

FIG. 2 - a

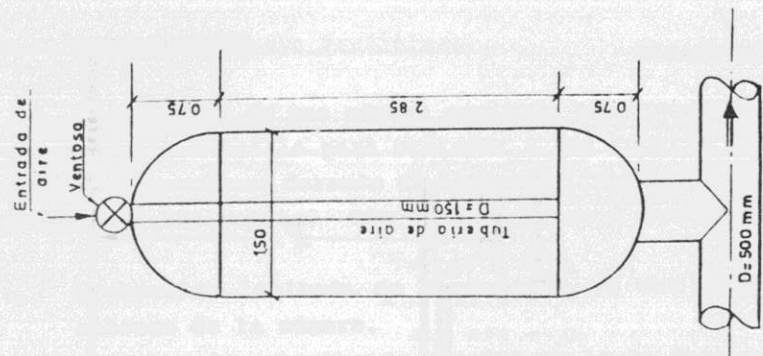


FIG. 2 - b

ANALISIS DEL CAUDAL DE DISEÑO DEL EVACUADOR
DE CRECIDAS DE LA CENTRAL RALCO
EN RELACION CON LA OPERACION DE LA OBRA

HARRY KING F

RESUMEN

El dimensionamiento de la obra de evacuación de un embalse depende del caudal de diseño, el que está relacionado con la capacidad de regulación de las crecidas afluentes, la que a su vez depende de la operación de las compuertas de la obra.

En el presente trabajo se analiza la magnitud del caudal de diseño del evacuador de crecidas de la central Ralco utilizando una determinada norma de operación, en la cual se ha considerado como variables de decisión el nivel del embalse, el caudal de regulación y el caudal evacuado por el vertedero.

Se concluye que es posible regular las crecidas afluentes al embalse Ralco operando las compuertas según una norma sencilla de aplicar y que es importante precisar una norma antes de realizar el proyecto definitivo de una obra de evacuación.

Ingeniero Civil. Empresa de Ingeniería Ingendesa S.A. (INGENDESA)
Profesor Auxiliar. Departamento de Ingeniería Civil. U. de Chile.

1. INTRODUCCION

El grado de regulación de una crecida afluyente a un embalse está relacionado con su capacidad de almacenamiento, con el dimensionamiento de la obra de evacuación y la operación de ésta durante la ocurrencia de la crecida. Debido a la importancia de controlar en forma adecuada los caudales evacuados río abajo y a las circunstancias que se viven al ocurrir grandes crecidas, debe existir una norma clara y sencilla para la operación de la obra de evacuación, la que debe apoyarse en la información con que se pueda contar antes y durante las crecidas.

El objetivo del presente estudio es analizar la capacidad de regulación del evacuador de crecidas de la Central Ralco, al utilizar una determinada norma de operación. El efecto regulador de las crecidas tiene incidencia en la determinación del caudal de diseño de la obra de evacuación o vertedero y también significará un beneficio adicional importante para las centrales que se ubicarán aguas abajo del embalse Ralco.

Para realizar el estudio se ha establecido una norma preliminar de operación del vertedero durante las crecidas, en la cual se ha considerado como variables de decisión el nivel del embalse, el caudal de regulación (que corresponde a la variación de volumen por unidad de tiempo) y el caudal evacuado por el vertedero.

En el análisis efectuado se ha estudiado el poder regulador de las crecidas considerando distintas situaciones, tanto de la magnitud de las crecidas afluentes como de los niveles iniciales del embalse. Se ha analizado además el caso de contar con un sistema de mediciones que permita pronosticar los caudales afluentes al embalse con algunas horas de anticipación.

Por último, se ha realizado un análisis de sensibilidad suponiendo distintos anchos de vertedero, antecedente necesario para su diseño en etapas más avanzadas.

2.- ANTECEDENTES GENERALES DEL PROYECTO RALCO

El proyecto de la central Ralco se ubica en el curso andino del río Bío-Bío aguas arriba de la central Pangué, a unos 120 km al sureste de la ciudad de Los Angeles, lugar donde el río lleva un caudal promedio de 270 m³/seg y cubre una hoya hidrográfica de 5.130 km².

Este proyecto contempla la construcción de una presa de hormigón en arco de doble curvatura, que se situará en la angostura Ralco, la que tendrá una altura de 150 m y permitirá embalsar del orden de 2.045 millones de m³. Tendrá un túnel de aducción de poco más de 7 km de longitud y una caverna de máquinas con sus obras anexas, ubicada en el costado izquierdo (sur-poniente) del río, un poco aguas arriba de la confluencia del río Huirihuirí con el Bío-Bío.

La máxima altura bruta utilizable por la central será de 224 m y el caudal de diseño elegido fue de 428 m³/s. Con estos valores, la central desarrollará una potencia de 720 MW, que le permitirá generar una energía media anual de 4.036 GWh.

Uno de los efectos positivos que tendrá la construcción del embalse Ralco es el de la regulación de las crecidas del río Bío-Bío, cuyo efecto podría traer beneficios importantes en las centrales que se ubicarían aguas abajo de esta obra, sobre todo si son puestas en servicio con posterioridad a ella.

La crecida afluyente a Ralco de período de retorno de 1.000 años alcanzaría un caudal máximo instantáneo de 6.700 m³/s. De acuerdo al estudio de factibilidad de la central, para evacuar las crecidas afluentes se ha proyectado un vertedero con cuatro compuertas de segmento de 11 m de ancho y 12 m de alto, dos a cada extremo de la presa.

El embalse tendría las siguientes cotas de operación:

Nivel mínimo normal.....	725 m s.n.m.
Umbral del vertedero.....	733 m s.n.m.
Nivel máximo normal.....	745 m s.n.m.
Coronamiento de la presa.....	750 m s.n.m.

La Figura N°1 muestra la planta de las obras de embalse de la central Ralco y en la Figura N°2 se incluyen cortes del evacuador de crecidas y la presa.

3.- CARACTERISTICAS DE LA NORMA PRELIMINAR DE OPERACION DEL EVACUADOR DE CRECIDAS

3.1 Objetivos

Entre los principales objetivos que se pretende cumplir con la norma de operación se pueden mencionar:

- Amortiguar aguas abajo del embalse los efectos de las crecidas afluentes, tanto en la magnitud del caudal máximo evacuado como en la tasa de aumento del caudal (dQ/dt), evitando golpes de agua que puedan producir daños a obras existentes.

- Efectuar la evacuación de las crecidas afluentes con el mínimo de movimientos de compuertas.

- Conseguir que el embalse quede a su máxima capacidad normal al término de las crecidas (cota 745 m).

3.2 Variables de decisión adoptadas

En la norma preliminar de operación del evacuador de crecidas se adoptó el criterio de considerar como variables de decisión, el nivel del embalse, el caudal de regulación y el caudal vertido, factores que se pueden determinar con poca dificultad y en forma confiable en tiempo real durante las crecidas:

- El nivel del embalse se mide directamente.

- El caudal de regulación se determina como función de la tasa de variación del nivel de embalse (dZ/dt).

- El caudal vertido es función del nivel del embalse (Z) y del grado de apertura de las compuertas.

Por lo tanto, los parámetros a emplear son Z , dZ/dt y Q_{ev} , medidos en intervalos de tiempo real durante las crecidas.

3.3 Criterios fijados para operar las compuertas

Al definir la norma preliminar de operación se han considerado tres regiones del embalse, dependiendo de su nivel. A continuación se resumen los criterios adoptados en cada caso:

3.3.1 Región A ($Z \leq 735$ m)

Las compuertas permanecen cerradas en todo momento.

3.3.2 Región B ($735 \text{ m} < Z \leq 745$ m)

Las compuertas permanecen cerradas mientras el caudal de regulación, calculado a intervalos de tiempo real prefijados, sea inferior a un determinado caudal de referencia, el cual es función del nivel en el embalse.

La decisión de operar las compuertas se toma a intervalos de una hora de tiempo real y depende de la comparación entre los caudales de referencia y el caudal regulado estimado (a partir de la tasa de variación de niveles en el embalse " dZ/dt ").

Se definieron dos diferentes caudales de referencia, con el fin de que exista un intervalo de estabilidad (o stand by), lo que permite disminuir el movimiento de compuertas (ecuaciones 1 y 2).

$$Q_{REF 1} = C_1 + C_2 \times (745 - Z) = 1.750 + 50 \times (745 - Z) \quad (1)$$

$$Q_{REF 2} = Q_{REF 1} + C_3 = Q_{REF 1} + 250 \quad (2)$$

El proceso de cierre de cada compuerta se realiza mediante escalones equivalentes a 250 m³/s, y el proceso de apertura se realiza mediante escalones equivalentes a 250 ó 500 m³/s, dependiendo de la diferencia entre el caudal regulado y los caudales de referencia.

3.3.3 Región C (Z > 745 m)

Corresponde a niveles del embalse superiores al máximo normal. Se han definido otros dos caudales de referencia para decidir la operación de las compuertas, pero a diferencia de lo programado en la Región B, éstos se comparan con el caudal evacuado por el vertedero.

Las expresiones que definen los caudales de referencia son las (3) y (4):

$$QREF3 = C4 \times (Z-745) = 4.500 \times (Z-745) \quad (3)$$

$$QREF4 = QREF3 + C5 = QREF3 + 500 \quad (4)$$

La comparación a intervalos de una hora de tiempo real de estos valores de referencia con el caudal evacuado, permite decidir si las compuertas se abren un escalón, se mantienen o se cierran. Tanto las aperturas como los cierres se han fijado en escalones equivalentes a 250 ó 500 m³/s, dependiendo de las diferencias entre el caudal evacuado y los caudales de referencia.

Los coeficientes C1 a C5 de las ecuaciones (1) a (4) se determinaron simulando la regulación de crecidas obtenidas a partir de los registros históricos de la estación fluviométrica Bío-Bío en Angostura Ralco. Se utilizaron crecidas con períodos de retorno de 5 y 1.000 años, considerando diferentes niveles iniciales en el embalse Ralco. Los coeficientes definidos son los que satisfacen en mejor forma los objetivos señalados en el punto 3.1.

4.- RESULTADOS

4.1 Casos estudiados

Una vez definida la norma preliminar de operación del evacuador de crecidas, se realizaron simulaciones de la operación bajo diferentes condiciones, las que se mencionan a continuación:

- Crecidas afluentes al embalse correspondientes a períodos de retorno de 5 y 1.000 años, esto es, 2.110 y 6.700 m³/s.
- Niveles del embalse al presentarse la crecida, a las cotas 730, 735, 740 y 745 m.
- Suponiendo que no se cuenta con datos previos de caudales afluentes al embalse y que sí se cuenta con ellos.
- Ancho total del evacuador de crecidas de 44, 48, 52, 56 y 60 m.

En todos los casos analizados se consideró un intervalo de tiempo real de 1 hora para tomar decisiones. La simulación se realizó para un período de duración total de 144 horas, suficiente como para incluir todo el proceso de crecidas.

4.2 Operación del evacuador de crecidas con desconocimiento de los caudales afluentes

En el Cuadro N°1 se muestran valores característicos obtenidos al simular la regulación de la crecida correspondiente a un período de retorno de 1.000 años y en el Cuadro N°2, la de un período de retorno de 5 años, con distintos niveles iniciales del embalse y para un ancho de vertedero de 44 m.

Las Figuras N°3 y 4 muestran las variaciones del caudal afluente, del caudal evacuado y del nivel del embalse, al regular la crecida correspondiente al período de retorno de 1.000 años con niveles iniciales del embalse a las cotas 745 y 735 m respectivamente.

CUADRO N°1
QAFL. MAX. = 6.700 m³/s (TR = 1.000 años)

Z INICIAL (m s.n.m.)	Qev. máx. (m³/s)	Z máx. (m s.n.m.)	Z FINAL (m s.n.m.)
745	4.766	747,88	745,33
740	4.361	747,04	745,33
735	3.638	745,62	745,32
730	3.056	745,55	745,32

CUADRO N°2
Q AFL. MAX. = 2.110 m³/s (TR=5 años)

Z INICIAL (m s.n.m.)	Qev. máx (m³/s)	Z máx (m s.n.m.)	Z FINAL (m s.n.m.)
745	2.000	745,44	745,05
740	1.250	745,26	745,05
735	750	745,15	745,09
730	0	741,75	741,75

Para la condición de funcionamiento más desfavorable entre las estudiadas, que corresponde a una crecida afluente con período de retorno de 1.000 años y nivel inicial del embalse a la cota 745 m, que es la máxima normal de operación (Cuadro N°1), se obtiene un caudal máximo evacuado de 4.766 m³/s y el nivel alcanza una cota máxima de 747,88 m.

Con la cota anterior quedaría aún una revancha de 2.12 m con respecto al coronamiento de la presa, a la que hay que descontar la altura de las olas. Esta revancha podría ser insuficien-

te y exigir aumentar el ancho del vertedero, como se estudia en el punto 4.4.

Es conveniente destacar que al simular la regulación de la crecida recién indicada, el vertedero funciona con las compuertas totalmente abiertas entre las horas 26 y 85 (ver Fig. N°3).

4.3 Operación del evacuador de crecidas con un sistema de telemetría para pronosticar los caudales afluentes

En este caso se supone que se puede pronosticar la ocurrencia de una crecida con algunas horas de anticipación, siendo posible iniciar la apertura de compuertas antes que lo indicado por la norma de operación.

Para analizar esta situación se simuló una operación con apertura anticipada de compuertas, con la crecida correspondiente a un período de retorno de 1.000 años y cota inicial 745 m. En este caso las compuertas quedan totalmente abiertas a partir de la cota 745,03 m, es decir, con sólo 0,03 m de sobrenivel.

Al estudiar la regulación de la misma crecida, pero sin conocimiento previo de los caudales afluentes al embalse (Punto 4.2), las compuertas quedan totalmente abiertas a partir de la cota 745,68 m.

En el cuadro N°3 se comparan los valores característicos obtenidos en las dos situaciones descritas.

CUADRO N°3

Q AFL. MAX. = 6.700 m³/s - Z INIC. = 745 m s.n.m.

TIPO DE MANIOBRA	Qev. máx. (m ³ /s)	Z máx. (m s.n.m.)
NORMA DE OPERACION	4.766	747,88
APERTURA ANTICIPADA	4.634	747,61

Los caudales máximos evacuados estimados en ambos casos son muy parecidos y el nivel máximo del embalse al realizar una apertura anticipada de las compuertas resulta inferior sólo en 0,27 m.

4.4 Análisis con distintos anchos de vertedero

El ancho del vertedero incide directamente en la relación entre el nivel del embalse y el caudal evacuado. Por lo tanto, se analizó la influencia del ancho en la regulación de la crecida de período de retorno de 1.000 años, al aplicar la norma preliminar de operación.

En el Cuadro N°4 se muestran los valores característicos obtenidos con anchos de vertederos comprendidos entre 44 m, que es el ancho establecido en el estudio de factibilidad y 60 m.

CUADRO N°4

Q AFL. MAX. = 6.700 m³/s - Z INIC. = 745 m s.n.m.

ANCHO VERTED. (m)	Qev. máx. (m ³ /s)	Z máx (m s.n.m.)	REVANCHA (m)
44	4.766	747,88	2,12
48	5.010	747,47	2,53
52	5.246	747,11	2,89
56	5.521	746,86	3,14
60	5.785	746,63	3,37

Dado que la cota de coronamiento de la presa es 750 m s.n.m., las revanchas estimadas varían entre 2,12 y 3,37 m, valores a los que hay que descontar la altura de las olas.

Por último, en el Cuadro N°5 se indican los caudales que puede evacuar el vertedero para distintos anchos de éste, si el nivel del embalse llegara a la cota del coronamiento de la presa.

CUADRO N°5

Z EMB = 750 m s.n.m.

Q AFL. MAX. (TR = 1.000 años) = 6.700 m³/s

ANCHO VERTEDERO (m)	Q EVACUADO (m ³ /s)
44	5.840
48	6.410
52	6.990

5.- CONCLUSIONES

De este análisis se concluye que es posible regular las crecidas afluentes al embalse Ralco, operando la obra de evacuación según una norma sencilla de aplicar.

En la norma preliminar de operación empleada en este estudio se ha considerado como variables de decisión, el nivel del embalse, el caudal de regulación (que es función de la tasa de variación del nivel del embalse) y el caudal evacuado. Para evaluar las variables basta con efectuar mediciones precisas del nivel del embalse, a lo menos en dos puntos de éste, que permitan tomar decisiones a intervalos de tiempo prefijados (en este análisis se consideró 1 hora).

En el caso de disponer de un pronóstico de caudales afluentes con algunas horas de anticipación, se aprecia un comportamiento muy similar al obtenido con la norma de operación preliminar (ver Cuadro N°3). Esto se debe a que durante las crecidas, a las pocas horas de iniciadas éstas, las compuertas quedan totalmente abiertas.

El caudal de diseño del evacuador de crecidas depende de la forma en que se operen sus compuertas durante la ocurrencia de la crecida. Es posible determinar dicho caudal en forma confiable, en función de la norma de operación que se aplique. De esto se deduce la importancia de precisar una norma antes de realizar el proyecto definitivo.

En etapas más avanzadas del proyecto será necesario precisar las dimensiones del evacuador de crecidas, de modo que al simular la regulación de la crecida de diseño, ésta sea evacuada con una revancha aceptable, considerando que la presa será de hormigón (ver Cuadro N°4). También se deberá analizar la evacuación de la crecida decamilenaria, la máxima probable y qué ocurre al estar una compuerta fuera de servicio.

6.- BIBLIOGRAFIA

- Oficina de Evaluación de Proyectos Hidroeléctricos (1990) "(Central Ralco, Estudio de Factibilidad", ENDESA.
- División Estudios Hidrológicos (1990). "Estudio de los Recursos Hídricos de la Central Ralco", ENDESA.
- Verní, F. (1978) "Normas de Operación del Embalse Colbún", VIII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica, Vol, 1, pp. 299-314.
- Committee on Hydraulics for dams (1982) "Operation of Hydraulic Structures of Dams", International Commission on Large Dams.

FIGURA N°1

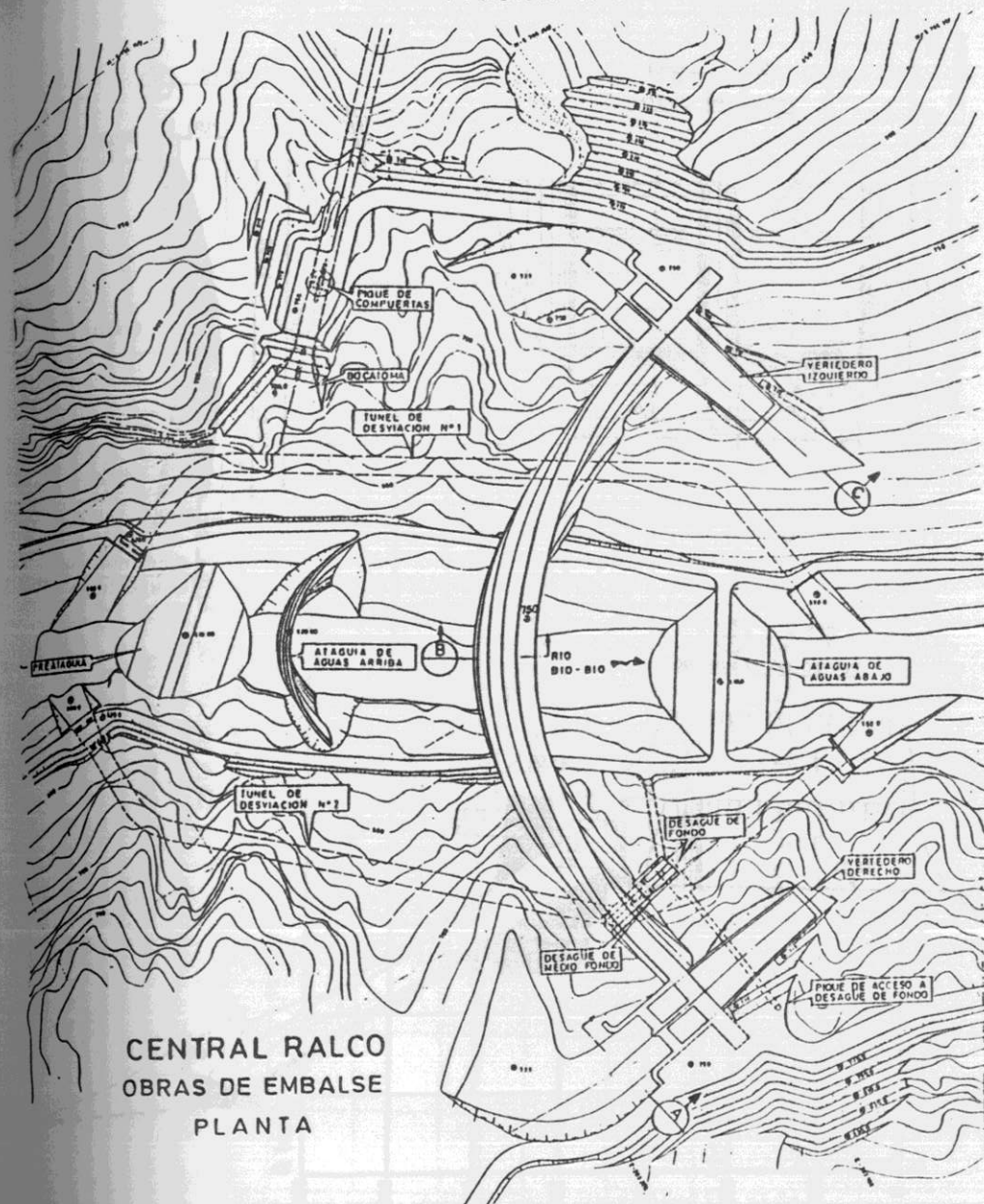


FIGURA N° 2

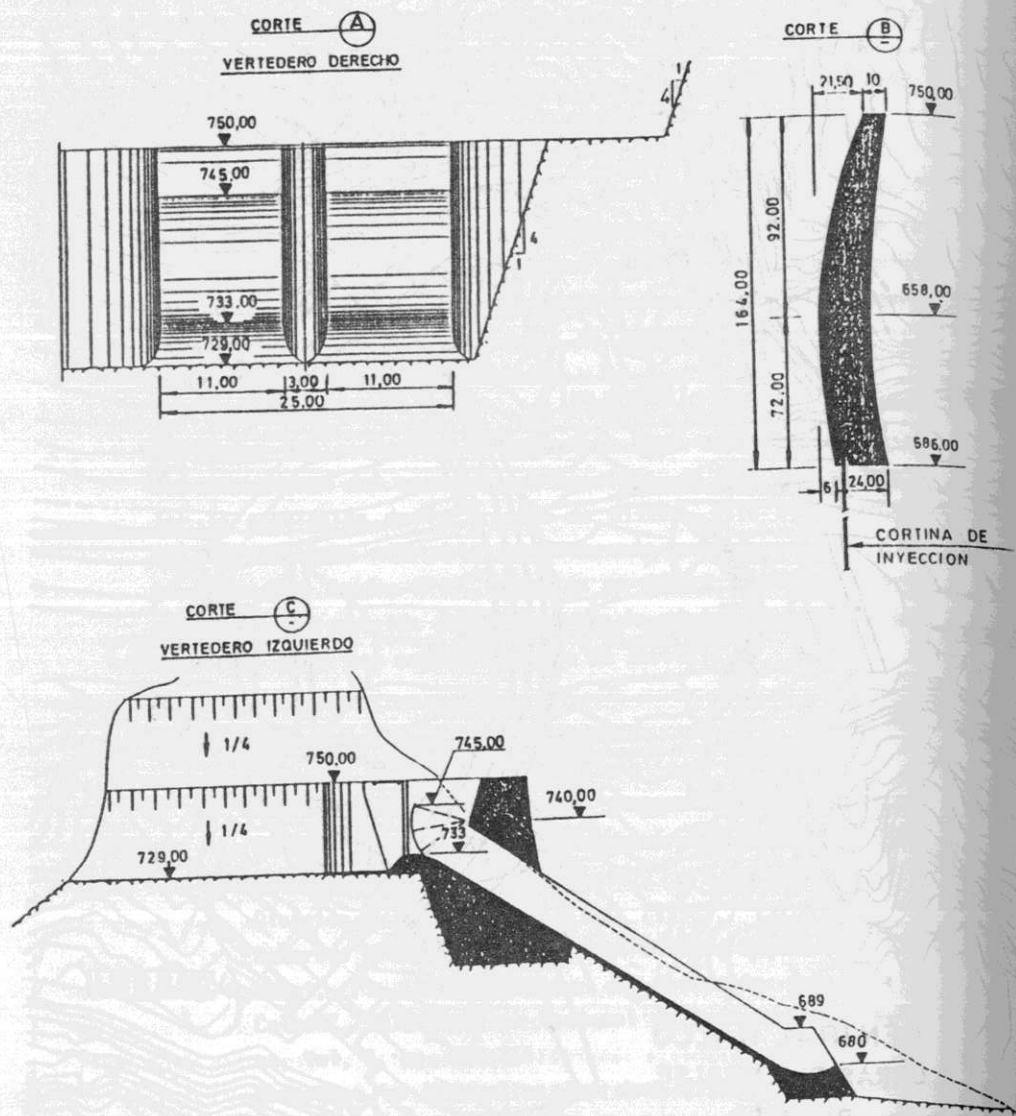


FIGURA N° 3
EMBALSE RALCO
 OPERACION DEL VERTEDERO
 CRECIDA QMI = 6700 m³/s (TR = 1000 AÑOS)
 COTA INICIAL DEL EMBALSE 745 (m.s.n.m.)
 ANCHO DEL VERTEDERO = 44 m

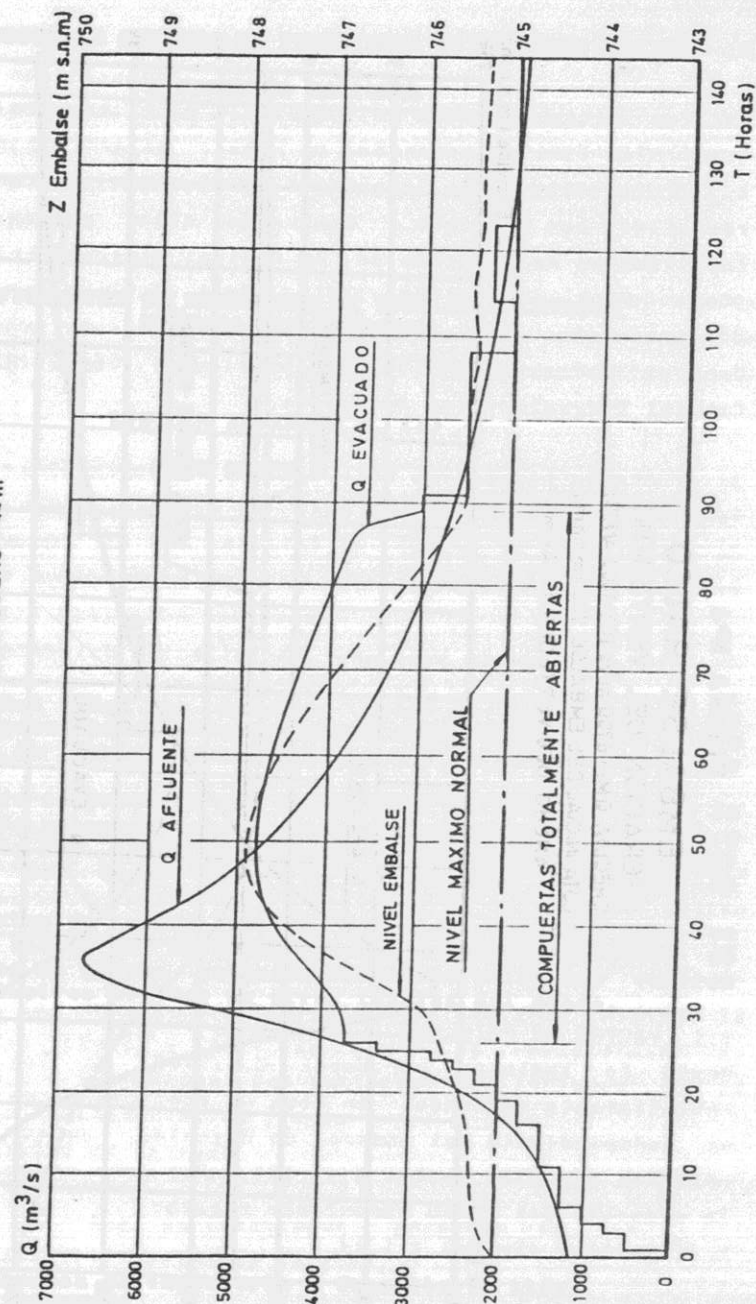
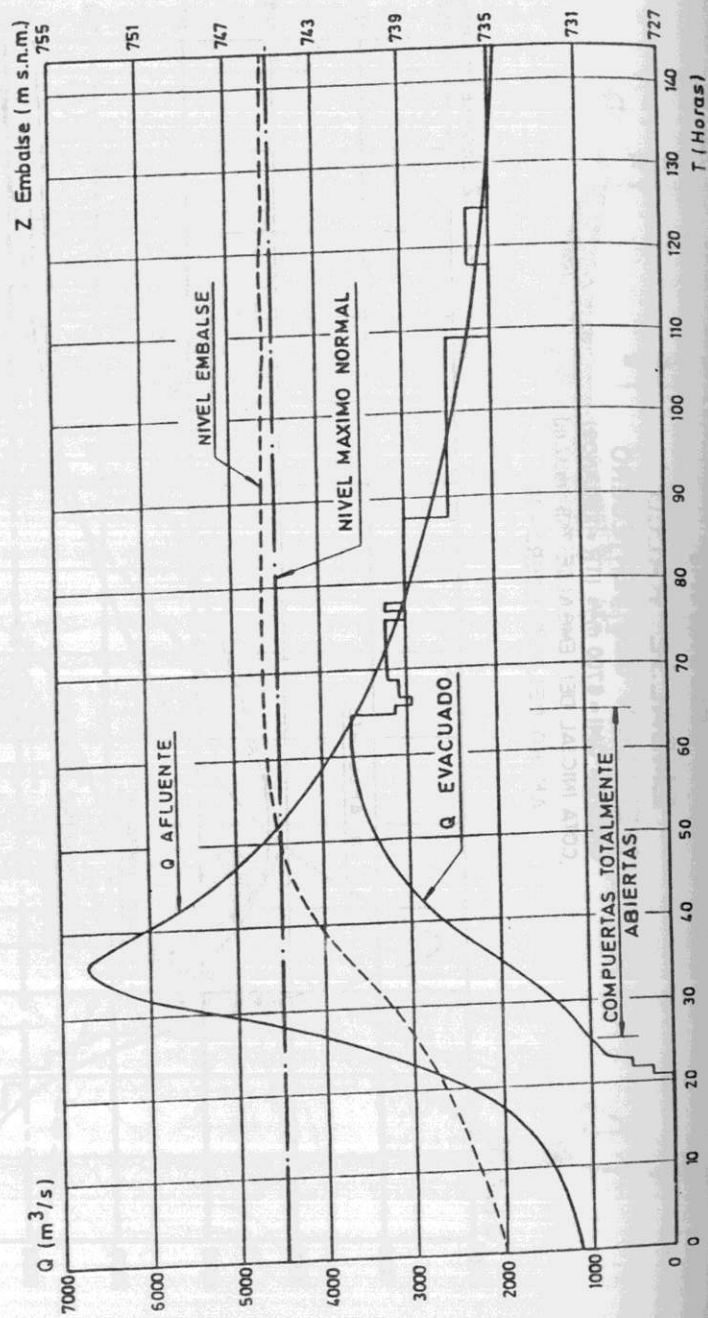


FIGURA N° 4
EMBALSE RALCO
 OPERACION DEL VERTEDERO
 CRECIDA $Q_{MI} = 6700 \text{ m}^3/\text{s}$ (TR=1000 AÑOS)
 COTA INICIAL DEL EMBALSE 735 (m s.n.m.)
 ANCHO DEL VERTEDERO = 44 m



COEFICIENTES DE RUGOSIDAD DE TUNELES EXCAVADOS EN ROCA SIN REVESTIR

LINCOLN ALVARADO M. (1)

RENE NEGER S. (2)

En los últimos años en nuestro país se han diseñado y construido algunos túneles excavados en roca sin revestir, con revestimiento de hormigón proyectado y con su radier revestido con hormigón. En este trabajo se presenta un resumen del estado del arte y la recopilación de antecedentes referentes al factor de fricción y sobreexcavación del túnel de aducción de la central Canutillar de ENDESA y del túnel Maule de la central Pehuenche de PEHUENCHE S.A. Los antecedentes de ambos túneles permiten concluir que los valores del factor de fricción y de la sobreexcavación de dichos túneles se ubican satisfactoriamente entre los valores de dichos parámetros medidos en otros túneles del mundo.

(1) Socio de Empresa de Ingeniería y Consultoría Ltda.
 (2) Ingeniero INGENDESA.