

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

XIX CONGRESO CHILENO DE HIDRAULICA

REVESTIR O NO REVESTIR RAPIDOS DE EVACUADORES DE CRECIDAS EXCAVADOS EN ROCA. ANALISIS DE CASOS EN CHILE.

**LINCOLN ALVARADO M.¹
SANTIAGO CASTRO B.²
LUIS ALVAREZ G.³**

RESUMEN

La decisión acerca de revestir o no los rápidos de evacuadores de crecidas implica también asumir o no un importante costo del proyecto global, de ahí la importancia de documentar estos casos. En este trabajo se exponen los casos de los evacuadores de crecidas de los embalses La Paloma, Santa Juana, Puclaro, Cogotí, Corrales, y Chacrillas, los primeros ya construidos, y el último, con su fase de Ingeniería de Detalles terminada. De hecho, los rápidos de evacuación de los embalses La Paloma, Santa Juana, Cogotí se dejaron sin revestir en el diseño final, pero posteriormente hubo que revestir los dos primeros, debido a daños causados por socavación hidráulica en crecidas ocurridas al inicio de su operación. El análisis de la potencialidad de socavación en los evacuadores de crecida de estos embalses se ha realizado con la metodología propuesta por Van Schalkwyk et al. (1994a), que correlaciona dicha socavación con un parámetro que representa el poder erosivo hidráulico (potencia unitaria) y uno que representa la calidad de la roca (Índice de Kirsten).

¹Ingeniero Civil, Edic Ingenieros SA-mail: lalvarado@edic.cl

²Geólogo, Golder Associates SA.- mail: rscastro@golder.cl

³Ingeniero Civil, Dirección Obras Hidráulicas. Ministerio de Obras Públicas

1 INTRODUCCIÓN

La decisión acerca de si revestir o no los rápidos, excavados en roca, de evacuadores de crecidas implica asumir o no un importante costo del proyecto, de ahí la importancia de documentar lo sucedido con obras de este tipo construidas en Chile.

En este trabajo se exponen y analizan los rápidos de los embalses Santa Juana, Puclaro, Paloma, Cogotí y Corrales, ubicados todos en la IV Región de Coquimbo de Chile a excepción del Embalse Santa Juana el que se localiza en la parte sur de la III Región de Atacama. Estos embalses se encuentran operando desde 1995, 1999, 1967, 1939, y 2001 respectivamente.

A estos embalses se ha agregado el proyecto del embalse Chacrillas ubicado en la V Región. Este embalse se encuentra con su Ingeniería de Detalles terminada.

Los muros de todos estos embalses son del tipo CFRD, a excepción del de La Paloma que es de tierra y zonificado.

Tal como se mencionó anteriormente, en el caso de los evacuadores de crecidas de los embalses Santa Juana, La Paloma y Cogotí los rápidos se dejaron sin revestir, pero posteriormente hubo que revestir los dos primeros debido a los daños que sufrieron causados por la socavación durante crecidas bastante menores que la de diseño.

El análisis de los rápidos de los evacuadores de crecidas se ha fundamentado en la aplicación de la metodología propuesta por (Van Schalkwyk et al. 1994a) que correlaciona la socavación hidráulica a través de la relación entre un parámetro hidráulico (potencia unitaria) y uno que representa la calidad geotécnica y situación de los planos de fractura de la roca (Índice de Kirsten).

2 METODOLOGIA

Van Schalkwyk(1994) muestra en sus trabajos que de acuerdo a la experiencia empírica documentada de 18 casos en Sud África y 33 en Estados Unidos (Moore et al., 1994), es posible correlacionar la “potencia unitaria del flujo”, con un índice de erosionabilidad hidráulica de la roca “Índice de Kirsten” en un gráfico doble logarítmico y que de acuerdo con lo observado de terreno es posible definir zonas de erosión excesiva, moderada a pequeña y sin erosión (Ver la Figura 1).

Al respecto, cabe señalar que para un flujo en canales, como es el caso de los rápidos, la potencia por unidad de área se define como:

$$P = \rho \cdot g \cdot q \cdot S \text{ (Watts/m}^2\text{)} \quad (1)$$

Donde:

- ρ = densidad del agua (1.000 kg/m³)
- g = aceleración de gravedad (9,81 m/s²)
- q = caudal unitario (m²/s)
- S = pendiente de la línea de energía

El Índice de erosionabilidad hidráulica, fue propuesto por (Kirsten, 1982) y actualizado por (Annandale, 2002c), se expresa por la siguiente relación:

$$K = M_s \cdot K_b \cdot K_d \cdot J_s \quad (2)$$

- M_s = Valor de la resistencia a la compresión simple de la roca.
- K_b = Número del tamaño del bloque = RQD/Jn.
- RQD = Porcentaje de trozos de roca intactos y resistentes de más de 10 cm de longitud cada uno, ya sea por carrera de un sondaje o por metro lineal.
- Jn = Número de sistemas o familias de fracturas o diaclasas representativos de un macizo rocoso.
- K_d = Número del tamaño del bloque = Jr/Ja.
- Jr = Número que representa la rugosidad de los planos de fracturas o diaclasas de un macizo rocoso (Sistema del Índice. “Q” Barton N., 1974).
- Ja = Número que representa el relleno, espesor y tipo de materiales de los planos de fracturas o diaclasas de un macizo rocoso (Sistema del Índice “Q”. Barton N., 1974).
- Js = Número relacionado con la orientación y la inclinación de los planos de fracturas o diaclasas de la roca.

Las Figuras 1 y 2 muestran el gráfico, presentado por (Van Schalkwyk et al. 1994b), que permite definir la erosionabilidad de la roca.

3 EVACUADORES DE CRECIDAS ANALIZADOS

En la Tabla 1 de la página siguiente, se indican el año de entrada en operación, el tipo de presa y las principales características físicas de los evacuadores de crecidas analizados en este trabajo.

Tabla 1: Características principales de los muros

EMBALSE	AÑO DE TERMINO	TIPO	ALTURA m	LONGITUD CORONAMIENTO m
SANTA JUANA	1995	CFRD	113	390
PUCLARO	1999	CFRD	83	595
LA PALOMA	1967	ZONIFICADO	96	1.000
COGOTI	1939	CFRD	83	160
CORRALES	2001	CFRD	70	340
CHACRILLAS	Proyectado	CFRD	100	320

En la Tabla 2, siguiente se exponen las principales características de diseño de estos evacuadores de crecidas.

Tabla 2. Características principales de diseño de los evacuadores de crecida

EMBALSE	CAUDAL DE DISEÑO m ³ /s	AÑO DE TÉRMINO	SECCION	REVESTIDO	ANCHO BASAL m	PENDIENTE
SANTA JUANA	1.075	1995	TRAPECIAL	NO	15,0	0,508 – 0,410
PUCLARO	1.596	1999	RECTANGULAR	SI	25,0	0,226 – 0,400
LA PALOMA	6.500	1967	RECTANGULAR	NO	116,1	1,044
COGOTÍ	3.000	1939	TRAPECIAL	NO	40,0 – 17,0	0,250 – 0,400
CORRALES	670	2001	TRAPECIAL	SI	40,0	0,400
CHACRILLAS	1.113	Proyectado	RECTANGULAR	SI	12,0	0,541 – 0,261

De los evacuadores de crecidas antes citados Puclaro, Corrales y Chacrillas fueron diseñados y construidos (a excepción de Chacrillas, aún por construir), con rápidos revestidos con hormigón. En los embalse Santa Juana, Paloma, y Cogotí, el diseño y construcción no contempló revestimiento, sin embargo, en el caso de Santa Juana y Paloma se presentaron serios problemas de socavación hidráulica, por lo que dichos rápidos fueron posteriormente revestidos con hormigón.

4 CÁLCULO DE LA POTENCIA UNITARIA

Para determinar la potencia unitaria del escurrimiento se calcularon los ejes hidráulicos correspondientes considerando las dimensiones teóricas de las secciones transversales, es decir sin sobre-excavación, y un coeficiente de rugosidad de Manning igual a 0,030.

4.1 EVACUADORES DE CRECIDAS SIN REVESTIMIENTO CONSIDERANDO LAS CONDICIONES REALES DE FUNCIONAMIENTO

Para los rápidos de las presas Santa Juana, La Paloma, Cogotí, y Corrales las condiciones máximas reales con las cuales han funcionado se indican a continuación:

Tabla 3. Embalses y caudal máximo de funcionamiento real

EMBALSE	CAUDAL MAXIMO REAL (m ³ /s)
SANTA JUANA	90
PALOMA	800
COGOTI	1.000

4.2 CONDICIONES DE ESCURRIMIENTO Y POTENCIA UNITARIA

Las condiciones de escurrimiento y la potencia unitaria, se indican a continuación para una sección ubicada en la mitad (Tabla 4) y otra en el término del rápido (Tabla 5).

Tabla 4. Sección ubicada en la mitad del rápido

EMBALSE	Q (m ³ /s)	h (m)	V (m/s)	J	P (kW/m ²)
SANTA JUANA	90	0,46	12,9	0,450	26,2
PALOMA	800	0,45	16,7	0,735	54,3
COGOTI	1.000	2,45	22,0	0,175	92,3

Tabla 5. Sección ubicada al término del rápido

EMBALSE	Q (m ³ /s)	h (m)	V (m/s)	J	P (kW/m ²)
SANTA JUANA	90	0,48	12,3	0,384	22,4
PALOMA	800	0,45	16,6	0,722	53,4
COGOTI	1.000	2,40	23,6	0,210	116,8

4 EVACUADORES DE CRECIDAS TOMANDO EN CUENTA LAS CONDICIONES DE DISEÑO

Las condiciones de diseño para los rápidos de las presas Santa Juana, Paloma, Puclaro, Cogotí, Corrales y Chacrillas se indican a continuación:

Santa Juana	1.075 m ³ /s
Puclaro	1.600 m ³ /s
Paloma	6.500 m ³ /s
Cogotí	3.000 m ³ /s
Corrales	1.113 m ³ /s

Las condiciones de escurrimiento, para el caso en que no se considere revestimiento ($n = 0,030$), se indican a continuación para una sección ubicada en la mitad (Tabla 6) y otra en el término del rápido (Tabla 7).

Tabla 6. Sección ubicada en la mitad del rápido

EMBALSE	Q (m ³ /s)	h (m)	V (m/s)	J	P (kW/m ²)
SANTA JUANA	1.075	2,83	24,2	0,192	128,9
PUCLARO	1.600	2,81	22,8	0,154	96,6
PALOMA	6.500	2,07	29,8	0,315	189,3
COGOTI	3.000	6,06	25,4	0,095	143,4
CORRALES	653	0,99	16,5	0,262	42,0
CHACRILLA	1.113	3,37	27,5	0,244	222,2

Tabla 7. Sección ubicada al término del rápido

EMBALSE	Q (m ³ /s)	h (m)	V (m/s)	J	P (kW/m ²)
SANTA JUANA	1.075	2,32	29,7	0,356	240,5
PUCLARO	1.600	2,28	28,0	0,294	184,1
PALOMA	6.500	1,81	33,9	0,492	295,2
COGOTI	3.000	5,58	29,2	0,139	222,3
CORRALES	653	0,93	17,6	0,327	52,4
CHACRILLA	1.113	3,42	27,1	0,233	212,1

5 GEOLOGÍA, GEOTECNIA, DISCONTINUIDADES E ÍNDICE DE KIRSTEN

5.1 GENERALIDADES

El análisis de los rápidos de los evacuadores de crecidas se ha fundamentado en la aplicación de la metodología propuesta por (Van Schalkwky et al. 1994a) que correlaciona la socavación con un parámetro hidráulico (potencia unitaria) y uno que representa la calidad geotécnica y situación de los planos de fractura de la roca (Índice de Kirsten) en rápidos existentes. Estos parámetros graficados en un sistema doble logarítmico y lo observado en de terreno en rápidos existentes, permite definir zonas de de erosión excesiva, moderada a pequeña y sin erosión.

Los resultados de estos gráficos son los que actualmente permiten apoyar de mejor manera la decisión de revestir o no los rápidos de evacuadores de crecidas.

Como se expuso en el punto 2, el índice de erosionabilidad hidráulica fue propuesto por (Kirsten, 1982) y actualizado por (Annandale, 2002c y 2006) se expresa por la siguiente relación, ya indicada en el punto 2:

$$K = M_s \cdot K_b \cdot K_d \cdot J_s$$

Por esta razón, se evaluaron a fondo todos antecedentes disponibles geológico-geotécnicos y geomecánicos de las rocas, donde está emplazados estos rápidos de los evacuadores de crecidas, para poder estimar este Índice de Kirsten. Esto incluyó al menos lo siguiente:

- Planos geológicos y perfiles geológico-geotécnicos existentes.
- Registros y fotografías de sondajes geotécnicos a lo largo del rápido de descarga.
- Obtención del RQD y grado de fracturamiento, además de la forma, rugosidad y relleno de planos de fracturas y diaclasas del macizo rocoso excavado, de acuerdo a lo mostrado en los sondajes revisados.
- Permeabilidad estimada a partir de ensayos Lugeon.
- Resistencia a la compresión simple estimada /o resultante de ensayos de compresión uniaxial de laboratorio.

- Adicionalmente, los autores tienen experiencia directa en el estudio, diseño y/o construcción de estos embalses, en alguna de las instancias que cada una de estas actividades implican.

En este sentido fue fundamental el aporte del ingeniero Luis Alvarez de la Dirección de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas, co-autor del presente trabajo.

Los resultados se exponen en las tablas siguientes:

5.2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS

Los resultados se exponen en la Tabla 7 siguiente:

Tabla 7. Sección ubicada al término del rápido

EMBALSE	VALOR PESIMISTA	VALOR OPTIMISTA	VALOR MEDIO
SANTA JUANA	314	1138	720
PUCLARO	426	3537	1982
PALOMA	472	3157	1815
COGOTÍ	538	3134	1836
CORRALES	64	333	198
CHACRILLAS	1333	6107	3720

6 PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

Para presentar los resultados se ha utilizado el gráfico (Annandale G.W., 2006) que relaciona la potencia unitaria, el Índice de Kirsten y la magnitud de la socavación.

La Figura 1 muestra los resultados, de los cálculos, para las condiciones reales de funcionamiento de rápidos sin revestir, excavados en roca. El gráfico muestra que todos los casos analizados (Santa Juana, Paloma y Cogotí) se ubican en la zona con socavaciones entre 0 y 2 metros. Como índice de Kirsten se ha usado el valor medio.

La Figura 2 muestra los resultados, para las condiciones consideradas en el diseño, de todos rápidos analizados considerándolos sin revestir. El gráfico muestra que todos los casos analizados se ubican en la zona con socavaciones iguales o mayores de 2 metros. Como Índice de Kirsten se ha usado el valor medio.

7 CONCLUSIONES

- La metodología utilizada en el análisis permite, en la etapa de diseño, disponer de una herramienta que ayuda en la toma de decisión respecto a la necesidad de revestir un rápido excavado en roca, que hasta ahora, en Chile, no ha estado disponible.
- Desde el punto de vista hidráulico el cálculo de la potencia unitaria sólo requiere agregar una columna en la planilla de cálculo del eje hidráulico.
- Desde el punto de vista geológico – geotécnico el cálculo del Índice de Kirsten demanda de un mayor trabajo, pues se debe realizar un mapeo geológico-geotécnico detallado de

superficie y de los testigos de los sondeos geotécnicos. También es necesario llevar a cabo un adecuado programa de ensayos geomecánicos de laboratorio, tal que permitan un estudio a fondo tanto de la matriz intacta del macizo rocoso como, muy especialmente, de sus planos de discontinuidades (forma y rugosidad, rellenos, abertura, extensión o corrida, y orientación con respecto al eje del evacuador de crecidas).

- El estudio geológico – geotécnico debe realizarse, tanto en superficie como en profundidad, al menos hasta unos 20 m más abajo de aquella en que se fundará el rápido. Todo esto apoyado de un adecuado programa de ensayos geomecánicos, que permitan la definición de los parámetros del Índice de Kirsten.
- Los casos de evacuadores chilenos, sin revestir, estudiados indican que la decisión de revestir posteriormente los rápidos de Santa Juana y Paloma fue la adecuada.
- Respecto al rápido del embalse Cogotí su socavación hidráulica ha llegado, al parecer, hasta una profundidad en la que ha alcanzado un relativo equilibrio. Si en el futuro se produjesen crecidas mayores que aquellas hasta ahora ocurridas, es posible que esta socavación aumente hasta un extremo que se haga necesario revestir también este rápido.

7 REFERENCIAS

Annandale G.W., 2002. Quantification of the relative ability of rock to resist scour. Rock scour due falling high-velocity jets.

Annandale G.W., 2006. Scout technology. Prediction and management of water erosion of earth material. McGraw-Hill. Civil Engineering Series.

Barton, N.; Lien, R. and Lunde, J. Engineering classification of rock masses for design of tunnel support. Rock Mechanics, Vol. 6, N° 4, 1974, pp. 5: 2-9.

Bieniawski, Z. T., Rock mass classification (RMR) in rock engineering and its application in tunnelling. Symp. Exploration for Rock Engineering, Johannesburg, Vol. I, 1976, páginas 97-106.

Chilean National Committee on Large Dams, 1996. Large Dams in Chile. CIGB, ICOLD.

Deere, D. U. and Miller, R. P, 1996. Engineering classification and index properties for intact rock (RQD). Technical Report N° AFNL-TR-65-116, Air Force Weapons Laboratory, New Mexico.

Grimstad, E. and Barton, N., 1993. Updating of the Q-System for NTM. Proceedings on the International Symposium of Sprayed Shotcrete – Modern Use of Wet Mix Sprayed Shotcrete Concrete for Underground Support, Fagernes, 1993. (Eds. Kompen, Opsahl and Berg, Norwegian Concrete Association, Oslo.

Kirsten, H.A.D. 1982. A classification system for excavation in natural materials. The Civil Engineer South Africa, July, pp. 292-308.

Moore, J.S., Temple, D.M., Kirsten, H.A.D. 1994 Headcut advance threshold in earth spillways, Bull. Assoc. Engineering Geologist, Vol XXXI, N 2, June.

Van Shalkwky, A., Jordaan, J. M., Dooge, N. 1994a Q 71-R 37: Erosion of rock in unlined spillways, Dix-huiteme Congres des Grandes Barages.

Van Shalkwky, A., Jordaan, J. M., Dooge, N. 1994b Q 71-17: Erosion of rock in unlined spillways, Dix-huiteme Congres des Grandes Barages.

Van Shalkwky, A., Jordaan, J. M., Dooge, N. 1995. The erodibility of different rock formations under varying flow conditions, Water Research Commission, Report N° 302/1/1995, Pretoria, South Africa.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas de Chile por la autorización para la publicación del trabajo y por las facilidades otorgadas para obtener los antecedentes.

Figura 1: Gráfico Potencialidad de Socavación Hidráulica versus Índice de Kirsten (condiciones reales en que han operado las obras).

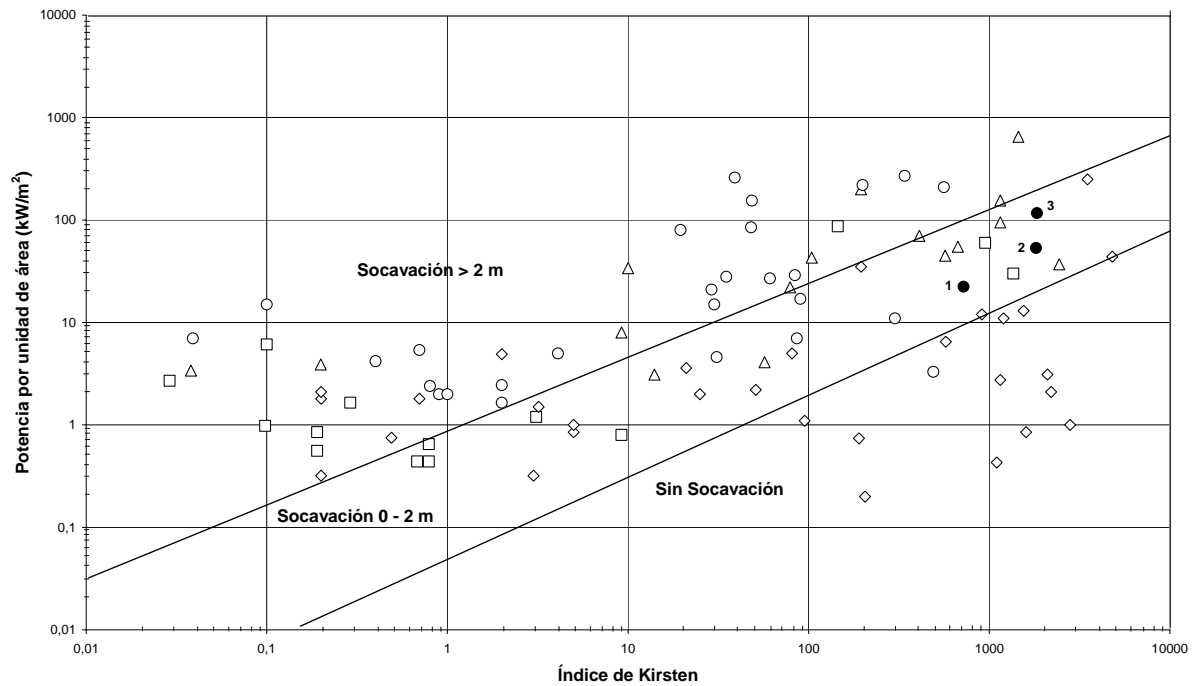
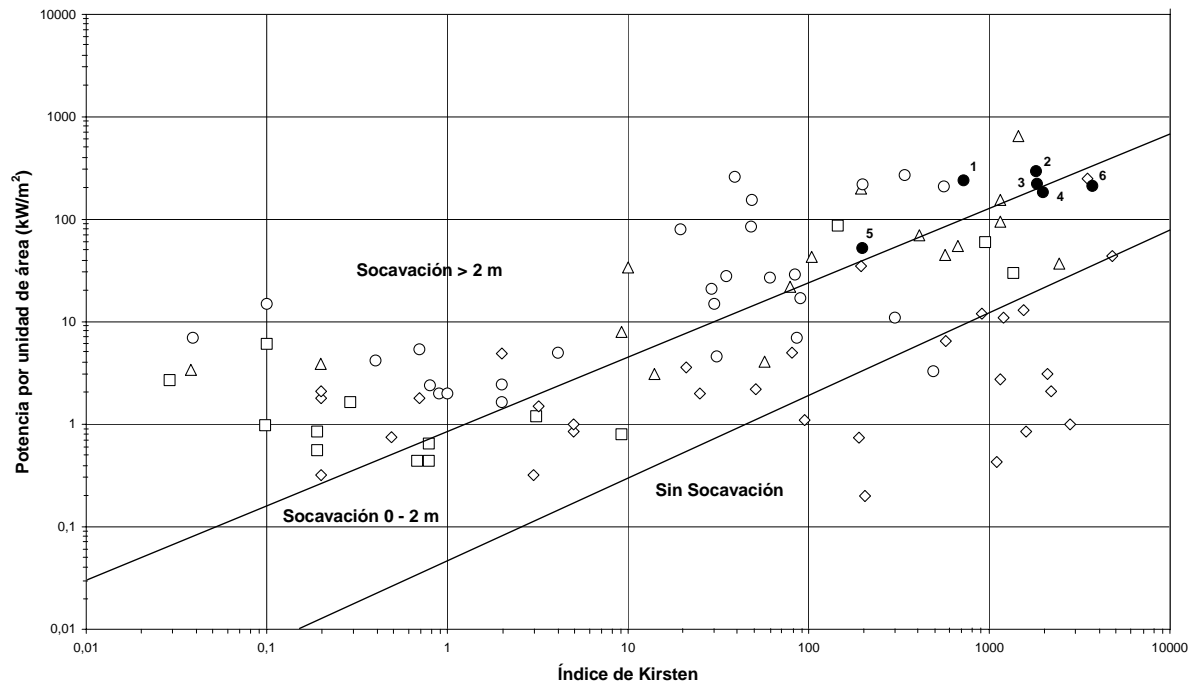


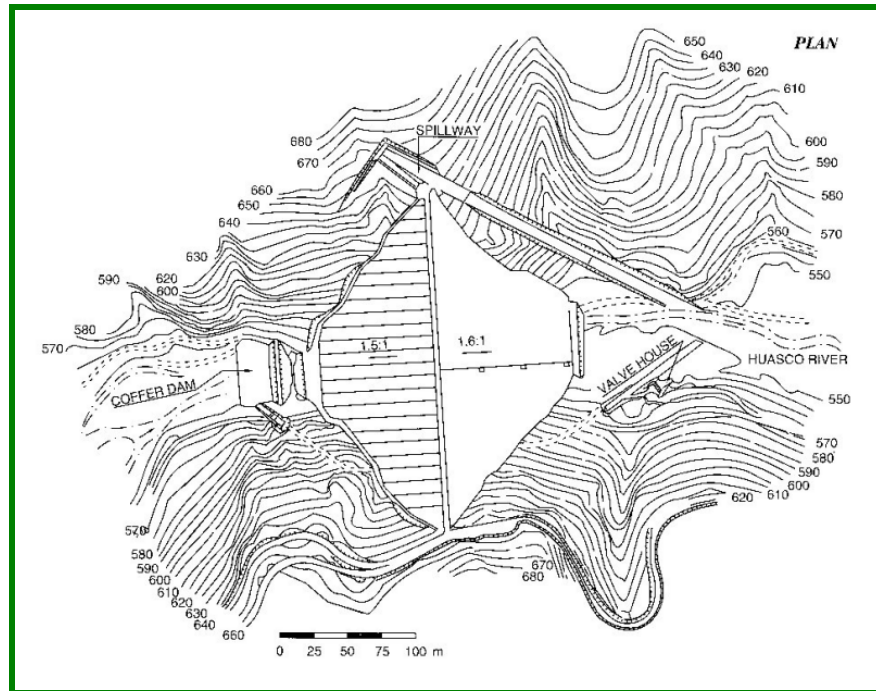
Figura 2: Gráfico Potencialidad de Socavación Hidráulica versus Índice de Kirsten . (condiciones de diseño suponiendo el rápido sin revestir).



Leyenda	
◇	Sin Socavación
□	Poca Socavación
△	Socavación Moderada
○	Socavación Significativa

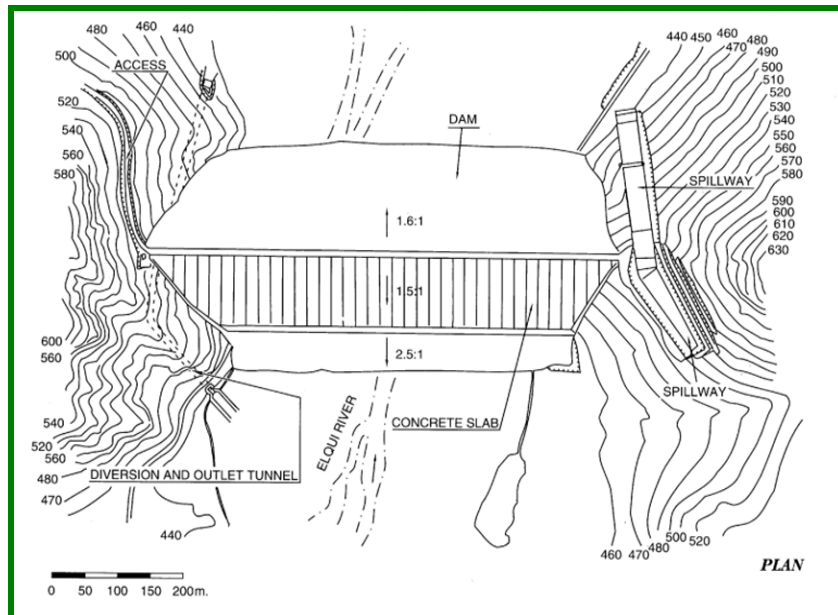
1	Santa Juana	4	Puclaro
2	Paloma	5	Corrales
3	Cogotí	6	Chacrillas

EMBALSE SANTA JUANA EVACUADOR DE CRECIDAS



**Rápido de descarga
Vista desde aguas abajo**

EMBALSE PUCLARO

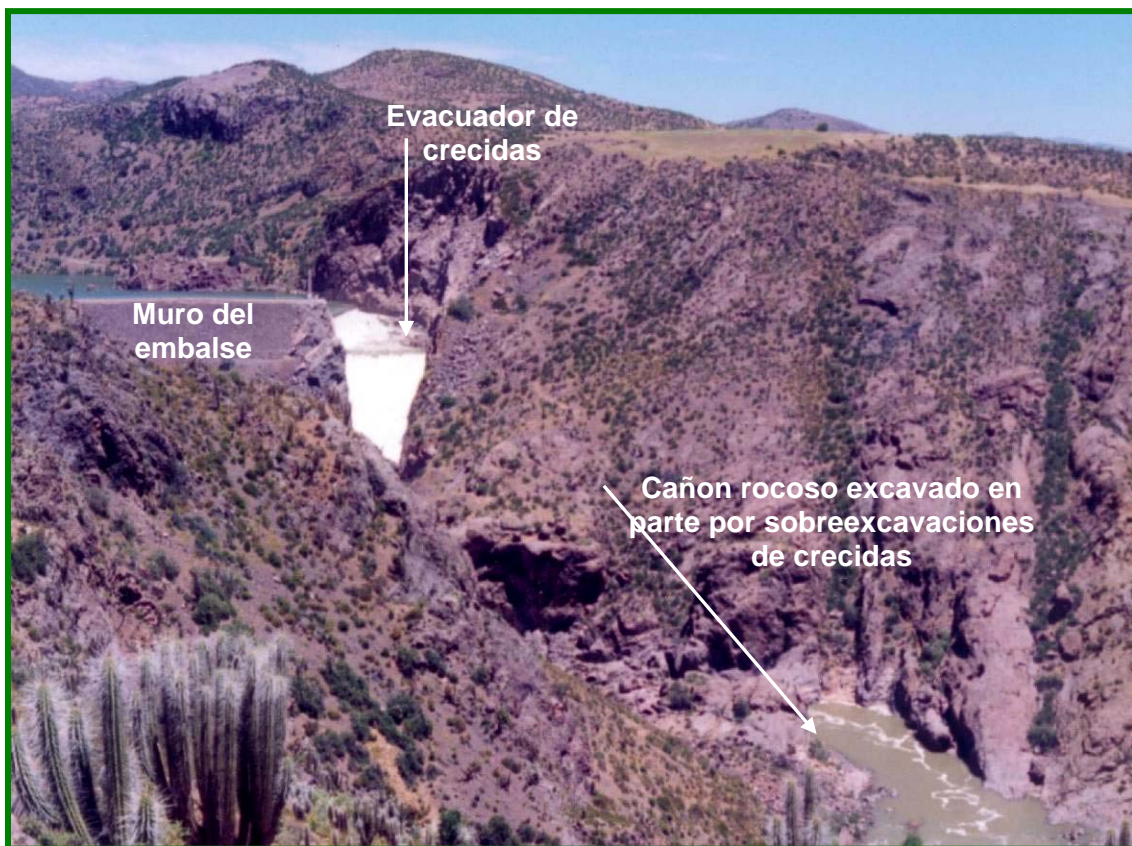
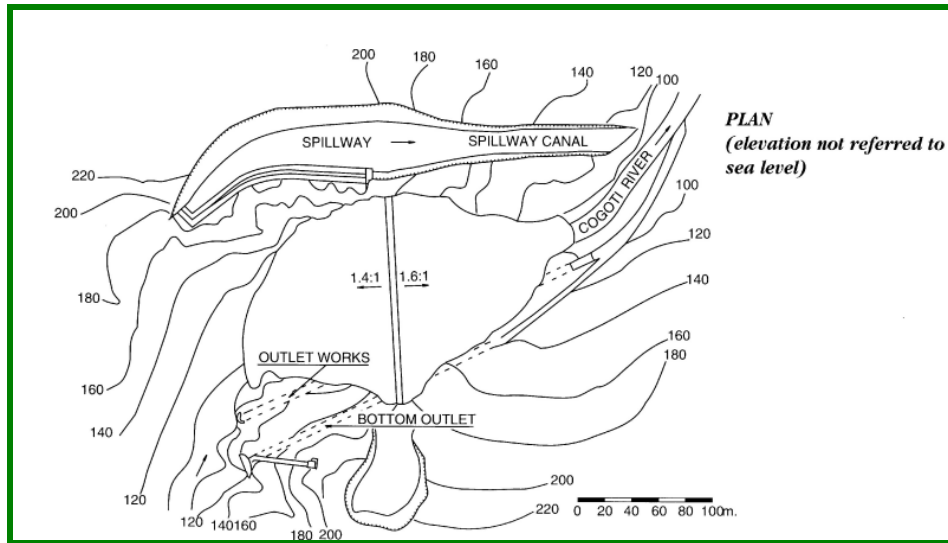


EMBALSE PALOMA



Vista desde aguas abajo.

EMBALSE COGOTII



Vista desde aguas abajo.

EMBALSE CORRALES



Vista desde aguas abajo.



Evacuador de crecidas.