

FIG 1 Definición de los elementos geométricos en un cauce natural

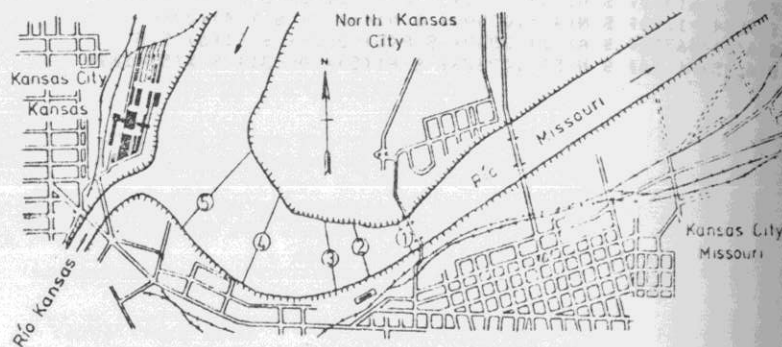


FIG 2 Río Missouri en Kansas City

PREVISION DE NIVELES DEL RIO RAPEL EN EL PUEBLO DE

RAPEL Y SU VERIFICACION

Por

Andrés Benítez Girón (\*)

RESUMEN

El pueblo de Rapel, situado 23,55 km aguas abajo de la Central Rapel, queda afectado cuando el caudal del río Rapel es superior a 4 500 m<sup>3</sup>/s, por lo cual la Central Rapel trata de regular al máximo las crecidas que se producen, para evitar daños en el pueblo, o avisar oportunamente los niveles que va a alcanzar el agua cuando el caudal evacuado debe ser superior a 3 500 m<sup>3</sup>/s.

En este trabajo se indican los estudios efectuados, los métodos utilizados para determinar los niveles máximos en cada crecida y los estudios que van a realizarse próximamente para conocer mejor el fenómeno de la propagación de ondas a lo largo del río entre la Central Rapel y el pueblo de Rapel.

(\*) Ingeniero Jefe de la División Estudios Hidrológicos ENDESA.

El pueblo de Rapel se encuentra 23.55 km aguas abajo del muro del embalse C. Rapel y está constituido por más de 150 casas y alrededor de 1 000 habitantes. La carretera que lo comunica con San Antonio cruza el río a través de un puente, en el cual se ha instalado la sección fluviométrica constituida por un cable de aforo y limnigrafo.

La mayor parte de las casas se encuentran construidas sobre la cota 16 m.s.n.m en una elevación existente que se transforma en isla al subir el nivel del agua de la cota 15.50 m.s.n.m que corresponde a un caudal de alrededor de 5000 m<sup>3</sup>/s.

La única construcción que queda afectada al subir el agua de la cota 14,50 m.s.n.m. al comienzo del pueblo, que corresponde a un caudal de unos 4000 m<sup>3</sup>/s, es un Hogar de Menores y su capilla, construidos en el lecho del río en el año 1954 aproximadamente, de acuerdo a datos recogidos, y hoy día abandonada.

Para no generar en el pueblo de Rapel una onda de crecida superior a la que se habría producido de no existir el muro, ENDESA efectuó un estudio de crecidas con el fin de minimizar el caudal peak evacuado durante las crecidas siguiendo una curva de recesión análoga a la afluente ya que, en régimen natural, la onda de crecida se amortigua a lo largo del cauce.

Sin embargo, los habitantes del pueblo de Rapel, desde que se empezó el proyecto y se construyó la Central, siempre se han mostrado temerosos de que se produzca una catástrofe por lo cual cuando se producen grandes temporales que generan grandes crecidas, ENDESA mantiene permanente contacto con las autoridades del pueblo de Rapel, para comunicarle la apertura de compuertas y caudales y alturas máximas que van a producirse en el pueblo.

Para ello se han debido realizar los siguientes estudios :

- a) Análisis del eje hidráulico del río Rapel en el pueblo de Rapel para diferentes caudales superiores a 3000 m<sup>3</sup>/s y su verificación.
- b) Análisis del tiempo de retardo del caudal peak entre Central Rapel

el pueblo de Rapel, para distintos caudales, al abrir o cerrar las compuertas.

- c) Estudio de la propagación de ondas a lo largo del río Rapel.

Desde la fecha que entró en servicio la Central Rapel, se han producido 11 crecidas cuyo caudal peak fue superior a 2 350 m<sup>3</sup>/s y durante la cual se evacuaron grandes volúmenes. Estas crecidas se han incluido en el cuadro N° 1.

Durante alguna de estas crecidas se produjeron problemas en el pueblo de Rapel, con inundación de algunos predios y casas, especialmente el Hogar de Menores y la Capilla, por lo cual se trató de culpar a ENDESA de los perjuicios ocasionados, tratando de convencer que nunca antes se habían tenido problemas, lo que se demostró que no era verídico. El 21 de Agosto de 1953 se produjo una crecida cuyo caudal peak se estimó en 6 200 m<sup>3</sup>/s.

## 2. DETERMINACION DE LAS ZONAS DE INUNDACION

Por los motivos expuestos anteriormente se decidió efectuar un estudio de ejes hidráulicos para caudales altos para determinar las zonas de inundación.

Para ello se efectuó un levantamiento topográfico y la restitución aerofotogramétrica del río y pueblo de Rapel, así como el levantamiento topográfico del cauce, mediante perfiles longitudinales y 15 perfiles transversales separados entre sí, aproximadamente, 200 m.

Como punto inicial se adoptó el perfil N° 18, que era el que se encontraba más aguas abajo y como punto de control se adoptó el N° 10 que corresponde a la sección limnigráfica.

Se efectuaron dos cálculos suponiendo que en el punto inicial existe escurrimiento crítico y escurrimiento normal, utilizando finalmente este último por dar valores análogos y un poco más conservadores.

Para asignar los coeficientes de rugosidad "n", se dividió la sección en cauce principal y dos laterales de inundación, asignándole a cada uno diferentes valores. Los pares de valores utilizados fueron 0,040 - 0,060 y 0,050 - 0,060, el primero corresponde al

2.118

Las curvas de descarga que se obtuvieron en la sección de control, o sea en el puente, indicó que la que se ajustaba mejor correspondía al par de valores  $n_p = 0,040$  y  $n_L = 0,060$ . En la parte baja la diferencia de altura para iguales caudales era de 50 cms, la que disminuyó rápidamente al aumentar el caudal, coincidiendo ambas curvas para caudales iguales o superiores a 4 000 m<sup>3</sup>/s que eran los que más interesaban.

En la lámina N° 1 se ha dibujado el mapa de la zona del río y pueblo de Rapel con las isolíneas de caudales y curvas de nivel. Se observa que el pueblo queda aislado para caudales superiores a 5 000 m<sup>3</sup>/s.

### 3. VERIFICACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ESTUDIO. LIMNIMETRO DE AGUAS MAXIMAS

Para verificar que los niveles del río coincidieran con los del estudio, especialmente en la zona más conflictiva, que era la del Hogar de Menores y la Capilla, fue necesario instalar en este lugar un instrumento que midiera el nivel de agua automáticamente.

Como la instalación de un limnógrafo era cara y difícil se decidió instalar un limnómetro de aguas máximas, cuyo costo y mantención fuera pequeño.

Anteriormente se habían instalado en otros lugares limnómetros de aguas máximas que proporcionaban resultados poco confiables si no se leían inmediatamente después de producida la crecida.

Por este motivo se diseñó un limnómetro que después de realizarle pequeñas modificaciones en el taller, quedó definitivamente como indica la Lámina N° 2.

Básicamente consiste en un tubo de 3" de diámetro al cual se le hacen perforaciones de 5 mm de diámetro y a 5 cm de distancia, cerrándose en su parte inferior. En su extremo superior se le atornilla una tapa gorro, que lleva una anilla que permite colocar un candado que lo une a la anilla soldada al tubo, para evitar que personas extrañas intervengan en él. Dentro del tubo se coloca una platina de 2 1/2" x 5 mm,

2.119

a la cual se adosan pequeños frascos de remedios, en forma alternada y separadas sus bocas por una distancia de 5 cms. Pasada la crecida se puede determinar hasta donde llegó el nivel del agua con una precisión de - 5 cms, sacando la varilla y viendo cual es el último frasco que se ha llenado. La precisión es suficiente para estudios de ejes hidráulicos.

Su instalación en terreno se realiza igual que un limnómetro corriente. Desde el punto de vista práctico no conviene que el tubo tenga una longitud superior a 1 m, ya que se hace difícil sacar la varilla con los frascos.

Las ventajas que presenta este limnómetro de aguas máximas son :

- Precisión en la medida, máximo - 5 mm, debiendo tener en cuenta que no existe influencia de oleaje.
- Imposibilidad de que los frascos se llenen con agua que no proceda del río, o sea no queda influenciado por la lluvia.
- Se puede medir algunos días después de la crecida, ya que la evaporación es mínima.
- Fácil instalación.
- Fácil control.
- Bajo costo.

Debido al buen resultado obtenido, se han instalado en numerosos ríos, en lugares donde el acceso no es muy bueno y donde se necesita medir ejes hidráulicos de aguas máximas.

El limnómetro de aguas máximas en la Capilla del Hogar de menores del pueblo de Rapel se instaló en el verano de 1977. De esta forma se ha podido conocer el nivel del agua durante las crecidas y comparar dichos niveles con los que proporcionaba el estudio mencionado en el punto 2.

Los resultados obtenidos han sido :

Fecha	Cota limnigrafo Rapel en Rapel m s.n.m.	Q m <sup>3</sup> /s	Cota en la Capilla Según L <sub>Máx</sub> m s.n.m.	Según Estudio m s.n.m.
23 Julio 77	14,50	4 220	15,34	15,35
12 Agosto 77	12,80	2 480	13,89	13,65
21 Julio 78	15,10	4 920	16,19	15,80

Los resultados del estudio son aceptables, especialmente en lo que respecta a predecir con bastante anticipación y precisión las cosas que deben ser evacuadas de acuerdo al caudal que se va a evacuar por las compuertas y turbinas de Central Rapel.

#### 4. ESTUDIOS FUTUROS

El problema está resuelto desde el punto de vista práctico, o sea conocer la altura de agua en el pueblo de Rapel para un determinado caudal del río en régimen permanente.

Posteriormente, y considerando la cantidad de información existente y la que se puede generar con el tiempo, se ha pensado utilizar este tramo de río como campo experimental para estudiar la traslación de ondas generadas por la apertura o cierre brusco de compuertas con diferentes condiciones iniciales de caudal, así como su amortiguamiento cuando el tiempo de apertura no es lo suficientemente grande como para producir régimen permanente en todo el río. Esto último permitiría evacuar por las compuertas un cierto caudal superior al que produce problemas en el pueblo de Rapel sin que sufra daños dicho pueblo.

La aplicación de cualquier método requiere conocer una cantidad de datos de terreno tan grande que representa un alto costo, por lo cual es necesario simplificar al máximo el problema, representando el tramo del río por un cauce teórico uniforme en toda su longitud y equivalente al real.

La determinación de las "características medias equivalentes" del lecho puede efectuarse conociendo el volumen de embalse del lecho en función del caudal, cuando existe régimen permanente en el río, las alturas medias en función del caudal Q en varias secciones del río, o al menos en las secciones extremas del tramo del río en

Supongamos conocida la función

$$V_E = f(Q)$$

siendo

$V_E$  = volumen embalsado en la caja del río entre dos secciones cuando el caudal es Q.

así como la función

$$\bar{H} = f(Q)$$

donde

$\bar{H}$  = altura media del río entre dos secciones cuando el caudal es Q.

El área media equivalente de la superficie del agua cuando el río lleva el caudal Q será

$$\Omega_S = \frac{V_E}{\bar{H}}$$

si L es la distancia entre las dos secciones el ancho medio equivalente será:

$$\bar{B} = \frac{\Omega_S}{L}$$

el área de la superficie media equivalente de escurrimiento será:

$$\bar{A} = \bar{B} \times \bar{H}$$

y la velocidad media equivalente

$$\bar{v} = \frac{Q}{\bar{A}}$$

El problema queda reducido a determinar las funciones  $\bar{H} = f(Q)$  y  $V_E = f(Q)$ .

En el primer caso se puede calcular  $\bar{H}$  como

$$\bar{H} = \frac{1}{n} \sum H_i$$

siendo

$H_i$  = alturas medias para un caudal Q en cada una de las secciones con control fluviométrico.

El establecimiento de la función  $V_E = f(Q)$  se puede realizar cuando se tiene control fluviométrico en las secciones extremas y especialmente cuando se puede manejar el caudal de entrada.

Supongamos dos secciones A y B con control fluviométrico separados por una distancia L. Si podemos determinar los volúmenes  $V_E$  embalsados en el cauce al variar el caudal de un valor Q a otro  $Q + \Delta Q$ , se podrá determinar gráficamente la función  $V_E = f(Q)$ . En efecto, determinando numerosos valores  $\Delta V_E$  para distintas variaciones de Q se pueden dibujar los puntos partiendo de los  $\Delta V_E$  que corresponden a un caudal inicial igual a 0 m<sup>3</sup>/s. Los restantes  $V_E$  se pueden dibujar en forma ordenada y creciente respecto del menor valor del caudal inicial  $Q_i$  del tramo  $\Delta Q$ , tomando como punto inicial, el de la curva ya trazada anteriormente. Finalmente, dibujados todos los tramos se traza una curva suavizadora (Lámina N° 3 a).

El valor de  $\Delta V_E$  se puede obtener cuando el río está en régimen permanente durante varias horas con un caudal Q. Si el caudal de entrada varía bruscamente y queda posteriormente con un caudal constante  $Q + \Delta Q$ , se producirá en la sección de salida un cambio paulatino de caudal hasta que se hace constante e igual a  $Q + \Delta Q$ , o sea el río vuelve a tener régimen permanente. El volumen que ha entrado al cauce es distinto al que sale en la cantidad  $\Delta V_E$ .

En el caso del río Rapel entre la Central Rapel y el pueblo de Rapel, es fácil determinar los valores de  $\Delta V_E$  utilizando el movimiento de compuertas que se realiza durante las crecidas (Lámina N° 3 b). Cuando el caudal evacuado se mantiene constante durante 5 ó 6 horas el río entra en régimen permanente como se puede observar en el limnigrama del pueblo de Rapel.

Basándose en 11 movimientos de compuertas realizados durante las últimas crecidas se ha calculado la curva de embalse. Asimismo se ha calculado la función  $\bar{H} = f(Q)$  para el tramo comprendido entre Central Rapel y Rapel y la pendiente media del eje hidráulico (Cuadro N° 2). Los valores equivalentes generalizados del coeficiente de rugosidad "n" están dentro de lo posible, para valores de  $Q > 1\ 000$  m<sup>3</sup>/s.

programa de propagación de ondas en lechos naturales, se utilizarán estos valores para comprobar si la onda calculada aguas abajo tiene el mismo retardo y la misma forma que la producida en la realidad durante los movimientos de compuertas realizados, con lo cual el problema de la inundación del pueblo de Rapel quedará perfectamente analizado, para poder tomar decisiones con mayor conocimiento que actualmente.

#### BIBLIOGRAFIA

- Río Rapel en el pueblo de Rapel. Areas inundadas para diferentes caudales. Ingenieros Harry King y Emilio Iraguen (Informe OICOI 1/76. División Estudios Hidrológicos de ENDESA).

CUADRO N° 1

MAXIMAS CRECIDAS QUE SE HAN PRODUCIDO EN EL RIO RAPEL  
DESDE EL AÑO 1968

FECHA	$\bar{Q}_{Max.d}$ m3/s	$Q_p$ m3/s	$Q_p$ .Evacuado m3/s
9 Mayo 1972	2 040	2 530	2 470
10 Junio 1972	3 500	4 650	4 050
16 Agosto 1972	3 230	3 800	3 800
9 Julio 1972	2 100	2 450	1 560
22 Mayo 1974	1 860	2 350	2 100
27 Junio 1974	2 135	2 700	3 090
30 Junio 1974	3 720	5 400	5 130
10 Julio 1975	2 495	2 650	2 700
23 Julio 1977	4 170	4 700	4 440
12 Agosto 1977	1 955	2 400	2 300
21 Julio 1978	4 870	5 100	5 000

CUADRO N° 2

CARACTERISTICAS MEDIAS EQUIVALENTES DEL RIO RAPEL  
ENTRE CENTRAL RAPEL Y EL PUEBLO DE RAPEL

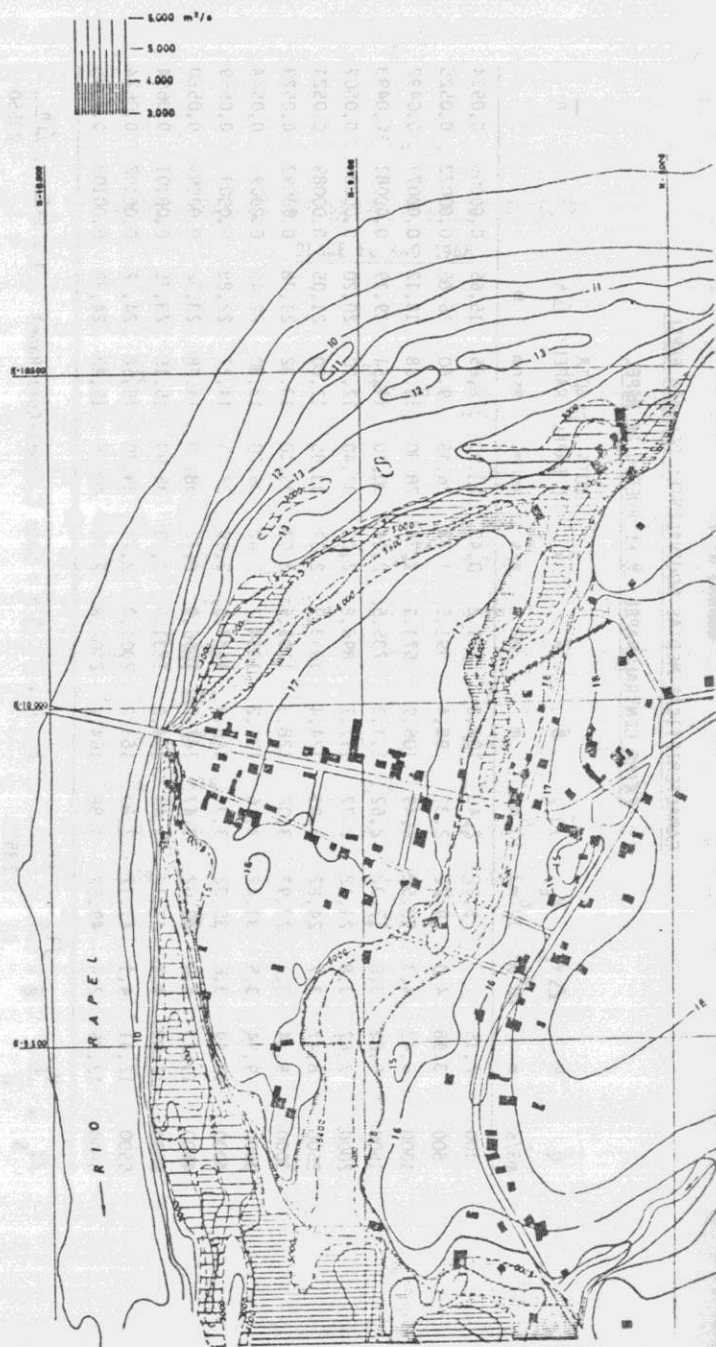
Q m3/s	$\bar{H}$ m	$\Delta V_E$ $10^6$ m3	$V_E$ $10^6$ m3	$\bar{\Omega}_S$ $10^6$ m2	$\bar{B}$ m	$\bar{A}$ m2	$\bar{V}$ m/s	COTA C. RAPEL msnm	COTA RAPEL msnm	$\Delta h$ m	i	$\bar{n}$
100	2,15		5,22	2,43	103,2	221,8	0,45	23,90	8,25	15,65	0,00066	0,0954
500	3,98	4,0	9,22	2,32	98,4	391,5	1,28	26,45	9,60	16,85	0,00072	0,0525
1000	5,42	4,3	13,52	2,49	105,9	574,1	1,74	28,80	10,68	18,12	0,00077	0,0432
1500	6,61	3,8	17,32	2,62	111,3	735,5	2,04	30,70	11,51	19,19	0,00081	0,0493
2000	7,62	3,8	21,12	2,77	117,7	896,8	2,23	32,40	12,20	20,20	0,00086	0,0509
2500	8,47	3,7	24,82	2,93	124,4	1053,9	2,37	33,85	12,80	21,05	0,00089	0,0524
3000	9,24	3,1	27,92	3,02	128,3	1185,6	2,53	35,10	13,32	21,78	0,00092	0,0529
3500	9,94	3,5	31,42	3,16	134,2	1334,2	2,62	36,20	13,80	22,40	0,00095	0,0544
4000	10,59	3,6	35,02	3,31	140,4	1487,0	2,69	37,15	14,27	22,88	0,00097	0,0559
4500	11,23	4,0	39,02	3,47	147,5	1656,9	2,72	38,10	14,78	23,32	0,00099	0,0580
5000	11,83	4,1	43,12	3,64	154,8	1831,0	2,73	38,90	15,15	23,75	0,00101	0,0604
5500	12,41	4,1	47,12	3,80	161,2	2001,0	2,75	39,70	15,58	24,12	0,00102	0,0624
5800	12,75	2,4	49,52	3,88	164,9	2102,8	2,76	40,15	15,83	24,32	0,00103	0,0635

$$\bar{\Omega}_S = \frac{V_E}{\bar{H}} \quad \bar{B} = \frac{\bar{\Omega}_S}{L} = \frac{\bar{\Omega}_S}{23550}$$

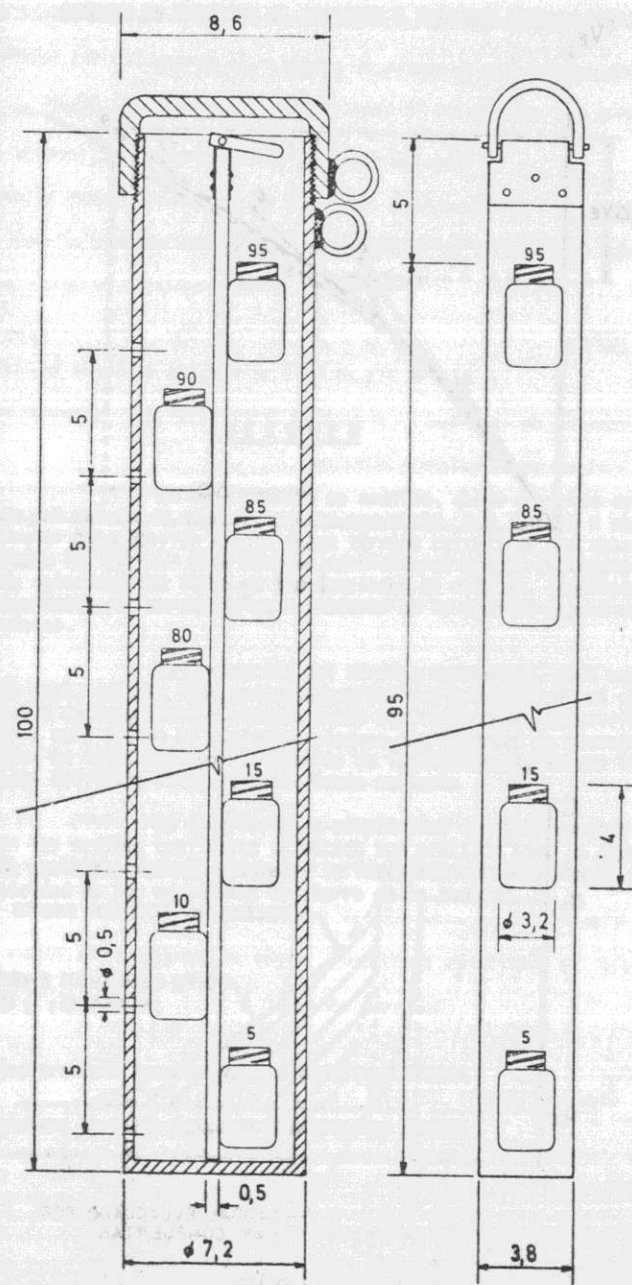
$$\bar{A} = \bar{H} \times \bar{B} \quad \Delta h = \text{Cota C. Rapel} - \text{Cota Rapel}$$

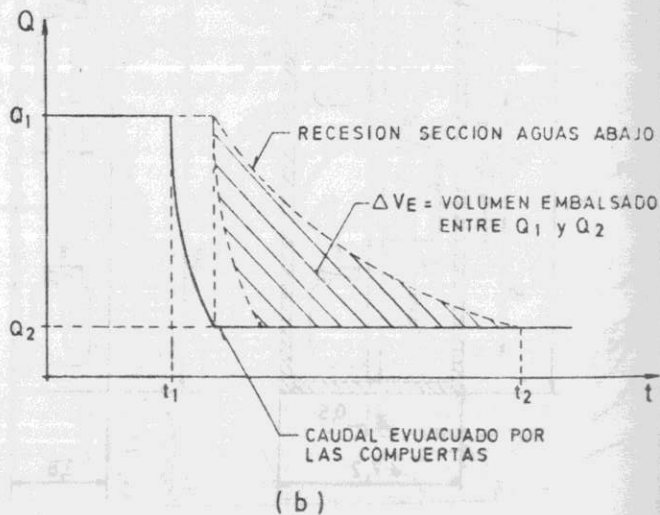
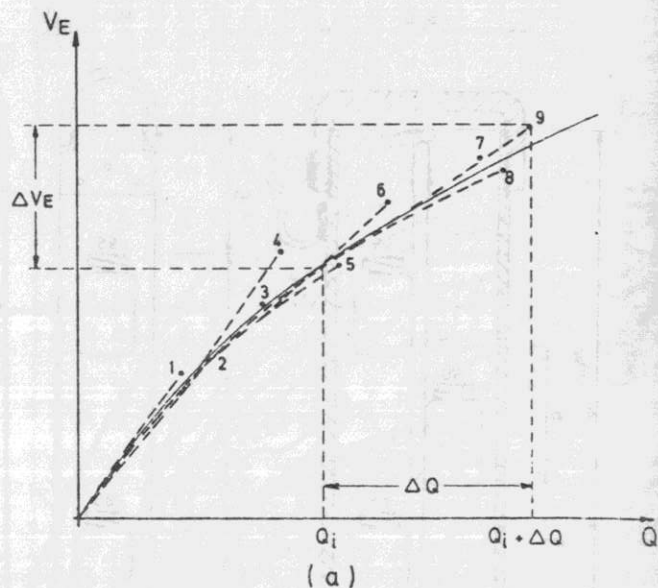
$$i = \frac{\Delta h}{L} = \frac{\Delta h}{23550}$$

AREAS IUNDADAS DEL PUEBLO  
DE RAPEL CON DISTINTOS CAUDALES



LIMNIMETRO DE AGUAS MAXIMAS



COMENTARIOS AL METODO DE GIBSON  
(AFOROS EN TUBERIAS DE ADUCCION A TURBINAS HIDRAULICAS)

P O R

HORACIO MERY M.\*

EMILIO IRAGUEN I.\*\*

## RESUMEN

En este trabajo se analiza, desde el punto de vista teórico, el método de aforo propuesto por el Dr. N.R. Gibson a objeto de formular la expresión exacta de un término correctivo que aparece en la fórmula del gasto. Este término considera el efecto de la distribución de velocidad del flujo en las secciones de medidas, (coeficiente de Boussinesq), si se acepta que el cierre de la turbina genera un fenómeno másico.

La evaluación del término correctivo, para una situación real, estaría indicando que gravita muy levemente en el resultado final y de todas formas siempre puede ser estimado su valor. En atención a esto último se presentan algunos coeficientes de Boussinesq estimados en instalaciones actualmente en funcionamiento en que las velocidades del flujo se midieron mediante molinete.

Lo anterior y la simplicidad del instrumental requerido en las medidas configuran un método muy práctico para la determinación de caudales quedando solamente la incertidumbre relacionada con la hermeticidad de los mecanismos de cierre de la turbina.

\* Ingeniero Jefe Sección Obras Hidráulicas ENDESA

\*\* Ingeniero División Estudios Hidrológicos ENDESA