

XX CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA

UNA DISCUSIÓN ACERCA DEL TIEMPO DE EROSIÓN MÁXIMA EN MODELOS FÍSICOS PARA ALIVIADEROS EN SALTO DE ESQUÍ

Jorge Daniel Bacchiega, Claudio Antonio Fattor y María Cecilia Lopardo
Instituto Nacional del Agua (INA) - Laboratorio de Hidráulica
C.C. 21, (1802) Aeropuerto Ezeiza, Argentina - jdbacchi@ina.gov.ar

RESUMEN

Los modelos físicos de aliviaderos en salto de esquí reproducen con razonable aptitud la erosión final (a tiempo infinito) del lecho aguas abajo, siempre que mantenga la similitud de Froude y la escala de longitudes sea suficientemente grande. Se acepta, normalmente, una distorsión con referencia a los diámetros del material, cuya función es importante en cuanto a simular la barra que se forma aguas abajo de la fosa de erosión. Si tras cada serie de ensayos en modelo se retira esa barra, el tiempo final del ensayo se incrementa. A partir de una definición de la escala de tiempos basada en la acción de un chorro sobre el lecho y utilizando los valores experimentales de prototipo y modelo físico de la presa de Piedra del Águila, en la región sudoccidental de la Argentina, se propone evitar un cálculo estimativo del llamado "tiempo total de ensayo", que efectivamente resulte consistente con observaciones del prototipo.

ABSTRACT

The maximum depth of local scour on rocky riverbeds downstream ski-jump buckets (for infinite time of operation) can be well simulated by means of physical models, when Froude similarity conditions and big enough geometric scale are assured. It is usually accepted a distortion of the bed grain size scale, even if it has importance for the simulation of the bar conformed downstream the erosion pool. If this bar is removed after each model test, the time to reach the maximum depth of scour increases. By means of a time scale definition based on the action of a jet on a non cohesive bed and the experimental data from prototype and hydraulic model of Piedra del Aguila Dam, in the southwestern zone of Argentina, a proposal to avoid the time scaled estimation of the called "total time of erosion test", consistent with prototype observations, is presented.

INTRODUCCIÓN

La erosión local aguas abajo de aliviaderos, ya sea de estructuras de salto de esquí o de cuencos disipadores a resalto, es un tema que ha sido fuertemente analizado por diferentes investigadores. En efecto, existen en la bibliografía numerosas fórmulas más o menos elaboradas para estimar la erosión local aguas abajo de los mismos. Aún cuando la fórmula de cálculo resulte muy compleja, sólo es esperable un valor aproximado, que indique un orden de magnitud de la erosión final que resulta factible esperar con un tiempo de operación suficientemente prolongado de la obra. En consecuencia, el término "tiempo infinito" se refiere a dicho tiempo de operación, para el que se alcanza prácticamente la máxima erosión local al pie de obra.

Teniendo en cuenta el carácter estrictamente tridimensional del fenómeno, su configuración macroturbulenta y la influencia decisiva de aspectos topográficos y geométricos para la determinación de las corrientes de recirculación y el análisis de efectos de las barras de sedimentos, es imprescindible la utilización de modelos físicos no distorsionados en escala adecuada y con representación completa del cauce en la restitución. Según señalan casi todos los autores, esos modelos físicos reproducen muy razonablemente la profundidad máxima de erosión (a tiempo infinito), siempre que las escalas mantengan similitud de Froude y sean suficientemente grandes. Si el tamaño del material es simulable en escala de longitudes (habitual para fondos rocosos o aluviones gruesos) la verificación prototipo modelo es muy buena.

El material que egresa de la fosa de erosión tiende a depositarse aguas abajo en forma de una barra, que puede afectar la obra incrementando el nivel de agua de restitución, lo que en caso de centrales a pie de presa puede reducir el salto disponible para hidroelectricidad, con la consiguiente pérdida económica y en ciertos casos, con la amenaza de inundar la propia central. Allí no sólo interesa la profundidad máxima final sino su evolución temporal, lo que implica conocer una "escala de tiempos de erosión" y verificar la influencia del tamaño del sedimento. Como lo señalara Breusers (1966) no resulta posible encontrar una escala de tiempos que surja mediante aplicación sencilla de expresiones monomías. Luego, dentro del espacio suficientemente conocido de las leyes de semejanza, este aspecto queda aún en discusión. Sobre esa base, se planteó una aproximación a la escala de tiempos de erosión local en modelos físicos (Bacchiaga et Al) basada en experiencias de modelo y prototipo que se retoman en el presente trabajo.

La evolución del lecho fluvial aguas abajo de la fosa de erosión provoca la formación de una barra conformada por el material excedente, que tiene una particular y decisiva influencia en la definición del llamado "tiempo final de erosión" en el modelo, obtenido tras las determinaciones sucesivas en las que no se ha detectado profundización del valor máximo en la fosa.

ESCALA DE TIEMPOS DE EROSIÓN

Para definir una escala de tiempos de erosión local en modelos físicos froudianos se ha considerado la naturaleza física del fenómeno en estudio que básicamente, consiste en el ingreso de una lámina de alta velocidad en un cuerpo de aguas tranquilas. La fosa de erosión

es el producto de la interacción entre el chorro turbulento incidente y el material de fondo. El fenómeno es tridimensional y la estratigrafía del lecho (aluvional u rocoso) puede llegar a definir las profundidades máximas de erosión como el tiempo en que se alcanzan. El proceso erosivo se caracteriza porque el caudal sólido de ingreso a la fosa de erosión es prácticamente nulo y porque la erosión gradual del lecho del río genera un aumento del tirante líquido, aspecto que permite una mayor difusión del chorro turbulento.

El "chorro" choca contra el lecho provocando su disgregación, generando el proceso erosivo y se desvía hacia aguas abajo, arrastrando consigo material removido. A medida que progresa la socavación, la proporción de energía disipada antes de llegar al lecho es mayor, de modo que con el tiempo se alcanzará un cierto estado de equilibrio, cuando la velocidad del flujo sea incapaz de generar una tensión de corte superior a la tensión crítica de arrastre. Considerando, en una primera aproximación que el flujo es bidimensional, con gasto sólido afluente nulo, la ecuación de continuidad del sedimento por unidad de ancho resulta:

$$(dy/dt) + (dq_s/dx) = 0 , \quad [1]$$

donde se muestra la relación entre la profundidad "y", el tiempo "t", el gasto sólido por unidad de ancho "q_s" y la abscisa "x". Aplicando las reglas de similitud a la expresión [1] es posible llegar a una relación de escalas (donde E significa esta relación entre prototipo y modelo de la variable que la sucede):

$$Et = E l^2 / eq_s . \quad [2]$$

A efectos de definir una escala de gasto sólido Eq_s, una alternativa sencilla es utilizar el criterio de Meyer Peter (Lopardo, 1976), que presenta al gasto sólido como:

$$q_s = (s-1) f(\tau_0 - \tau_c)^{3/2} , \quad [3]$$

donde τ_0 y τ_c son respectivamente la tensión de corte en el lecho y la tensión crítica de arrastre y s es la relación de pesos específicos entre sólido y líquido. Vinculando las tensiones de corte y las velocidades, la expresión [3] se puede presentar como:

$$q_s = (s-1) f(V_x - V_c)^3 , \quad [4]$$

donde V_x es la velocidad en el eje del chorro que impacta contra el lecho y V_c la velocidad crítica de arrastre del sedimento que compone el lecho. Reemplazando la escala de gastos sólidos en función de la expresión [4] en la fórmula [2], resulta una escala de tiempos:

$$Et = E l^2 E (s-1) [(V_x - V_c)_m / (V_x - V_c)_p]^3 . \quad [5]$$

Los subíndices "m" y "p" indican valores de modelo y prototipo. De la ecuación [6] se desprende que la escala de tiempos depende de las velocidades máximas esperables al inicio del proceso erosivo y de las velocidades críticas de iniciación de arrastre, que no estarán generalmente en la misma escala. La expresión [5] también fue hallada por Farhodi y Smith (1982), a partir de un análisis de caudal sólido mediante el criterio de Einstein. La condición de similitud de Froude permite extrapolar valores de velocidades V_x de modelo a prototipo, mientras que las velocidades críticas de arrastre no cumplen con esa regla de semejanza, ya que el estado de agregación de las partículas no se encuentra a escala.

Por otra parte, puede realizarse un análisis alternativo a partir de consideraciones dimensionales, el tiempo necesario para erosionar un volumen v por unidad de ancho puede ser dado por $t = v/q_s$ en la que el área de la sección longitudinal de erosión está vinculada a la profundidad máxima de erosión $v = c y^2$, en la que c es un factor geométrico. La dependencia del tiempo característico sobre las condiciones hidráulicas y características del material fue investigada por varios autores. Breusers (1966) determina una escala de tiempos para erosión local por flujo bidimensional:

$$Et = Ed^{2.05} E(s-1)^{1.6} (V_x - V_c)^{-4}, \quad [6]$$

donde Ed es la escala de diámetros de material del lecho. Basándose en el trabajo original de Breusers (1966) puede inferirse que la influencia de los distintos parámetros pueden describirse en una relación funcional válida tanto para flujo bidimensional como tridimensional (Hoffmans y Pilarczyk, 1995):

$$t = K y^2 s^{1.7} / (\alpha_1 V_x - V_c)^{4.3}, \quad [7]$$

en donde K es un coeficiente no adimensional, del orden de $K = 330 \text{ horas m}^{2.3} / \text{s}^{4.3}$ y α_1 es un coeficiente que depende de la intensidad de turbulencia local. Si existe similitud geométrica de la fosa de erosión $EK = 1$ y si se mantiene en modelo y prototipo el mismo peso específico de material $Es=1$, por lo que aplicando escalas a la expresión [7] se obtiene:

$$Et = EL^2 [(\alpha_1 V_x - V_c)_m - (\alpha_1 V_x - V_c)_p]^{4.3}. \quad [8]$$

Si bien la conclusión acerca de la escala de tiempos dado en la expresión [5] es similar a la que se deduciría de las ecuaciones [6] y [8], resulta obvio que numéricamente los valores serían diferentes. De acuerdo con Hoffmans y Booij (1993) puede expresarse $\alpha_1 = 1.5 + 4.5i$, donde i es la intensidad de la turbulencia, dada habitualmente como $i = \sqrt{[(v^2)/V_x]}$.

Vale la pena realizar un análisis acerca del fenómeno de difusión de la vena líquida. Es importante destacar que a medida que se sumerge, la difusión del chorro afecta progresivamente la velocidad en el eje del mismo V_x , disminuyendo su valor en relación con la velocidad de ingreso V_0 . La velocidad máxima esperable de impacto contra el lecho puede calcularse a partir de una expresión que interprete la difusión de un chorro turbulento. Tomando la aproximación bidimensional del problema, es posible cuantificar este fenómeno físico a partir de la aplicación del principio de cantidad de movimiento. El chorro, al difundirse, interactúa con la masa de fluido presente en la fosa, lo que permite definir un volumen de control compuesto por la sección de ingreso, los dos planos que delimitan la difusión del chorro y una sección genérica donde se desea obtener el perfil de velocidades. Considerando que el campo de presiones es hidrostático y que la distribución de velocidades en cada sección es gaussiana, es posible plantear:

$$V_x/V_0 = k [(b_0/y) \cos\alpha]^n, \quad [9]$$

donde α es el ángulo que hace la lámina con la vertical, b_0 el espesor de la lámina (Figura 1). De acuerdo con Muñoz (1964), si la profundidad es importante ($y/b_0 > 2.000$) los coeficientes numéricos pueden estimarse constantes $k = 2,28$ y $n = 0.5$. Con base en la expresión [9] es

posible calcular la velocidad máxima V_x en contacto con el lecho para cada condición de escurrimiento del salto de esquí (es decir su velocidad de ingreso de la lámina al agua V_0 , el ángulo α de incidencia y el espesor de dicha lámina b_0) en función de la profundidad de erosión "y" que progresará a lo largo del tiempo. La profundidad inicial es un dato y la final es calculable a partir de diversas expresiones, de modo que es factible tener un rango de variación de la escala de tiempos para cada ensayo sobre modelo.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

A fin de verificar la incidencia efectiva de la velocidad crítica de inicio del movimiento y de la variación de la velocidad máxima de impacto contra el lecho en la variación de la escala de tiempos, se ha empleado el modelo froudiano a escala de longitudes 1:65 existente en el Laboratorio de Hidráulica que reproduce la geometría de las estructuras hidráulicas de descarga de la Presa de Piedra del Águila. Este aprovechamiento se encuentra sobre el río Limay y cuenta entre sus órganos de evacuación con un vertedero de caudal de diseño Q_d , con cuatro vanos regulados por compuertas de sector seguidos por una rápida de fuerte pendiente de 60 m de ancho promedio. La restitución de los caudales erogados al río se efectúa a través de un salto de esquí, ubicado sobre la margen izquierda del curso. El lecho del río está compuesto por un material aluvional con un diámetro medio del orden de los 150 mm, confinado por un manto rocoso que se profundiza hacia el río. (Figura 2)

El modelo reproduce la estructura del vertedero en forma completa, representándose con fondo móvil, la configuración del lecho aguas abajo del salto de esquí. Para las condiciones de semejanza del material granular se consideró la representación en el modelo del diámetro característico (d_{50}) del lecho en prototipo, teniendo en cuenta las restricciones impuestas por el número de Reynolds de corte del grano ($R_p^* > R_m^* > 70$, con $R^* = V ds / \nu$), el parámetro de movilidad del grano ($Y_m = Y_p = (V^2 / g) * (s - 1) * ds$), la relación diámetro-tirante ($Z = ds / h$) y la relación de masas específicas entre el material granular y el fluido.

Con la finalidad de establecer la evolución de la erosión en el modelo, se efectuaron una serie de ensayos con caudales de 500 m³/s y 1200 m³/s erogados por el vertedero. Dichas condiciones reproducen operaciones efectivamente realizadas en el prototipo y de las cuales se dispone del relevamiento de la topobatimetría resultante. La evolución del proceso erosivo determina un incremento relativamente importante de la profundidad durante las primeras horas de operación, tendiendo a decrecer el proceso de intercambio de material sólido con el foso resultante hasta alcanzar, en forma asintótica, la erosión máxima esperable para una dada condición de funcionamiento. En estas condiciones, los ensayos efectuados tendieron a establecer con mayor precisión la evolución producida para cada ensayo en las primeras dos horas de funcionamiento.

Para cada condición de operación establecida en el modelo, se efectuó el relevamiento del perfil de erosión correspondiente con el eje del aliviadero en intervalos correspondientes a 0.5, 1, 2, 4, 6 y 8 hs de iniciada la operación. En las Figuras 3 y 4 se observan los resultados obtenidos para cada caudal ensayado. En ambas figuras se representó en forma comparativa el perfil original del lecho y los perfiles resultantes para cada intervalo de medición. Se aprecia, además, que la mayor parte de la erosión (entre un 70 y un 80% de la erosión máxima) se desarrolla, en el modelo, en la primera hora de funcionamiento del vertedero, resultando

decreciente la profundización del foso hasta alcanzar la profundidad máxima alcanzada para el caudal ensayado. El proceso de equilibrio se logra, en este caso, transcurridas 6 horas de funcionamiento del modelo (Figura 5)

ANÁLISIS DE LA ESCALA DE TIEMPO.

La variación de la velocidad del chorro sumergido a medida que se profundiza el foso de erosión define, al menos en forma teórica, la existencia de una modificación de la escala de tiempos a medida que se desarrolla el proceso de erosión [expresión 8]. El cálculo teórico de las escalas de tiempo inicial y final puede efectuarse a partir de los resultados obtenidos en el modelo, considerándose para ello las condiciones de la restitución en el instante que se inicia la operación del mismo y la configuración resultante alcanzada luego de 6 hs de funcionamiento.

Mediante la expresión [9], se han calculado (para un caudal en prototipo de $1200 \text{ m}^3/\text{s}$), los correspondientes valores de velocidad de impacto del chorro contra el lecho del río. Para ello se consideraron los tirantes inicial y final, que en virtud de lo observado en el modelo resultan de 3.8 m y 30.3 m respectivamente. Por otra parte, para la determinación de la velocidad crítica de inicio de arrastre, existen diferentes expresiones (Izbach-Khaldre, Shields, etc), que toman en consideración el tamaño y las características geométricas del material granular, para la condición de equilibrio de una partícula sólida.

Mediante la aplicación de las ecuaciones anteriores, se han calculado las escalas de tiempo correspondientes a la condición de inicio de la operación y al final de la misma, en comparación con la escala de tiempos teórica que determina la aplicación de las condiciones de semejanza de Froude. Indudablemente, la estimación de la velocidad crítica del inicio del movimiento resultará determinante en la valoración de las escalas de tiempo. Los valores que se obtuvieron de escalas de tiempos resultaron:

- Escala de Froude ($E_t = E_L^{1/2}$): 8.06
- Condición inicial $t=0$: 8.59
- Condición final $t= \alpha$: 9.95

Tal como se observa de los valores anteriores, existe una variación del orden del 15% entre los valores inicial y final de las escalas de tiempo, la cual se incrementa (23%) si se considera como base la escala de tiempos de Froude. Si bien se modifican los valores con la secuencia de los procesos de erosión, los valores finalmente obtenidos permitirían concluir que, en estimaciones preliminares, resulta válido considerar que la escala de tiempos permanece relativamente constante, con valores cercanos a los establecidos por la escala de longitudes del modelo.

Finalmente, con el objetivo de establecer algún parámetro de comparación con relación al comportamiento del prototipo, en la Figura 6 se muestra el perfil de erosión obtenido en el modelo en comparación con los registros batimétricos del prototipo luego de 35 días de operación de caudales similares a los ensayados en el modelo. Se observa que el modelo reproduce la forma de la fosa de erosión, existiendo cierta diferencia en los valores de

profundidad máxima registrada. Indudablemente, la existencia de fuerzas de acorazamiento en el prototipo determinan el no cumplimiento estricto de las condiciones planteadas por la expresión [9], requiriéndose tiempos mayores para desarrollar similares condiciones del proceso de evolución de la erosión.

LA PROFUNDIDAD MÁXIMA DE EROSIÓN A TIEMPO INFINITO

Como resultara de las experiencias comparativas entre prototipo y modelo, la simple aplicación de la escala de tiempos (que parece ajustarse a las condiciones teóricas) no alcanza a interpretar siquiera en orden de magnitud el valor de lo que podría suponerse como "tiempo infinito" del modelo. En efecto, si para un caudal de 1.200 m³/s la erosión final para 35 días en prototipo aún no había alcanzado los valores máximos esperables tras experiencias de 30 minutos en modelo, cabe preguntarse acerca del grado de confiabilidad de los valores intermedios, que se utilizan para definir en este caso volúmenes de material a dragar en la barra ubicada aguas abajo de la fosa. En caso de utilizarse en forma directa los resultados de la escala de tiempos, podría pensarse que la condición final de erosión en el caso expuesto debería alcanzarse en prototipo para luego de aproximadamente 5 horas de operación.

Parece razonable intuir que el modelo, con la escala de tiempos definida a lo largo de este texto, podría ser útil para conocer la evolución inicial del proceso en prototipo, lo que es indudablemente importante, pero resulta absolutamente inconsistente para dar orden de magnitud de las condiciones máximas de erosión. A medida que el foso de erosión alcanza mayores profundidades la resistencia a la erosión normalmente aumenta, por encontrarse mayores tamaños de material, que producen un efecto de acorazamiento en prototipo. Ese efecto es prácticamente imposible de simular en el modelo físico, incluso por la dificultad de evaluar las condiciones reales de resistencia a la erosión de un material rocoso a profundidades importantes.

La primera parte de los ensayos (hasta el orden de magnitud de horas de operación en prototipo) pueden ser transportados a prototipo a partir de una escala de tiempos, como la que se propone en este trabajo. Sin perjuicio de ello, en virtud de lo expuesto, el "tiempo infinito" no puede ser obtenido de ensayos sobre modelo, pues involucra el efecto asintótico del proceso erosivo, que es justamente el que en mayor medida resulta imposible de simular.

CONCLUSIONES

- El análisis efectuado permite demostrar que la escala de tiempos para el fenómeno de erosión local depende de la diferencia entre la velocidad del chorro en el impacto con el lecho del río y la velocidad crítica de arrastre del material sólido, tanto en prototipo como en el modelo. La velocidad máxima esperable del impacto puede calcularse mediante la evaluación de la difusión de un chorro turbulento en el agua.
- La variación de la velocidad del impacto a medida que se profundiza el foso de erosión conduce a la obtención de una escala de tiempos variable en virtud del desarrollo del proceso erosivo.
- Los ensayos efectuados sobre modelo físico de la presa de Piedra del Águila determinaron

la existencia de dicha variación, encontrándose un incremento del orden del 15% en el valor de la escala de tiempo entre el inicio y el final del ensayo, el cual coincide con la obtención de la profundidad máxima de erosión. No obstante, la modificación de la escala de tiempo encontrada no resulta significativa, aún si se la compara con los valores obtenidos de la aplicación de la escala de Froude.

- El proceso de la evolución de la erosión en prototipo no puede ser totalmente explicado mediante el sencillo análisis de las velocidades de iniciación de movimiento y la variación de la velocidad de impacto contra el fondo. La escala de tiempos parece tener sentido práctico sólo en los primeros momentos de fenómeno erosivo, en los que las características del lecho son simuladas razonablemente. Esas circunstancias determinan que el proceso de la evolución en el tiempo de la erosión en prototipo requiere de tiempos sustancialmente mayores que los esperables a partir de los resultados obtenidos del modelo físico.
- Por lo expuesto, se propone no pretender obtener un orden de magnitud de lo que significaría en prototipo el llamado "tiempo infinito" de profundidad de erosión obtenido de los modelos físicos.

BIBLIOGRAFÍA

Bacchiega, D; Fattor, C; Lopardo, C; Laganière, D (1998). "Una aproximación a la escala de tiempos de erosión local en modelos físicos, XVII Congreso Nacional del Agua, Santa Fe, Vol 4, pp 183-192.

Breusers, H. (1966) "Conformity and time scale un two dimensional local scour", Proc.Symp on model and prototype conformity, Hyd. Res. La, Poona, India, pp 1-8.

Farhoudi, J; Smith, K (1982). "Time scale for scour downstream of hydraulic jump". Journal of Hydraulic division, ASCE, Vol 108 N°HY10, pp.1147-1162.

Hoffmans, G; Pilaeczyk, K. (1995). "Local scour downstream of hydraulic structures", Journal of Hydraulic Engineering, Vol.121, N°4, pp 326-340.

Lopardo, R (1976). "Hipótesis de interpretación del ritmo de aporte en un cierre fluvial", VII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR, Santiago de Chile, Vol. 1, pp 419-428.

Muñoz, R (1964), "Socavación al pie de un vertedero, II Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR, Porto Alegre, Vol 2.

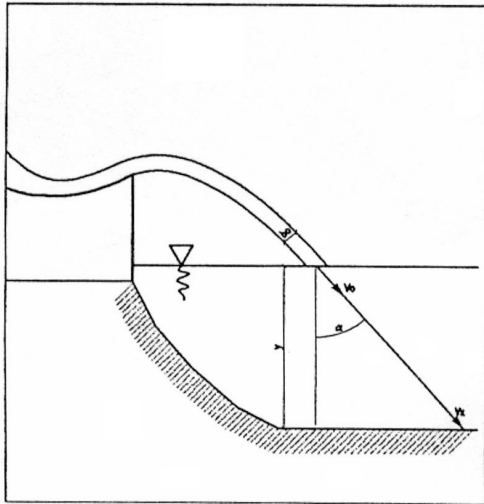


FIGURA 1

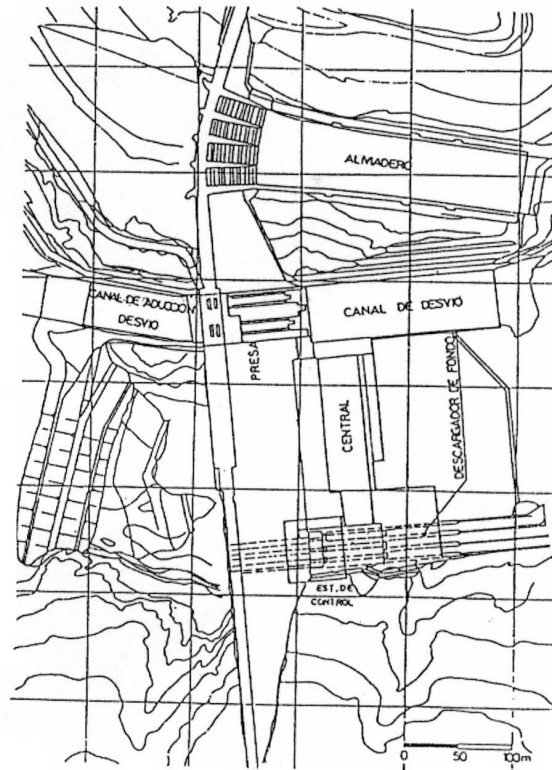


FIGURA 2

Evolución de la erosión en el eje
($Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$)

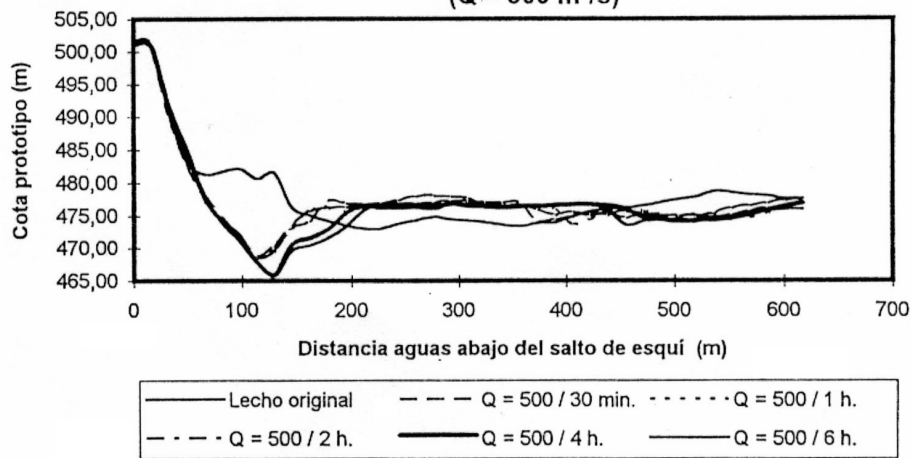


FIGURA 3

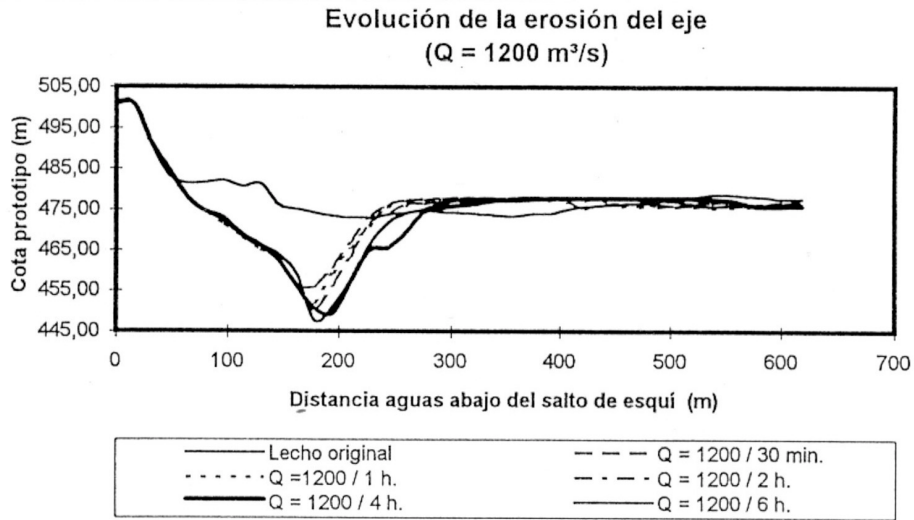


FIGURA 4

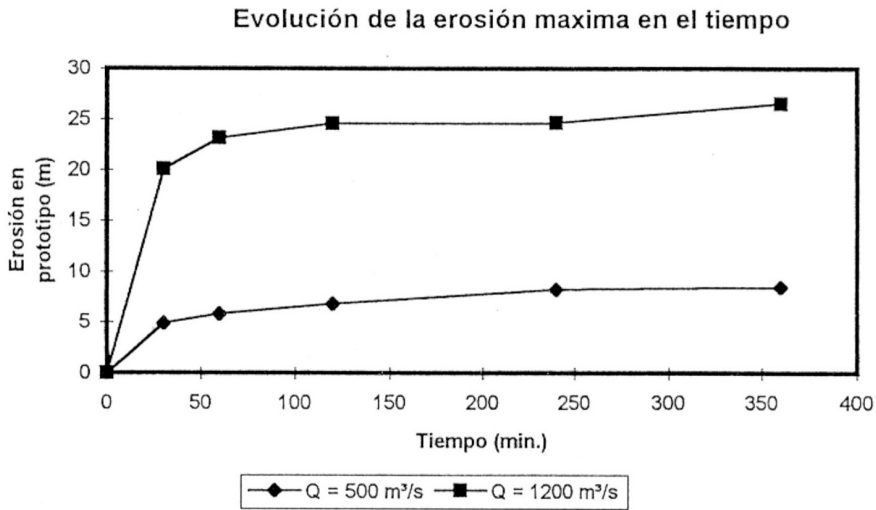


FIGURA 5

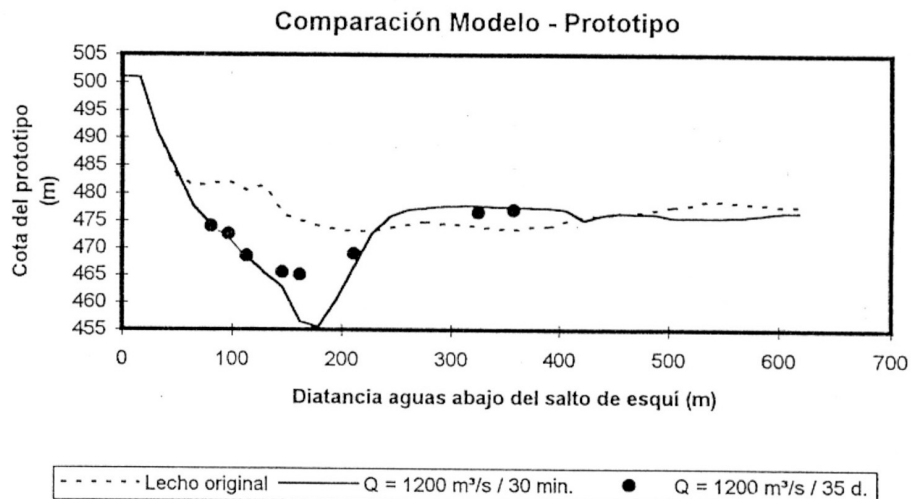


FIGURA 6