



## **EROSIÓN EN CANALES DE ROCA**

**Pablo Spalletti, José Daniel Brea**

Laboratorio de Hidráulica - Instituto Nacional del Agua (INA), Argentina  
E-mail: [pspallet@ina.gov.ar](mailto:pspallet@ina.gov.ar) - [dbrea@ina.gov.ar](mailto:dbrea@ina.gov.ar)

### **RESUMEN**

En canales excavados en roca poco resistente o muy fracturada, frente a acciones dinámicas debidas a escurrimientos con velocidades elevadas, pueden desarrollarse efectos erosivos sobre las paredes y el fondo de la conducción. La estimación de estos procesos se realiza mediante métodos de análisis no tradicionales, que tienen en cuenta por un lado la resistencia del material de base, y por otro, el poder erosivo del agua a través de la tasa de disipación de energía o potencia del escurrimiento por unidad de superficie. En el presente trabajo se describe la metodología original de Annandale sobre la que se proponen ciertas modificaciones, para la estimación de la erodibilidad de materiales rocosos en canales, en torno a pilas y en saltos hidráulicos tanto sobre el fondo como en la pared frontal. Finalmente se muestran los resultados de una aplicación en el canal de derivación de Portezuelo Grande en la Provincia de Neuquén, mostrándose el acuerdo entre las estimaciones y las erosiones observadas, luego del funcionamiento de la obra con el pasaje del caudal de diseño.

### **ABSTRACT**

In channels excavated on very little resistance or fractured rock, dynamic actions due to high speed runoffs, may develop erosive effects on the walls and the bottom of the waterway. The estimation of these processes is done through non-traditional analysis methods which take into account, from one side, the resistance of the base material, and for the other side, the erosive power of water through the rate of energy dissipation or stream power per unit area. This paper describes the Annandale methodology and the proposed modifications, to estimate the erodibility of rocky material in channels, around bridge piers and hydraulic jumps on both the bottom and the front wall. Finally, the results of an application in the diversion channel of Portezuelo Grande in the Neuquén Province are shown, screening the agreement between the estimates and the observed erosions at the channel after the passage of the design flow.

## INTRODUCCIÓN

La erosión de canales excavados en roca, no suele ser un problema a analizar en forma habitual, ya que es usual asumir que la capacidad resistente del material excede ampliamente las solicitaciones dinámicas. Sin embargo, en casos en que la roca de base es de mala calidad o las acciones del escurrimiento son de gran magnitud, pueden desarrollarse efectos erosivos sobre las paredes y el fondo del canal.

Los procesos que potencialmente pueden contribuir en forma significativa a la erosión de canales en roca son el descalce y arrancamiento o “plucking”, la abrasión debida al transporte de fondo y suspensión, la disolución, y la cavitación, además de procesos físicos y químicos de meteorización que pueden contribuir al debilitamiento del material (Whipple et al., 2000).

Más allá de las dificultades para analizar cada uno de los mecanismos de rotura y extracción del material, y del efecto combinado con sus interacciones de los procesos citados, en los casos en que puedan llegar a desarrollarse estos fenómenos es necesario estudiar su probabilidad de ocurrencia, así como su magnitud.

Para estimar la erodibilidad de materiales rocosos la metodología que se utiliza es la desarrollada originalmente por Annandale en 1995 (Annandale, 1995). En la bibliografía específica del tema, prácticamente la totalidad de los estudios de erosión en roca y las recomendaciones respecto a la forma de llevar adelante su análisis, se refieren a dicho método de cálculo (Sedimentation Engineering, 2008; US Bureau of Reclamation, 2009; Annandale et al., 2000, etc.).

En el presente trabajo se describe la metodología para la estimación de la erodibilidad de materiales rocosos en canales, en torno a pilas y en saltos hidráulicos, se indican las modificaciones propuestas a algunas de las expresiones propuestas por los autores del método, y se muestran los resultados de una aplicación para el canal de derivación de Portezuelo Grande en la Provincia de Neuquén.

## METODOLOGÍA PARA ANALIZAR LA ERODIBILIDAD DE CANALES EN ROCA

La metodología semi-empírica presentada por Annandale o Erodibility Index Method, fue desarrollada a partir de observaciones de campo, y define un umbral de erosión para cualquier material, incluyendo roca. Este método cuantifica la magnitud relativa de los efectos dinámicos de las corrientes que actúan sobre el material tratando de tener en cuenta la turbulencia del flujo, y empíricamente considera las propiedades del material que determinan su capacidad de resistir la erosión.

El método de análisis correlaciona la magnitud relativa del poder erosivo del agua a través de la potencia del escurrimiento por unidad de superficie “P”, también llamada tasa de disipación de energía y que está relacionada con la intensidad de turbulencia y las presiones fluctuantes (Annandale, 1995 y Annandale et al., 2000), con la resistencia del material representado a través del índice de erodibilidad “K”. La relación entre los parámetros puede ser expresada como una función  $P=f(K)$  para la condición de erodibilidad crítica.

La erodibilidad crítica para rocas y otros materiales complejos se define en la inmediata vecindad de la línea punteada en la Figura 1. Los símbolos graficados con relleno, siempre por encima del trazo punteado, representan eventos para los cuales fue observada erosión, mientras que los que están por debajo de la citada línea se corresponden con situaciones en las que no ocurrieron procesos erosivos. Calculando el índice de erodibilidad para una determinada roca y la tasa de disipación de energía para la sollicitación hidrodinámica, es esperable que ocurra erosión si el punto en el gráfico se ubica por arriba de la línea de erodibilidad crítica.

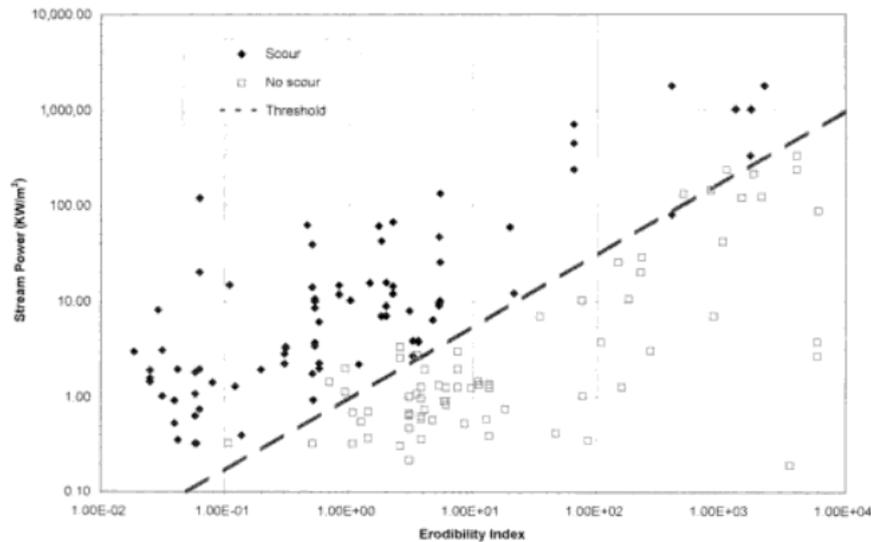


Figura 1.- Erodibilidad crítica para roca (Annandale 1995, Sedimentation Engineering, 2008).

Como se indicara el índice de erodibilidad “K” representa una medida de la resistencia del material a la erosión. Este índice está basado en modificaciones del sistema de caracterización de rocas de Barton (Q). Para determinar este índice se utilizan parámetros geológicos, pudiéndose estimar a partir de la expresión:

$$K = M_s \cdot K_b \cdot K_d \cdot J_s \quad (1)$$

donde  $M_s$  es el coeficiente de resistencia de masa,  $K_b$  es el coeficiente de tamaño de bloques,  $K_d$  es el coeficiente de resistencia al corte en las discontinuidades y  $J_s$  es el coeficiente de la estructura del material. En las referencias ya citadas hay tablas y relaciones que permiten cuantificar estos parámetros geológicos.

Para rocas el valor de  $M_s$  puede considerarse como el valor del ensayo a compresión simple (UCS) en MPa si éste es mayor a 10 MPa, y como  $0,78 \times UCS^{1,05}$ , si es menor.

El coeficiente de tamaño de bloques puede determinarse como:

$$K_b = \frac{RQD}{J_n} \quad (2)$$

donde RQD es el índice de calidad de rocas que se define como:

$$RQD = \frac{\sum \text{longitud\_fragmentos} > 10\text{cm}}{\text{longitud\_total\_perforada}} \cdot 100 \quad (3)$$

y  $J_n$  el coeficiente de grupos de juntas que es función del número de conjuntos o familias de juntas de la masa rocosa. El coeficiente  $K_b$  puede variar para materiales rocosos entre 1 y 100.

El coeficiente  $K_d$  se determina por la relación  $J_r/J_a$  (Barton), siendo  $J_r$  el coeficiente de rugosidad de la junta y  $J_a$  el coeficiente de alteración de la junta.

El parámetro  $J_s$  tiene en cuenta la facilidad con la que el flujo puede penetrar el terreno y movilizar bloques. Puede determinarse a partir del ángulo de buzamiento de la junta respecto a la dirección del escurrimiento y de las dimensiones de los bloques, pudiendo adoptar valores entre 0,4 y 1,9.

Respecto del poder erosivo del agua, el parámetro que lo representa es la tasa de disipación de energía. Para su cálculo en la bibliografía ya citada se dispone de ecuaciones para distintas condiciones de escurrimiento derivadas del análisis de datos de campo.

La expresión general para la determinación de la tasa de disipación de energía es:

$$P = \gamma \cdot q \cdot \Delta E \quad (4)$$

donde  $P$  es la potencia del escurrimiento en kW/m<sup>2</sup> (potencia por unidad de superficie),  $\gamma$  es el peso específico del agua (9,82 kN/m<sup>3</sup>), “ $q$ ” es el caudal por unidad de ancho en m<sup>3</sup>/s.m y  $\Delta E$  es la pérdida de energía expresada por unidad de longitud (m/m).

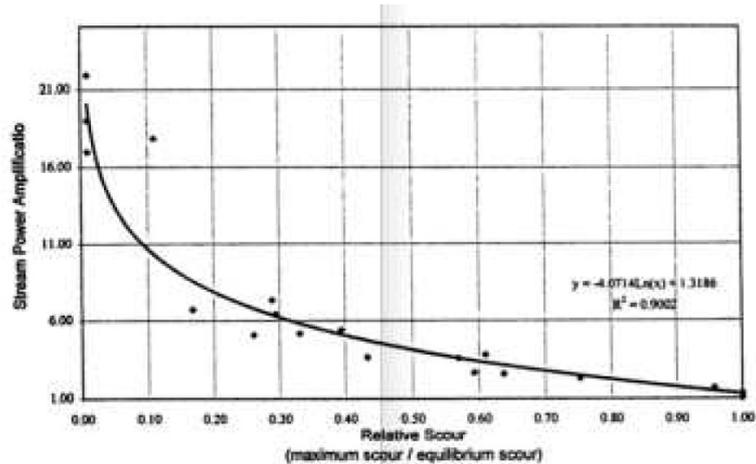
A partir de la ecuación anterior fueron definidas expresiones para flujo en canales, pilas de puentes (Annandale, 1999), caídas aguas abajo de un canal, vórtice que genera erosiones retrocedentes en canales, etc.

Para el caso de escurrimiento en canales, la expresión que se utiliza para determinar la potencia del flujo por unidad de superficie es:

$$P = \gamma \cdot q \cdot S_f \quad (5)$$

en la que  $S_f$  es la pendiente de la línea de energía y  $q$  es el caudal específico que eventualmente puede considerarse como  $q = U \times h$ .

En el método del índice de erodibilidad (Annandale, 1999) adaptado para la estimación de la erosión local en pilas de puentes fundadas en roca, se hace uso de las relaciones desarrolladas por la Federal Highway Administration, presentadas en la Figura 2, relativas a la amplificación de la potencia del flujo en pilas.



**Figura 2.-** Amplificación de la potencia del flujo en pilas como función de la profundidad de erosión local adimensionalizada.

La amplificación de la potencia del flujo es la relación entre las tasas de disipación de energía al pie de la pila y en el canal aguas arriba del puente.

La profundidad de erosión relativa en el eje de abscisas representa la fracción de erosión local en la roca respecto de la máxima posible erosión calculada con la ecuación del HEC-18 (FHA, 2001), considerando un coeficiente de material igual a 1. La forma de la ecuación del HEC-18, para pilas cilíndricas, agua clara y ángulo de ataque  $0^\circ$  es:

$$\frac{y_s}{a} = 2 \cdot K_4 \cdot \left(\frac{h}{a}\right)^{0.35} \cdot Fr^{0.43} \quad (6)$$

con  $y_s$ : profundidad de erosión local,  $a$ : diámetro de la pila,  $h$ : tirante en el canal aguas arriba de la pila,  $Fr$ : número de Froude aguas arriba de la pila y  $K_4$ : coeficiente de material a considerar igual a 1.

La socavación en torno a las pilas se producirá cuando la potencia amplificada alcance el valor de  $P$  crítica, por lo que tomando dicho valor en función de las características resistentes de la roca y dividiéndolo por la tasa de disipación de energía en el canal aguas arriba del puente, se obtiene la amplificación. Del gráfico de la Figura 2 se extrae para la amplificación determinada, la socavación de la roca respecto a la calculada con la fórmula del HEC-18, pudiéndose así estimar los valores de erosión local.

A partir de la expresión general para la determinación de la tasa de disipación de energía ya presentada (4), Annandale (1995) desarrolló expresiones para analizar caídas aguas abajo de un canal y la disipación del vórtice que genera erosiones retrocedentes en canales, basándose en el esquema presentado en la Figura 3 para saltos ventilados.

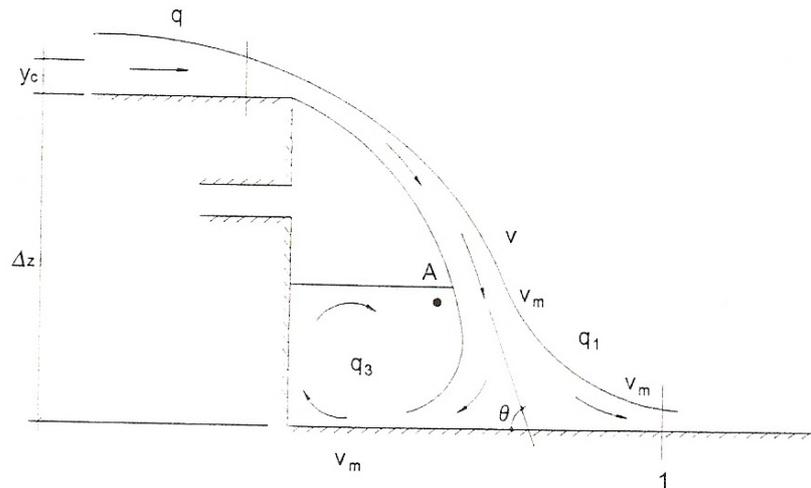


Figura 3.- Esquema de un salto en el extremo de un canal.

La expresión obtenida por Annandale para determinar la tasa de disipación de energía en un salto o caída en un extremo de un canal, que debió ser corregida para obtener una potencia por unidad de superficie (que es el parámetro utilizado para definir la condición de erodibilidad crítica), y considerando que el espesor del chorro que impacta la roca es igual al tirante crítico, es:

$$P = \gamma \cdot q \cdot \left[ \frac{\Delta z}{y_c} + \frac{3}{2} - \frac{y_1}{y_c} - \frac{1}{4} \cdot \left( \frac{3}{2} + \frac{\Delta z}{y_c} \right) \cdot \left( 1 + \frac{1.06}{\sqrt{\frac{\Delta z}{y_c} + \frac{3}{2}}} \right)^2 \right] \quad (7)$$

El US Bureau of Reclamation (2009) presenta una fórmula simplificada, que desprecia el término de energía cinética a la salida y que permite considerar el efecto del tirante de restitución:

$$P = \gamma \cdot q \cdot \left( \frac{\Delta z + 1.5 \cdot y_c - y_1}{y_c} \right) \quad (8)$$

Annandale (1995) presentó un análisis para calcular la disipación del vórtice retrocedente que se genera en la caída y que ejerce un esfuerzo sobre la cara frontal del salto. La expresión que surge del análisis anterior para determinar la tasa de disipación de energía de este vórtice contra la cara frontal, considerando que la disipación se desarrolla en el tirante  $y_1$ , es (ver Figura 3):

$$P = \gamma \cdot q_3 \cdot \frac{v_m^2}{2 \cdot g \cdot y_1} \quad (9)$$

y como:

$$v_m = \frac{v}{2} \cdot (1 + \cos \theta) \quad (10)$$

surge:

$$P = \gamma \cdot q_3 \cdot \frac{v^2}{8 \cdot g \cdot y_1} \cdot (1 + \cos \theta)^2 \quad (11)$$

Los valores de  $q_3$  y  $v$  pueden obtenerse de:

$$q_3 = q \cdot \frac{(1 - \cos \theta)}{(1 + \cos \theta)} \quad (12)$$

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot (1.5 \cdot y_c + \Delta z - y_1)} \quad (13)$$

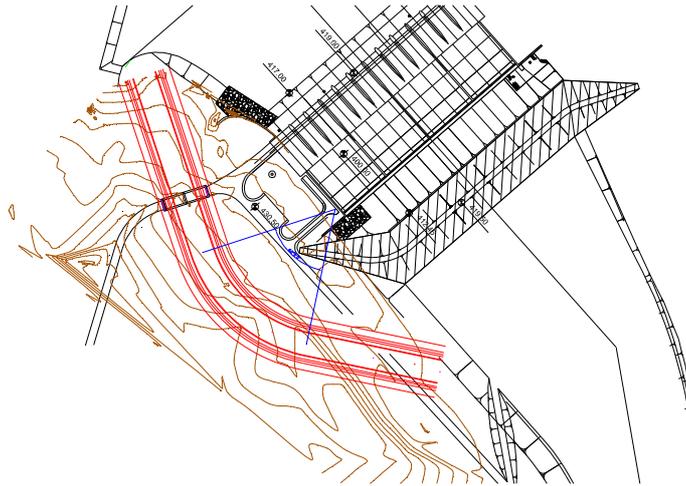
### APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

La metodología se aplicó en el canal proyectado en la margen derecha de la obra de derivación de Portezuelo Grande (Figura 4), para desviar las aguas del río Neuquén durante las tareas de reparación de las obras de cierre y dissipación.



**Figura 4.-** Planta Portezuelo Grande.

El canal de desvío proyectado, con un ancho de fondo de 20 metros, taludes de pendiente variable y bermas de 3 metros a cada lado, presentó la configuración en planta de la Figura 5, con dos tramos rectos, el de aguas arriba de 166,1 metros y el de abajo de 119,8 metros, unidos por una curva en planta con un radio de curvatura al eje del canal de 122,5 metros, un ángulo de  $60^\circ$  y un desarrollo de 128,3 metros, con una longitud total de canal de 414,2 metros con un desnivel de 1,6 metros que es salvado con una pendiente de solera uniforme.



**Figura 5.-** Planta del canal de desvío según proyecto.

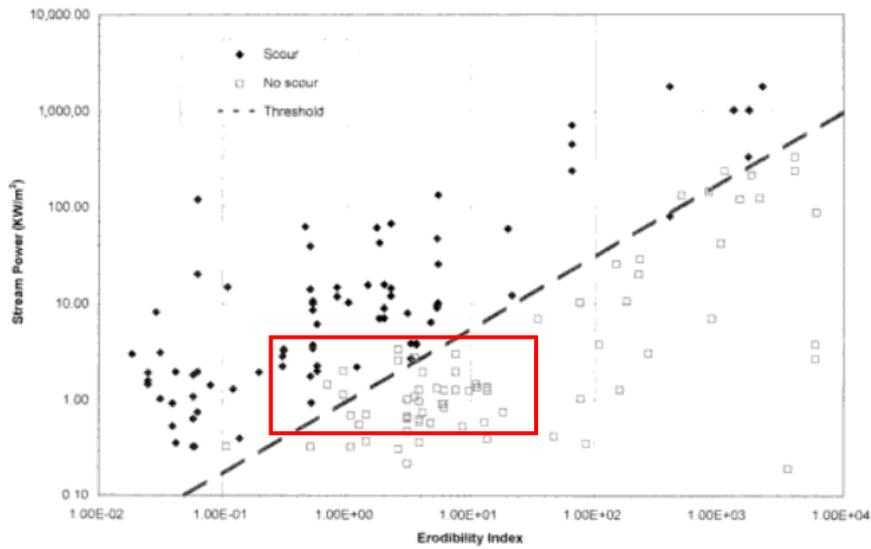
En correspondencia con el tramo recto de aguas arriba del canal de desvío proyectado y a 115,5 metros de su inicio, la obra intersecta la Ruta Provincial N° 12, por lo que se ha previsto la construcción de un puente sobre el canal de desvío.

Como información geológica para la determinación del índice de erodibilidad de las rocas, se contó con información de 6 sondeos en cercanías de la traza del canal de desvío proyectado. Para la cuantificación precisa de dichos índices los datos disponibles no eran suficientes, y dada la necesidad de determinar estos valores, se procedió a asignar a los coeficientes con los que se determina “K”, rangos razonables dentro de su intervalo de variación, obteniéndose finalmente para los diferentes estratos de roca, índices de erodibilidad de máxima y de mínima. Estas hipótesis implican incertidumbres que puede ir más allá de la propia de la metodología.

El índice “K” máximo para la roca más dura fue de 39.12 y el mínimo para la roca más blanda de 0.28, quedando definido de esta manera el intervalo de variación de los índices de erodibilidad.

Los cálculos de la potencia del flujo por unidad de superficie (ecuación 5) a lo largo de las progresivas del canal para el caudal de diseño de 350 m<sup>3</sup>/s, se realizaron para condiciones de rugosidad variables dentro del rango de situaciones posibles, adoptándose “n” de Manning entre 0.03 y 0.045. De esta manera los efectos del escurrimiento en las distintas progresivas se manifiestan con potencias variables de 0.43 a 3.08 kW/m<sup>2</sup>, con valores más altos en el extremo de aguas abajo del canal.

El rango de acciones dinámicas y resistencias de los materiales rocosos se ha volcado en la Figura 6 sobre el gráfico de erodibilidad crítica, de donde surge la posibilidad de que se presenten situaciones en las que se desarrollen procesos erosivos.



**Figura 6.-** Rango de situaciones K-P en el canal.

La Figura 7 es una nueva representación del gráfico originalmente presentado por Annandale al que se incorporaron análisis de confianza para las regresiones realizadas a partir de los datos. La línea superior azul representa un 99 por ciento de probabilidad de inicio de erosión y la línea amarilla inferior un 1 por ciento de probabilidad de que se presente erosión (US Bureau of Reclamation, 2009). En dicha figura se volvió a indicar con un rectángulo rojo el rango de Kh y P para el canal.

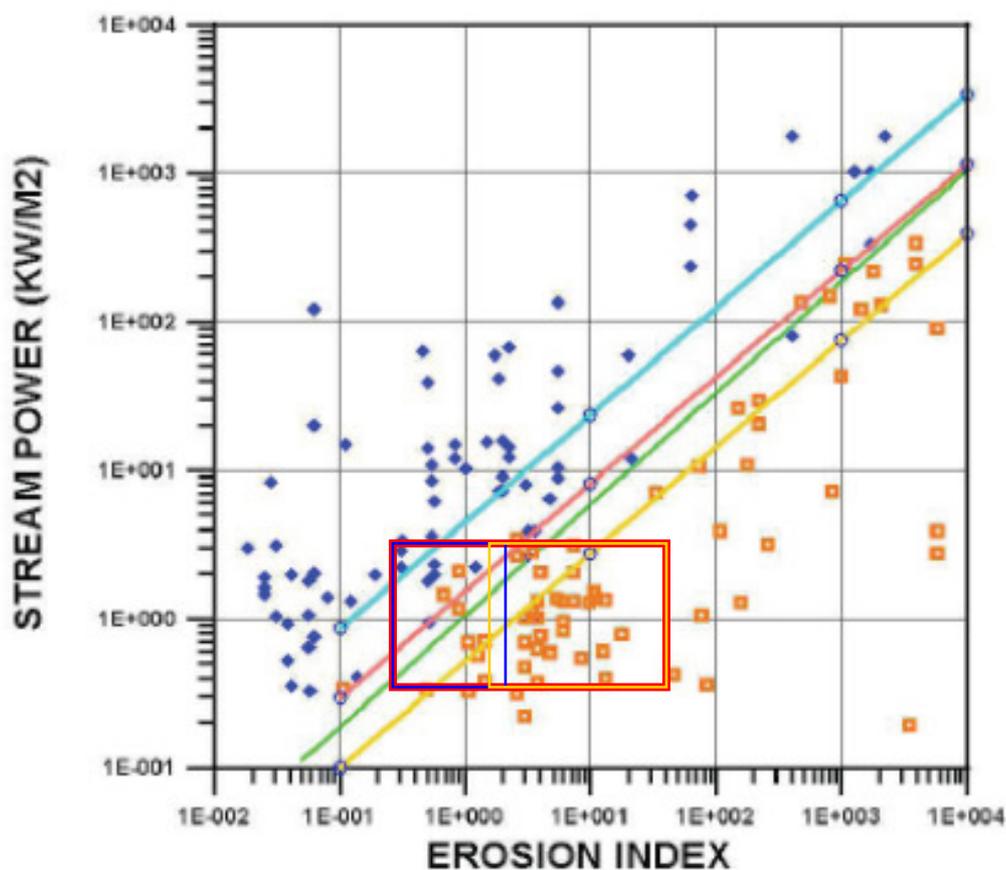


Figura 7.- Gráfico para estimar la posibilidad de erosión (US Bureau of Reclamation, 2009)

Al presentarse los distintos tipos de roca en estratos alternados, en las paredes del canal expuestas al escurrimiento, los efectos erosivos podrán desarrollarse sobre los estratos con material más débil. Para analizar este efecto, en la Figura 7 se indica con un rectángulo azul el rango de  $K_h$  y de  $P$  en el canal para el material más débil de los 6 analizados.

En la solera los elementos más resistentes (recuadro naranja en Figura 7) pueden ser capaces de resistir los efectos dinámicos y controlar eventuales erosiones de los materiales más débiles, por lo que en el fondo podrían presentarse ciertas discontinuidades incrementando los valores de rugosidad, hacia los mayores del rango analizado en la modelación.

Para el caso de las pilas del puente sobre la Ruta Provincial N° 12, se aplicó el método del índice de erodibilidad adaptado para la estimación de la erosión local en pilas fundadas en roca. De la información disponible se seleccionó la muestra de roca más cercana a la traza del puente y a la cota de fundación de la estructura, determinándose los índices de erodibilidad con su posible rango de variación para caracterizar la resistencia del material ( $K_h$  entre 1,4 y 12,49), por lo que la potencia por unidad de superficie del flujo necesaria para producir erosión ( $P$  crítica), estaría entre 1,3 y 7  $\text{kW/m}^2$  (Figura 1).

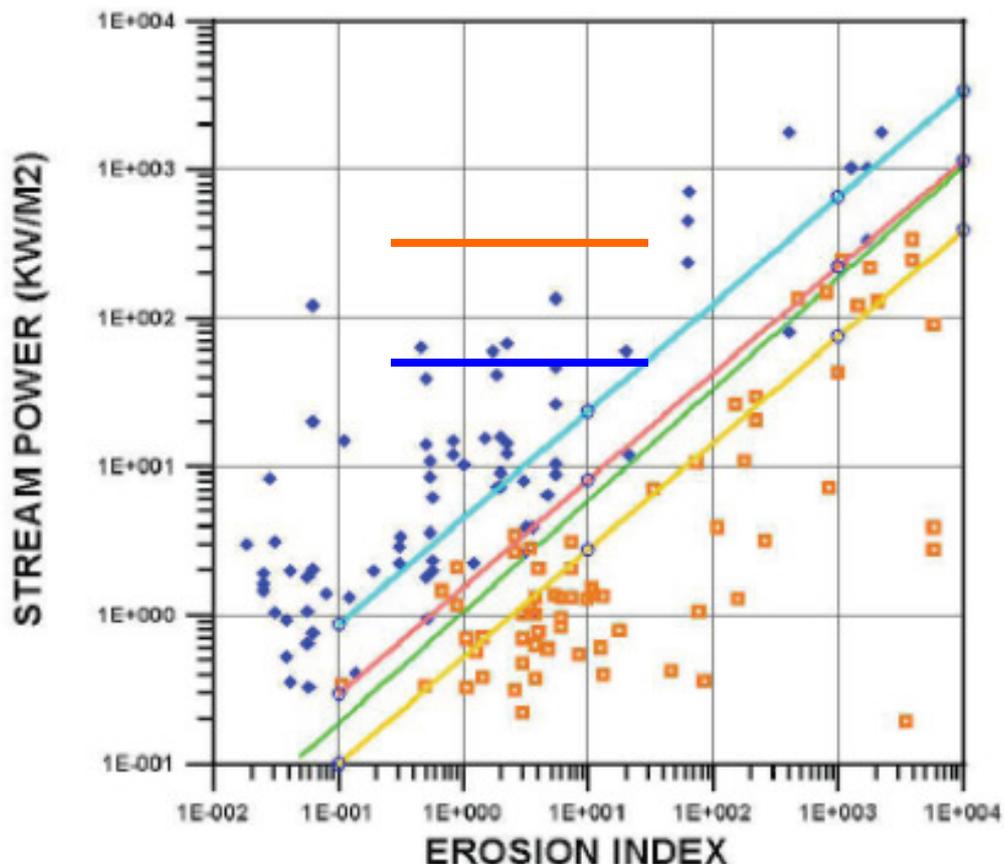
La tasa de disipación de energía en el canal aguas arriba del puente puede considerarse igual a  $0,55 \text{ kW/m}^2$ , por lo que las amplificaciones estarían entre 2,5 y 12,5. De la Figura 2 surge que para las amplificaciones citadas, la socavación de la roca respecto a la calculada con la

fórmula del HEC-18 varía entre 0,8 y 0,06. Considerando los valores calculados de  $Fr$  y  $h$  en la zona del puente y los datos geométricos de las pilas, se calculó un valor de  $y_s=2,4m$  con la ecuación de referencia del HEC-18. Se tiene entonces que los valores de erosión estimados se encontrarían en el rango de 1,92 a 0,15 metros de acuerdo con la caracterización de los índices de erodibilidad de mínima y de máxima adoptados.

También con la metodología se analizó la caída hidráulica en el extremo de aguas abajo del canal proyectado. Considerando valores de  $\gamma=9,82kN/m^3$ ,  $q=350/20=17,5 m^3/s.m$ ,  $\Delta z=7,5m$ ,  $y_c=3,15m$  e  $y_1=5,5m$  (correspondiente a una cota de agua en la restitución de aproximadamente 418 metros), se obtuvo un valor de  $P$  de  $367 kW/m^2$ .

Para la disipación del vórtice retrocedente que se genera en la caída y que ejerce un esfuerzo sobre la cara frontal del salto, teniendo en cuenta que cuando la lámina que vierte no tiene buena aireación el ángulo  $\sigma$  tiende a  $90^\circ$ , resultó  $P = 53 kW/m^2$ .

En la Figura 8 se muestran las tasas de disipación de energía para la caída (rojo) y para el vórtice retrocedente (azul) en relación al rango de los índices de erodibilidad de las rocas en la zona.



**Figura 8.-** Gráfico para estimar la posibilidad de erosión (US Bureau of Reclamation, 2009). Indicación de la potencia de los efectos dinámicos del flujo en el salto de aguas abajo del canal.

Puede notarse que cualquiera sea el caso, son esperables erosiones en el fondo como en la pared frontal de la caída. Esto es así a pesar de haberse analizado una situación con niveles de

restitución altos (418 metros). En el caso de presentarse situaciones con cotas de restitución menores, los riesgos de erosión serán mayores. Estos cálculos motivaron que se planteen alternativas de obras en el tramo final del canal, para resistir los efectos erosivos del flujo en el salto de aguas abajo y para controlar la eventual erosión retrocedente.

### **SITUACIÓN DEL CANAL LUEGO DE SU OPERACIÓN**

Las Figuras 9 y 10 muestran el estado del canal tras su operación, es decir luego del pasaje del caudal de diseño. Puede apreciarse que más allá de las dificultades para la aplicación de la metodología, los resultados estuvieron en línea con las erosiones observadas en el canal y en proximidades de las pilas del puente, más allá de algunas previsiones que se adoptaron en obra en la fundación de dichos elementos (Figura 9), tras los cálculos efectuados.



**Figura 9.-** Vista de las pilas tras la operación del canal.



**Figura 10.-** Vista del canal tras su operación.

## CONCLUSIONES

Los procesos erosivos están gobernados por la magnitud de las solicitaciones que pueden generarlos y el tiempo durante el cual actúan. Las dificultades para la determinación de la magnitud de las solicitaciones y la resistencia de los materiales, en este caso roca, así como las incertidumbres relativas al conocimiento acabado de los procesos erosivos en sí mismos, imposibilitan la determinación precisa de los tiempos en los cuales puede desarrollarse la erosión y su magnitud.

Más allá de lo dicho, la metodología descrita y aplicada al canal de derivación de Portezuelo Grande, dio resultados compatibles con las erosiones observadas tras su operación, poniendo de manifiesto que es un método apto para realizar este tipo de análisis.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Annandale, G.** (1995): "Erodibility", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 33, No. 4, pp. 471-494.

**Annandale, G.** (1999): "Estimation of Bridge Pier Scour using the Erodibility Index Method". *Stream Stability and Scour at Highway Bridges* (ASCE), pp. 83-97.

**Annandale, G.; Wittler, R.; Scott, G.** (2000): "Scour Downstream of Dams". *Symposium on Scour of Foundations, International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Melbourne, Australia.

**Bureau of Reclamation** (2009). *Dam Safety Risk Analysis Best Practices – Erosion of Rock and Soil*.

**García, M.**, Ed. (2008). *Sedimentation Engineering*, ASCE.

**Whipple, K.; Hancock, G.; Anderson, R.** (2000): "River incision into bedrock: Mechanics and relative efficacy of plucking, abrasion, and cavitation". *Geological Society of America Bulletin*, March 2000. Vol. 112; no. 3; pp. 490-503.



Instituto de Recursos Hídricos



Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías



Universidad Nacional de Santiago del Estero



Instituto Nacional del Agua



Subsecretaría de Recursos Hídricos



Agencia Nacional de Promoción Cient. y Tec.



Gobierno Prov. de Santiago del Estero



Ministerio de la Producción



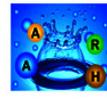
Secretaría del Agua



Secretaría de Desarrollo, Ciencia y Tecnología



Consejo Prof. de la Ingeniería y Arq.



Asociación Argentina de Recursos Hídricos



Asoc. Internacional de Invest. Hidroamb.



Comisión Regional del Río Bermejo



CORPORACION ARGENTINA TECNOLÓGICA s.a. INGENIERIA CIVIL E HIDRAULICA

