

## **MODELACIÓN FÍSICA TRIDIMENSIONAL DE LAS PROTECCIONES DE LOS AZUDES DEL RÍO CUARTO**

**Moya, G., Rodriguez, A., López, F., Muratore, H., Hiruela, J., Díaz, A.**

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 físicas a fondo móvil de las protecciones aguas arriba, aguas abajo y sobre las márgenes de ambos azudes.

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 models of two small dams in Rio Cuarto River downstream of Carretero and FFCC bridges are presented. The 3D models were constructed in the Hydraulic Laboratory of Cordoba National University.

The methodology and hypothesis details of the physical movable bed models for the design conditions, calibration and performance them are included. The ranges of application for each modeling condition is specified.

Results for each structure modeling are summarised, including flow pattern, local erosion near piles and structure, and banks and bed protections.

Finally, conclusion of the modeling and the working of the structure is analyzed, understanding for structure, the ensemble of the small dam, banks, embankments and 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.

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 una de sus funciones la de restituir localmente la cota de fondo del lecho en las proximidades de las pilas de los puentes, protegiéndolas del descenso generalizado 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 generalizada a la altura 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.

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 generalizado en la zona próxima del puente.

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.

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 erosión *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.

## DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS FÍSICOS

Los ensayos se realizaron sobre modelos físicos con semejanza de Froude, en cuencos 3D construidos a escala no distorsionada de longitudes  $E_L=1:60$ . Esto ha permitido modelar un tramo de río de 582m de longitud, con un ancho efectivo de 417m en el caso del azud del Puente Carretero y 544m para el azud del Puente Ferroviario. Cabe destacar que sobre los modelos físicos tridimensionales se han ensayado las obras y modificaciones solicitadas por el proyectista, además de variantes derivadas de observaciones sobre los modelos.

En los modelos se han representado las principales características hidromorfodinámicas y del flujo en la zona bajo análisis, entendiéndose ésta como el conjunto cauce, planicie fluvial, azudes, terraplenes, protecciones y entorno circundante.

Para el desarrollo del trabajo, y de acuerdo con los requerimientos del proyectista, se realizó la modelación para caudales constantes en prototipo de 1900 y 2900 m<sup>3</sup>/s para el caso del azud del Puente Carretero y 2900 m<sup>3</sup>/s para el Azud del Puente Ferroviario, todos con una duración de ensayo de 15:30 hs que garantiza la condición más desfavorable respecto de la duración de las crecidas de diseño en prototipo.

Los estudios incluyeron las siguientes actividades:

a- Estudio de las protecciones:

- Protección con enrocado aguas arriba, aguas abajo y sobre las márgenes del azud “Puente Carretero”, hasta lograr su optimización.
- Protección con enrocado aguas arriba, aguas abajo y sobre las márgenes del azud “Puente Ferroviario”, hasta lograr su optimización.
- Protecciones con enrocado en pilas de los puentes Carretero y Ferroviario.

En el caso de colocación de *enrocado* de aguas arriba y sobre las márgenes se modelaron distintas configuraciones en planta, con un diámetro representativo de 0,40 m en prototipo y espesor de 1 m. Bajo el enrocado se ha colocado una material textil que permite representar correctamente el nivel de la manta de geotextil que se colocará en obra.

Aguas abajo de los azudes se modelaron las protecciones de enrocado con distintas longitudes, medidas inmediatamente aguas abajo de cada azud. Se utilizaron rocas de diámetro representativo de 1,00 m en prototipo, con espesor del manto de protección de 2,00 m.

Las protecciones contra la erosión localizada en el Puente Carretero se modelaron con distintas configuraciones geométricas y de enrocado representativo (con diámetros de 0,40, 075 y 1,00m en prototipo) hasta lograr su desempeño óptimo, minimizando el volumen total de enrocado que asegure la estabilidad estructural de las pilas.

En ambos casos se modelaron distintas configuraciones en planta de las protecciones, hasta que llegara a su diseño óptimo para los escenarios hidrológicos considerados.

## **ENSAYOS REALIZADOS**

Sobre los modelos físicos de los azudes de la ciudad de Río Cuarto, se han realizado un total de 10 ensayos considerando distintas configuraciones de protecciones de márgenes y pilas, y además de los diferentes estados de los vertederos inflables. En la tabla siguiente se resumen los ensayos realizados.

**Tabla 1.-** Ensayos realizados sobre los modelos físicos tridimensionales.

Azud	Código de Ensayo	Objetivo
Puente Carretero	E1_APC_2900	Protecciones aguas arriba y aguas abajo del azud; Protecciones márgenes del río; Protecciones pilas puente Carretero.
	E2_APC_2900	Protecciones márgenes del río; Protecciones pilas puente Carretero.
	E3_APC_2900	Protecciones pilas puente Carretero.
	E4_APC_2900	Protecciones pilas puente Carretero.
	E5_APC_2900	Protecciones pilas puente Carretero.
	E6_APC_2900	Protecciones pilas puente Carretero.
	E7_APC_RD	Caudales de diseño vertedero inflable.
Puente Ferroviario	E8_APF_2900	Protecciones aguas arriba y aguas abajo del azud; Protecciones márgenes del río; Protecciones pilas puente Carretero.
	E9_APF_2900	Protecciones márgenes del río.
	E10_APF_RD	Caudales de diseño vertedero inflable.

En el caso de las protecciones de pilas del puente Carretero, éstas se encuentran separadas de las protecciones aguas arriba del azud, no habiéndose definido y verificado por ensayos previos, como en el caso de las correspondientes al puente Ferroviario (UNC, 2004).

Adicionalmente a los ensayos 3D resultó necesario efectuar ensayos para proteger el pie del cuenco disipador del segundo azud (puente Ferroviario) debido a efectos que se observaron con posterioridad de la ocurrencia de la primera crecida significativa (aproximadamente 800 m<sup>3</sup>/s). El efecto acumulado de la discontinuidad transitoria del transporte sólido producido durante la colmatación de los azudes, y de la erosión local aguas abajo, produjo una disminución del tirante de restitución de diseño superior a los 3 m al pie del azud y de 0,50 a 1000 m aguas abajo. Este efecto produjo que el resalto diseñado inicialmente no estuviera totalmente contenido, generándose un segundo resalto menor. Este segundo resalto debió ser controlado con un enrocado ad-hoc ensayado en un modelo 2D de detalle a escala 1:30.



**Foto 1.-** Resalto hidráulico aguas abajo del cuenco disipador.

## RESULTADOS OBTENIDOS

### AZUD PUENTE FERROVIARIO

A continuación se presenta un resumen de los resultados obtenidos para la configuración definitiva de las protecciones y para el caudal máximo de diseño (2900 m<sup>3</sup>/s). En las siguientes tablas se observan los resultados de erosión aguas arriba, aguas abajo y en las márgenes del azud.

**Tabla 2.-** Erosión final aguas arriba del APF, Ensayo E8\_APF\_2900. (Prog. 0 – Eje azul).

Secciones	MD	C-MD	Centro	C-MI	MI
Prog.	12,00	36,00	72,00	108,00	132,00
0,00	426,32	426,26	426,24	426,45	426,09
12,00	426,31	426,25	426,24	426,13	426,16
24,00	426,30	426,18	426,31	426,25	426,25
36,00	427,16	426,56	426,56	426,56	426,54
48,00	427,40	426,26	426,20	423,85	426,26
60,00					426,44
72,00					426,43

**Tabla 3.-** Erosión final aguas abajo del APF, Ensayo E8\_APF\_2900. (Prog. 0 – Eje azul).

Secciones	MD	C-MD	Centro	C-MI	MI
Prog.	12,00	36,00	72,00	108,00	132,00
0,00	425,36	425,60	425,42	425,60	425,77
12,00	423,87	424,15	423,55	423,84	425,10
24,00	425,26	423,67	422,13	423,55	427,80
36,00	423,61	423,78	423,14	422,18	425,93
48,00					424,99

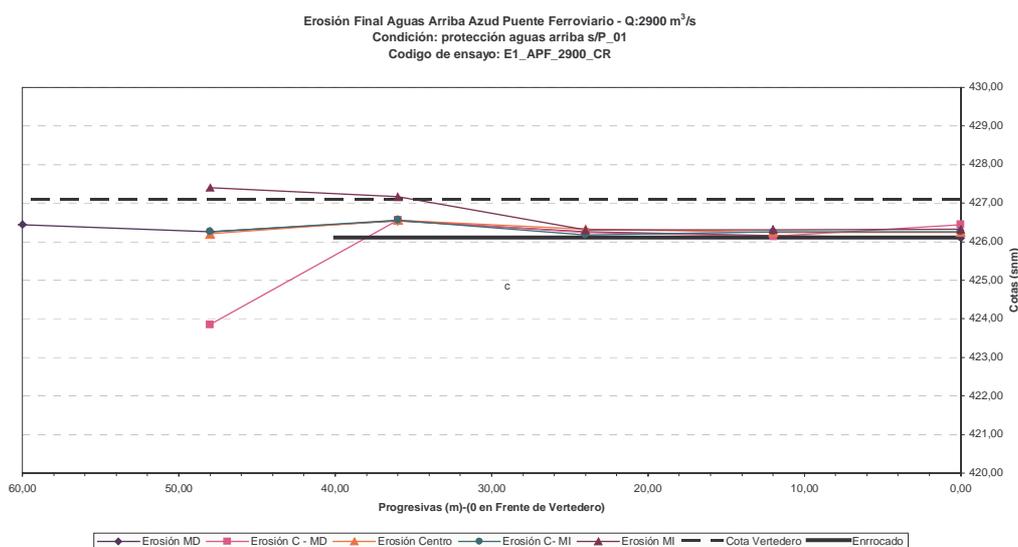
**Tabla 4.-** Cota resultante aguas arriba del APF en Márgenes Protegidas, Ensayo E8\_APF\_2900. (Prog. 0 – Eje azul).

Sección MD+120				Sección MD+84				Sección MD+12			
Protección		Terreno		Protección		Terreno		Protección		Terreno	
Prog.	Cotas	Prog.	Cotas	Prog.	Cotas	Prog.	Cotas	Prog.	Cotas	Prog.	Cotas
-5	427,78	0	427,88	-15	429,6	0	427,874	-25	429,93		
-1,2	427,78	12	426,25	-10	429,6	12	426,362	-23	429,93	0	426,22
14	426,1	24	426,56	9	426,1	24	424,142	0	426,1	12	426,16
21	426,1			17	426,1			8	426,1	24	426,19

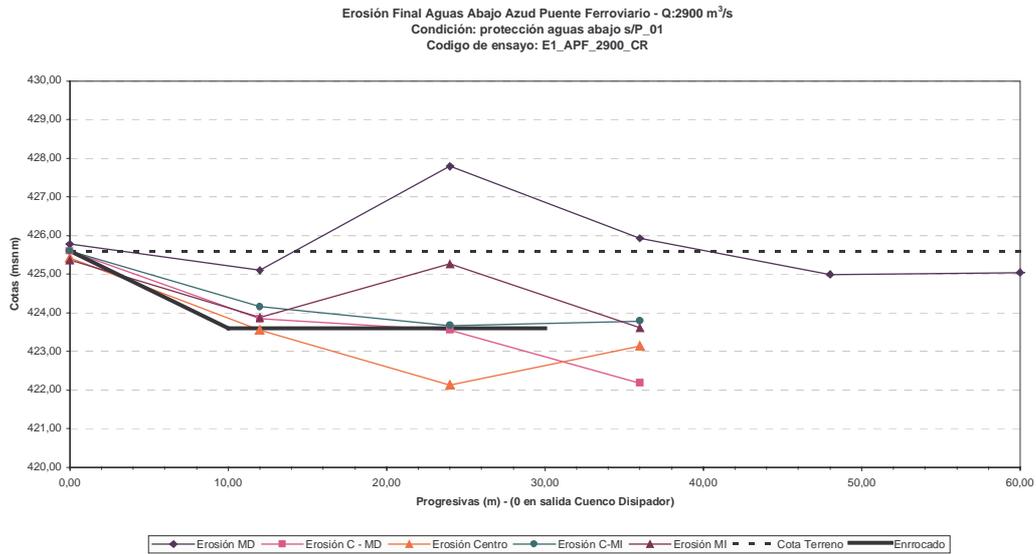
**Tabla 5.-** Cota resultante aguas abajo del APF en Márgenes Protegidas, Ensayo E8\_APF\_2900. (Prog. 0 – Eje azul).

Sección MD+120				Sección MD+84				Sección MD+12			
Protección		Terreno		Protección		Terreno		Protección		Terreno	
Prog.	Cotas	Prog.	Cotas	Prog.	Cotas	Prog.	Cotas	Prog.	Cotas	Prog.	Cotas
-23	428,1	-24	429,24	-22	427,6	-24	428,59	-15	426,6	-24	428,17
-21	428,1	-12	427,62	-18	427,6	-12	427,92	-12	426,6	-12	428,11
0	424,6	0	425,59	0	424,6	0	425,96	0	424,6	0	426,98
8	424,6	12	424,99	8	424,6	12	425,22	8	424,6	12	425,65

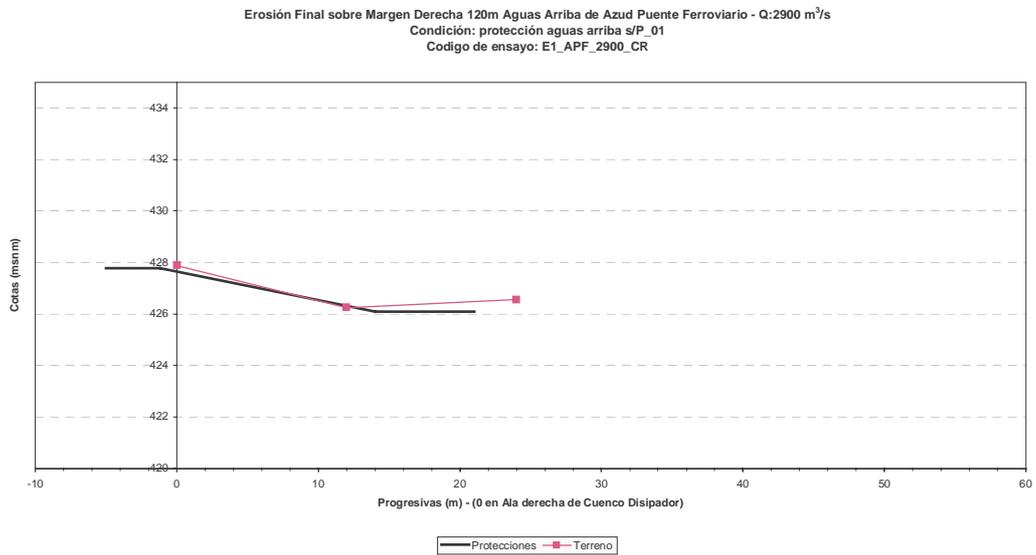
**Nota:** Las celdas coloreadas representan aquellas que poseen protección.



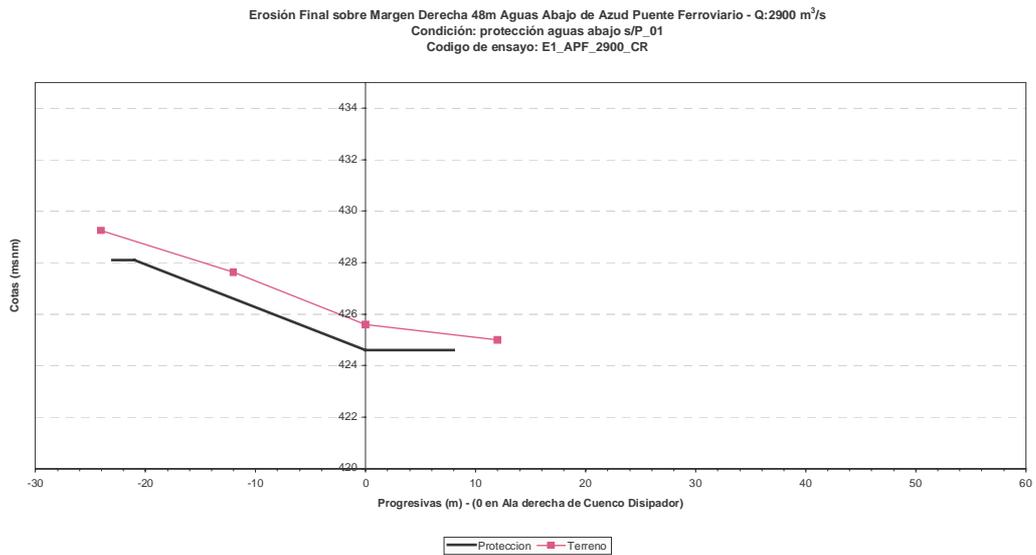
**Figura 1.-** Erosión aguas arriba del azud del Puente Ferroviario, Ensayo E8\_APF\_2900.



**Figura 2.-** Erosión aguas abajo del azud del Puente Ferroviario, Ensayo E8\_APF\_2900.



**Figura 3.-** Erosión final aguas arriba sobre margen derecha, Sección MD+120. Ensayo E8\_APF\_2900.



**Figura 4.-** Erosión final aguas abajo sobre margen derecha, Sección MD-48. Ensayo E8\_APF\_2900.



Foto 2.- Erosión final aguas abajo del APF. Ensayo: E8\_APF\_2900.

Como se observa en las figuras y tablas anteriores comportamiento de las protecciones proyectadas aguas arriba y aguas abajo del azud es aceptable. En el caso de la protección aguas abajo del azud se observa que en la sección central la erosión es mayor no comprometiendo la estabilidad del enrocado proyectado.

Aguas arriba del azud las protecciones se comportaron favorablemente, eliminando el proceso erosivo. Finalizado el ensayo se ha observado la migración de una pequeña cantidad de material de protección, que no afecta la estabilidad de la protección.

Esta migración de material se incrementa en las proximidades de las pilas del Puente Ferroviario, por lo cual se ha modificado las protecciones de enrocado en el sector, que han presentado con comportamiento apropiado en ensayos posteriores.

Aguas abajo las protecciones proyectadas se han comportado favorablemente evitando localmente el proceso erosivo que puede llegar a afectar la estabilidad de la estructura.

### AZUD PUENTE CARRETERO

A continuación se presenta un resumen de los resultados obtenidos para la configuración definitiva de las protecciones y para el caudal máximo de diseño ( $2900 \text{ m}^3/\text{s}$ ). En las siguientes tablas se observan los resultados de erosión aguas arriba, aguas abajo y en las márgenes del azud.

Tabla 6.- Erosión final aguas arriba del APC en msnm, Ensayo E1\_APC\_2900. (Prog. 0 – Eje azud).

Secciones	MD	C-MD	Centro	C-MI	MI
Prog.	12,00	36,00	72,00	108,00	132,00
0,00	432,03	432,03	432,05	432,11	431,89
12,00	432,01	431,72	430,73	431,57	430,87
24,00	431,60	430,85	430,78	431,48	430,73
36,00	432,01	431,09	431,03	431,63	430,73
48,00	431,70	430,97			
60,00	431,61	430,84			
72,00	431,83	431,10			

**Tabla 7.-** Erosión final aguas abajo del APC, Ensayo E1\_APC\_2900. (Prog. 0 – Eje azul).

Secciones	MD	C-MD	Centro	C-MI	MI
Prog.	12,00	36,00	72,00	108,00	132,00
0,00	431,30	431,30	431,12	431,30	431,30
12,00	429,62	429,38	428,96	428,43	428,83
24,00	431,36	429,32	429,05	427,67	428,66
36,00	431,60	428,51			
48,00	432,05	428,61			
60,00	431,33				
72,00	430,97				

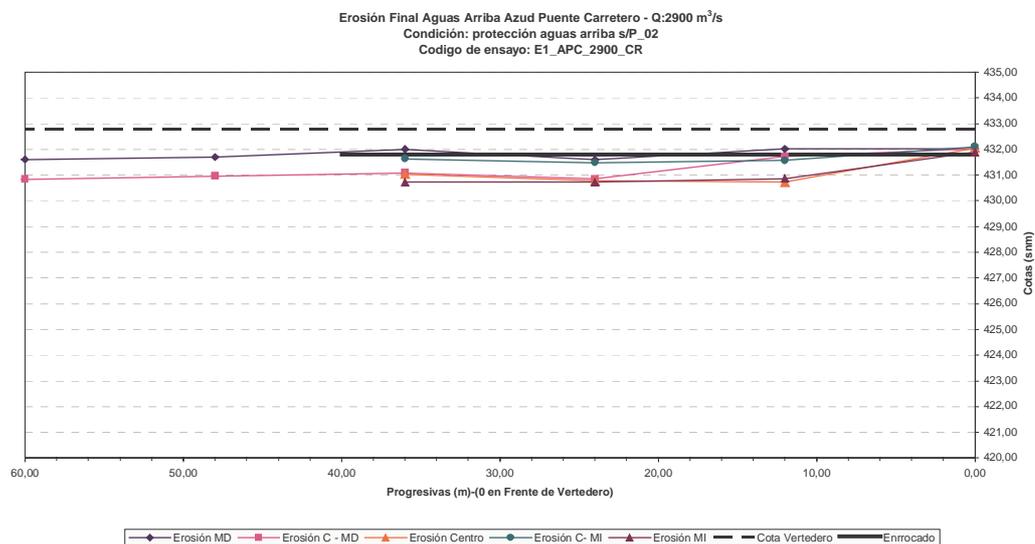
**Tabla 8.-** Cota resultante aguas arriba del APC en Márgenes Protegidas, Ensayo E1\_APC\_2900. (Prog. 0 – Eje azul).

Sección MD+72				Sección MD+36				Sección MD+12			
Protección		Terreno		Protección		Terreno		Protección		Terreno	
Prog.	Cotas	Prog.	Cotas	Prog.	Cotas	Prog.	Cotas	Prog.	Cotas	Prog.	Cotas
-12	434,39	-12	434,39	-12	433,15	-12	433,6	0	431,80	0	432,17
-8	434,39	-12	434,39	-8	433,15	0	432,35	6	431,80	12	432,01
0	431,80	0	433,19	0	431,80	12	432,01	12	431,80	24	431,81
6	431,80	12	431,83	6	431,80	24	432,56	24	431,80	36	431,72
				12	431,80	36	431,09	36	431,80	48	432,1
								48	431,80		

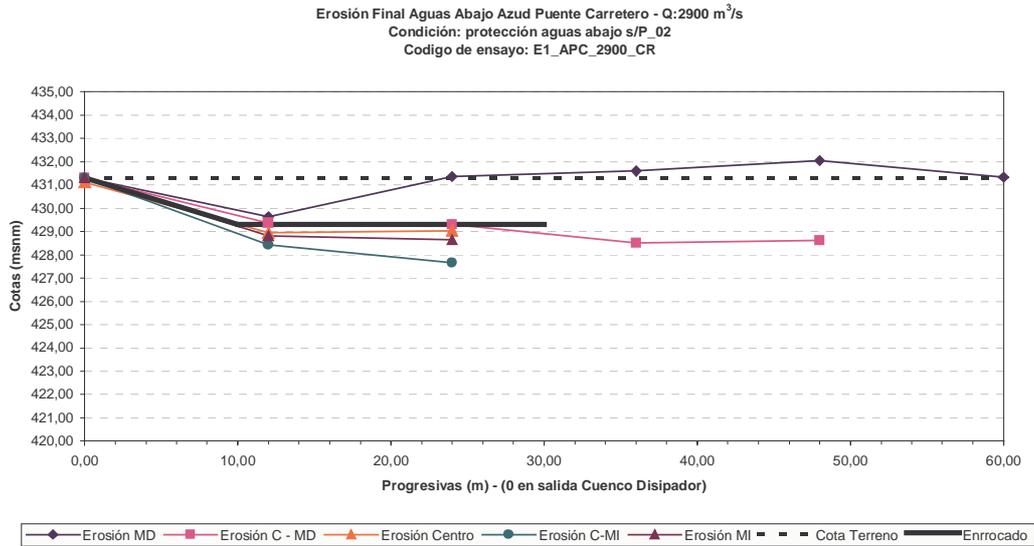
**Tabla 9.-** Cota resultante aguas arriba del APC en Márgenes Protegidas, Ensayo E1\_APC\_2900. (Prog. 0 – Eje azul).

Sección MD+72				Sección MD+96				Sección MD+132			
Protección		Terreno		Protección		Terreno		Protección		Terreno	
Prog.	Cotas	Prog.	Cotas	Prog.	Cotas	Prog.	Cotas	Prog.	Cotas	Prog.	Cotas
-22	432,7	-12	433,04	-12	433,19	-12	433,19	-12	433,19	0	431,93
-18	432,7	0	431,25	0	430,30	0	431,51	0	430,30	12	429,98
0	430,30	12	430,97	8	430,30	12	430,19	8	430,30	24	429,13
8	430,30	24	429,97			24	430,34				

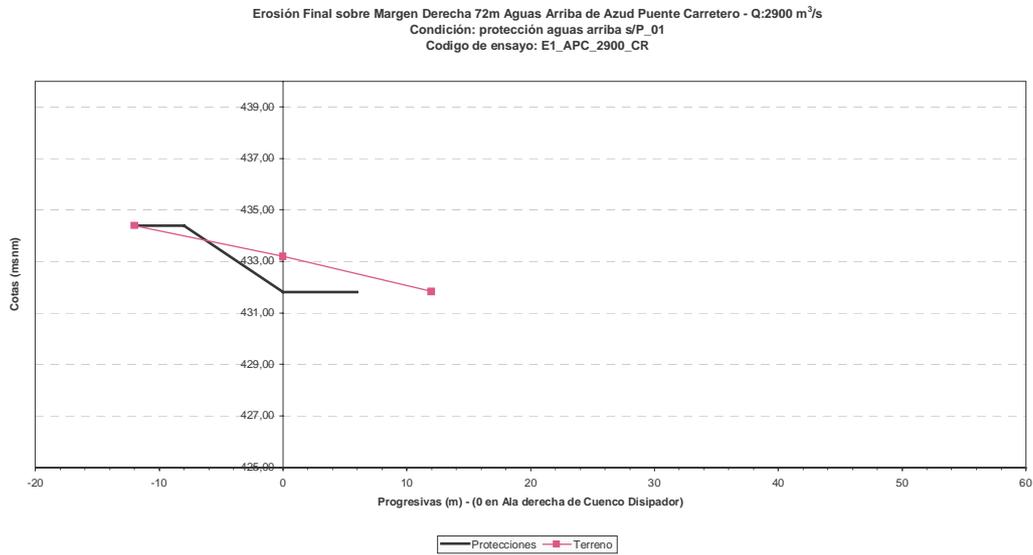
**Nota:** Las celdas coloreadas representan aquellas que poseen protección.



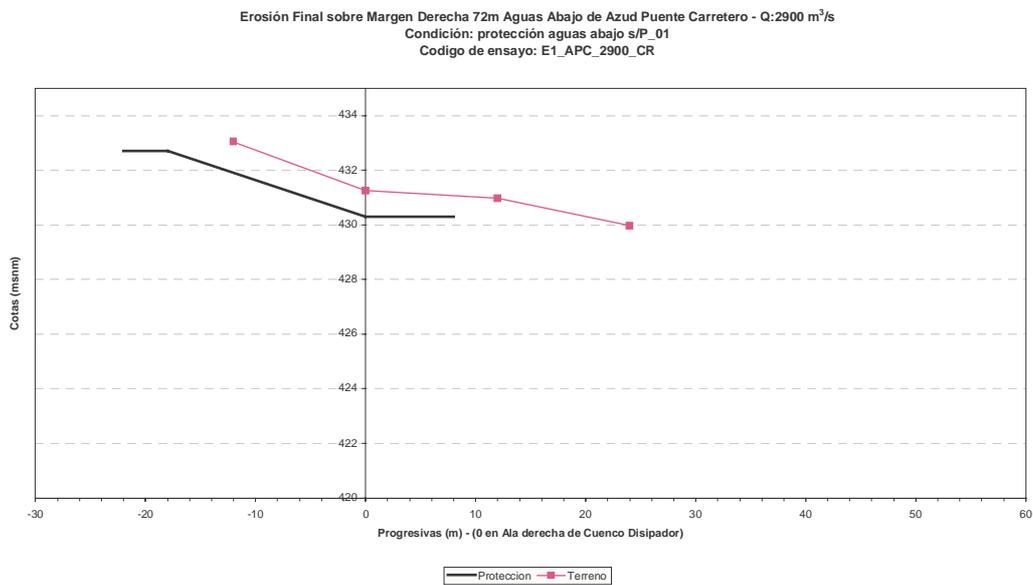
**Figura 5.-** Erosión aguas arriba del azud del Puente Carretero, Ensayo E1\_APC\_2900.



**Figura 6.-** Erosión aguas abajo del azud del Punte Carretero, Ensayo E1\_APC\_2900.



**Figura 7.-** Erosión final aguas arriba sobre margen derecha, Sección MD+72. Ensayo E1\_APC\_2900.



**Figura 8.-** Erosión final aguas abajo sobre margen derecha, Sección MD-72. Ensayo E1\_APC\_2900.



Foto 4.-- Vista aguas arriba estado final protecciones margen derecha. Ensayo E1\_APC\_2900.

Aguas arriba del azud el comportamiento de las protecciones proyectadas es aceptable, eliminando las erosiones frente al azud, y asegurando así la estabilidad de la estructura para el escenario hidrológico ensayado.

Se observó la migración de una pequeña cantidad del material de enrocado hacia aguas abajo, que no compromete la estabilidad del enrocado.

Aguas abajo la protección se comportó favorablemente deteniendo el proceso erosivo, asegurando la estabilidad de la estructura por falta de material de sustentación.

## CONCLUSIONES

- En los escenarios sin protecciones, aguas arriba del azud sobre la margen derecha, se produjo una erosión significativa por efecto de turbulencia generada en el ingreso del flujo lateral desde la planicie.
- La forma de la erosión que se observó aguas abajo del cuenco de disipación de energía es la clásica asociada a la macroturbulencia generada en el resalto hidráulico.
- Las protecciones aguas arriba y aguas abajo del azud se proyectaron de manera de verificar una deformación aceptable para el escenario de caudales ensayado. Estas protecciones garantizan la estabilidad estructural del azud aguas arriba y aguas abajo del mismo.
- Se determinaron las erosiones que se producen a la salida del cuenco en el caso sin protección. La magnitud de las mismas, justificó el ensayo y diseño de una protección con enrocado hasta satisfacer la condición de estabilidad del material para el máximo caudal de ensayo.
- El resalto hidráulico producido en el cuenco disipador, permaneció parcialmente ahogado, produciéndose en el pie, como resalto libre, para ciertas condiciones del flujo en algunos de los ensayos realizados.
- 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 equivalente en prototipo de aproximadamente 15 hs. El caso real de crecidas con transporte de sólidos y menor duración producirá erosiones de menor magnitud.

## BIBLIOGRAFÍA

**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”.

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

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

**U.N.C.** (2004) “Modelación Física Tridimensional de las Protecciones de los Azudes del Río Grande”. *Laboratorio de Hidráulica. Universidad Nacional de Córdoba*.

**U.N.C.** (2003) “Informe Preliminar de los estudios sobre el Modelo Físico del Azud del Puente Carretero”. *Laboratorio de Hidráulica. Universidad Nacional de Córdoba*.

**U.N.C.** (2003) “Informe de Avance de los estudios en Modelos Físicos de Azudes de Río Cuarto”. *Laboratorio de Hidráulica. Universidad Nacional de Córdoba*.

**U.N.C.** (2003) “Informe de Avance de los estudios en Modelos Físicos de Azudes de Río Cuarto”. *Laboratorio de Hidráulica. Universidad Nacional de Córdoba*.

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

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

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