

TABLA N° 6 RESULTADOS OBTENIDOS CON DIFERENTES FORMULAS. NIVEL DIARIO

	$\bar{X}$ (cm)	ES (cm)	R
VALOR MEDIDO	1,39	-	-
CUERPO DE INGENIEROS USA (1)	2,72	1,99	0,35
CUERPO DE INGENIEROS USA (2)	1,40	1,65	0,30
CUERPO DE INGENIEROS USA (3)	1,45	0,82	0,72
ANDERSON	1,36	1,13	0,53
UBC	1,76	1,13	0,50
DERIKX	2,19	1,15	0,75
KUZMIN	3,62	2,57	0,55
POPOV (1)	0,05	1,89	0,54
POPOV (2)	1,27	1,20	0,56
KONALOV	2,42	1,43	0,81
DGA (BNET, Ta)	1,43	0,51	0,83

$\bar{X}$  : Promedio

ES : Error estándar entregado por la fórmula

R : Coeficiente de correlación ajustado por grados de libertad

TABLA N° 7

Resultados obtenidos con fórmulas propuestas. Nivel grupo de días

	Muestra total		Echaurren-Norte		Cuenca Echaurren		Rutas de Nieve	
	$\bar{X}$	ES(DS)	$\bar{X}$	ES(DS)	$\bar{X}$	ES(DS)	$\bar{X}$	ES(DS)
Abiación medida	1.47	(0.80)	1.77	(0.59)	1.76	(0.68)	0.86	(0.74)
FGD (Ta, Tb= 6.9° C)	1.77	0.74	1.89	0.49	1.68	0.42	1.75	1.11
FGD (Ta, Tb= 0° C)	1.93	1.08	2.11	0.75	1.71	0.58	1.99	1.62
FGD (Tx, Tb= 6.8° C)	1.55	0.73	1.60	0.52	1.47	0.55	1.59	1.00
FGD (Tx, Tb= 0° C)	1.53	0.80	1.60	0.53	1.37	0.57	1.64	1.14
BROC, Ta	1.53	0.53	1.71	0.41	1.60	0.42	1.28	0.68
BNET, Ta	1.33	0.47	1.70	0.42	1.70	0.38	1.04	0.51

$\bar{X}$  : Promedio

ES : Error estándar entregado por la fórmula

DS : Desviación estándar

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

VII CONGRESO NACIONAL

PRONOSTICOS DE ONDAS DE CRECIDA AFLUENTES AL EMBALSE DE CENTRAL RAPEL

Andrés Benítez G. (\*)

Catalina Bobenrieth (\*\*)

RESUMEN

En este trabajo se explica la metodología para pronosticar las ondas de crecida afluentes al embalse de la central Rapel utilizando el método del Hidrograma Unitario (H.U.)

La precipitación efectiva (Pe) se obtiene resolviendo por correlación múltiple el sistema de ecuaciones necesarias para calcular una onda de crecida superficial, pero adoptando como variable dependiente el caudal observado y como incógnitas las precipitaciones efectivas.

También se incluye el pronóstico de la onda de crecida más grande registrada en el embalse de C. Rapel, cuyo QMi fue de 7 370 m3/s y se produjo el 27 de junio de 1982.

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

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

## 1. INTRODUCCION. OBJETIVO

La central Rapel (350 MW) es una central hidroeléctrica de embalse ubicada en el río Rapel, a unos 30 km de su desembocadura en el océano Pacífico y aguas abajo de la junta de los dos afluentes más importantes, los ríos Cachapoal y Tinguiririca. (Lámina N° 1).

Controla una cuenca hidrográfica que cubre un área de 13 275 km<sup>2</sup>, de los cuales, aproximadamente, 3 175 km<sup>2</sup> corresponden a la cuenca nival y 10 100 km<sup>2</sup> a la cuenca pluvial.

Durante su construcción se estableció un sistema de pronóstico de crecidas pluviales, basado en el método del Hidrograma Unitario (H.U.) de tiempo unitario  $t_u = 6$  h.

Para la determinación de la precipitación media en la cuenca cada 6 horas, se utilizaron 5 estaciones pluviométricas cuya comunicación estaba asegurada. También se recibía información de los ríos Cachapoal y Tinguiririca; en este caso cada 2 horas. (Lámina N° 1).

Para estimar la precipitación efectiva se obtuvo una curva de infiltración en función del tiempo.

El sistema funcionó perfectamente durante el período de construcción.

Al entrar en operación la central, la situación se alteró por la existencia del embalse ya que surgieron restricciones en su operación.

En estos últimos años se han producido las siguientes crecidas con  $Q_{mi}$  superiores a 4 500 m<sup>3</sup>/s:

5 julio 1984	5 500 m <sup>3</sup> /s
16 julio 1982	4 900 m <sup>3</sup> /s
27 junio 1982	7 400 m <sup>3</sup> /s

Lo que motivó, la necesidad de establecer un método computacional para calcular ondas de crecida que pueda ser operado por personal no muy especializado.

## 2. RESTRICCIONES Y NORMAS PARA LA OPERACION DEL EMBALSE (1)

Las restricciones existentes son:

- 1° El pueblo de Rapel no debe soportar un  $Q_{mi}$  superior al que habría tenido sin la existencia del embalse, siempre que sea superior a 3 500 m<sup>3</sup>/s.
- 2° El nivel del embalse no puede ser en ningún punto de su perímetro superior a la cota 105 m.s.n.m.

(1) A. Benítez G. "Previsión de niveles del río Rapel en el pueblo de Rapel y su verificación", IV Coloquio Nacional de Hidráulica, 1979.

Para cumplirlas se debe tener en cuenta:

- 1° Al abrir y cerrar las compuertas de superficie se generan ondas gravitacionales que recorren el embalse y cuya amplitud depende del aumento o disminución del caudal que evacúan las compuertas de superficie.
- 2° Cuando el caudal total evacuado es muy grande se produce una diferencia de nivel entre el muro y la cola, debido esencialmente a la pérdida de carga que se produce en la zona más estrecha del embalse.

Por estos motivos se han establecido los siguientes niveles del embalse en función del caudal afluente:

$Q_{mi}$ (m <sup>3</sup> /s)	Muro (m.s.n.m.)	Llallauquén (m.s.n.m.)
3 500	104,18	104,38
4 000	104,08	104,34
5 000	103,85	104,25
6 000	103,58	104,16
7 000	103,27	104,05
8 000	102,92	103,94
9 000	102,53	103,83

Para una buena operación del embalse estos niveles deben alcanzarse con anterioridad a que llegue dicho caudal, por lo cual es necesario pronosticar la onda de crecida.

## 3. METODOLOGIA EMPLEADA

El procedimiento utilizado está basado en el método del Hidrograma Unitario (H.U.)

Para ello ha sido necesario:

- 1° Calcular un nuevo H.U. de 6 horas, que incluyera el efecto del embalse.
- 2° Establecer una forma para calcular la onda de crecida afluente.
- 3° Método para calcular la precipitación media de la cuenca cada 6 horas.

## 3.1 DETERMINACION DE LA ONDA DE CRECIDA

El cálculo del caudal afluente se realiza cada 2 horas utilizando la ecuación

$$Q_{AER} = Q_G + Q_{CMF} + Q_V + Q_R \quad (1)$$

siendo

$$Q_{AER} = \text{caudal afluente al embalse C. Rapel}$$



siendo

$Q_i$  = caudal QAERS en el tiempo  $i$

$q_i$  = caudal del H.U. en el tiempo  $i$  ( $i = 1 \dots n$ )

$P_j$  = precipitación caída en el tiempo  $j$  ( $j = 1 \dots N$ )

El conjunto de ecuaciones se termina al multiplicar el último valor de  $q$  ( $q_n$ ) con el último valor de  $P$  ( $P_N$ ), o sea con el producto  $q_n P_N$ .

En el caso del pronóstico el problema es inverso. Se conocen  $Q_i$  y  $q_i$  y se desea determinar  $P_j$  para calcular la onda de crecida y ver si se ajusta a la real, para lo cual se va resolviendo el sistema de ecuaciones (6) conforme vamos obteniendo valores  $Q$ . Como en este caso el tiempo unitario ( $t_u$ ) es  $t_u = 6$  horas y tenemos el  $Q_i$  cada 2 horas, podemos establecer un sistema de ecuaciones análogo al anterior pero con tres ecuaciones cada 6 horas, o sea

$$Q_i = q_i P_1 + q_{i-1} P_2 + \dots + q_K P_{i-K+1}$$

$$Q_i' = q_i' P_1 + q_{i-1}' P_2 + \dots + q_K' P_{i-K+1}$$

$$Q_i'' = q_i'' P_1 + q_{i-1}'' P_2 + \dots + q_K'' P_{i-K+1}$$

siendo  $q_i'$  y  $q_i''$  caudales del H.U. intermedios entre el  $t_{u_i}$  y  $t_{u_{(i+1)}}$ .

Resolviendo el sistema de ecuaciones cada 6 horas, se aumenta cada vez en tres ecuaciones más y sólo una precipitación con lo cual el sistema está cada vez más definido. También puede aplicarse cada 2 horas, cada vez que obtenemos QAER.

Durante la solución de los sistemas de ecuaciones los problemas más frecuentes que se presentaron fueron:

a) Se produce una diferencia  $\Delta Q$  entre el último caudal pronosticado (QP) y el valor calculado (QR) (Lámina N° 4). En este caso, para hacerlos coincidir se calcula la precipitación efectiva ( $\Delta Pe$ ) como

$$\Delta Pe = \frac{\Delta Q}{q_1}$$

donde  $q_1$  es el caudal del H.U. a las 6 horas. Este valor se le suma a la última  $Pe$  y se calcula nuevamente la onda crecida.

b) Hay una  $Pe$  un poco negativa, menor de 3 mm. En este caso se le resta esta precipitación a la  $Pe$ , siguiente o anterior. En las tablas este caso se ha marcado con un \* y la  $Pe$  negativa se ha hecho 0,0 mm. A la  $Pe$  que se ha disminuido en igual cantidad también se la ha marcado con \*.

c) Si las  $Pe$  están comprendidas entre  $-8 \text{ mm} > Pe > -3 \text{ mm}$ , se resta una mi-

dad a la anterior y otra mitad a la  $Pe$  posterior y esa  $Pe$  se hace 0,0 mm.  
d) Si las  $Pe$  son muy negativas ese período de lluvias se hace 0,0 mm y se resuelve el sistema nuevamente.

#### 4. RESULTADOS OBTENIDOS

De las crecidas analizadas se incluye la del 27 de junio de 1982, la que ha sido la más grande registrada en el río Rapel, con un  $Q_{M_i} = 7\,370 \text{ m}^3/\text{s}$ . En la Lámina N° 4 se ha dibujado la crecida y el histograma de la precipitación, cada 6 horas, que la produjo. Se observan dos ondas producidas por dos períodos de precipitaciones separadas por uno de 12 horas, prácticamente sin lluvias.

Al hacer el pronóstico se supuso que el caudal base ( $Q_B$ ) era igual a  $585 \text{ m}^3/\text{s}$ , que era el existente al empezar el temporal. También se trató de realizarlos lo más objetivamente posible, abstrayéndose de lo que ocurrió posteriormente, o sea suponiendo que se está efectuando el pronóstico en tiempo presente.

Los pronósticos se han numerado conforme se han ido realizando. Cuando con un determinado bloque de lluvias sólo se realiza un solo pronóstico se le denomina P.N., pero si se realizan varios a diferentes horas se les denomina P.N-1, P.N-2 y P.N-3. Cuando en un pronóstico se modifica la  $Pe$  calculada, por el motivo indicado en el punto a) del método de cálculo, se le añade una "c".

En las Tablas N° 1, 2 y 3 se puede deducir el proceso seguido para el pronóstico. En la columna 1 se encuentra el número del bloque de 6 horas de precipitaciones, en la columna 2 el día, en la 3 el período de lluvia, en la 4 el número del pronóstico, en la 5 la hora en que se realiza el pronóstico, en la 6 la precipitación media de la cuenca ( $P_c$ ), en la 7 sus valores acumulados y a continuación las precipitaciones efectivas ( $Pe$ ) obtenidas en cada pronóstico. En la penúltima línea está la suma de las precipitaciones  $P_c$  y  $Pe$  y en la última el coeficiente de correlación de las respectivas correlaciones múltiples.

En las Láminas 5, 6 y 7 se han dibujado las ondas de crecida pronosticadas con el correspondiente número del pronóstico y la hora en que el pronóstico fue realizado.

De las tablas se deduce:

- 1° Son muy pocas las  $Pe$  que resultan negativas (0,0\*) y generalmente corresponde al mismo bloque de precipitaciones.
- 2° Son muy pocos los casos en que la  $Pe$  de un bloque es mayor que la correspondiente  $P_c$ .

3° Sólo en el pronóstico P.2 se tiene que  $\sum Pe > \sum Pc$ .

4° La infiltración total es igual a

$$I_t = \sum Pc - \sum Pe = 177,7 - 138,9 = 38,8 \text{ mm}$$

De este total, en las lluvias que generaron la primera onda, se produjo una infiltración

$$I_1 = \sum Pc - \sum Pe = 50,4 - 26,7 = 23,7 \text{ mm}$$

La infiltración total fue pequeña porque el terreno estaba bastante saturado como lo indica el caudal base de 585 m<sup>3</sup>/s.

5° Los coeficientes de correlación son excelentes.

De las láminas se deduce:

- 1° El ajuste hasta la hora en que se realiza el pronóstico es bueno.
- 2° El ajuste una vez que se conoce el QMi puede ser excelente, como en el caso P.12-3
- 3° Conforme se desarrolla el temporal se van obteniendo diferentes QMi con bastante antelación lo que permite programar el descenso del nivel del embalse para cumplir con las normas indicadas anteriormente. Este QMi puede observarse que es creciente conforme se van incorporando nuevos bloques de lluvias y antecedentes de caudales.

En la Tabla N° 4 se ha realizado un resumen, indicando el número del pronóstico y el día y hora en que se hizo; el QMi pronosticado y el día y hora en que se va a producir; la diferencia entre la hora en que se realiza el pronóstico y la hora en que se produce el QMi y en la siguiente columna la diferencia respecto la hora en que se produjo realmente el QMi que fue de 7 370 m<sup>3</sup>/s a las 20 h del día 27. Puede observarse que hay suficiente tiempo para bajar paulatinamente el embalse.

## 5. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede concluir:

- 1° Esta metodología para pronosticar caudales con cierta anticipación es aceptable, pero con la condición que la cuenca sea lo suficientemente grande para que el tiempo de retardo del H.U. sea de bastantes horas.
- 2° El H.U. calculado representa bien a las características hidrológicas de la cuenca.

3° El cálculo de la precipitación de la cuenca (ecuación 4) parece ajustarse a la realidad.

4° Los coeficientes de correlación múltiple son muy altos. Ahora bien, debe tenerse en cuenta que este coeficiente representa la bondad del ajuste entre la onda de crecida que se ha producido hasta el momento de realizar el pronóstico y la pronosticada hasta esa misma hora, pero no necesariamente la forma definitiva de la onda ni el valor del QMi, los que dependen de si sigue o no lloviendo.

TABLA N° 1

PREC N°	DIA	HORA	PRON N°	HORA	Pc mm/6h	Σ Pc mm	Pe. 1 mm/6h	Pe. 2 mm/6h	Pe. 3 mm/6h	Pe.4-2 mm/6h	Pe.4-3 mm/6h
1	24	0-6			10,2	10,2	3,4	3,0	2,7	3,6	3,6
2	24	6-12	1	12	8,7	18,9	5,3	8,0	8,6	8,2	8,2
3	24	12-18	2	18	6,7	25,6		15,2	12,7	11,5	11,5
4	24	18-24	3	24	16,0	41,6			3,5	3,3*	0,7
5	25	0-6	4-1	6	8,8	50,4				0,0*	2,7
	25	-	4-2	Σ 18	-	-	-	-	-	-	-
SUMA						50,4	8,7	26,2	27,5	24,0	26,7
COEFICIENTE CORRELACION							0,996	0,986	0,991	0,998	-

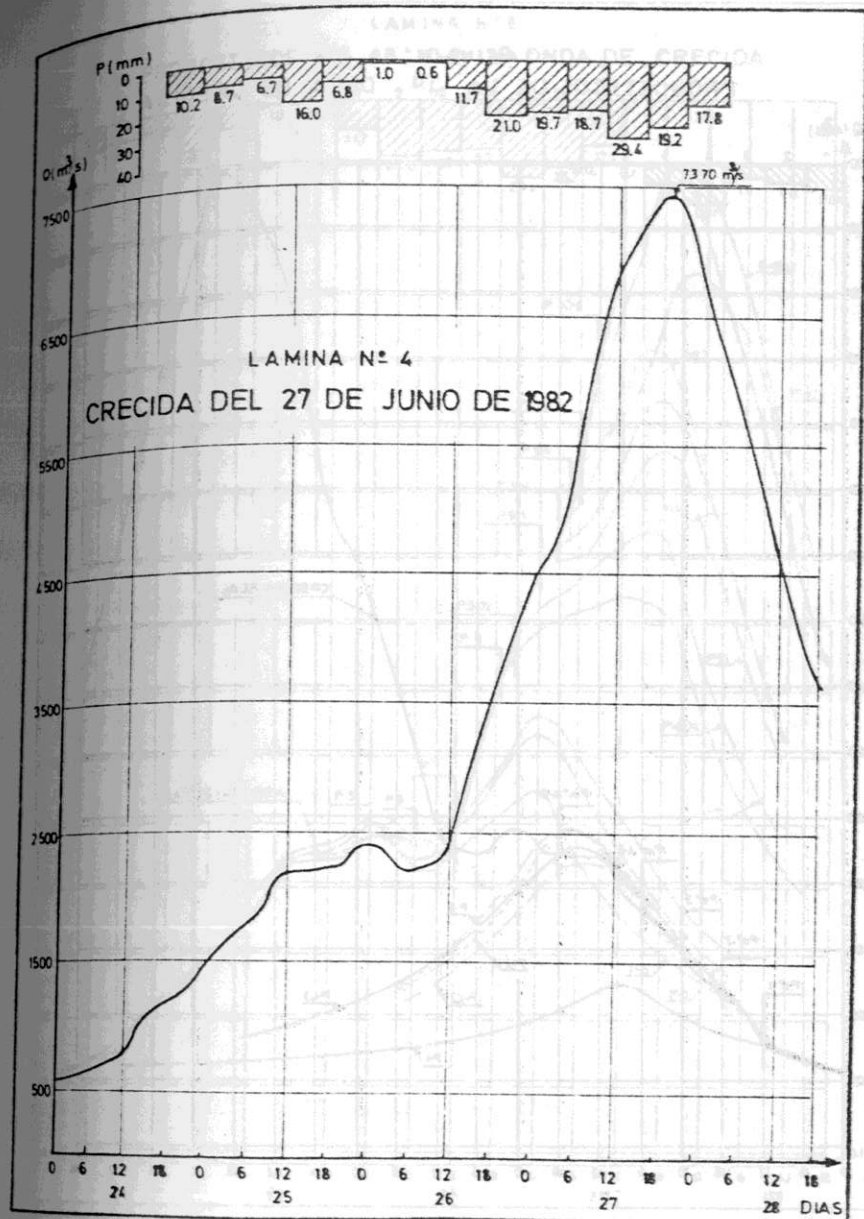
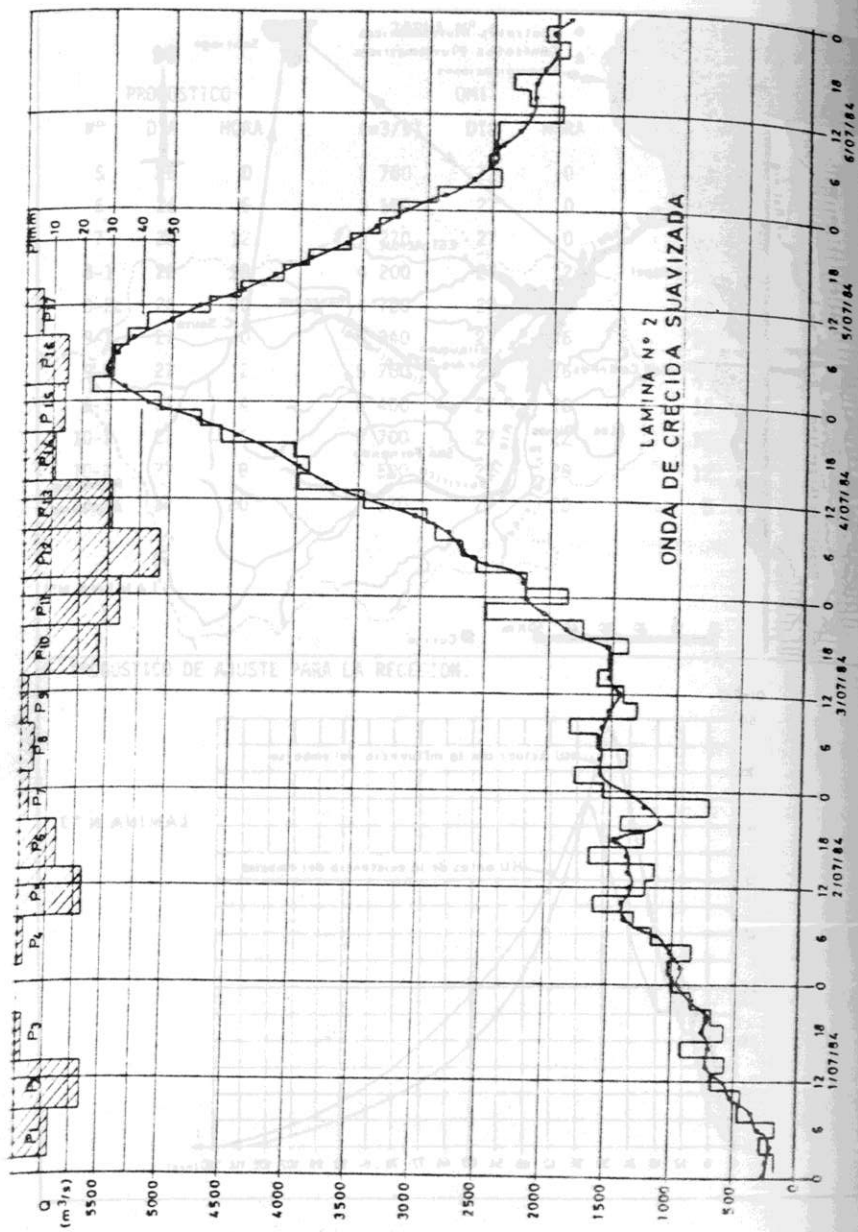
TABLA N° 2

PREC N°	DIA	HORA	PRON N°	HORA	Pc mm/6h	Σ Pc mm	Pe. 5 mm/6h	Pe. 6 mm/6h	Pe. 7 mm/6h	Pe.8-1 mm/6h	Pe.8-2 mm/6h
1	24	0-6			10,2	10,2	3,6	3,7	3,7	3,6	3,6
2	24	6-12	1	12	8,7	18,9	7,9	7,8	7,7	7,9	7,9
3	24	12-18	2	18	6,7	25,6	10,9	10,7	10,6	11,1	11,1
4	24	18-24	3	24	16,0	41,6	4,3	4,4	4,4	4,2	4,3
5	25	0-6	4-1	6	8,8	50,4	0,0*	0,0*	0,0*	0,0*	0,0*
6	25	6-12	-	-	1,0	51,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	25	12-18	4-2	18	0,6	52,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	25	18-24	5	24	11,7	63,7	22,1*	21,0*	20,9*	22,1*	22,0*
9	26	0-6	6	6	21,0	84,7		8,2	7,3	7,3	7,5
10	26	6-12	7	12	19,7	104,4			4,0	4,7	4,5
11	26	12-18	8-1	18	18,7	123,1				26,0	32,5
SUMA						123,1	48,8	55,8	58,6	86,9	93,4
COEFICIENTE CORRELACION							0,9984	0,9986	0,9986	0,9986	0,9988

FAMILIA N° 3

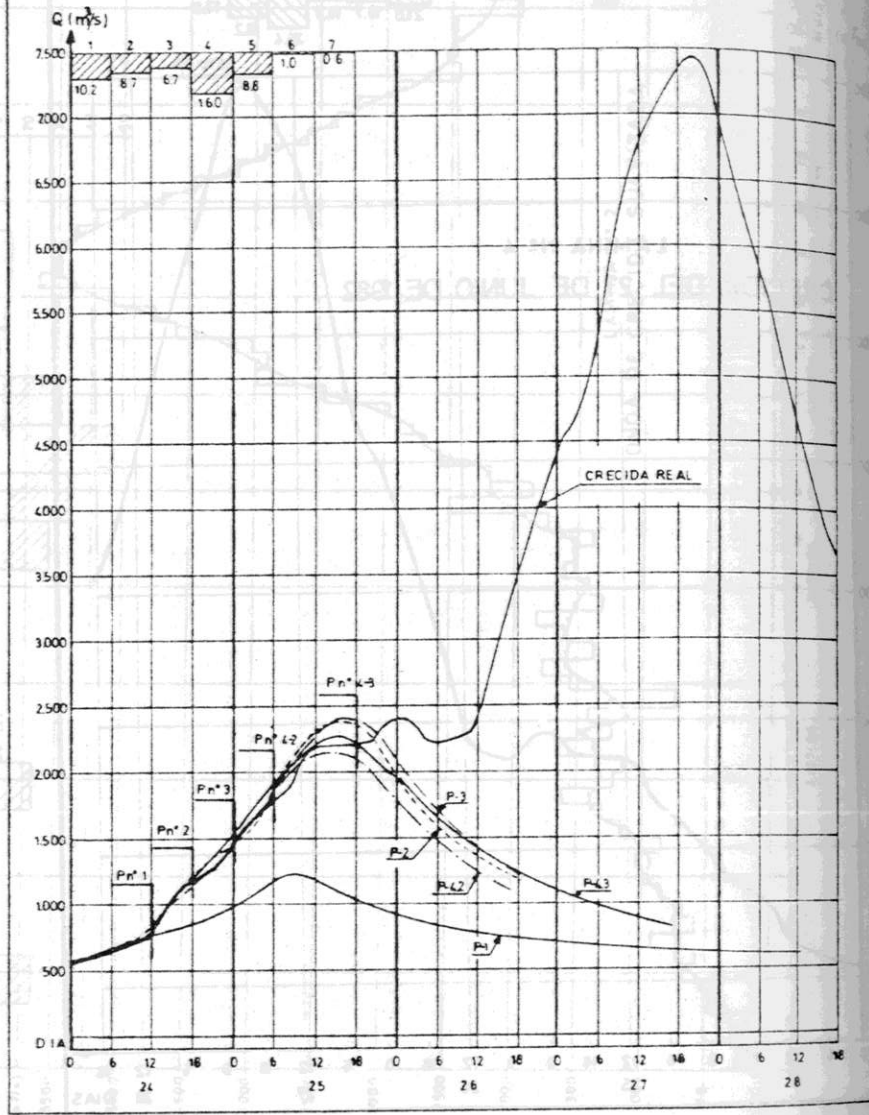
PREC N°	DIA	HORA	PRON N°	HORA	Pc mm/6h	Σ Pc mm/6h	Pe9-1 mm/6h	Pe9-2 mm/6h	Pe9-3 mm/6h	Pe10-1 mm/6h	Pe10-2 mm/6h	Pe10-3 mm/6h	Pe12-3 mm/6h
1	24	0-6			10,2	10,2	3,7	3,8	3,9	3,6	4,3	4,5	
2	24	6-12	1	12	8,7	18,9	7,8	7,8	7,5	7,9	7,2	7,0	
3	24	12-18	2	18	6,7	25,6	10,8	10,5	9,4	11,2	10,1	9,2	
4	24	18-24	3	24	16,0	41,6	4,3	4,6	5,6	3,8	2,3	3,3	
5	25	0-6	4-1	6	8,8	50,4	0,0*	0,0*	0,2	0,0*	3,3	4,1	
6	25	6-12	-	-	1,0	51,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
7	25	12-18	4-2	18	0,6	52,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
8	25	18-24	5	24	11,7	63,7	21,5*	20,1*	16,8	22,7*	19,7	13,5*	
9	26	0-6	6	6	21,0	84,7	6,9	6,7	7,1	6,2	0,0*	0,0*	
10	26	6-12	7	12	19,7	104,4	6,1	8,3	12,3	4,8	11,2*	20,8	
11	26	12-18	8	18	18,7	123,1	26,4	28,9	33,9	25,2	38,7	39,4	
12	26	18-24	9-1	24	29,4	152,5	18,5	20,1	19,1	17,8	23,2	22,2	
13	27	0-6	9-2	2	-	-	-	-	-	-	-	-	
	27	6-12	9-3	4	-	-	-	-	-	-	-	-	
	27	12-18	10-1	6	25,2	177,7	-	-	-	34,4	25,3	14,9	
	27	18-24	10-2	8	-	-	-	-	-	-	-	-	
SUMA						177,7	106,0	110,8	115,8	137,6	145,3	138,9	
COEFICIENTE DE CORRELACION							0,9992	0,9992	0,9993	0,9995	0,9992	0,9994	



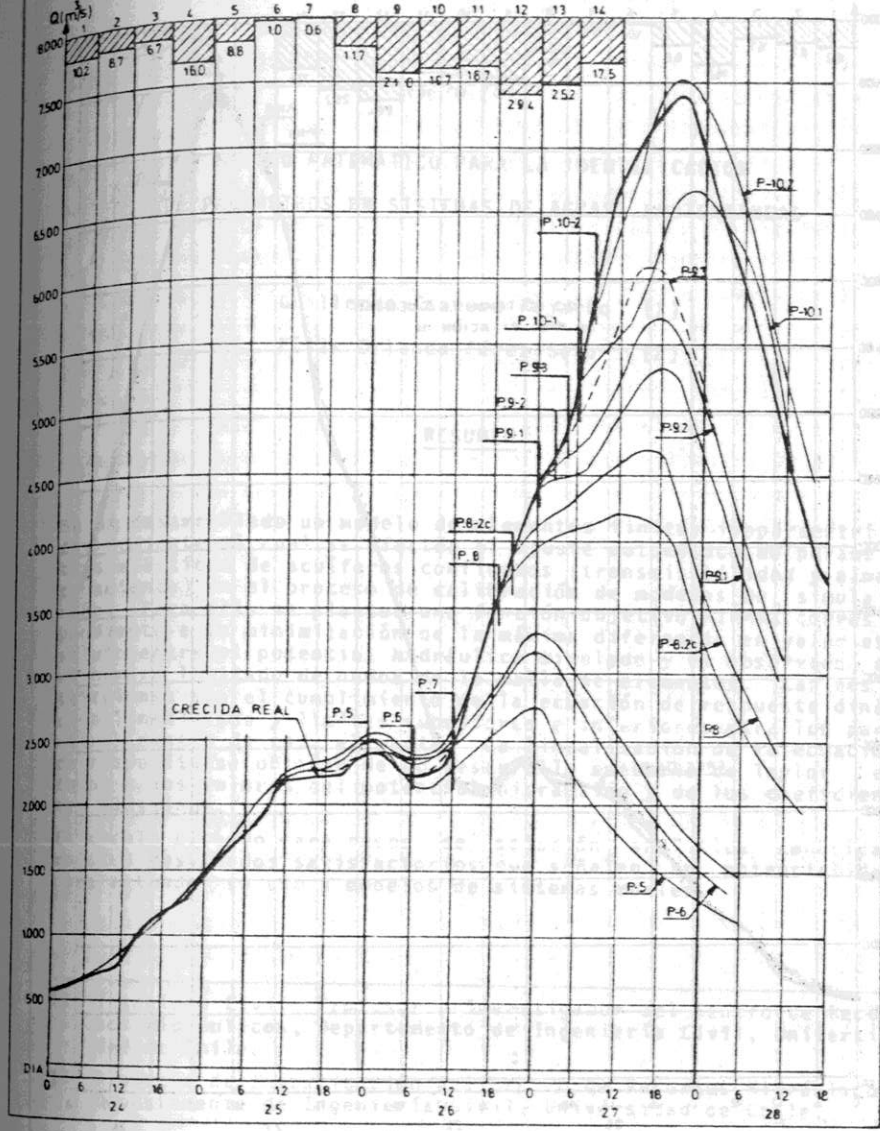


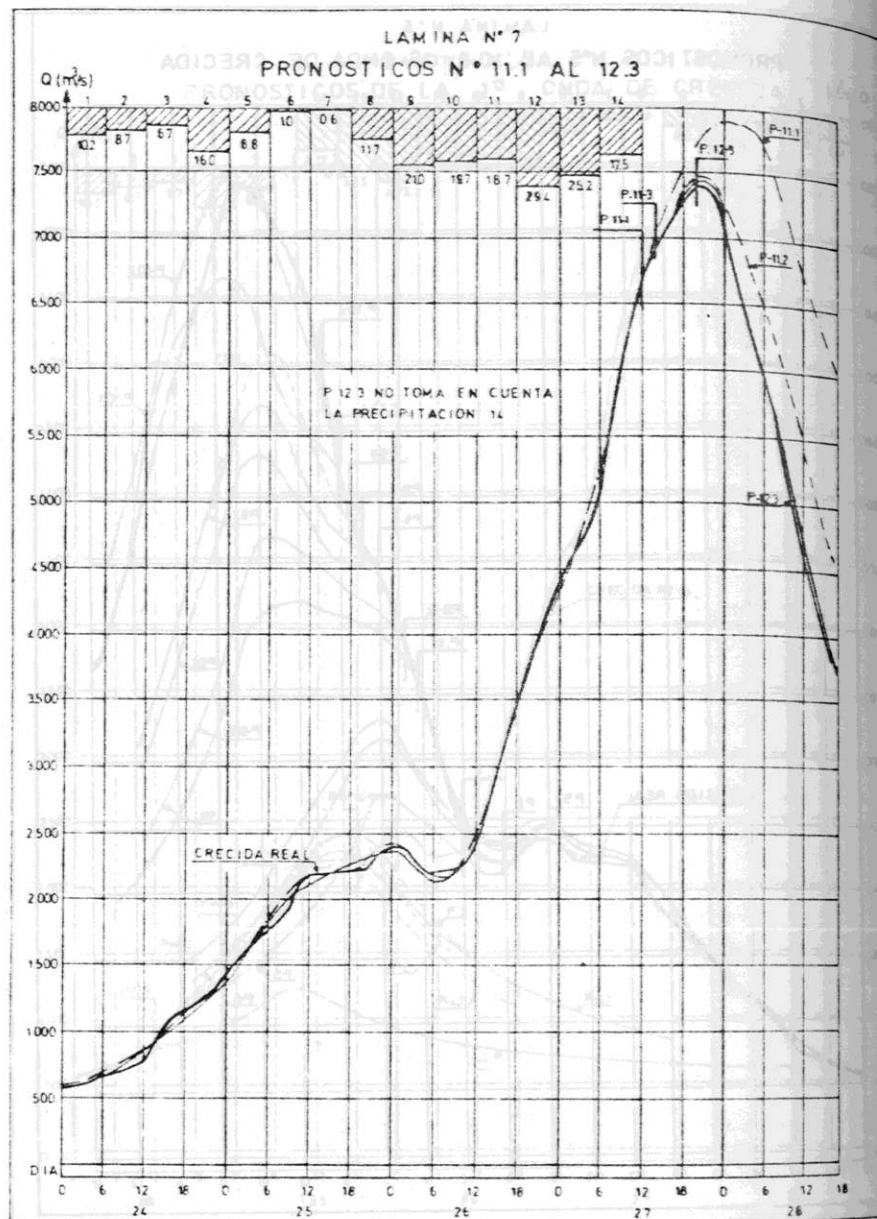


LAMINA N° 5  
PRONOSTICOS DE LA 1ª ONDA DE CRECIDA



PRONOSTICOS N°5 AL 10-2 2ª ONDA DE CRECIDA





MODELO MATEMATICO PARA LA IDENTIFICACION  
DE PARAMETROS EN SISTEMAS DE AGUAS SUBTERRANEAS

Guillermo Cabrera Fajardo (1)

Félix Orlando Pérez Soto (2)

RESUMEN

Se ha desarrollado un modelo de elementos finitos isoparamétricos mediante el cual se efectúa el ajuste automático de parámetros elásticos de acuíferos confinados (transmisibilidad y almacenamiento) en el proceso de calibración de modelos de simulación. Para ello se plantea una función objetivo MINMAX correspondiente a la minimización de la máxima diferencia en valor absoluto entre el potencial hidráulico simulado y el observado en un número limitado de nudos de la malla de elementos. Las restricciones son el cumplimiento de la ecuación de respuesta dinámica linealizada y límites superiores e inferiores para los parámetros dentro de cada elemento. La linealización de la ecuación de respuesta se obtiene de un desarrollo en serie de Taylor en torno a los valores del potencial hidráulico y de los coeficientes elásticos.

El modelo probado para casos de solución analítica conocida, muestra resultados satisfactorios que señalan su potencialidad para extender su uso a modelos de sistemas reales.

(1) Ingeniero Civil, Profesor e Investigador del Centro de Recursos Hidráulicos, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

(2) Ayudante de Investigación del Centro de Recursos Hidráulicos, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.