

DETERMINACIÓN DE CURVAS ENVOLVENTES DE CAUDALES MÁXIMOS OBSERVADOS Y ESPERADOS PARA LA REPÚBLICA ARGENTINA

• Graciela Viviana Zucarelli • Rosana del Carmen Hammerly •
Universidad Nacional del Litoral, Argentina

Resumen

Los caudales máximos registrados y esperados pueden relacionarse con el área de la cuenca de aporte. La curva que cubre todos los puntos de esta gráfica se denomina “envolvente de caudales máximos”. La envolvente de caudales máximos observados no está asociada con probabilidades o periodos de retorno, su visualización permite una apreciación de la magnitud máxima de los caudales ocurridos en la región de estudio. Sin embargo, la envolvente de caudales máximos esperados corresponde a valores asociados con determinados periodos de retorno. En este trabajo se presentan las envolventes de caudales máximos observados y las envolventes de caudales máximos esperados para 124 cuencas de la República Argentina. Las curvas han sido obtenidas sobre la base de informaciones actualizadas hasta el año 2003, pertenecientes a la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación. La metodología aplicada es la propuesta por Creager, Francou y Rodier, y una curva de tipo exponencial. Con base en los resultados obtenidos, se determinó un coeficiente de Francou y Rodier, perteneciente al sistema del río Uruguay, que se encuentra entre los cincuenta coeficientes máximos registrados en el mundo.

Palabras clave: regiones hidrológicas, distribuciones de probabilidad, Argentina, cuencas.

Introducción

El comportamiento de los caudales máximos se observa en una gráfica que relaciona esta variable con el área de la cuenca. La curva que cubre todos los puntos de esta gráfica se denomina “envolvente de caudales máximos”. La envolvente no está asociada con probabilidades o periodos de retorno, pero su visualización permite una apreciación de la magnitud máxima de los caudales esperados en la región de estudio.

Si bien el valor proporcionado por esta curva no es válido para el diseño de obras hidráulicas, puede resultar útil para el análisis potencial del escurrimiento en una cuenca y para la estimación de caudales en zonas donde se carece de información hidrométrica.

En este trabajo se presentan las envolventes de caudales máximos observados y las envol-

ventes de caudales máximos esperados para 124 cuencas de la República Argentina. Las curvas han sido obtenidas sobre la base de informaciones actualizadas hasta el año 2003, pertenecientes a EVARSA (2003). La metodología aplicada es la propuesta por Creager *et al.* (1945), y Francou y Rodier (1967) y una curva exponencial.

Metodología

La ecuación general de envolvente de caudales en las cuencas hidrográficas tiene la siguiente expresión:

$$q = \alpha \cdot A^\beta \quad (1)$$

donde Q es el caudal máximo en m^3/s ; A , el área de la cuenca en km^2 ; α y β , los parámetros que definen la curva envolvente. Creager *et al.* (1945), luego de reunir aproximadamente mil

caudales máximos instantáneos de magnitudes excepcionales observados en ríos de Estados Unidos y de otras partes del mundo, propusieron la siguiente expresión:

$$Q = 1.30 \cdot C_c \cdot \left(\frac{A}{2.59} \right)^{0.936 \cdot A^{-0.048}} \quad (2)$$

donde Q es el caudal máximo en m^3/s , A es el área de la cuenca en km^2 y C_c es el parámetro empírico que define la curva envolvente. Creager determinó un coeficiente mundial $C_c = 200$. Según cita Kaviski (1993), Francou y Rodier, en 1967, publicaron una fórmula envolvente de amplio uso en Europa y África, cuya expresión es la siguiente:

$$\frac{Q}{Q_o} = \left(\frac{A}{A_o} \right)^{1-K/10} \quad (3)$$

donde Q es el caudal máximo en m^3/s ; Q_o , una constante igual a $10^6 \text{ m}^3/\text{s}$; A , el área de la cuenca en km^2 ; A_o , una constante igual a 10^8 km^2 , y K es un coeficiente empírico conocido como coeficiente de Francou y Rodier. La ecuación (3) tiene la particularidad de que converge para el punto en que $A = 10^8 \text{ km}^2$ y $Q = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$, que corresponde, aproximadamente, al total de área drenada en la superficie de la tierra y el caudal medio anual de todos los ríos de la tierra. De la ecuación (3) se puede despejar el coeficiente K para un evento particular:

$$K = 10 \cdot \left[1 - \frac{\log Q - 6}{\log A - 8} \right] \quad (4)$$

Francou y Rodier consideraron al coeficiente K como un índice de crecidas que puede utilizarse para comparar caudales máximos. De acuerdo con Papp (2001), valores de K entre 6 y 7 indican eventos extremos en una escala global, y que ocurren en climas tropicales o ecuatoriales, mientras que valores de K inferiores a 4 corresponden a climas

continentales. Para la elección de una ley que refleje el comportamiento general de la variable, se aplicó el programa *AFMULTI*. Realizado por un grupo de investigadores de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral, Argentina (Cacik y Paoli, 1997), este programa calcula los parámetros estadísticos (estimadores muestrales) con base en el método de los momentos de diferentes distribuciones estadísticas.

Resultados

La gran extensión latitudinal de la república Argentina y su densidad topográfica determina la existencia de varios tipos climáticos caracterizados por la gran variabilidad en la cantidad y distribución de las precipitaciones. Las precipitaciones definen una mayor densidad de los ríos en las zonas de alta precipitación, mientras que en el resto predominan los grandes ríos alóctonos, que tienen su fuente de alimentación en las reducidas áreas de precipitaciones orográficas (Centro Editor de América Latina, 1981). Los factores geomorfológicos y climáticos que definen las cuencas permiten caracterizar a la Argentina en dos grandes vertientes exorreicas: la vertiente del Atlántico, donde se destaca a la cuenca del río de La Plata, y la vertiente del Pacífico, de menor extensión, pero con grandes caudales y cursos muy activos. Existen, además, vastas áreas que integran cuencas endorreicas, tal como se observa en la figura 1.

Para este trabajo se analizaron los registros de caudales de 124 cuencas pertenecientes a 12 sistemas hídricos de la república Argentina, cuyas características principales se observan en el cuadro 1, junto con los coeficientes de Creager (C_c), y de Francou y Rodier (K).

El rango de áreas de los sistemas analizados oscila entre 4 650 y 2 346 000 km^2 ; mientras que el intervalo de caudales máximos va desde 682 a 60 215 m^3/s . Los parámetros de los diferentes métodos se obtuvieron por medio de un ajuste de curvas, logrando la curva envolvente más cercana a los valores observados y a los

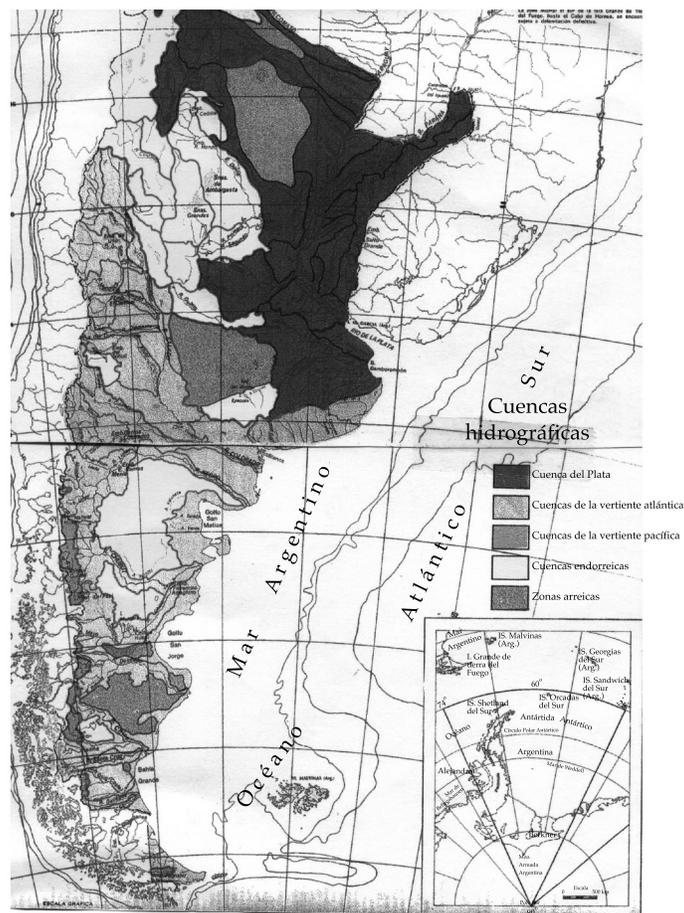


Figura 1. Cuencas hidrográficas de la República Argentina. Fuente: Centro Editor de América Latina (1981).

Cuadro 1. Características de los sistemas hídricos analizados y coeficientes de Creager, y Francou y Rodier.

Sistema	Área máxima (km ²)	Caudal máximo (m ³ /s)	Caudal específico máximo (L/s/km ²)	Cantidad de cuencas	Creager C _c	Francou y Rodier K
Río Paraná	2 346 000	60 215	69.92	31	93.31	5.29
Río Paraguay	1 100 000	13 320	140.10	9	44.03	4.59
Río Uruguay	189 000	50 371	59.76	8	139.29	5.80
Río Colorado	26 000	1 097	1 559	23	19.48	4.29
Río Negro	95 000	5 975	1 471	7	20.37	3.72
Río Chubut	31 681	694.7	3 6.72	14	4.87	3.00
Laguna Mar Chiquita	20 200	2 800	394.9	3	11.74	3.52
Río Santa Cruz y río Gallegos	15 550	2 520	291.6	6	11.53	3.54
Sistema Océano Pacífico	4 650	3 743	140.5	22	41.29	4.91
Sistema endorreico	14 000	682	75.36	1	25.19	4.52

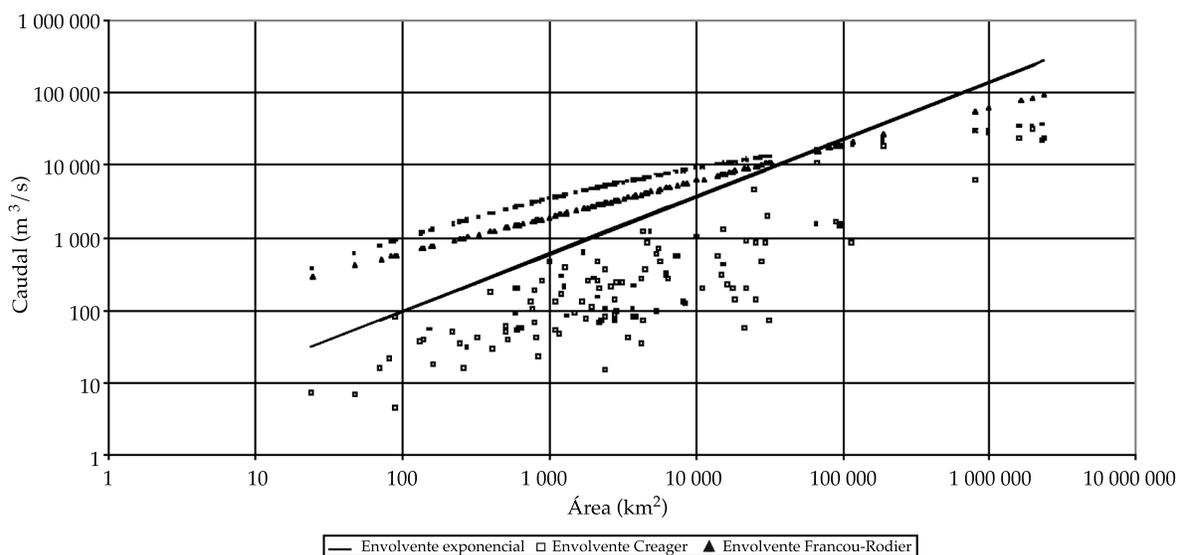


Figura 2. Curvas envolventes de caudales para $Tr = 2$ años.

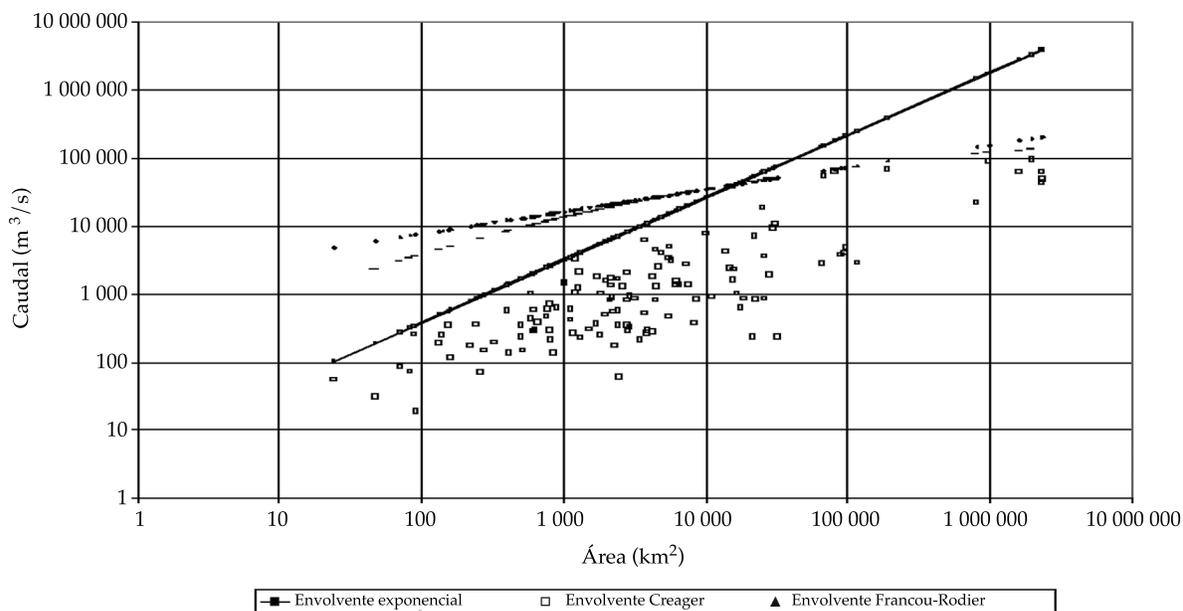


Figura 3. Curvas envolventes de caudales para $Tr = 1000$ años.

valores esperados. Las figuras 2 y 3 presentan las curvas envolventes de caudales máximos esperados para los métodos de Creager, y Francou y Rodier, y la envolvente exponencial

para los periodos de retorno de dos y mil años. Los parámetros de dichas envolventes para diferentes periodos de retorno se presentan en el cuadro 2.

Cuadro 2. Coeficientes de ajuste de las envolventes de caudales máximos esperados para diferentes periodos de retorno.

<i>Tr</i> (años)	α	β	C_c	K
2	2.56	0.79	49	5.01
5	2.49	0.87	73	5.50
10	3.40	0.84	91	5.82
50	3.47	0.91	124	6.20
100	3.50	0.92	151	6.37
200	5.00	0.90	155	6.44
1 000	5.60	0.92	187	6.73

Cuadro 3. Caudales máximos observados en el mundo. Envolvente de Francou y Rodier (fuente: adaptado de Ramírez-Orozco y Gómez-Martínez, 2005).

Orden	Río	País	Fuente	Área (km ²)	Caudal (m ³ /s)	Año	K
1	Amazona	Brasil	Rakhecha, 2001	4 640 000	370 000	-	6.76
2	Quaieme	Francia	IAHS, 1984	330	10 400	1981	6.38
3	Banquiao	China	ICOLD, 1994	762	13 000	1975	6.31
4	Amazonas, Obidos	Brasil	IAHS, 1984 ICOLD, 1994	4 620 000	320 000	1953	6.29
5	Shingu Oga	Japón	IAHS, 1984	2 350	19 025	1959	6.28
6	Narmada	India	IAHS, 1984	88 000	69 400	1994	6.24
7	Amazonas, Obidos	Brasil	ICOLD, 1994	4 620 000	313 000	1989	6.22
8	Cho Shui	Taiwán	IAHS, 1984	259	7 780	1979	6.22
9	Narmada	India	IAHS, 1984	88 000	69 400	1970	6.21
10	Machhu	India	IAHS, 1984 ICOLD, 1994	1 930	16 308	1979	6.21
11	Coyuca	México	Ramírez, 2004	1 533	13 623	1984	6.21
12	Tam Shui West	Taiwán	IAHS, 1984	2 110	16 700	1963	6.20
13	Nueces	Estados Unidos	IAHS, 1984	1 800	15 600	1959	6.19
14	La Parada	México	Ramírez, 2004	1 533	14 253	1986	6.17
15	Cihuatlán	México	Ramírez, 2004	1 370	13 500	1959	6.16
16	Yate	Francia	ICOLD, 1994	4.36	8 680	1988	6.15
17	Pecos	Estados Unidos	IAHS, 1984	9 100	26 800	1954	6.12
18	Nyodo Ino	Japón	IAHS, 1984	1 560	13 510	1963	6.10
19	Shimantan	China	ICOLD, 1994	230	6 280	1975	6.09
20	Teodong Gang	Corea del Norte	IAHS, 1984	12 175	29 000	1967	6.07
21	Han Koan	Corea del Sur	IAHS, 1984	23 880	37 000	1925	6.05
22	Narmada	India	ICOLD, 1994	88 000	61 229	1973	6.03
23	Chungju	Corea	IAHS, 1984	6 648	21 899	1990	6.03
24	Hualien	Taiwán	IAHS, 1984	1 500	11 900	1973	6.01
25	Cagayan	Filipinas	Rakhecha, 2001	4 244	17 550	-	5.98
26	Misantla	México	Ramírez, 2004	456	6 860	1995	5.95
27	Badiraguato	México	Ramírez, 2004	1 018	9 245	1981	5.93

Cuadro 3 (continuación). Caudales máximos observados en el mundo. Envolvente de Francou y Rodier (fuente: adaptado de Ramírez-Orozco y Gómez-Martínez, 2005).

Orden	Río	País	Fuente	Área (km ²)	Caudal (m ³ /s)	Año	K
28	Eel	Estados Unidos	Rakhecha, 2001	8 060	21 300	-	5.92
29	Kiso	Japón	Rakhecha, 2001	1 680	11 150	-	5.91
30	Quinne	Francia	Rakhecha, 2001	143	4 000	-	5.90
31	Pedernales	Estados Unidos	Rakhecha, 2001	2 450	12 500	-	5.87
32	Tone	Japón	Rakhecha, 2001	5 110	16 900	-	5.87
33	Nueces	Estados Unidos	Rakhecha, 2001	5 504	17 400	-	5.87
34	Hanjang	China	Rakhecha, 2001	41 400	40 000	-	5.87
35	Daeryong Gang	Corea del Norte	Rakhecha, 2001	3 020	18 500	-	5.86
36	San Bartola	México	Rakhecha, 2001	81	3 000	-	5.86
37	Yoshino	Japón	Rakhecha, 2001	3 750	14 470	-	5.84
38	Pioneer	Australia	Rakhecha, 2001	1 490	9 840	-	5.84
39	Little Nemaha	Estados Unidos	Rakhecha, 2001	549	6 370	-	5.83
40	SF Wailua	Estados Unidos	Rakhecha, 2001	58	2 470	-	5.82
41	Yate	Francia	Rakhecha, 2001	435	5 700	-	5.81
42	Uruguay	Argentina	Zucarelli	80 000	50 371	1983	5.80
43	Betsiboka	Madagascar	Rakhecha, 2001	11 800	22 000	-	5.78
44	Midfork	Estados Unidos	Rakhecha, 2001	1 360	8 780	-	5.77
45	Haast	Nueva Zelanda	Rakhecha, 2001	1 020	7 690	-	5.76
46	Coahuayana	México	Ramírez, 2004	6 835	17 000	1959	5.76
47	Jhelum	Paquistán	Rakhecha, 2001	29 000	31 100	-	5.74
48	Mangoky	Madagascar	Rakhecha, 2001	50 000	38 000	-	5.70
49	Papenoo	Francia	Rakhecha, 2001	78	2 200	-	5.65
50	Buey	Cuba	Rakhecha, 2001	73	2 060	-	5.62

Para ambas metodologías, los valores máximos de las envolventes corresponden al río Uruguay.

Los caudales máximos en el mundo

El cuadro 3 presenta un listado de los caudales máximos registrados en el mundo, recopilados en el trabajo de Ramírez-Orozco y Gómez-Martínez, 2005. Se han incorporado en la misma el río Uruguay en El Soberbio (Misiones, Argentina), con un caudal de 50 371 m³/s, en un área de 80 000 km², con un coeficiente K de 5.80,

lo que lo ubica entre los cincuenta coeficientes máximos en el mundo.

Conclusiones

La aplicación de las metodologías propuestas por Creager, y por Francou y Rodier permitió el trazado de las envolventes de caudales máximos registrados y esperados. Se determinó un coeficiente de Francou y Rodier que se ubica entre los cincuenta máximos del mundo y que corresponde a la cuenca del río Uruguay.

Las curvas envolventes de caudales máximos observados fueron determinadas con datos de eventos que han sido registrados, por lo tanto es probable que en el futuro ocurran caudales similares. Por su parte, las curvas envolventes de caudales esperados están asociadas con un periodo de recurrencia y pueden ser útiles para realizar un diseño preliminar de obras hidráulicas.

Recibido: 30/08/10

Aceptado: 28/05/12

Referencias

- CACIK, P. and PAOLI, C. *Modelo AFMULTI*. Santa Fe, Argentina: Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral (FICH-UNL), 1997.
- CENTRO EDITOR DE AMÉRICA LATINA. *Atlas físico de la República Argentina*. Vol. 1. Buenos Aires: Centro Editor de América Latina, 1981.
- CREAGER, W.P., JUSTIN, J.D., and HINDS, J. *Engineering for Dams*. Vol. I. New York: John Wiley, 1945.
- EVARSA. *Estadística hidrológica*. Tomos I y II. Buenos Aires: Presidencia de la Nación, Secretaría de Recursos Naturales y Desarrollo Sustentable, Evaluación del Recursos S.A., 2003.
- FRANCOU, J. et RODIER, J.A. Essai de classification des crues maximales observees dans le monde. In: *Cah. ORSTOM. ser. Hydrol.* Vol. IV, No. 3, 1967, pp. 223-233.
- KAVISKI, E. *Uso de técnicas empíricas en regionalización hidrológica*. X Simposio Brasileiro de Recursos Hídricos, I Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur, noviembre de 1993, Gramado RS, Brasil, 1993, pp. 443-452.
- PAPP, F. Extremeness of extreme floods. The extreme of the extremes. Extraordinary floods. *IAHS Publication*. No. 271, 2001, pp. 167-172.
- RAMÍREZ-OROZCO, A. y GÓMEZ-MARTÍNEZ, J. Actualización de las envolventes regionales de gastos máximos para la república mexicana. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XX, núm. 1, enero-marzo de 2005, pp. 99-108.

Abstract

ZUCARELLI, G.V. & HAMMERLY, R.C. *Determination of envelope curves for observed and expected maximum flow in the Republic of Argentina. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. IV, No. 1, January-March, 2013, pp. 187-194.*

Maximum recorded and expected flow can be related to the contributing area of a basin. The curve that covers all the points in this graph is called the "maximum flow envelope." The maximum flow envelopes observed are not associated with return probabilities or periods, and their imaging makes it possible to see the maximum magnitude of the flows occurring in the study region. Nevertheless, expected maximum flow envelopes correspond to values associated with specific return periods. This paper presents the maximum flow envelope curves for each of the 124 basins in the Republic of Argentina. The curves were obtained using data updated as of 2003 from the National Subsecretary of Water Resources. Creager and Francou-Rodier methodologies and an exponential curve are presented. Based on the results, a Francou-Rodier coefficient was determined for the Uruguay River system, which is among the 50 maximum coefficients recorded worldwide.

Keywords: hydrological regions, probability distributions, Argentina, basins.

Dirección institucional de las autoras

M.I. Graciela Viviana Zucarelli
Ing. Rosana del Carmen Hammerly

Universidad Nacional del Litoral
Departamento Hidrología
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas
Ciudad Universitaria
3000 Santa Fe, ARGENTINA
Teléfono: +342 4575 233, interno 167
zuca@fich1.unl.edu.ar
rhammer@fich1.unl.edu.ar