



EROSIONES AGUAS ABAJO DEL MODELO FÍSICO DE LA PRESA LOS MOLINOS (JUJUY)

**Matías Eder¹, Mariano Corral¹, Gerardo Hillman¹, Mariana Pagot¹, Nicolás Bellino¹,
Paolo Gyssels¹, Carlos M. García¹, Andrés Rodríguez¹, Gonzalo Moya¹, H. Daniel
Farias², Daniel Bachiega³, Héctor Muratore¹.**

¹Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA), Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEFyN), Universidad Nacional de Córdoba (UNC). Av Filloy s/n, Ciudad Universitaria, CP 5000, Córdoba, Argentina.

Email: matiaseder2@gmail.com

²IRHi-FCEyT, Universidad Nacional de Santiago del Estero, Santiago del Estero, Argentina.

³Laboratorio de Hidráulica Aplicada, Instituto Nacional del Agua, AU Ezeiza-Cañuelas Km 1,62, Ezeiza, Argentina.

RESUMEN

En este trabajo se presentan estudios experimentales realizados en el modelo físico del dique Los Molinos (Jujuy), construido en el Laboratorio de Hidráulica de la FCEFyN – UNC, el cual consiste en un modelo físico tridimensional (escala 1:65) con similitud de Froude, en el cual se presenta la caracterización de las erosiones locales aguas abajo de las distintas estructuras de descarga de la presa para distintos escenarios de modelación. Se describe el método de selección del material granular del fondo móvil realizando las consideraciones que deben cumplir para reproducir correctamente el fenómeno, las técnicas de medición de las erosiones locales en el modelo físico las cuales consisten en una técnica tradicional de medición con nivel óptico y escala graduada al mm y por otro lado una nueva técnica de medición utilizando una cámara digital Kinect fabricada por Microsoft en el año 2010. Finalmente se muestran los resultados de las erosiones críticas obtenidas en los ensayos y se realiza una comparación con los obtenidos mediante formulaciones matemáticas empíricas.

ABSTRACT

This work presents an experimental work on the physical model of the Los Molinos dam (Jujuy) built at Hydraulics Laboratory, FCEFyN – UNC, which consists of a 3D physical model (1:65 scale) designed using a Froude similarity. Estimates of local scour depths are reported downstream of the dam discharge structures for three different modeling scenarios. First, the method of selecting the optimum granular bed material is presented describing the major considerations that must be met to accurate modeling the phenomenon. For measuring local scour depth in the physical model two different experimental techniques have been used: a) the conventional technique of measuring bed elevations using and optical level and b) a new measurement techniques using a Kinect digital camera manufactured by Microsoft in 2010. Finally, experimental results the critical scour depth are reported and a comparison is performed between these results and others obtained using empirical formulations.

INTRODUCCIÓN

La presa de derivación Los Molinos está ubicada sobre el Río Grande, pocos kilómetros aguas arriba de la ciudad San Salvador de Jujuy y aproximadamente 1 kilómetro aguas abajo de la confluencia con el Río Reyes. Su principal finalidad es la derivación de agua hacia el canal Río Grande que se utiliza para riego artificial.

La presa está constituida por tres estructuras de descarga, un vertedero con cota de descarga a nivel fijo (Dique Fijo) de 200m de longitud, un vertedero controlado por cuatro compuertas de

tipo segmento circular (Dique Móvil) de 70m de longitud y un canal de limpieza adjunto a este sobre la margen derecha (Canal Moderador) de 10m de longitud.

La interposición de la presa de derivación Los Molinos en el Río Grande ha originado un corte del flujo de sedimentos desde el sector aguas arriba de la presa hacia el sector aguas abajo. Esto generó la colmatación del vaso de la presa y complementariamente dio lugar a un proceso de erosión generalizada del lecho aguas abajo de aproximadamente 3-4m. Esta nueva situación se aparta de las condiciones de diseño de la obra original, lo cual se traduce en un comportamiento anómalo de las estructuras hidráulicas de descarga y dissipación.

Por lo expuesto se proyectaron obras de re funcionalización de las estructuras de descarga y para evaluar el diseño propuesto se construyó en el Laboratorio de Hidráulica de la FCEfyN - UNC un modelo físico tridimensional (escala 1:65) con similitud de Froude (Figura 1).

En este trabajo se presentan los estudios experimentales realizados para evaluar las erosiones locales aguas abajo de la de la presa Los Molinos para diferentes escenarios extremos.

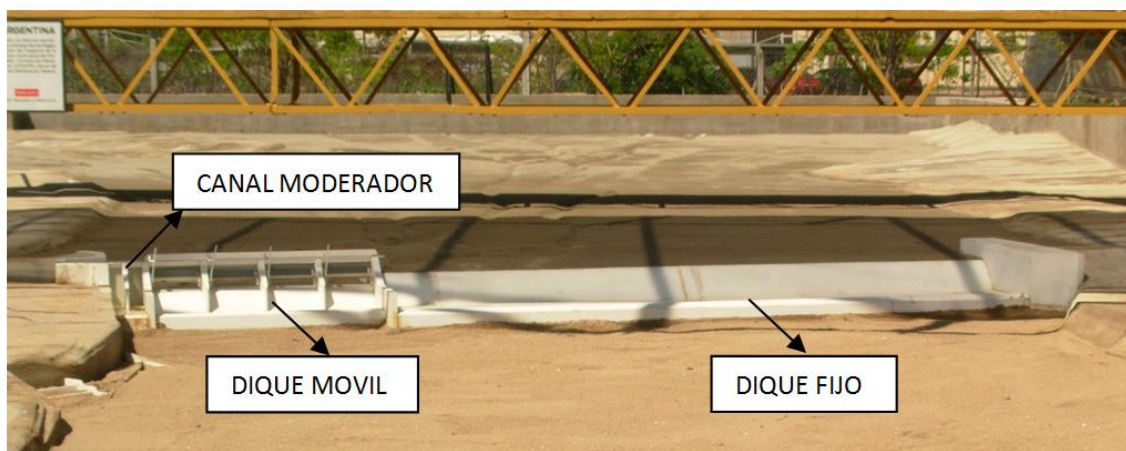


Figura1.- Modelo Físico de la Presa Los Molinos (Jujuy).

CONDICIONES EXPERIMENTALES ENSAYADAS

Para caracterizar la erosión local crítica se definieron diferentes escenarios de modelación. Estos se pueden clasificar en ensayos de caudales máximos, ensayos de despegue y de caudales intermedios.

A continuación se describen los escenarios ensayados en el modelo físico:

1. Ensayos de caudales máximos:

- Caudal de $900 \text{ m}^3/\text{s}$ (período de retorno TR menor a 5 años) que corresponde al máximo caudal que pueden evacuar el Dique Móvil y Canal Moderador antes de que el agua comience a escurrir por el dique fijo.
- Caudal de $3200 \text{ m}^3/\text{s}$ (TR de aproximadamente 500 años) con compuertas totalmente cerradas y pasante solo por el Dique Fijo.
- Caudal de $4200 \text{ m}^3/\text{s}$ (TR de 10000 años) con las compuertas del Dique Móvil y Canal Moderador totalmente abiertas.

2. Ensayos de despegue, corresponden a los caudales mínimos que generan la separación del chorro de agua de la estructura de descarga, los cuales pueden generar erosiones locales al pie de la presa mayores a las producidas por los caudales máximos:

- Caudal de $90 \text{ m}^3/\text{s}$ escurrido solo por el Canal Moderador (con las compuertas del Dique Móvil cerradas).
- Caudal de $220 \text{ m}^3/\text{s}$ solo por Dique Móvil con todas sus compuertas abiertas y las del Canal Moderador completamente cerradas.

- Caudal de 600 m³/s por el Dique Fijo con todas las compuertas del Dique Móvil y Canal Moderador cerradas, al realizar el ensayo se observó que la separación del flujo solo se daba sobre la margen derecha donde se concentra el mayor caudal específico, se atribuye este fenómeno a la tridimensionalidad del flujo de aproximación a la presa.
3. Ensayos de caudales intermedios, correspondientes a caudales con recurrencias bajas:
- Caudal de 1600 m³/s escurriendo por el Canal Moderador, Dique Móvil y Dique Fijo (con todas las compuertas, completamente abiertas), TR aproximadamente 20 años.
 - Caudal de 600 m³/s escurriendo solo por el Canal Moderador y Dique Móvil (con todas las compuertas abiertas), TR de 2 años.

Tabla 1.- Escenarios ensayados

Ensayo		Caudal Total (m ³ /s)	Caudal Grande (m ³ /s)	Caudal Reyes (m ³ /s)	Motivación
Ensayos de Caudales Máximos	N°1	900	594	306	Caudal Máximo Dique Móvil (DM) y Canal Moderador (CM)
	N°2	3200	1088	2112	Caudal Máximo Solo Dique Fijo (DF)
	N°3, 7, 9*	4200	2772	1428	Caudal para Periodo de Retorno T=10000 años
Ensayos de Despeque	N°4	90	90	-	Caudal de Despeque Canal Moderador (CM)
	N°5	225	225	-	Caudal de Despeque Dique Móvil (DM)
	N°10	600	600	-	Caudal de Despeque Dique Fijo (DF)
Ensayos de Caudales Intermedios	N° 11	1600	1066	534	Caudal de Verificación DF, DM y CM
	N° 12	600	400	200	Caudal de verificación DM y CM

GRANULOMETRÍA DEL LECHO

Para representar el lecho móvil en el modelo se ha utilizado un material natural de la misma densidad y de características clásticas similares a las que se encuentran hoy en prototipo, cuya curva granulométrica llevada a escala 1:65 se denomina aquí “curva ideal”. Para pasar de la constitución ideal a la real a emplear en el modelo, es necesario tener en cuenta las siguientes limitaciones:

1) Escalar todos los diámetros de la curva granulométrica implica que una parte importante de ella, aproximadamente el 35%, esté constituida por material pasante Tamiz 200 (diámetros inferiores a 75 micrones) por este motivo no se consideró esta fracción de la curva.

2) Para diámetros menores a 0,6mm se generan formas de fondo que modifican la macrorugosidad del cauce. Estas pueden afectar significativamente la representatividad del fenómeno. Por esta razón se consideró como diámetro mínimo admisible 0,6mm.

Se han preparado por cribado, separación, selección y mezclado las siguientes curvas granulométricas:

- Muestra 1: arena seleccionada (1 – 2 mm);
- Muestra 2: arena gruesa (0,6 – 4mm) mezclada con grava fina (hasta 12mm);
- Muestra 3: arena gruesa (0,6 – 4mm).

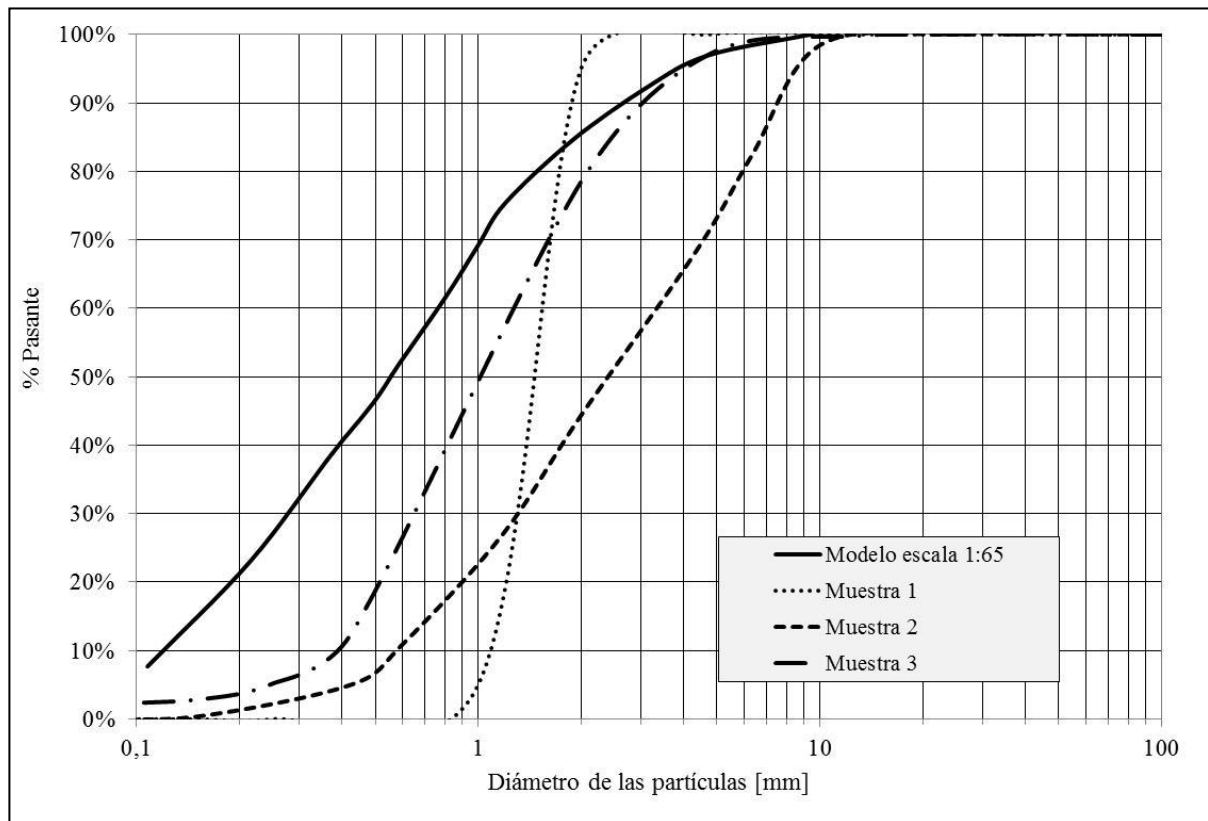


Figura2.- Granulometría de las muestras, UNC (2012).

Para seleccionar la muestra que se utilizó en el modelo, además del análisis de la granulometría, se han tenido en cuenta las siguientes premisas:

- El objetivo de los ensayos ha sido estimar la erosión local aguas debajo de la presa, variable que en las expresiones empíricas depende del d_{85} - d_{90} o incluso en algunas fórmulas no depende del diámetro.
- No son objetivos de los ensayos evaluar el proceso de acorazamiento ni el transporte de sedimentos o erosión general del tramo.
- No se ha considerado aporte de sedimentos, tomando como hipótesis para estos ensayos “aguas claras”.
- La rugosidad del lecho en ríos de grava depende de los diámetros de la fracción más gruesa (d_{84} , d_{90}), en este caso en particular dado que la granulometría es extendida resulta muy probable que se produzca “acorazamiento”. Esto implica un aumento de la rugosidad del cauce ya que se incrementa el diámetro medio debido a la coraza.
- A nivel de macroformas fluviales, se debe observar aguas abajo de la fosa de erosión la formación de una barra de sedimentos, constituida por el material grueso removido por el impacto del chorro de agua.

Para verificar cuál de las muestras es la que mejor reproduce el fenómeno, además de cálculos en gabinete, se han ensayado las tres muestras en el modelo. Los resultados observados en estos ensayos se resumen a continuación:

Muestra 1: No se generó la barra de sedimentación y/o contención aguas abajo de la fosa de erosión, por esta razón la erosión continuó indefinidamente en el tiempo, es decir, no se estabilizó. Se concluye que esta muestra no reproduce satisfactoriamente el fenómeno, por lo que fue descartada.

Muestra 2: Se generó la barra de sedimentación y/o contención, lo que resultó en un ensayo estable en el tiempo. Sin embargo se formó una coraza en el talud de aguas abajo del foso de erosión y en la barra de sedimentos con un diámetro medio de 8 mm y máximo de 12 mm, equivalentes a 520 y 780 mm en prototipo (Figura 3) este material se encuentra en prototipo en forma aislada por lo tanto no se tiene certeza de que exista en suficiente cantidad como para formar esta coraza.



Figura3.- Acorazamiento con diámetro medio de 8mm y máximo de 12mm.

Muestra 3: Se generó la barra de sedimentación y el ensayo resultó estable. Además se produjo la coraza en el talud de aguas abajo y en la barra de sedimentos con un diámetro medio de 4 mm, equivalentes a 260mm en prototipo (Figura 4).

Esta granulometría ha sido la seleccionada para el representar el lecho móvil, UNC (2012).



Figura4.- Barra de sedimentos aguas debajo del foso de erosión, ensayo N°1
900m³/s.

En resumen, se considera que la fracción de la curva granulométrica constituida en el modelo (muestra 3) es representativa de la existente hoy en el prototipo, descartándose la fracción más gruesa por la existencia aislada de esos diámetros, y se pudo observar que reproduce correctamente el fenómeno estudiado.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Durante la realización de los ensayos se monitoreó periódicamente (con intervalos de tiempo mayores a medida que avanzaba el desarrollo del ensayo) la evolución de la erosión en el tiempo, para ello se relevaron las profundidades de erosión con nivel óptico en seis puntos al pie de la presa y en otros seis al fondo del foso de erosión, estas mediciones se realizaron en todos los ensayo hasta que la erosión se estabilizó. Luego se desactivó el modelo en forma controlada, para evitar efectos de apagado, y una vez drenado por completo el modelo se procedió a realizar las mediciones finales de las erosiones, estas mediciones se realizaron utilizando dos técnicas diferentes:

a) Medición Tradicional: Consiste en un relevamiento convencional de puntos sobre perfiles longitudinales y transversales, utilizando un nivel óptico y una escala graduada al milímetro. Se definieron tres perfiles paralelos al eje de la presa para realizar las mediciones: Perfil 1 al pie de la presa; Perfil 2 en el fondo del foso de erosión; Perfil 3 en la barra de sedimentos (Figura 5) y dos perfiles perpendiculares a estos: Perfil 4 en el Dique Móvil; Perfil 5 en el Dique Fijo (Figura 6).

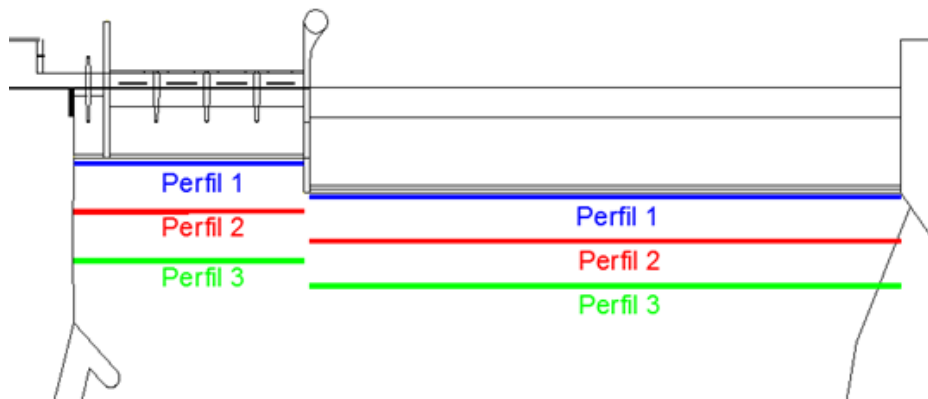


Figura5.- Ubicación de perfiles paralelos al eje de la presa para medir las erosiones finales.

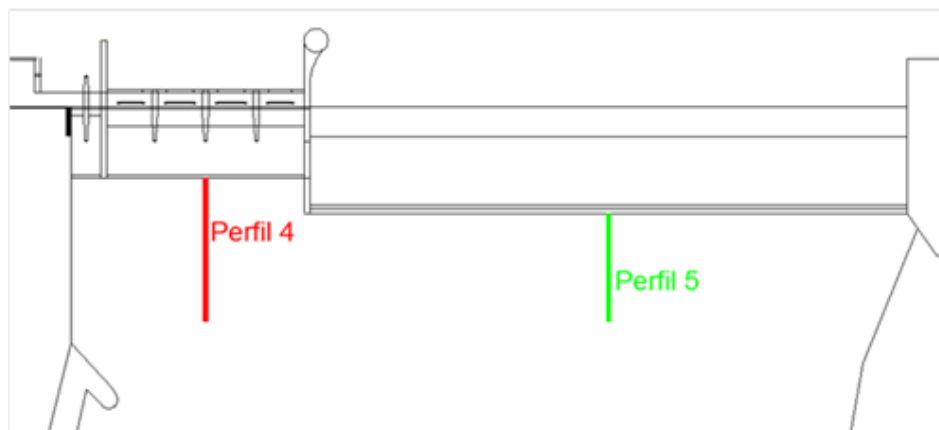


Figura6.- Ubicaciones de perfiles transversales al eje de la presa para medir las erosiones finales.

b) Medición Digital: Se realizaron utilizando una cámara digital Kinect fabricada por Microsoft en el año 2010.

Esta metodología de medición se basa en la capacidad del sensor y receptor de la cámara de emitir y registrar la respuesta de un plano láser (el sensor KINECT consiste en un emisor laser infrarrojo, una cámara infrarroja y una cámara óptica RGB).

El principio de medición de la profundidad consiste en la emisión de un láser infrarrojo y el registro de los datos de su reflexión, para luego aplicar un proceso de triangulación.

Los datos relevados con la cámara Kinect representan una matriz de 640 x 480 pixeles, lo que en prototipo equivale a una superficie relevada digitalmente de 85 m x 54 m. Esta superficie cuenta con una resolución de 307200 puntos, adquiriendo así cada pixel un tamaño espacial de 12 cm promedio ($X=11,3$ cm e $y= 13$ cm). (Bellino et al. 2013).

Aplicando esta metodología se puede reproducir la superficie relevada en archivos digitales.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este apartado se presentan los resultados obtenidos aplicando las distintas técnicas de medición para el ensayo N°3 – correspondiente a un caudal de $4200\text{m}^3/\text{s}$, posteriormente muestra un resumen de las erosiones críticas obtenidas para todos los ensayos (Tabla 1).

En la Figura 7 se observa la evolución de la erosión en el tiempo, el eje de abscisas representa el tiempo a partir del instante en el que el agua comienza a pasar por la presa y en ordenadas se muestra la cota del fondo del foso se erosión medido con nivel óptico durante la ejecución del ensayo en seis puntos (e1-e6).

En la Figura 8 se puede apreciar la erosión final, obtenida aplicando el método tradicional de medición en los tres perfiles paralelos al eje de la presa (Figura 4) desde margen derecha hasta margen izquierda.

En la Figura 9 se observa el resultado de la erosión medida con la cámara Kinect donde se aprecia un perfil paralelo al eje de la presa que pasa por el fondo del foso de erosión.

En la Figura 10 se comparan los resultados obtenidos en el relevamiento de las erosiones finales utilizando las dos técnicas experimentales (convencional y digital) en el perfil 2 paralelo al eje de la presa y cuya localización se indica en la Figura 4. Se observa un muy buen desempeño de la cámara digital Kinect generando información con mayor resolución espacial que con el nivel óptico.

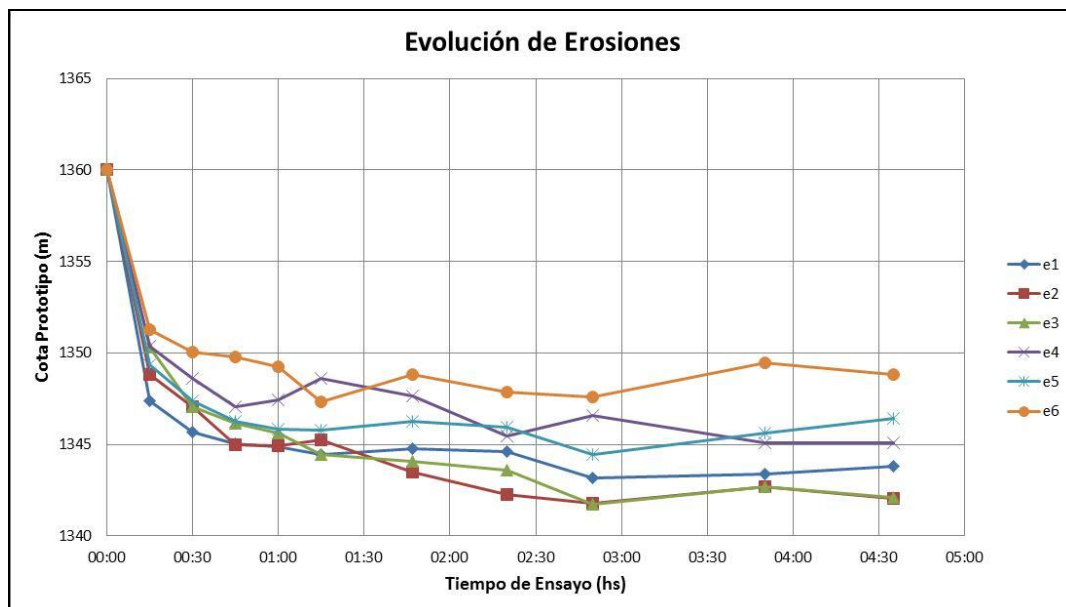


Figura7.- Evolución temporal de la erosión en seis puntos de medición situados en la fosa de erosión (Ensayo N°3 – $4200\text{ m}^3/\text{s}$), UNC (2012).

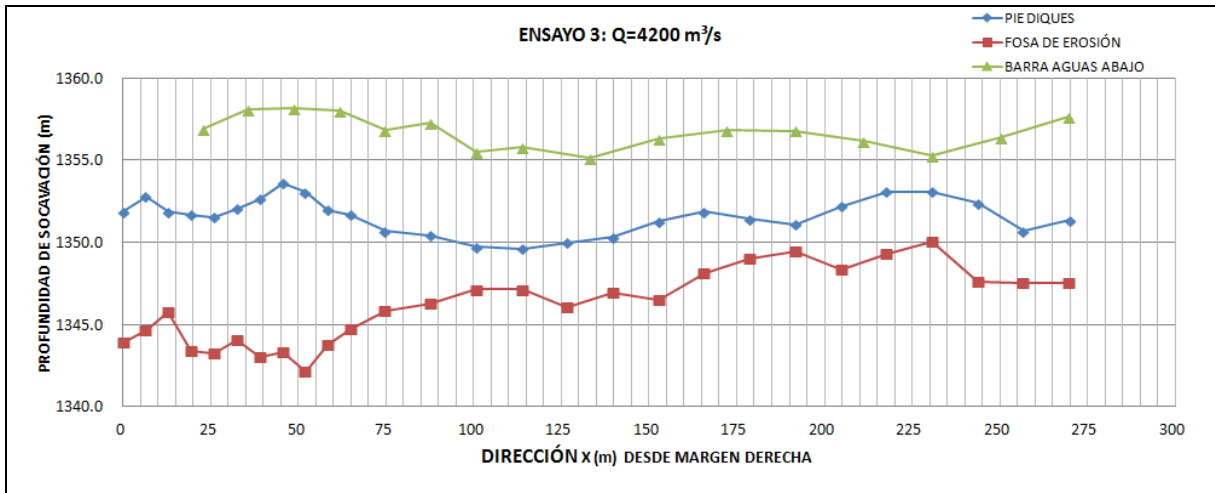


Figura8.- Erosión final en los tres perfiles paralelos al eje de la presa (Ensayo N°3 – 4200 m³/s), UNC (2012).

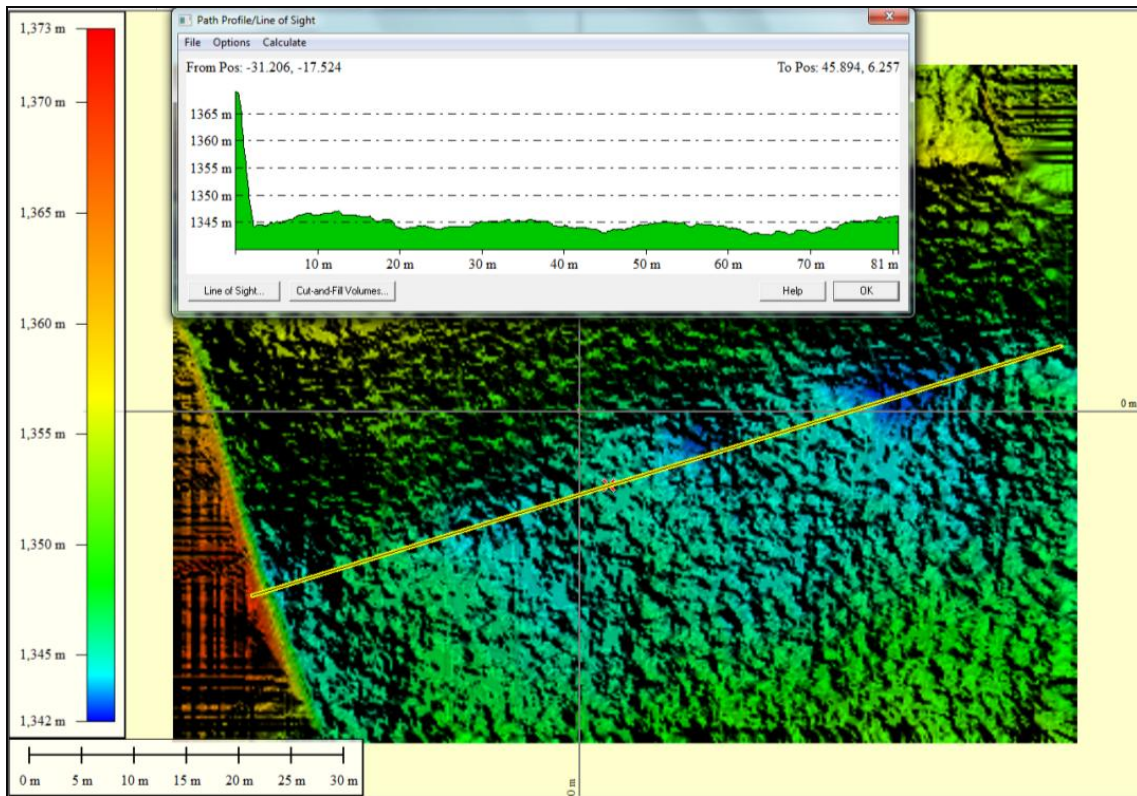


Figura9.- Perfil paralelo a la presa, en correspondencia con el foso de erosión. Ensayo N°3 – 4200 m³/s en la zona del CM y DM, UNC (2012).

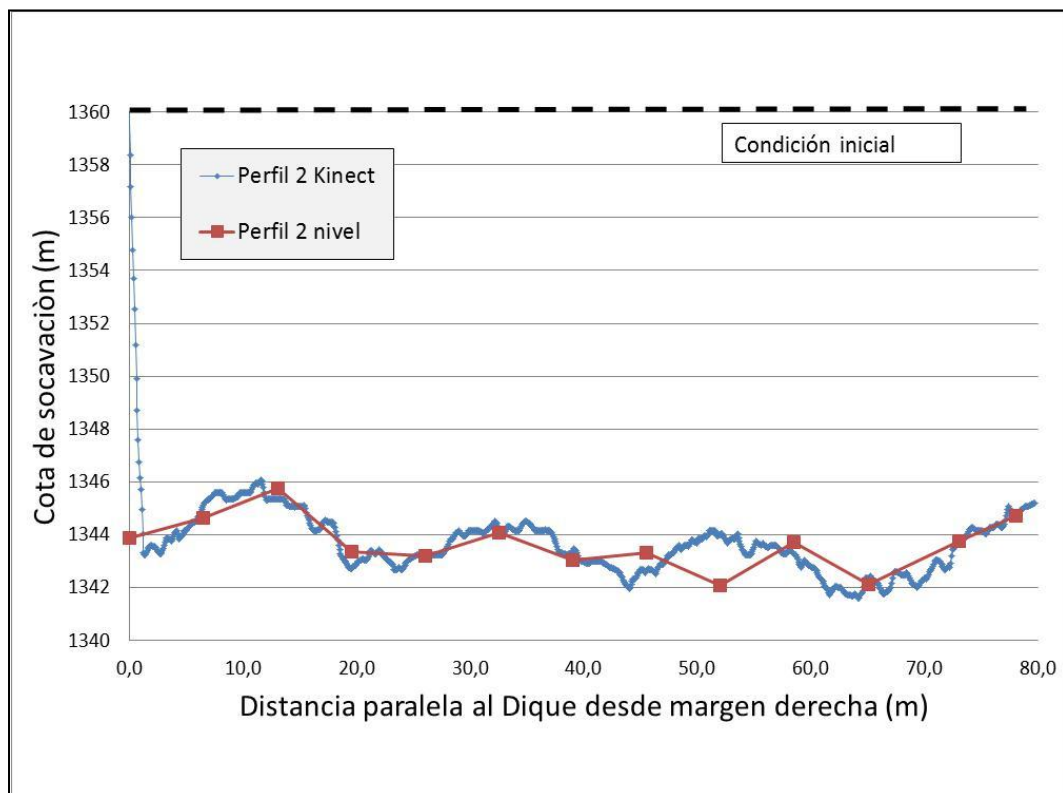


Figura10.- Comparación de resultados obtenidos con el método tradicional y con la cámara digital Kinect (Perfil paralelo al eje de la presa Perfil 2. Caudal $Q=4200\text{m}^3/\text{s}$), UNC (2012).

En las tablas 2, 3 y 4 se presentan los resultados de las erosiones críticas. Se detallan las cotas (expresadas como cotas en prototipo) y las profundidades de erosión tanto al pie de la presa como en el foso de erosión para el Canal Moderador, Dique Móvil y Dique Fijo.

Tabla 2.- Erosiones críticas al pie y en el foso de erosión para la zona aguas abajo del Canal Moderador. Las erosiones máximas se expresan como cotas en prototipo.

	Ensayo	Cota de erosión máxima (m)	Profundidad de erosión (m)
Pie del Dique	Despegue – $90\text{m}^3/\text{s}$	1351	9
Foso de Erosión	Caudal Máx. – $4200\text{m}^3/\text{s}$	1344,6	15,4

Tabla 3.- Erosiones críticas al pie y en el foso de erosión para la zona aguas abajo del Dique Móvil. Las erosiones máximas se expresan como cotas en prototipo.

	Ensayo	Cota de erosión máxima (m)	Profundidad de erosión (m)
Pie del Dique	Caudal Máx. – $4200\text{m}^3/\text{s}$	1351,8	8,2
Foso de Erosión	Caudal Máx. – $4200\text{m}^3/\text{s}$	1342,3	17,7

Tabla 4.- Erosiones críticas al pie y en el foso de erosión para la zona aguas abajo del Dique Fijo. Las erosiones máximas se expresan como cotas en prototipo.

	Ensayo	Cota de erosión máxima (m)	Profundidad de erosión (m)
Pie del Dique	Caudal Máx. – $4200\text{m}^3/\text{s}$	1350,3	9,7
Foso de Erosión	Caudal Máx. – $4200\text{m}^3/\text{s}$	1347,1	12,9

Se puede observar que el ensayo de 4200 m³/s resulto ser crítico para la mayoría de las erosiones, a excepción de la producida al pie del canal moderador, por este motivo se repitió el ensayo de 4200m³/s en tres oportunidades, en la Figura 11 se puede observar una comparación de los resultados obtenidos en los perfiles paralelos al eje de la presa Perfil 1 (pie de presa) y Perfil 2 (fosa de erosión - Figura 4). Se observa una muy buena repetitividad de los resultados experimentales.

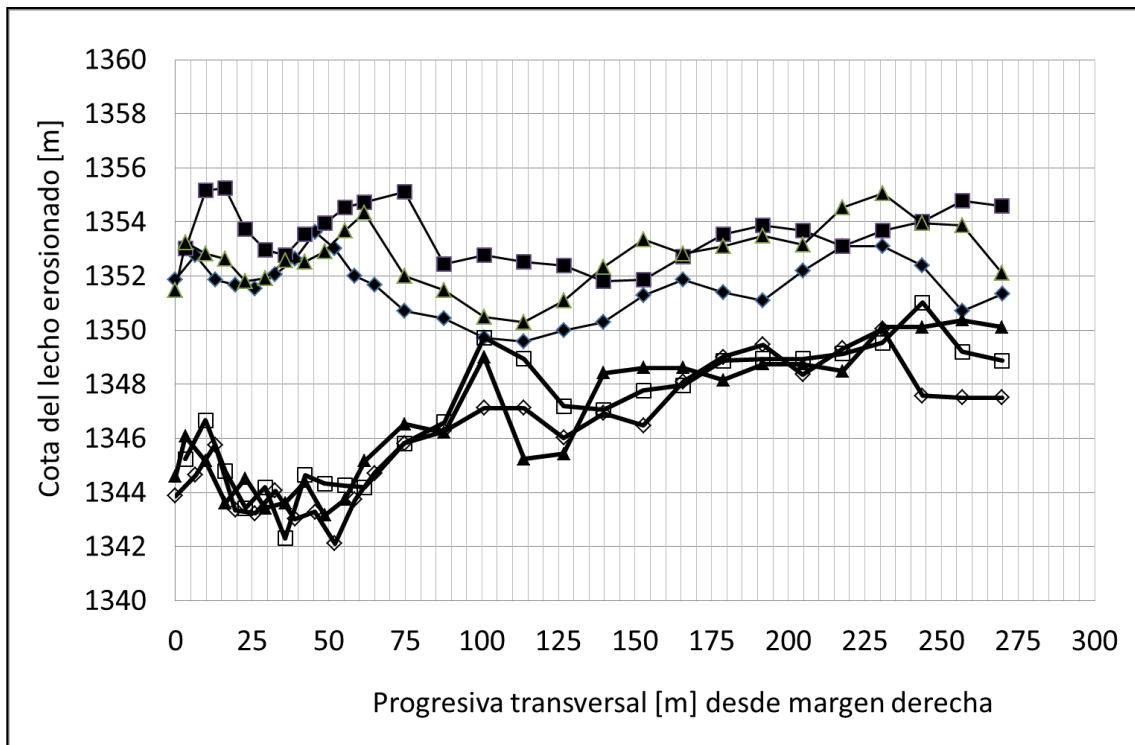


Figura11.- Comparación de erosiones para los tres ensayos de 4200m³/s en los Perfiles 1 (pie de presa, símbolos rellenos) y 2 (fosa de erosión, símbolos abiertos), misma forma de los símbolos indica resultados del mismo ensayo.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES CON FORMULACIONES MATEMÁTICAS

Se presentan en este apartado las erosiones máximas obtenidas analíticamente a partir de formulaciones matemáticas. Para su estimación se asumió un funcionamiento de salto esquí donde la lámina lanzada impacta en un manto de agua, produciendo una disipación macroturbulenta en el cauce y una erosión localizada alejada de la zona de despeque.

Existen numerosas investigaciones que permiten determinar la profundidad de erosión sobre la base de consideraciones energéticas del escurrimiento y de las características del material del lecho. Estas expresiones tienen la siguiente forma general:

$$D = \frac{K \times q^x \times H^y}{d^z} \quad (1)$$

Donde,

- D: Profundidad de erosión [m]
- Q: Caudal específico [m³/s.m]
- H: Altura de caída [m]
- D: Diámetro característico de las partículas del lecho [m]
- K: Constante
- x,y,z: Exponentes que varían según el autor

A continuación se muestran los resultados de erosión máxima, para cada estructura de descarga, se adoptaron dos promedios que consideran el agrupamiento de los valores más representativos obtenidos aplicando fórmulas de distintos autores:

-Erosión en el Canal Moderador:

Para la crecida de 4200m³/s se consideró que el Canal Moderador eroga un caudal de 248m³/s, la profundidad de erosión teórica se encuentra en el entorno de 10,9 a 11,5m, (Halcrow, 2010).

-Erosión en el Dique Móvil:

Se consideró que el Dique Móvil eroga un caudal de 1137m³/s para la crecida de 4200m³/s y la profundidad de erosión teórica obtenida fue de aproximadamente 11,5 a 12,1m, (Halcrow, 2010).

-Erosión en el Dique Fijo:

Para el Dique Fijo, los valores de erosión más representativos se encuentra en el entorno de 10.5 a 11.0m, (Halcrow, 2010).

Al comparar los resultados obtenidos en el modelo físico con los estimados analíticamente se observan diferencias entre ambos resultados, en todos los casos las erosiones estimadas teóricamente fueron menores a las obtenidas experimentalmente, con diferencias del orden del 25% en el Canal Moderador, 30% en Dique Móvil y 15% en Dique Fijo respecto de las erosiones experimentales. Estas diferencias se pueden atribuir a que no se cumplen estrictamente las hipótesis realizadas en las fórmulas matemáticas para simplificar la complejidad operativa, una de las simplificaciones que se realizan y no se cumplen en este caso particular es la distribución uniforme del caudal a lo largo de cada estructura, se pudo observar en los ensayos la concentración de caudales específicos mayores sobre la margen derecha del dique.

Si bien el orden de magnitud es el mismo, las diferencias entre los resultados son importantes desde el punto de vista de la seguridad y del costo de las obras.

CONCLUSIONES

En cuanto al material del fondo móvil se seleccionó una granulometría similar a la que se encuentra hoy en prototipo, además en los ensayos se observó un comportamiento similar al que se espera ocurra en la realidad con la estabilización de la erosión y la formación de una barra de sedimento aguas debajo de la fosa de erosión y un acorazamiento compatible con el material del prototipo.

Las técnicas experimentales de monitoreo y medición de erosiones (tradicional y digital) utilizadas en el modelo mostraron un buen comportamiento, con una buena correlación en los resultados.

Se observó que las erosiones críticas se dan en su mayoría de los casos para el máximo caudal ensayado (4200 m³/s), a excepción de la producida al pie del canal moderador. Se pudo observar una buena repetitividad en los resultados de los ensayos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bellino, N.(2013); Sánchez Aimar, E.; Pagot, M.; Corral, M.; Eder, M.; Apostolo, C.; Gysels, P.; Balbis, S.; Muratore, H.; Hillman, G. y Rodríguez, A. (2013). "Desarrollo e implementación de una nueva técnica de medición de erosión en modelos físicos utilizando una cámara KINECT", III Simposio Sobre Métodos Experimentales en Hidráulica, UNL, Santa Fe.

Halcrow (2010), "Elaboración del proyecto y evaluación económica e impacto ambiental del proyecto de refuncionalización y mejora del dique derivador los molinos y canal río grande, provincia de Jujuy". Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios de la Nación, Buenos Aires, Argentina.

UNC (2012) "Proyecto y construcción del modelo físico tridimensional del dique derivador los molinos, Provincia de Jujuy", Laboratorio de Hidráulica, FCEFYN, Informes Técnicos I y II.