	425.90	423.32	428.78	425.72	428.66	427.40	429.32	428.00	427.28	427.46
Ferr.	700	423.74	422.66	423.56	421.64	424.16	423.14	423.38	421.16	422.72	422.48
	1900	419.24	419.06	421.88	420.56	420.08	419.66	421.16	419.30	422.06	421.28
	2900	418.15	415.94	420.97	417.32	422.11	418.40	421.93	418.52	418.51	420.68

En la figura siguiente se presenta a modo de ejemplo la erosión media medida central con y sin protección aguas abajo del Azud del Puente Ferroviario, para un caudal de 2900 m³/s.

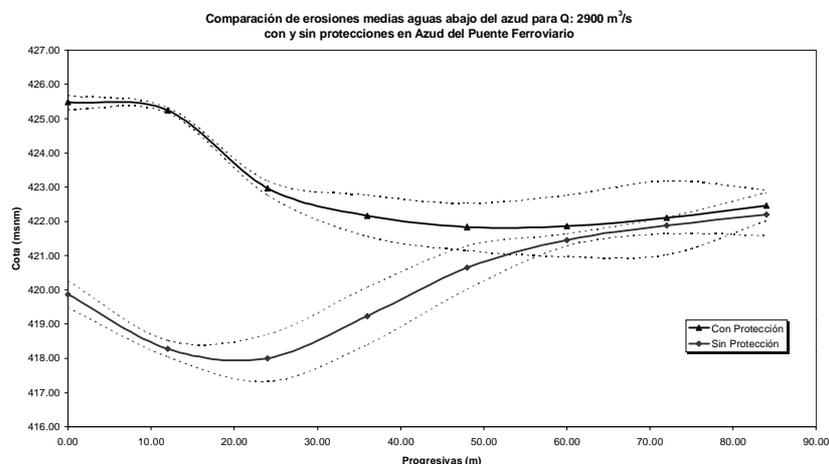


Figura 21: Comparación de erosiones medias al pie del Azud del Puente Ferroviario con y sin protecciones para un caudal de 2900 m³/s.

Conclusiones

- Sobre los modelos físicos tridimensionales a fondo móvil de los Azudes de los Puentes Carretero y Ferroviario, se ensayaron 22 escenarios, considerando tres caudales, dos condiciones de sedimentación aguas arriba, y dos condiciones de protección aguas abajo;
- Para los escenarios modelados numéricamente (HEC 6) y en los ensayos en modelo a fondo móvil, se ha observado un recrecimiento general del cauce aguas arriba de la zona de influencia de la obra;
- La profundidad de erosión de las pilas es sensible a su comportamiento hidrodinámico, y poco sensible al estado inicial de sedimentación del terreno por efecto del azud, para estos ensayos de larga duración;
- En todos los escenarios modelados se observa una mayor erosión en las pilas ubicadas en el cauce sobre la margen derecha por efecto del ingreso de flujo lateral la llanura;
- En todos los escenarios ensayados, frente del azud sobre la margen derecha, se origina una erosión por efecto del ingreso del flujo desde la planicie, inmediatamente aguas arriba del azud;
- El ingreso de flujo lateral proveniente de la llanura de inundación provoca perturbaciones en las zonas de ingreso que influyen en la conformación del fondo en el cauce.
- Los caudales que sobrepasan los terraplenes proyectados sobre ambas márgenes del azud, generan inmediatamente aguas abajo de estos, resaltos que pueden comprometer su estabilidad;
- La forma de la erosión que se genera aguas abajo del cuenco de disipación de energía es propia de la que se genera por la influencia de la macroturbulencia generada en el resalto hidráulico. El resalto hidráulico permaneció ahogado para los caudales ensayados;
- El comportamiento de la protección transversal proyectada aguas abajo a la salida del cuenco disipador es aceptable, permaneciendo estable y acompañando las deformaciones del fondo en los escenarios ensayados;
- Las erosiones producidas a la salida del cuenco en el ensayo sin protección se producen inmediatamente al pie de la obra y son de mayor magnitud que las correspondientes a los ensayos realizados con protección, las cuales se sitúan a distancias mayores medidas desde el azud;
- El resalto hidráulico permaneció ahogado para los caudales ensayados;
- Las erosiones medidas deben considerarse como máximas posibles o envolventes superior

ya que corresponden a ensayos con agua clara, caudales constantes y tiempos de ensayos suficientes hasta la estabilización de la erosión. En caso de crecidas con transporte de sólidos y menor duración las erosiones serán menores.

- En todos los escenarios analizados se observó una importante sensibilidad en el comportamiento frente a la erosión de la estructura analizada y su entorno, al direccionamiento del flujo entrante y los caudales relativos entre el cauce y su planicie de inundación;

Referencias Bibliográficas

ADV (1997) *Acoustic Doppler Velocimeter – Technical Documentation*. SonTek, Inc, Estados Unidos.

Aguirre Pe, J. (1980): *Hidráulica de Sedimentos*. Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

Barbeito O., Massera L., Ambrosino S. (2000) *Fotocarta Geomorfológica, Río Chocancharagua, ciudad de Río Cuarto*.

British Standards Institution (1965) “*Methods of Measurement of Liquid Flow in Open Channels*”, B.S. 3680: Part 4A: 1965. Londres.

Chaudhry M. H. (1993) *Open-Channel Flow*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Chini, I. C. , Reyna, S. M. (1995) *Azud de Toma para la Provisión de Agua Potable de la Ciudad de Cosquín*. Universidad Nacional de Córdoba.

Chow V. T. (1994) *Hidráulica de Canales Abiertos*. Ed. McGraw-Hill Interamericana S.A. Santa Fe de Bogotá. Colombia.

Evaluación de Recursos Hídricos S. A. (EVARSA). *Estadística Hidrológica 1997*.

Fernandez Bono, J. F. (1986) *Modelos Físicos en Ingeniería Hidráulica*. Escuela Técnica superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Valencia. 230 pgs.

Frisicari (1997) *Estudio hidrológico del Río Cuarto*, Tesis de Grado: Universidad Nacional de Córdoba.

Institute For Water Resources. Hydrologic Engineering Center (1998) *HEC-RAS. River Analysis System (version 2.2). User’s Manual and Hydraulic Reference Manual*. US Army Corps of Engineers. Davis, California.

Institute For Water Resources. Hydrologic Engineering Center (2001) *HEC-RAS. River Analysis System (version 3.0). User’s Manual and Hydraulic Reference Manual*. US Army Corps of Engineers. Davis, California.

Maza Álvarez J. A. (1996) *Transporte de Sedimentos Tomo 1 al 12*, Instituto de Ingeniería.

U.N.C. (2003) “*Modelación Física Tridimensional a Fondo Móvil de los Azudes de la Ciudad de Río IV*”. Laboratorio de Hidráulica. Universidad Nacional de Córdoba.

U.S. Army Corps of Engineers. (1996) *HEC-6, A numerical sediment’s model*. User Manual.

US Bureau of Reclamation (1970) *Proyecto de Presas Pequeñas*. Ed. Dossat. Madrid, España.

U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation (1978) *Design of Small Canal Structures*. Technical Services Publication. Denver, Colorado.

Vergara, M. A. (1993) *Técnicas de Modelación en Hidráulica*. Ed. Alfaomega. 294 pgs;

Vide, J. P. (2002) *Ingeniería de Ríos*, UPC, 331 pgs.

Villegas Mónica, Degiovanni Susana, Caviglia Lorena, Palma Yanina. *Monitoreo de sistemas fluviales: evaluación de la presión de la minería de áridos sobre el Río cuarto utilizando geoindicadores*. Universidad Nacional de Río Cuarto, Dpto. Geología