



## **DISEÑO Y OPERACIÓN DEL RÁPIDO DE LA OBRA DE SEGURIDAD DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA CHACABUQUITO**

LINCOLN ALVARADO.

Edic Ingenieros Limitada. lalvarado@edic.cl

PABLO LOIS.

Hidroeléctrica Guardia Vieja S.A. plois@hgv.cl

ROBERTO LUDERS.

Edic Ingenieros Limitada. rluders@edic.cl

### **RESUMEN**

La Obra de Seguridad de la Central Chacabuquito, que se origina en la Cámara de Carga, está compuesta por un vertedero lateral, un canal colector, un rápido escalonado y un dissipador de energía tipo SAF. El rápido es de sección rectangular de 2,50 m de ancho con escalones de altura variable entre 0,64 m y 1,16 m. El caudal de diseño es de 23 m<sup>3</sup>/s y la diferencia de cota es 50 m.

Esta publicación incluye la historia de las canalizaciones escalonadas, la metodología de diseño del rápido y del dissipador de energía y su funcionamiento para un caudal cercano al de diseño.

### **ABSTRACT**

The Chacabuquito Hydroelectric Power Plant wasteway work, located in the forebay, is composed by a side channel spillway, followed by a stepped cascade and a SAF type energy dissipator. The stepped cascades is a 2,50 m wide rectangular section with steps of variable height between 0,64 m and 1,16 m. The design flow is 23 m<sup>3</sup>/s and a 50 m level fall.

This reports includes the stepped cascade historical development, proposes a design method for the stepped cascades and the energy dissipator. Also describes a prototype real operation with a flow close to the maximum design flow.



# DISEÑO Y OPERACIÓN DEL RÁPIDO DE LA OBRA DE SEGURIDAD DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA CHACABUQUITO

## 1 Introducción

La Central Hidroeléctrica Chacabuquito, propiedad de Hidroeléctrica Guardia Vieja S.A., se ubica en el río Aconcagua a unos 8 km de la ciudad de Los Andes. La central aprovecha una altura de caída de 134 m, y un caudal de 23 m<sup>3</sup>/s para producir una potencia de 27 MW.

La central capta las aguas en la descarga de la Central Los Quilos y mediante una aducción de 13 km de longitud, compuesta de un canal y dos túneles las lleva hasta una Cámara de Carga desde donde se origina la tubería en presión que alimenta las 4 turbinas Francis de la casa de máquinas.

La cámara de carga dispone de una obra de seguridad para evacuar, el total o parte, del caudal afluente en el caso de un rechazo de carga. Esta obra de seguridad esta compuesta por un vertedero lateral de 50 m de longitud que entrega las aguas a un canal colector que mediante un canal de enlace empalma con un rápido de descarga. Este conduce las aguas hasta un dissipador de energía que finalmente las descarga en la quebrada Totoralillo para finalmente llegar hasta el río Aconcagua.

En esta publicación se describe diseño del rápido escalonado y del dissipador de energía, así como también el funcionamiento observado de la obra una vez construida.

## 2 Historia de los rápidos escalonados

Según Chanson (2001 ) los rápidos escalonados han sido usados por más 3.500 años. En la antigüedad fueron usados con tres propósitos principales: vertederos, canalizaciones y en conducciones para suministro de agua a ciudades ( acueductos romanos ).

Los más antiguos rápidos escalonados fueron construidos en Grecia y Creta. La experiencia respecto del diseño de los vertederos escalonados se difundió alrededor del Mediterráneo por los romanos, musulmanes y españoles sucesivamente. A pesar que las primeras obras fueron construidas en albañilería de piedra y madera, una amplia gama de materiales de construcción fueron introducidos en el siglo 19. Entre los siglos 16 y 18 se construyeron “grandes cascadas” con fines ornamentales.

En la década de 1970 los diseñadores recuperaron el interés por los rápidos escalonados como estructuras para disipar energía e incorporar aire al escurrimiento. La tendencia fue iniciada por la introducción de un nuevo material de construcción, el hormigón rodillado ( RCC ) y por los gaviones protegidos con polímeros. En las décadas de 1980 y 1990 , varias presas fueron construidas con su talud de aguas abajo escalonado que funciona como evacuador de crecidas. La Figura 1 muestra el caudal unitario de algunos desarrollos materializados en los últimos 2 siglos.



Los rápidos escalonados se encuentran en la naturaleza como se muestra en la Foto 1 y como en muchas otras cosas, el hombre no ha hecho sino que aplicarlo en su provecho.

### 3 Diseño del rápido de la obra de seguridad de la central Chacabuquito

#### 3.1 Alternativas analizadas

El rápido se ubica en una ladera con una pendiente de 1,2/1 ( H/V ) y debe salvar una diferencia de cota de 50 m.

Las posibles alternativas analizadas fueron:

Canalización lisa.

Canalización con escalones.

Canalización con dientes.

La última alternativa fue descartada pues su diseño normalizado por el USBR permite su uso sólo para pendientes iguales o más tendidas que 2/1 ( H/V ).

Las condiciones del escurrimiento ( según nomenclatura del punto 3.2 ) , para una canalización de sección rectangular de 2,50 m de ancho, en la sección final del rápido fueron:

SOLUCION	h (m)	n	V (m/s)	B (m)	F
ESCALONADO	0,616	0,030	14,92	11,88	6,6
LISO	0,365	0,012	25,17	32,60	15,5

La longitud de un dissipador de resalto ( $L_r$ ) sin dientes resulta, para cada solución:

SOLUCION	B(m)	hconj (m)	$L_r$ (m)
ESCALONADO	12,44	5,97	36,72
LISO	32,60	7,85	46,31

Teniendo en consideración el poco espacio disponible para el dissipador de energía se eligió la solución de rápido escalonado con un dissipador del tipo Saint Anthony Falls ( Blaisdell 1948 )

#### 3.2 Rápido escalonado

El cálculo del E.H. se realiza mediante la aplicación de la ecuación de Bernoulli, tomando en cuenta la pendiente del fondo del canal.

Se utiliza la siguiente notación de variables para el cálculo del E.H. en canales con gran pendiente según lo indicado en la Figura 3:

$$\begin{aligned} \text{Altura de agua (m)} & : h \\ \text{Area (m}^2\text{)} & : A = b \cdot h & (1) \\ \text{Perímetro Mojado (m)} & : P_m = 2 \cdot h + b & (2) \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \text{Radio Hidráulico (m)} & : R_h = A / P_m \\ \text{Velocidad (m/s)} & : V = Q / (b \cdot h) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{Bernoulli (m)} : B = h \cdot \cos \alpha + V^2 / 2g \quad (4)$$

$$\text{Pendiente Línea de Energía (m/m)} : J = \left[ \frac{V \cdot n}{R_h^{2/3}} \right]^2 \quad (5)$$

La ecuación de Bernoulli es la siguiente:

$$z_1 + h_1 \cdot \cos \alpha + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + h_2 \cdot \cos \alpha + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta H_f \quad (6)$$

donde:

$$\Delta H_f = \Delta L \cdot \frac{J_1 + J_2}{2} \quad (7)$$

$$\Delta Z = z_1 - z_2 = \Delta L \cdot \sin \alpha \quad (8)$$

Luego la ecuación para encontrar la distancia en el sentido de la pendiente dada una altura de aguas  $h_2$  es la siguiente:

$$\Delta L = \frac{B_2 - B_1}{\sin \alpha - \frac{J_1 + J_2}{2}} \quad (9)$$

Según Minor (2000) para la determinación de la rugosidad de Manning se utiliza la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2,69 - 1,38 \cdot \log \left[ \frac{K}{wD} \right] \quad \text{para } \alpha = 30^\circ \quad (10)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4,25 + 0,58 \cdot \log \left[ \frac{K}{wD} \right] \quad \text{para } \alpha = 50^\circ \quad (11)$$

donde:

f : factor de fricción

K : altura de rugosidad perpendicular al pseudofondo,  $K = s \cos (\alpha)$

s : altura del escalón ( variable entre 0,64 m y 1,16 m )

w : coeficiente de prismacidad de la sección, y está dado por:

$$w = 0,90 - 0,38 \cdot e^{\frac{-5h}{b}} \quad \text{para } h/b \geq 0,04 \quad (12)$$

$$w = 0,60 \quad \text{para } h/b < 0,04 \quad (13)$$

$$D : \text{diámetro hidráulico de la sección:} \quad D = 4 \cdot R_h \quad (14)$$



El factor de fricción se relaciona con el coeficiente de rugosidad de Manning por medio de la siguiente expresión:

$$n = \sqrt{\frac{f \cdot R_h^{1/3}}{8g}} \quad (15)$$

Considerando escurrimiento crítico en la sección de control:

$$h = 2,052 \text{ m} \quad V = 4,48 \text{ m/s} \quad B = 3,078 \text{ m} \quad ZF = 1.063,637 \text{ m}$$

En la sección final del rápido a la cota  $ZF = 1.014,00 \text{ m}$  se obtienen las siguientes condiciones de escurrimiento:

$$h = 0,506 \text{ m} \quad V = 16,18 \text{ m/s} \quad B = 13,769 \text{ m} \\ h_{\text{conj}} = 6,156 \text{ m} \quad F = 8,0$$

La elevada aireación producida en un rápido escalonado lleva a un esponjamiento del flujo que debe ser considerado en el diseño de los muros. La altura característica  $h_{90}$  del flujo mixto (agua-aire), con una concentración superficial del 90%, sirve de guía para el diseño en la zona aireada. Partiendo del punto de interceptación del ingreso del aire al flujo, la mezcla agua-aire puede ser descrita por la siguiente curva (Minor 2000):

$$h_{90}(x) = 0,55 \left( \frac{q^2 s}{g \cdot \sin \alpha} \right)^{1/4} \tanh \left( \frac{\sqrt{g \cdot s \cdot \sin \alpha}}{3q} (x - L_i) \right) + 0,42 \left( \frac{q^{10} s^3}{(g \cdot \sin \alpha)^5} \right)^{1/18} \quad (16)$$

donde:

- $h_{90}$  : altura de la mezcla agua-aire con una concentración del 90% (m)
- $x$  : distancia horizontal desde el inicio del rápido (m)
- $q$  : caudal por unidad de ancho del rápido ( $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ )
- $s$  : altura de los escalones (m)
- $g$  : aceleración de gravedad ( $\text{m}/\text{s}^2$ )
- $\alpha$  : ángulo de inclinación del rápido respecto de la horizontal ( $^\circ$ )
- $L_i$  : distancia inclinada de la zona no aireada (m)

La altura de los muros propuesta (Minor 2000) está dada por la siguiente relación:

$$h_d = \eta \cdot h_{90} \quad (17)$$

donde:

- $h_d$  : altura del muro (normal al escurrimiento) (m)
- $\eta$  : coeficiente de seguridad (-)

Para evacuadores de emergencia se recomienda  $\eta = 1,5$ , sobre todo si existe riesgo de erosión lateral. La altura de los muros del rápido se pueden calcular por:



$$h_d(x) = 0,825 \left( \frac{q^2 s}{g \cdot \sin \alpha} \right)^{1/4} \tanh \left( \frac{\sqrt{g \cdot s \cdot \sin \alpha}}{3q} (x - L_i) \right) + 0,63 \left( \frac{q^{10} s^3}{(g \cdot \sin \alpha)^5} \right)^{1/18} \quad (18)$$

Para  $x = 63,1$  m (inicio muros disipador de energía),  $q = 9,2$  m<sup>2</sup>/s,  $s = 0,943$  m,  $\alpha = 38,16^\circ$ ,  $L_i = 24,9$  m, la altura del muro es 2,86 m.

### 3.3 Disipador de energía

El disipador de energía, tipo resalto, SAF, fue desarrollado por Blaisdell en el St Anthony Falls Hydraulic Laboratory de la Universidad de Minnesota y debido a los dientes su dimensión es aproximadamente un 20% que la de un resalto clásico. Puede ser usado en escurrimientos con N<sup>o</sup> de Froude (sección de entrada al disipador) comprendidos entre 1,7 y 17.

La longitud del disipador se calcula como:

$$L = 4,5 h_{conj} / F^{0,76} \quad (19)$$

$$\text{Para } F \text{ comprendido entre } 5,5 \text{ y } 11 \quad h_2 = 0,85 \cdot h_{conj}. \quad (20)$$

La revancha de los muros laterales es:

$$R = 0,333 \cdot h_{conj}. \quad (21)$$

Según Gutiérrez (1995), la disipación de energía que se produce en el resalto crece conforme aumenta la concentración de aire del escurrimiento que ingresa al disipador de energía.

La longitud del disipador resulta igual a 5,47 m y la altura de aguas abajo "h<sub>2</sub>" igual a 5,23 m.

## 4 Operación observada de la obra

En Junio de 2002 se efectuó una operación de prueba de la Obra de Seguridad. La central estaba generando 18 m<sup>3</sup>/s y se sacaron de servicio todas las unidades provocando un rechazo total de carga de modo que el total del caudal afluente fue evacuado por el rápido.

Como se muestra en la Foto 3 el escurrimiento resultó altamente aireado (agua blanca) y no se produjeron salpicaduras (splash) que sobrepasaran los muros. El disipador de energía funcionó correctamente así como también las protecciones con enrocados.

Las Fotos 3 y 4 muestran el funcionamiento del disipador de energía.

El 14 de Septiembre de 2002 a raíz de un apagón que afectó a parte del Sistema Interconectado Central la Obra de Seguridad operó correctamente, esta vez con un caudal de unos 21 m<sup>3</sup>/s.

## 5 Agradecimientos

Los autores agradecen a Hidroeléctrica Guardia Vieja S.A. la autorización y facilidades para la presentación de este trabajo.



## 6 Referencias

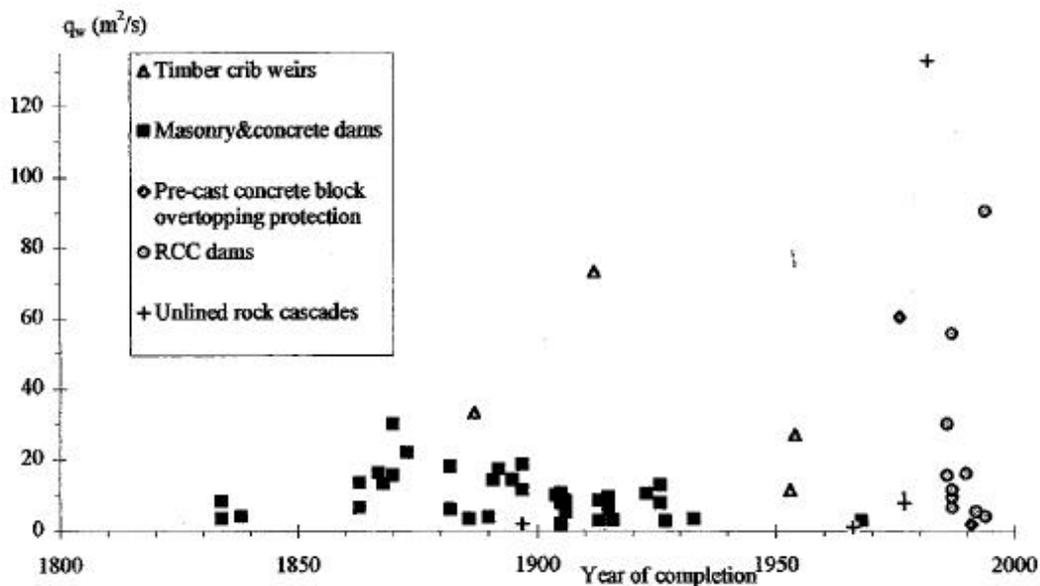
CHANSON Hubert. Historical Development of Stepped Cascades for Dissipation of Hydraulic Energy. Trans. Newcomen Soc, ( 72 ): 295-318,. 2000-2001.

BLAISDELL Fred. Development and Hydraulic Design, Saint Anthony Falls Stilling Basin. Transaction ASCE 113 : 483-561, 1948.

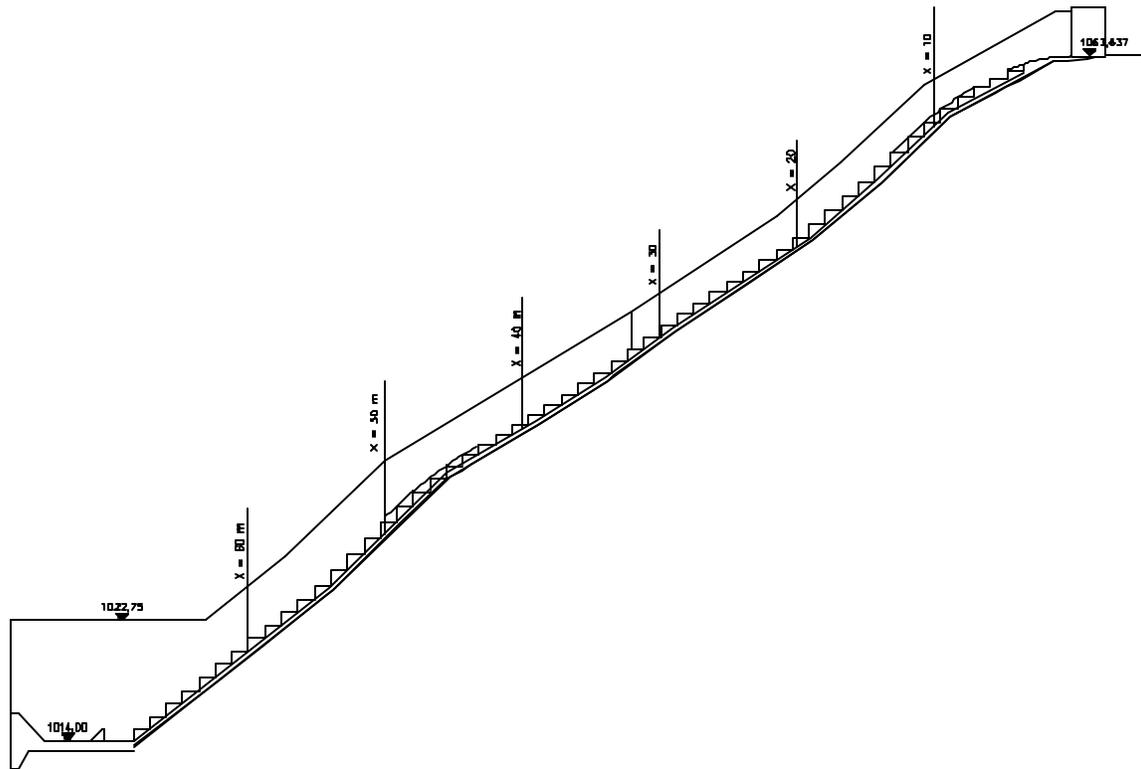
MINOR Hans, HAGER Willi.(Editors). Hydraulic of Stepped Spillways. Proceeding of the International Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways. Balkema, March 2000. 129p.

RICE C., KADAKY K (1992) Riprap Design for SAF Stilling Basins. Transaction of the ASAE 35 (6): 1817-1825 .1992.

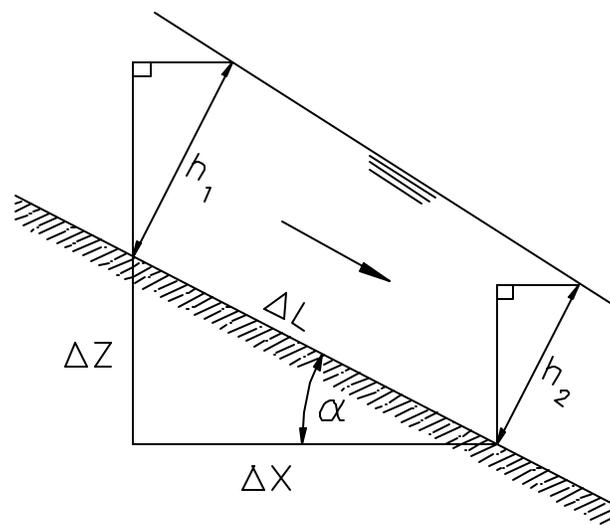
GUTIERREZ Ramón, PALMA Alfonso. Aeración en las Estructuras Hidráulicas de las Presas: Aliviaderos y Desagües Profundos. CNE. 1995. 377p.



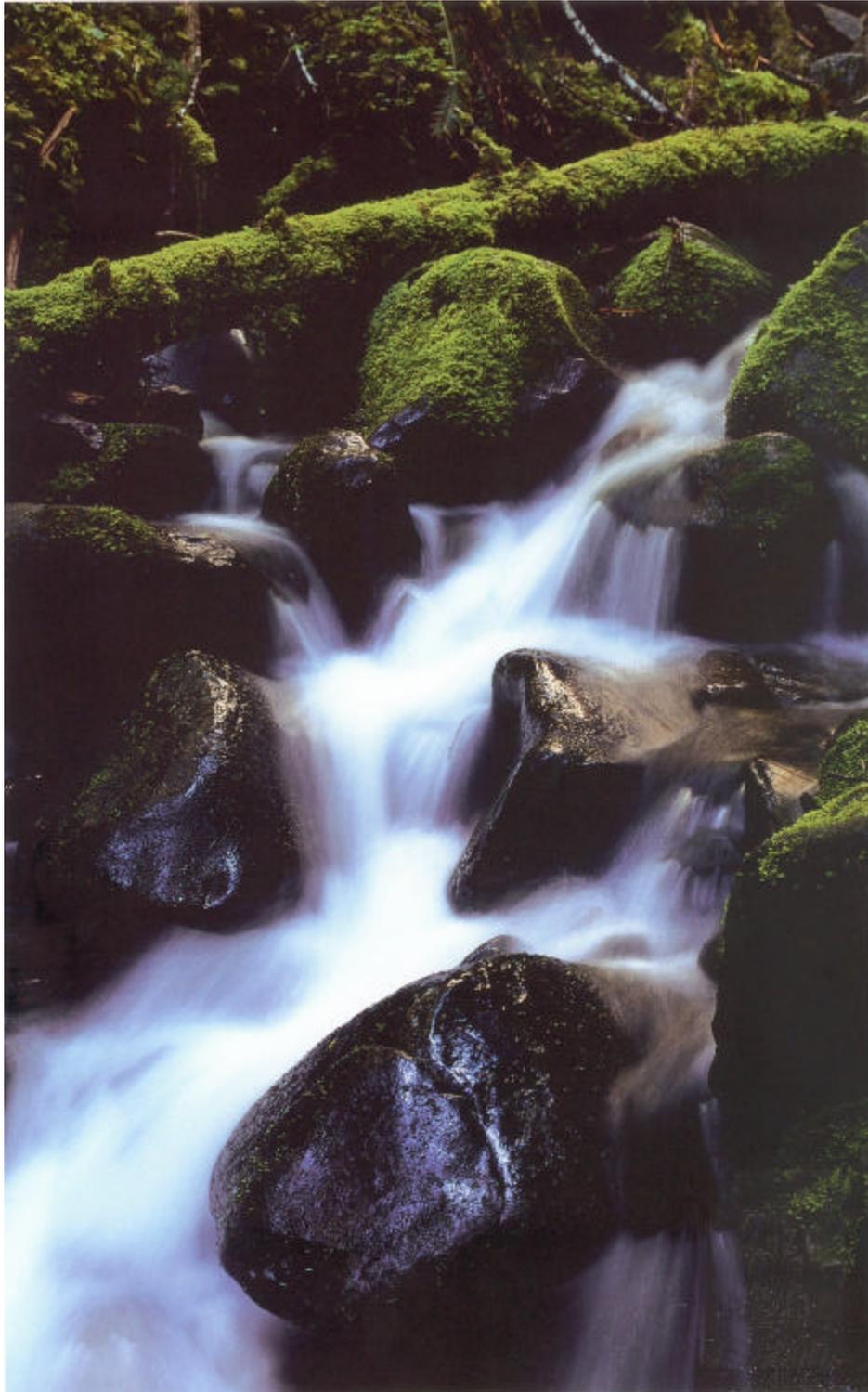
**FIGURA 1**  
**Caudal unitario de algunos rápidos escalonados  
diseñados en los últimos 2 siglos**



**FIGURA 2**  
**Perfil longitudinal del rápido**



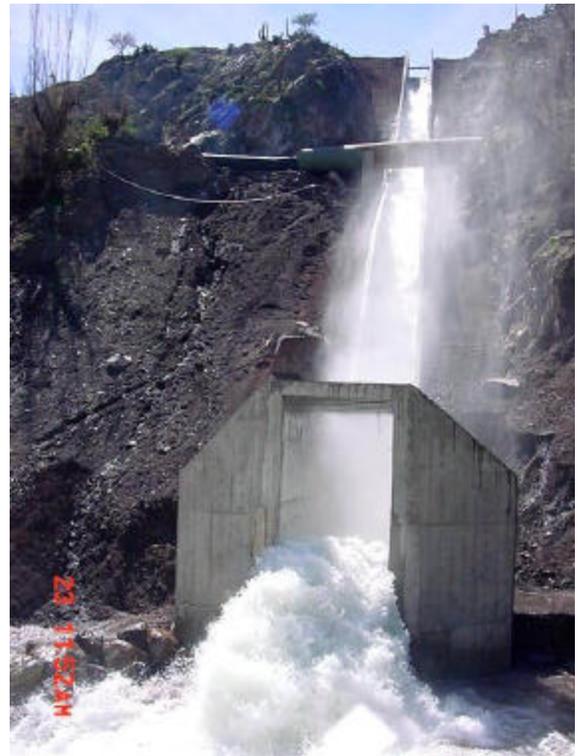
**FIGURA 3**  
**Definición de variables para el cálculo del EH.**



**FOTO 1**  
**Rápido escalonado natural**



**Foto 2**  
**Construcción del rápido**



**Foto 3**  
**Rápido funcionando**



**Foto 4**  
**Disipador de energía**