

# XXIV° Congreso Nacional del Agua 2013

San Juan, 14 al 18 de Octubre de 2013

## COEFICIENTES DE AJUSTE DE HIDROGRAMAS SINTETICOS EN RIOS DE LLANURA – MÉTODO DE SNYDER – RÍO TAPENAGÁ - CHACO

**RUBERTO, Alejandro R. (\*); DEPETTRIS, Carlos A. (\*), PILAR, Jorge V. (\*), RAMOS, Rosario (#), MENTASTI, Claudio (#)**

Departamento de Hidráulica – Facultad de Ingeniería- UNNE

(\*) Grupo de Investigación del Departamento de Hidráulica - Facultad de Ingeniería - UNNE

(#) Alumno de Ingeniería Civil – FI – UNNE - Av. Las Heras 727 (CPA H3500COI). TE (362) 4427006.

Correo-e: aleruberto44@yahoo.com.ar

### RESUMEN

Existen pocas mediciones de caudales y datos de escurrimiento superficial en los ríos del NEA Argentino que permitan cuantificar el escurrimiento requerido para estudios básicos y/o con fines de aprovechamiento.

La morfología de cuencas de llanura conforma sistemas de escurrimiento que no responden al concepto estricto de cuenca y pertenecen a los llamados Sistema Hidrológicos No Típicos [SHNT]. En este trabajo se propone determinar el coeficiente  $C_t$  (coeficiente de retardo) utilizado para el cálculo del tiempo al pico ( $t_p$ ) y el coeficiente  $C_p$  utilizado para el cálculo del caudal al pico ( $q_p$ ) en el método del hidrograma unitario sintético de Snyder.

El cálculo de hidrogramas de escurrimiento directo sintético ha sido casi siempre abordado empíricamente, lo cual lleva a considerarlo como un modelo hidrológico para simular la conversión de la precipitación en escurrimiento.

En este trabajo se aplicó la metodología de Snyder, desarrollada para cuencas de montañas de los montes Apalaches<sup>1</sup>, donde se aforaron veinte cuencas de 30 a 30.000km<sup>2</sup>, por lo que se plantean dificultades de aplicación para cuencas de llanura.

En este estudio han sido analizados veintidós hidrogramas de escurrimiento directo, en un rango de caudales de 5 a 425m<sup>3</sup>/s, correspondiente al período 1970 a 2003, con lo que se cubrieron situaciones de estiaje, periodos medios - bajos y una creciente de magnitud.

Con ello fueron calculados valores de  $C_t$  y  $C_p$  de la cuenca del río Tapanagá, sistema hidrológico que se desarrolla desde el centro - sureste del Chaco hasta el norteste de Santa Fé.

Los valores de  $C_t$  variaron en un rango de 1,17 a 4,54, con un promedio de 2,41 y para el coeficiente de ajuste de pico  $C_p$  los valores variaron entre 0,11 y 0,62, con un valor medio de 0,31.

Los resultados de  $C_p$  obtenidos mostraron buen ajuste con los proporcionados por otros investigadores en la bibliografía de referencia; los valores de  $C_t$  son un poco superiores al promedio de los calculados en otras áreas y mayor su rango de variabilidad. Esto último condicionado por la morfología propia de cuencas de llanura que tienen mayor capacidad de almacenamiento y menores pendientes.

La variabilidad hallada en los resultados de ambos coeficientes podría estar influenciada por la estructura de la red de drenaje de la cuenca baja: un cauce bien definido y áreas de estros y bañados de aporte lateral.

**Palabras clave:** método sintético de Snyder – coeficientes de ajuste – ríos de llanura

<sup>1</sup> Gran sistema montañoso del este de Norteamérica, casi paralelo a la costa atlántica, que se extiende desde la provincia de Quebec, en Canadá, hasta el norte de Alabama, en Estados Unidos.

## INTRODUCCIÓN

Existen métodos sintéticos que permiten determinar la respuesta hidrológica de cuencas en las que no se cuenta con suficientes datos. Estos métodos precisan de coeficientes de ajuste, propios de cada región. El presente trabajo se enfoca en la determinación de esos coeficientes para una cuenca rural del Nordeste Argentino (NEA).

Dichos parámetros se correlacionan seguidamente con las características físicas de la cuenca, para ser utilizadas en la obtención del hidrograma unitario sintético (HUS) de otras cuencas sin datos aforados, pero cuyas características físicas son similares.

Se ha utilizado la metodología del hidrograma sintético de Snyder, estudiado en cuencas de montañas (en los montes Apalaches, donde se aforaron veinte cuencas con tamaños de 30 a 30000 km<sup>2</sup>), que plantea dificultades de adaptación para cuencas de llanura, como la chaqueña.

En la llanura chaqueña, la morfología de las cuencas conforman sistemas de escurrimiento que no responden al concepto estricto de cuenca topográficamente definida y tienen características propias, como cuerpos de agua que actúan como retardadores del flujo, más transfluencias entre sistemas hidrológicos. Ello define a los denominados Sistema Hidrológicos No Típicos [SHNT] (Fertonani y Prendes, 1984).

Sólo una pequeña cantidad de los ríos de llanura poseen estaciones de aforo con records de registros suficientemente extensos y confiables. En el área estudiada se cuenta con registros de precipitaciones y caudales, que abarcan desde el año 1970 al 2003.

Se ha estudiado la cuenca baja del río Tapenagá, cuya superficie es 840km<sup>2</sup>, pendiente de 0,00025m/m, en la que existen , además, esteros y cañadas, propias de sistemas hidrológicos de la llanura chaqueña.

## OBJETIVOS

Determinar el coeficiente  $C_t$  (coeficiente de retardo) utilizado para el cálculo del tiempo al pico ( $t_p$ ) en el método del hidrograma unitario sintético de Snyder y ajustar el coeficiente  $C_p$  (coeficiente de pico del hidrograma) utilizado por ese método para el cálculo del caudal al pico ( $q_p$ ), para la cuenca de la llanura chaqueña del río Tapenagá.

## ANTECEDENTES

Snyder (en Linsley, 1958) y de manera similar Tucci (1997), proponen que el retardo de la cuenca de un hidrograma estándar es igual a:

$$tp = C_t \times (L \times L_c)^{0.3} \quad (1)$$

donde:

$t_p$  = tiempo al pico, en horas;

$C_t$  = coeficiente que varía entre 1,35 a 1,65, adoptando los valores más bajos en cuencas con pendientes altas;

- L = longitud del cauce principal, desde el punto de salida de la cuenca, hasta el punto más alto, coincidente con la divisoria, en kilómetros;  
 L<sub>c</sub> = distancia desde la salida de la cuenca hasta el punto del cauce más próximo al centroide de la cuenca.

Según Maidment (1993), el tiempo al pico es similar el retardo de la cuenca e igual a:

$$t = n \times (L \times L_{CA})^{0.3} \quad (2)$$

Donde:

- t = tiempo que está medido desde el baricentro de la precipitación en exceso al pico del hidrograma.  
 L = longitud del cauce principal.  
 L<sub>CA</sub> = distancia desde el baricentro del área de la cuenca hasta el punto de salida.  
 n = parámetro empírico que depende de las características físicas de la cuenca en estudio.

El cuerpo de Ingenieros de los EEUU utiliza una fórmula que incluye la raíz cuadrada de la pendiente del cauce principal en el denominador del término entre paréntesis:

$$t = n \times \left[ \frac{L \times L_{CA}}{\sqrt{S}} \right]^{0.3} \quad (3)$$

Según Orsolini, et al (2000), el tiempo al pico del hidrograma de escurrimiento directo de una cuenca es igual a:

$$t_p = 0.75 \times C_t \times (L \times L_c)^{0.3} \quad (4)$$

Donde:

- C<sub>t</sub> = es un coeficiente de tiempo que varía entre 1,8 a 2,2;  
 L = es la longitud del curso del cauce principal, en kilómetros;  
 L<sub>c</sub> = longitud del curso principal desde la sección de control al centroide de la cuenca, en kilómetros.

También Snyder seleccionó histogramas netos e hidrogramas para los cuales se cumpla:

$$t_p = 5.5 \times t_n \quad (5)$$

Donde:

- t<sub>p</sub> = tiempo al pico;  
 t<sub>n</sub> = tiempo de lluvia neta.

Y para determinar el tiempo al pico utilizó:

$$t_p = 0,75 \times C_t \times (L \times L_c)^{0.30} \Rightarrow C_t = \frac{t_p}{0,75 \times (L \times L_c)^{0.30}} \quad (6)$$

Pudiéndose plantear dos situaciones:

- a) t<sub>pR</sub> = 5,5 x t<sub>nR</sub> ⇒ por lo cual se cumpliría la condición de la ecuación (5) y se adopta t<sub>n</sub> = t<sub>nR</sub>; t<sub>p</sub> = t<sub>pR</sub> y el valor de C<sub>t</sub> se calcula con la ecuación (6).

b)  $t_{pR} \neq 5,5 \times t_{nR} \Rightarrow$  por lo cual no se cumpliría la condición de la ecuación (5), el tiempo de retardo del hidrograma unitario debe ser ajustado utilizando la ecuación:

$$t_p = t_{pR} + 0,25 \times (t_n - t_{nR}) \quad (7)$$

En forma conjunta con la ecuación (5) se tienen dos ecuaciones, con dos incógnitas:  $t_n$  y  $t_p$ . Luego, se calcula el coeficiente de retardo ( $C_t$ ) con la ecuación (6), utilizando el valor de tiempo al pico ajustado, calculado con la ecuación (7).

Luego, se debe recalculer el caudal pico  $q_{pR}$ , según:

$$q_{pR} = \frac{q_p \times t_p}{t_{pR}} \quad (8)$$

Para representar la distribución temporal del HUS es necesario calcular parámetros adicionales. Y el cuerpo de ingenieros de USA propone dos relaciones para calcular el ancho (en horas) del 50 % y 75 % del  $q_{pR}$  según:

$$W_{75} = \frac{1,22}{\left[ \frac{q_{pR}}{A} \right]^{1,08}} \quad (9)$$

$$W_{50} = \frac{2,14}{\left[ \frac{q_{pR}}{A} \right]^{1,08}} \quad (10)$$

Generalmente, la distribución en el tiempo de los anchos se puede realizar asignando un tercio del valor antes y dos tercios después de la ocurrencia.

En 1994, Chow, coincidiendo con los autores antes mencionados, demostró que a partir de esas relaciones, pueden calcularse cinco características propias de un hidrograma unitario sintético [figura 1.b)] para una duración de exceso de lluvia dada igual a  $q_{pR}$  y calcular también el retardo de cuenca,  $t_{pR}$ ; el tiempo base  $t_b$  y los anchos  $W$  (en unidades de tiempo) del hidrograma unitario al 50% y 75% del caudal pico. Con ello puede graficarse el hidrograma unitario:

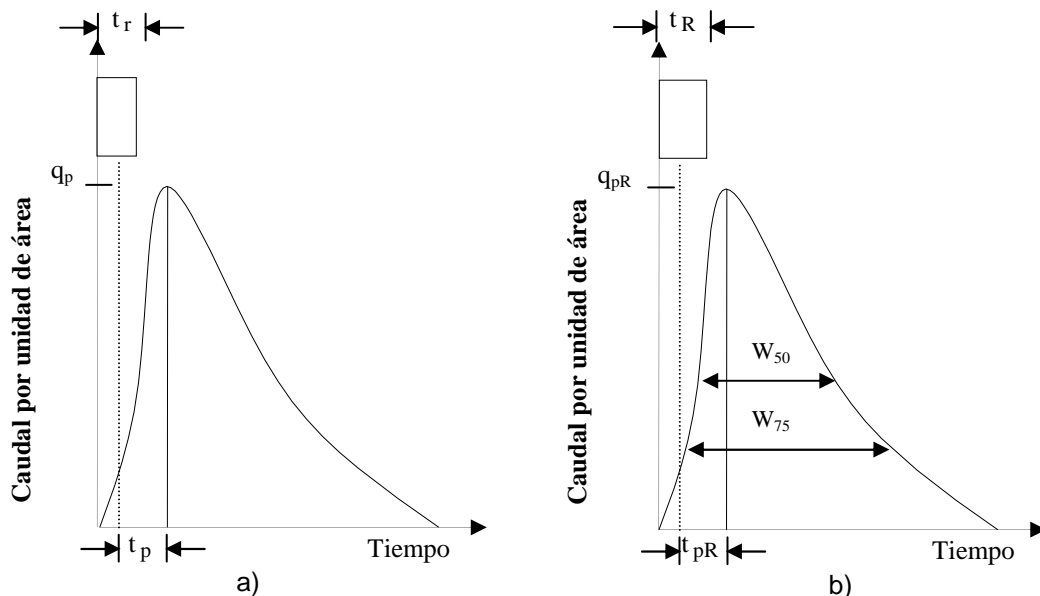


Fig.1. Hidrograma unitario y de escurrimiento directo de Snyder

$$t_p = 0,75 \times C_t \times (L \times L_c)^{0,3} \quad (11)$$

Donde:

$t_p$  = tiempo entre el centro de gravedad de la lluvia efectiva y el pico del HED [en horas].

0,75 = es una constante de transformación de unidades (1 para el sistema inglés).

$L$  = longitud de la corriente principal del río medida desde la desembocadura, al punto más alejado de la cuenca [km].

$L_c$  = distancia entre la sección de salida y el centro de gravedad de la cuenca, medida sobre el cauce principal [km].

$C_t$  = coeficiente de retardo de Snyder, dependiente de las características físicas de la cuenca y varía de 1,8 a 2,2.

Taylor y Schwartz propusieron, simplifícadamente, que el coeficiente  $C_t$  sea calculado con:

$$C_t = \frac{1,65}{(\sqrt{i})^{0,38}} \quad (12)$$

Siendo  $i$  = pendiente del curso principal.

Y el caudal pico por unidad de área de drenaje, en  $m^3/s$ , y el  $C_p$ , del hidrograma unitario será:

$$q_p = \frac{2,75 \times C_p \times A}{t_p} \Rightarrow C_p = \frac{q_p \times t_p}{2,75 \times A} \quad (13)$$

Donde:

$q_p$  = caudal pico [ $m^3/s$ ]

$t_p$  = caudal pico [horas]

$C_p$  = coeficiente de pico que incluye los efectos de almacenamiento en la cuenca; según Snyder, varía entre 0,56 y 0,69.

$A$  = área de la cuenca [ $km^2$ ]

Según Ramos (1999) es posible calcular el coeficiente  $C_p$  con la fórmula:

$$C_p = 0,60 \times \sqrt{i} \quad (14)$$

siendo  $i$  la pendiente de la cuenca.

Snyder adoptó el tiempo base del hidrograma  $T_b$  [días] (Linsley 1958):

$$T_b = 3 + 3 \times \frac{t_p}{24} \quad (15)$$

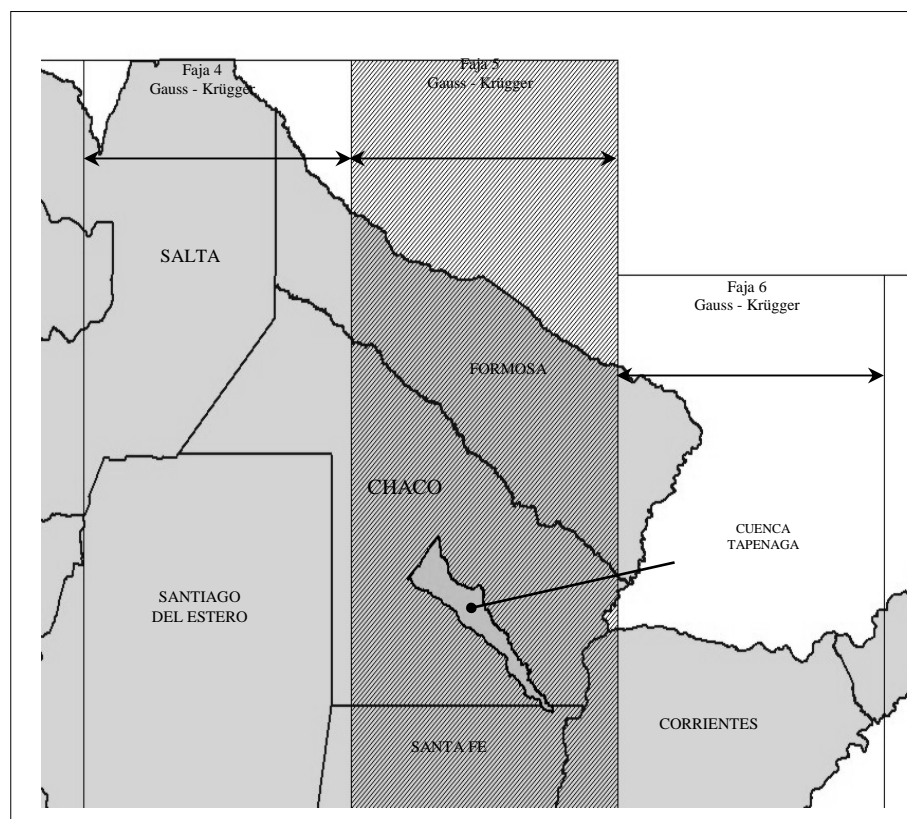
Las constantes de la ecuación antes mostrada están determinadas por el procedimiento utilizado para separar el flujo base de la escorrentía directa, mientras que las ecuaciones para determinar  $t_p$  y  $q_p$  definen los tres factores necesarios para construir el hidrograma unitario para una duración  $t_r$ . Para cualquier otra duración  $t_R \Rightarrow t_p R \neq 5,5 t_R$ .

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ubicación de la cuenca baja del río Tapenagá

La cuenca del río Tapenagá es posible dividirla en tres subcuencas para su estudio: alta, media y baja. El presente trabajo se focalizó en la subcuenca baja, que presenta una pendiente media del orden de  $0,00025\text{m/m}$ , con dirección noroeste-sureste y cuya superficie es  $840\text{ km}^2$ , lo que representa el  $17,6\%$  del área total.

En la figura número 1 se observa la ubicación geográfica de la cuenca, referida al sistema Gauss – Krügger.



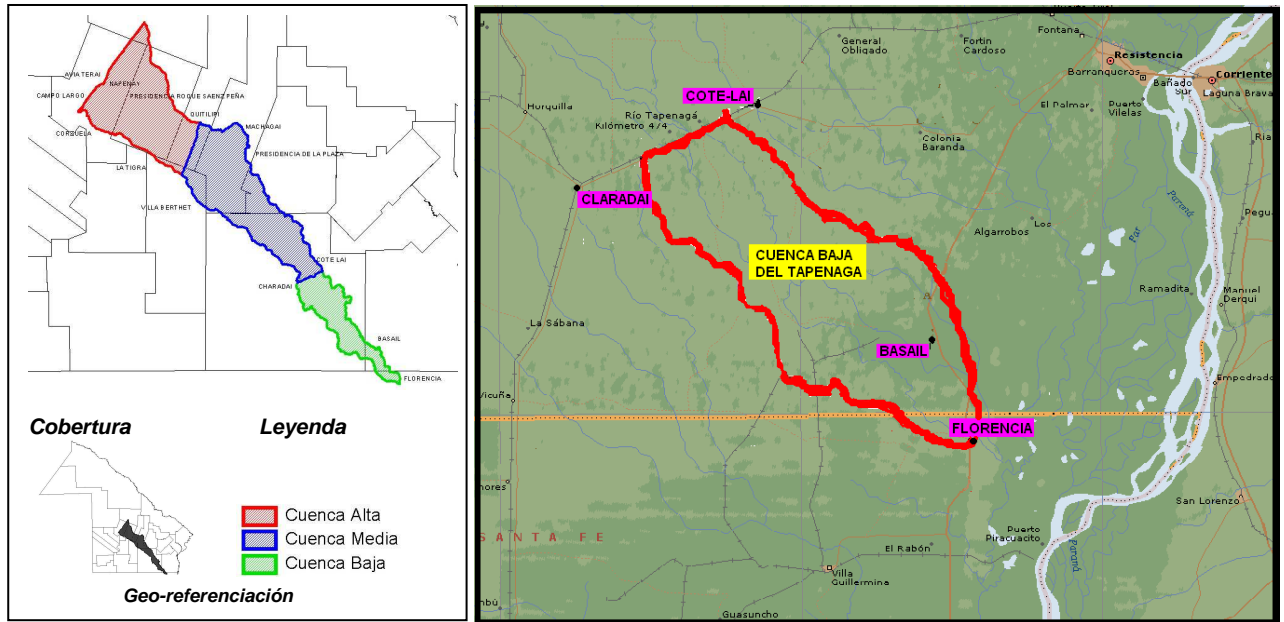
**Fig.2.** Ubicación geográfica de la cuenca del río Tapenagá (Valiente, 2004)

La cuenca baja es la que presenta un cauce principal bien definido y una red de drenaje medianamente integrada, con esteros, cañadas y bañados conectados a la corriente principal, siendo que en las subcuencas superiores la permanencia de agua es más prolongada en el tiempo.

### Delimitación del área de la cuenca baja

La cuenca tiene los siguientes límites físicos: al noroeste la Ruta Nacional n°89 y las vías del ex FFCC Gral. Belgrano, al norte el sistema de la cuenca del río Palometa y el arroyo Saladillo, al noreste el sistema del arroyo Palmira, hacia el sur los bajos de Charadai y el arroyo El Rabón y hacia el sureste la Ruta Nacional n°11, en donde se localiza la que se considera como sección de salida, el puente carretero, en el que se realizan mediciones hidrométricas.

En la fig. 3 se observa la delimitación de las subcuencas mencionadas.



**Fig. 3 y 4.** División de subcuencas del río Tapenagá (Valiente, 2004) y subcuenca baja del río Tapenagá – Estaciones pluviométricas y fluviométrica. (Elaboración propia)

### Metodología

Se trabajó con datos de la cuenca del río Tapenagá, medidos durante el período 1970 – 2003, en la sección de control correspondiente a la Ruta Nacional n°11, en Florencia, Santa Fé.

La diversidad en el uso y ocupación del suelo, más la humedad antecedente permitieron el ajuste del CN para diferentes estados hidrológicos. Se trabajó con valores de CN correspondientes a humedad antecedente de clase II, desde CN 60 y ajustes a clases I y III según la lluvia antecedente.

Los datos de lluvia fueron de tres estaciones: Cote Lai, Charadai y Basail, estaciones que cubren toda la cuenca baja, y coeficientes de Thiessen de 0,449; 0,110 y 0,441.

Fue posible depurar y trabajar con veintidós hidrogramas, con la precipitación neta que dio origen a los mismos y realizando la comparación de sus volúmenes. Se descartaron aquellos que superaban un error de 25% en diferencia de volúmenes: medido respecto a calculado. De la totalidad de los hidrogramas, en diez de ellos el valor de su caudal varió de 20 y 30m<sup>3</sup>/s; en cinco, de 10 a 20m<sup>3</sup>/s y en seis, de 0 a 10m<sup>3</sup>/s, más un valor de la creciente máxima aforada, con caudal de 424,35m<sup>3</sup>/s.

Para la determinación de  $C_t$  y  $C_p$  se utilizaron las siguientes fórmulas:

$$C_t = \frac{t_p}{(Lcg.L)^{0.3}} \quad (16)$$

$$C_p = \frac{10.Q_p.t_p}{2,75.h_n.A} \quad (17)$$

## RESULTADOS

Se presenta en planilla adjunta la hoja de cálculo planteada para la obtención de los valores de  $C_t$  y  $C_p$ , junto a los parámetros de cálculo como CN,  $Q_p$ , lluvia total y en exceso, el  $t_p$ .

Datos	
L(km)=	211,42
Lcg(km)=	129
A(km <sup>2</sup> )=	840

Tabla n°1. Datos y cálculo de  $C_t$  y  $C_p$  – Cuenca del río Tapenagá.

DATOS Y CÁLCULOS DE $C_t$ y $C_p$ DE LA CUENCA DEL RÍO TAPENAGÁ									
Fecha	CN	$Q_p$ (m <sup>3</sup> /s)	Lluvia total (mm)	Lluvia en exceso (mm)	$t_p$ (h)	$C_t$	Ct/ $C_t$ prom	$C_p$	Cp/ $C_p$ prom
10/03/70 - 29/03/70	60	8,63	67,6	5,6	27,1	1,26	0,53	0,18	0,59
12/03/72 - 23/03/72	77	9,68	42,9	7,4	63,2	2,95	1,23	0,36	1,16
19/02/76 - 04/03/76	60	10,52	66,9	5,4	25,7	1,20	0,50	0,22	0,71
24/11/83 - 01/01/84	82	9,41	32,7	6,0	54,7	2,55	1,06	0,37	1,21
26/01/84 - 19/02/84	78	23,69	72,4	26,0	65,9	3,08	1,28	0,26	0,85
20/02/84 - 22/03/84	38	20,60	38,0	5,4	25,0	1,17	0,49	0,41	1,34
08/02/85 - 03/03/85	74	31,61	98,6	38,4	80,8	3,77	1,57	0,29	0,94
27/03/86 - 17/05/86	87	424,35	327,9	286,3	97,2	4,54	1,89	0,62	2,03
19/02/87 - 17/03/87	61	10,80	75,0	8,8	85,0	3,97	1,65	0,45	1,47
27/09/87 - 30/10/87	39	7,15	38,2	4,8	37,3	1,74	0,72	0,24	0,79
10/01/88 - 11/03/88	75	13,52	85,6	30,7	70,2	3,28	1,36	0,13	0,44
27/10/89 - 14/11/89	75	24,25	67,8	19,1	48,0	2,24	0,93	0,26	0,86
27/09/91 - 12/10/91	60	8,20	6,5	5,3	41,9	1,96	0,81	0,28	0,92
05/03/93 - 15/04/93	78	25,53	72,5	26,1	42,1	1,97	0,82	0,18	0,58
12/11/93 - 24/11/93	73	19,32	57,9	11,5	44,3	2,07	0,86	0,32	1,05
01/02/96 - 28/02/96	80	28,80	62,5	21,9	29,2	1,36	0,57	0,17	0,54
08/10/96 - 31/10/96	74	27,74	83,3	27,7	26,4	1,23	0,51	0,11	0,37
10/01/00 - 27/01/00	60	28,24	95,8	16,6	71,8	3,35	1,39	0,53	1,72
08/06/01 - 30/06/01	34	13,50	37,0	8,8	72,0	3,36	1,40	0,48	1,56
01/09/01 - 27/09/01	77	5,97	34,4	3,9	51,9	2,42	1,01	0,35	1,13
27/10/01 - 09/11/01	78	27,87	57,6	16,3	34,5	1,61	0,67	0,26	0,83
12/09/02 - 30/09/02	78	25,60	56,3	15,5	39,7	1,85	0,77	0,28	0,92
<b>Promedio:</b>		<b>35,61</b>				<b>2,41</b>	<b>0,96</b>	<b>0,31</b>	<b>1</b>

Los veintidós hidrogramas analizados cubren una gama de caudales que varían de 5,97 a 28,8m<sup>3</sup>/s, registrados entre los años 1970 a 2003 y caudal promedio de 35,61m<sup>3</sup>/s, exceptuando el hidrograma de la creciente extraordinaria del año 1986, cuyo caudal pico fue 424,35m<sup>3</sup>/s. Por tanto, se analizaron situaciones hidrológicas en estiaje, en periodos medios - bajos y una en creciente extraordinaria.

Los valores del coeficiente  $C_t$  variaron en un rango de 1,17 a 4,54, con promedio de 2,41 y el coeficiente de ajuste de pico  $C_p$  tomó valores entre 0,11 y 0,62, con un valor medio de 0,31.

## CONCLUSIONES

Han sido explorados los coeficientes  $C_t$  y  $C_p$  para veintidós eventos aforados, en una cuenca rural de llanura y baja energía de relieve como la del río Tapenagá, en la sección correspondiente a la Ruta Nacional n°11, en la llanura chaqueña.



Los valores de caudales con los que se ha trabajado se han ubicado en el estrato medio-bajos a bajos, en el rango de 5 a 30m<sup>3</sup>/s, y sólo se dispuso de un caudal máximo extremo ajustado, de 424,3m<sup>3</sup>/s.

Los resultados de C<sub>p</sub> obtenidos mostraron un buen ajuste con los proporcionados por otros investigadores en la bibliografía de referencia.

Los valores de C<sub>t</sub> obtenidos son ligeramente superiores al promedio de los calculados en otras áreas con mayor su rango de variabilidad.

Este último aspecto se interpreta condicionado por la morfología propia de cuencas de llanura, que tienen mayor capacidad de almacenamiento y menores pendientes.

La variabilidad hallada en los resultados de ambos coeficientes podría estar influenciada por la estructura de la red de drenaje de la cuenca baja, donde se combina un cauce bien definido con áreas de esteros y bañados de aporte lateral cuya respuesta queda demorada en el tiempo y relacionada con la capacidad de transporte del cauce.

## BIBLIOGRAFÍA

- Administración Provincial del Agua (APA) de la provincia del Chaco.** Anales varios. Datos de aforos de la cuenca del río Tapenagá de diversos años. Resistencia, Chaco, Argentina.
- Chow, Ven te.** 1994. Hidrología aplicada. McGraw-Hill Interamericana SA, editora: Martha Edna Suárez. Bogotá, Colombia.
- Fertonani, Prendes.** 1984. Anales del 14 Congreso Nacional del Agua. Company. Olavarría, Argentina. Pág. 203 a 207.
- Linsley, Kholer y Paulus.** 1958. Hydrology for engineers. McGraw-Hill Book Company, Inc., USA; pág. 200 a 202.
- Maidment, D.** 1993. Handbook of hydrology. Ed. McGraw-Hill, EEUU.
- Orsolini, Zimmerman y Basile.** 2000. Hidrología – procesos y métodos. UNR Editora. Rosario, Santa Fé, Argentina.
- Ponce, V.** 1989. Enginnering hydrology, principles and practices. Ed. Prentice Hall. New Jersey, EEUU.
- Ramos, F. et al.** 1973. Engenharia hidrológica. ABRH, Editora UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil.
- Ruberto, A. et al.** 2010. Estudio exploratório de la rugosidad en un río de llanura. Estudio de caso: río Tapenagá, provincias de Chaco y Santa Fé. Anales del I Congreso internacional de hidrología de llanuras. Azul, Buenos Aires, Argentina.
- SUPCE-AFIN.** 1998. Plan de manejo pluvial del sector sur del área metropolitana del gran Resistencia. Resistencia, Chaco. Argentina.
- Tucci, CEM (organizador).** 1997. Hidrología. ciência e aplicação. ABRH, Editora da univerdidade UFRGS. Porto Alegre, Brasil.
- Valiente, M.** 2004. Evaluación de áreas de riesgo. Proyecto de saneamiento hídrico y desarrollo productivo de la línea Tapenagá, Ministerio de Producción – EP – Tapenagá, Chaco.