

## **REGIONALIZACIÓN PARAMÉTRICA DE CURVAS DE DURACIÓN DE CAUDALES**

**Patricia M. López, Jorge A. Maza, Victor H. Burgos, Adrián Vargas Aranibar,  
Luís A. Fornero, Jorge Bonilla**

Instituto Nacional del Agua - Centro Regional Andino  
Belgrano 210, M5500FIF Mendoza. Telefax: 0261-4288251. E-mail: [pmlopez@ina.gov.ar](mailto:pmlopez@ina.gov.ar)

### **RESUMEN**

Con el objeto de proveer al Gobierno de la Provincia de Catamarca de una herramienta para conocer la disponibilidad del recurso hídrico, se desarrolló una metodología paramétrica de regionalización que utiliza características morfológicas y climáticas para estimar Curvas de Duración de Caudales (CDC) en cuencas sin observaciones.

Actualmente, las provincias de Catamarca y La Rioja no cuentan con estaciones hidrométricas, sin embargo se realizaron observaciones en diferentes ríos en el período comprendido entre 1917 y 1984.

Del análisis de la información disponible se seleccionaron nueve cuencas y se estimaron CDC con series de caudales medios mensuales, con longitudes de registro entre 14 y 43 años. Las curvas se ajustaron a un modelo matemático cuyos parámetros fueron relacionados, por medio de modelos de regresión, con el área de la cuenca hasta la sección de aforo, la precipitación media anual y el índice de compacidad.

Si bien el número de estaciones hidrométricas empleado en este estudio es bajo, la verificación de la metodología, en las cuencas de los ríos Miranda y Durazno, demuestra un desempeño satisfactorio y la posibilidad de obtener curvas sintéticas en cuencas sin observaciones que verifiquen la condición de homogeneidad regional.

Se considera que la instalación de estaciones hidrométricas prevista por la Subsecretaría de Recursos Hídricos, enmarcada en el programa de Ampliación y Mejoramiento de la Red Hidrológica Nacional, proveerá información que podría utilizarse para realizar una nueva estimación de los modelos presentados en este estudio.

Palabras Claves: Curvas de Duración de Caudales; Regionalización; Cuencas sin observaciones.

## INTRODUCCIÓN

Para una cuenca la Curva de Duración de Caudales (CDC) representa la relación entre la magnitud y la frecuencia de caudales diarios, semanales, mensuales, etc. permitiendo realizar estimaciones del porcentaje de tiempo en el cual un caudal determinado es igualado o excedido en el período de registro.

La obtención de curvas empíricas es simple si se cuenta con observaciones, pero en muchas regiones las mediciones sistemáticas de caudales son escasas o inexistentes. La necesidad de realizar estimaciones en cuencas sin mediciones o de mejorar las estimaciones realizadas con registros de corta longitud originó el desarrollo de numerosos métodos de regionalización de CDC.

Quimpo et al. (1983) y Mimikou y Kaemaki (1985) proponen una metodología que se basa en representar las CDC a través de expresiones analíticas cuyos parámetros se relacionan con características morfológicas y climáticas de las cuencas mediante modelos regionales de regresión, permitiendo la determinación de las curvas en sitios sin observaciones.

Con el objeto de proveer al Gobierno de la Provincia de Catamarca de una herramienta operativa, la metodología anterior fue aplicada a la región comprendida por las provincias de Catamarca y La Rioja, que actualmente no cuenta con estaciones hidrométricas.

El propósito de este trabajo es presentar los modelos seleccionados y demostrar su desempeño en la estimación de curvas sintéticas en cuencas sin observaciones que verifiquen la condición de homogeneidad regional.

## REGIÓN ESTUDIADA Y DATOS UTILIZADOS

En la región comprendida por las provincias de Catamarca (C) y La Rioja (LR) se realizaron observaciones hidrométricas en diferentes períodos comprendidos entre 1917 y 1984.

Del análisis de la información disponible (Subsecretaría de Recursos Hídricos, 2004) se seleccionaron nueve cuencas para realizar la estimación de CDC con series de caudales medios mensuales (CMM). En la Tabla 1 se detallan las utilizadas en la: (a) estimación y (b) verificación de la metodología propuesta y en la Figura 1 se presenta el mapa de ubicación de las cuencas.

Tabla 1. Cuenas utilizadas en el estudio

	<b>Río</b>	<b>Sitio</b>	<b>Período de observación</b>
	Abaucán	Tinogasta (C)	1919/56
	Belén	Playa Larga (C)	1946/83
	Andalgalá	Andalgalá (C)	1920/60
	Chañarmuyo	Chañarmuyo (LR)	1967/81
(a)	Famatina	Famatina (LR)	1940/81
	Santa Maria	Pie de Médano (C)	1970/84
	Vinchina	Vinchina (LR)	1966/80
	Del Valle	Pomancillo (C)	1917/59
	Tala	La Reja (C)	1936/60
(b)	Miranda	Miranda (LR)	1967/80
	Durazno	Chilecito (LR)	1940/44-1952/81

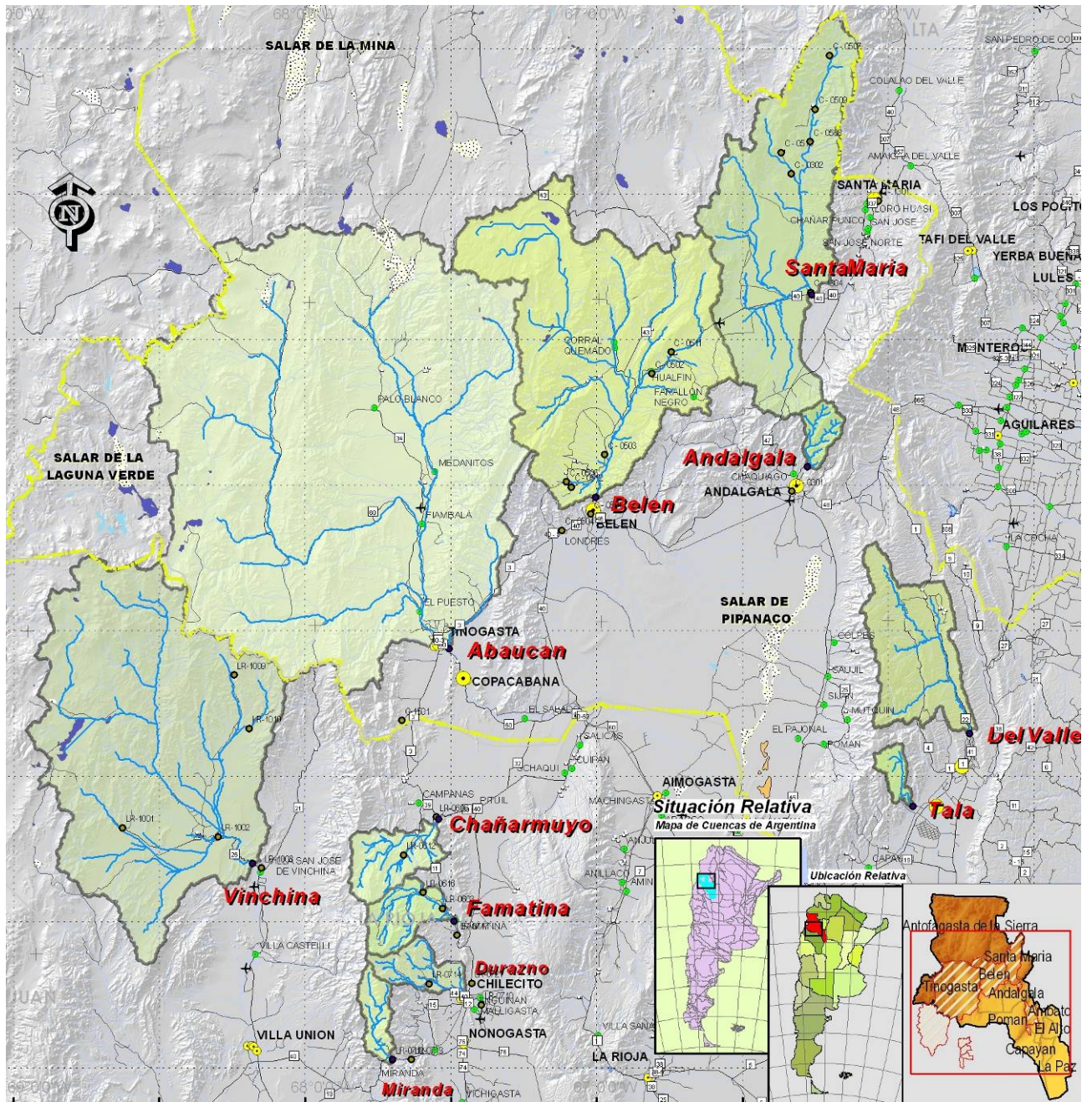


Figura 1. Mapa de cuencas utilizadas en el estudio

Las series empleadas poseen registros entre 14 y 43 años, las únicas sin datos faltantes son las de los ríos Famatina, Vinchina y Del Valle. Las décadas correspondientes a 1940 y 1970 son las que cuentan con un mayor número de estaciones con registros en la región.

Se analizaron las series de derrames anuales estandarizadas a fin de identificar valores atípicos, detectar tendencia y comprobar homogeneidad.

El diagrama de cajas se utilizó para la identificación de valores atípicos, encontrando como valores extremos altos los derrames del año hidrológico 1983/84 para el río Belén, 1922/23 para el río Andalgala y 1943/44 y 1944/45 para el río Famatina.

Si bien los valores atípicos influyen algunos estadísticos y la decisión de conservarlos o no en los análisis constituye un tema de discusión, en este estudio se adoptó el criterio de conservarlos dado que no había evidencia que justificara la remoción de los mismos.

Se empleó la prueba de Mann-Kendall (MK) para detectar tendencia (Westmacott y Burn, 1997; Yue et al., 2003; Birsan et al., 2005; Seoane et al., 2005). A fin de eliminar el efecto de la correlación serial en la aplicación de esta prueba se utilizó un procedimiento de pre-blanqueo propuesto por Yue et al. (2002), denominado trend-free pre-whitening (TFPW), ya que resulta ser más potente que la prueba MK modificada por Hamed y Rao (1998) para coeficientes de autocorrelación positivos.

Se detectó tendencia, estadísticamente significativa al 5%, positiva en las series de los ríos Belén y Vinchina y negativa en Andalgala y Del Valle. Estos resultados concuerdan con los del estudio regional de precipitaciones anuales realizado por Minetti et al. (2003).

La prueba de Mann-Whitney fue utilizada para estudiar la homogeneidad de las series estandarizadas y en todos los casos se acepta la hipótesis nula, que las muestras provienen de la misma población, con un nivel de significación del 5%.

## SELECCIÓN DEL MODELO PARA REPRESENTAR LAS CDC

Se seleccionaron tres modelos (Quimpo et al., 1983; Mimikou y Kaemaki, 1985) para la representación de las CDC, estimadas con series de CMM, en las nueve primeras cuencas presentadas en la Tabla 1. Los modelos fueron:

$$Q = a e^{-bD} \quad (1)$$

$$Q = a D^{-b} \quad (2)$$

$$Q = a - b \ln(D) \quad (3)$$

donde:  $Q$  representa el caudal en  $m^3/s$ ;  $D$  el porcentaje del tiempo en el que el caudal es igualado o excedido durante el período de registro;  $a$  y  $b$  son constantes positivas y constituyen los parámetros del modelo de la CDC.

Para cada serie se analizaron 24 pares de valores  $(Q,D)$ , en un rango de excedencias comprendido entre el 4% y 96%. Los pares fueron obtenidos calculando los percentiles de las series de CMM y los parámetros de los modelos propuestos fueron estimados mediante el método de mínimos cuadrados.

Para todas las estaciones analizadas el modelo de la ecuación (2) cumplió con la condición de presentar la menor suma de cuadrados de los residuos y en consecuencia fue seleccionado para representar las características de la CDC de las cuencas de la región. En la Figura 2 se presentan ejemplos de los ajustes obtenidos.



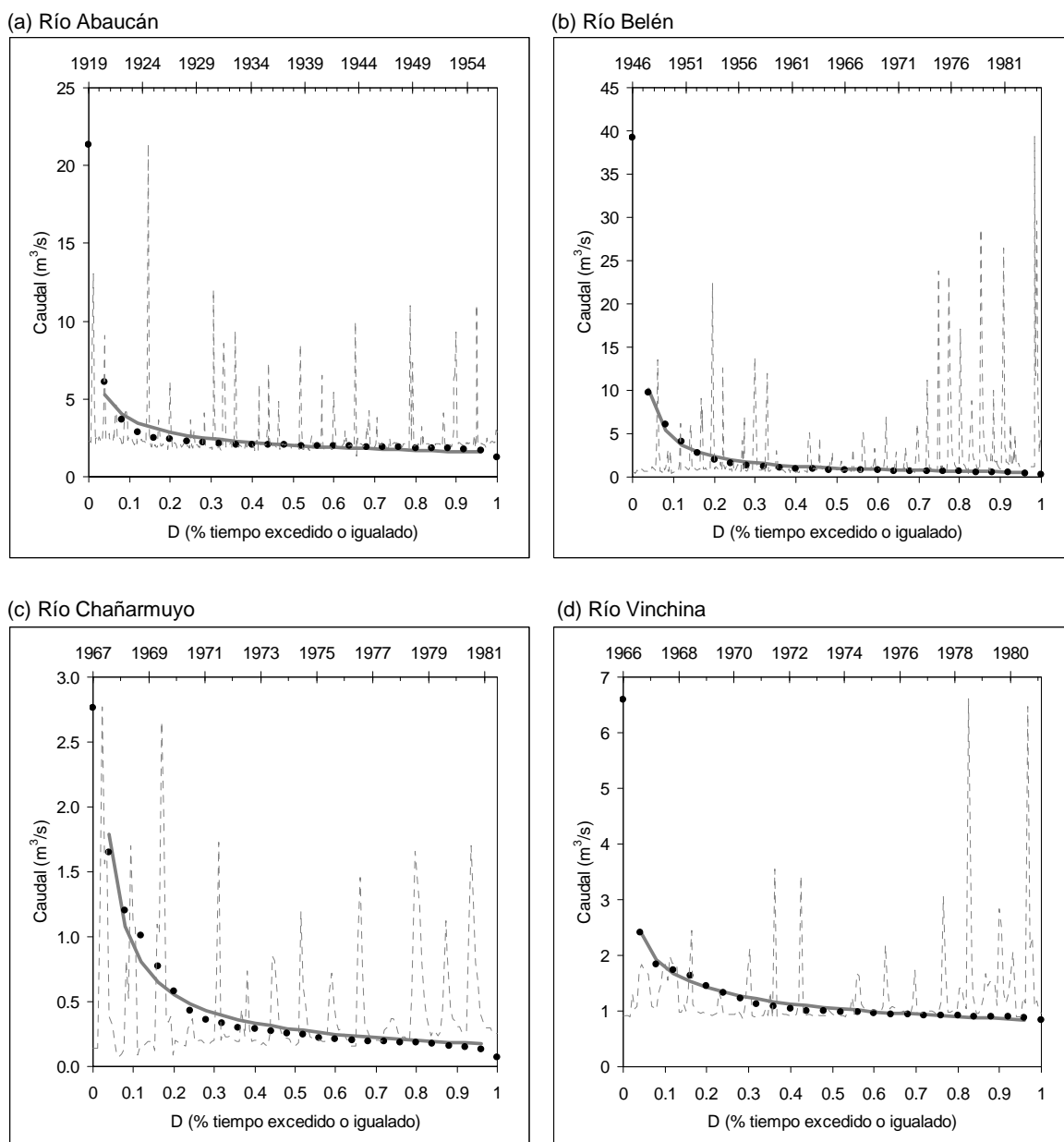


Figura 2. Serie de CMM (línea cortada), CDC observaciones (puntos) y CDC modelo (línea continua)

## MODELOS REGIONALES DE REGRESIÓN

Las características climáticas y morfológicas seleccionadas a fin de estimar los parámetros  $a$  y  $b$  del modelo representado por la ecuación (2) fueron: precipitación media anual (PMA), área de la cuenca hasta la sección de aforo (AREA), diferencia de cota máxima y mínima (DH), longitud cauce más largo (L), pendiente (PEND), perímetro (PRIM), índice de compacidad (IC) y la relación área/longitud del cauce más largo (A/L).

### Estimación de características climáticas y morfológicas

La información pluviométrica examinada se caracterizó por la baja densidad de estaciones, la disparidad de los períodos de registro y sus interrupciones.

Se analizaron precipitaciones mensuales obtenidas del extracto de los datos publicados en estudios ambientales específicos generados por la Secretaría de Minería de la Nación, en el marco del Programa de Asistencia Técnica para el Desarrollo del Sector Minero Argentino (<<http://www.mineria.gov.ar/estudios/inicioIRN.asp>>).

En las cuencas de los ríos Del Valle y Tala se utilizaron series suministradas por la Dirección de Hidrología y Evaluación de Recursos Hídricos de la Provincia de Catamarca correspondientes a un período de observación de precipitaciones más reciente, que no concuerda con el de observación de caudales.

Las series fueron procesadas según el año hidrológico (septiembre-agosto), a fin de obtener valores totales anuales. La baja densidad de estaciones por cuenca no permitió la construcción de mapas de isoyetas, en consecuencia la PMA se calculó como promedio de los valores medios observados.

A partir del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) se generaron distintos mapas derivados mediante el geoprocésamiento y el análisis espacial con el objetivo de determinar, para cada cuenca estudiada, el área de aporte y cuantificar sus características morfológicas.

Los valores de las variables explicativas y de los parámetros se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores variables explicativas y parámetros

Cuenca	AREA (km <sup>2</sup> )	DH (m)	L (km)	PEND (m/m)	PRIM (km)	IC	A/L (km)	PMA (mm)	Parámetros CDC	
									<i>a</i>	<i>b</i>
Abaucán	15945.5	4532.3	271.0	0.017	891.5	1.977	58.8	246.7	1.555	0.380
Belén	5961.3	3640.7	172.2	0.021	625.3	2.268	34.6	322.8	0.542	0.910
Andalgalá	220.1	4062.6	29.8	0.136	86.2	1.627	7.4	256.1	0.502	0.425
Chañarmuyo	573.0	3395.1	53.6	0.063	167.8	1.962	10.7	281.0	0.172	0.728
Famatina	465.3	4347.8	51.0	0.085	130.7	1.696	9.1	170.1	0.500	0.339
Santa María	4112.6	3128.0	117.2	0.027	525.8	2.296	35.1	234.9	0.743	0.839
Vinchina	7709.8	4734.5	177.5	0.027	635.4	2.026	43.4	124.5	0.836	0.330
Del Valle	1493.4	1948.6	96.9	0.020	289.8	2.100	15.4	569.4	1.502	0.813
Tala	151.4	3606.1	35.6	0.101	86.7	1.973	4.3	550.4	0.170	0.692

La matriz de coeficientes de correlación (Tabla 3) se empleó para seleccionar el conjunto de variables explicativas que mejor representan la relación con los parámetros *a* y *b*.

Previsiblemente, la matriz muestra una alta asociación entre las características morfológicas. El alto coeficiente de correlación entre DH y PMA demuestra que la variación de la variable climática con la diferencia de altitudes de las cuencas es importante y su signo indica que la relación es inversa. Esta situación, observada en regiones montañosas tropicales y subtropicales, es descrita en la bibliografía (Barry y Chorley, 1985) y en estudios regionales (<<http://www.mineria.gov.ar/estudios/inicioIRN.asp>>).

Tabla 3. Matriz de coeficientes de correlación

	AREA	DH	L	PEND	PRIM	IC	A/L	PMA	<i>a</i>	<i>b</i>
AREA	1.000									
DH	0.130	1.000								
L	0.989	0.092	1.000							
PEND	-0.915	0.254	-0.940	1.000						
PRIM	0.995	0.068	0.988	-0.936	1.000					
IC	0.610	-0.410	0.638	-0.760	0.687	1.000				
A/L	0.992	0.161	0.961	-0.878	0.983	0.576	1.000			
PMA	-0.365	-0.722	-0.276	0.020	-0.305	0.239	-0.435	1.000		
<i>a</i>	0.703	-0.156	0.691	-0.723	0.672	0.213	0.701	-0.175	1.000	
<i>b</i>	-0.057	-0.728	-0.029	-0.223	0.034	0.683	-0.081	0.702	-0.230	1.000

Se probaron diferentes combinaciones de variables explicativas evitando incluir simultáneamente aquellas que estuvieran una correlación alta, seleccionándose los siguientes modelos:

$$\begin{aligned}
 a &= 0.04853 \text{ AREA}^{0.3352} & (R^2 = 0.422) \\
 b &= 0.00943 \text{ IC}^{1.9827} \text{ PMA}^{0.4868} & (R^2 = 0.698)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Si bien los modelos anteriores proporcionaron un mayor coeficiente de determinación ( $R^2$ ) con parámetros significativos al 95%, se observa que los valores son modestos.

### VERIFICACIÓN DE LOS MODELOS REGIONALES

Con el propósito de verificar el desempeño de los modelos regionales, se estimaron las CDC sintéticas ( $\hat{q}$ ) en las cuencas de los ríos Miranda y Durazno (Tabla 1) y se compararon con las curvas estimadas ( $q$ ) con series de CMM. El ajuste se evaluó con la raíz cuadrada del % de error cuadrático medio ( $e$ ). Estos valores y los de las variables utilizadas en los modelos regionales se muestran en la Tabla 4, mientras que en la Figura 3 se presentan las curvas estimadas.

Tabla 4. Valores estimación y ajuste

Río	Variables explicativas			Medida ajuste
	AREA (km <sup>2</sup> )	IC	PMA (mm)	<i>e</i> (%)
Miranda	270.7	2.034	256.7	38
Durazno	374.5	1.945	283.9	12

$$e = \sqrt{\frac{[(\hat{q}-q)/q]^2}{N}}$$

Si bien los resultados (Tabla 4 y Figura 3) muestran que los modelos regionales presentan un mejor ajuste para la cuenca del río Durazno, se considera, teniendo en cuenta la baja densidad de estaciones hidrométricas y pluviométricas utilizadas en su determinación, que el desempeño general

de los mismos es satisfactorio. Por lo tanto podrían ser usados en la estimación de CDC en cuencas sin observaciones que verifiquen homogeneidad.

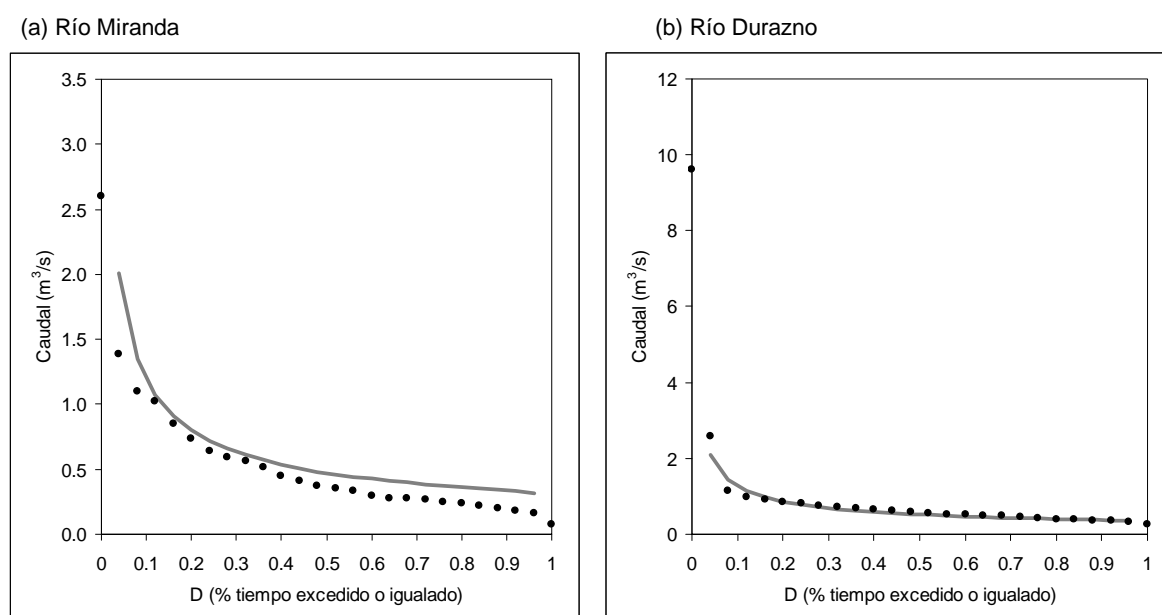


Figura 3. CDC estimada con observaciones (puntos) y modelo (línea continua)

## CONCLUSIONES

Se desarrolló una metodología paramétrica regional para la estimación de CDC sintéticas en sitios sin observaciones, cuyo objetivo fue proveer al Gobierno de la Provincia de Catamarca de una herramienta operativa.

Actualmente, la región comprendida por las provincias de Catamarca y La Rioja no cuenta con estaciones hidrométricas, sin embargo existen observaciones en diferentes ríos en el período comprendido entre 1917 y 1984.

El análisis de series de caudales medios mensuales observadas en nueve cuencas permitió seleccionar el modelo matemático que mejor describe las CDC de la región. Los parámetros de este modelo se relacionaron con características morfológicas y climáticas de las cuencas mediante modelos regionales de regresión.

La variable climática utilizada, precipitación media anual, fue estimada con la información pluviométrica disponible, caracterizada por la baja densidad de estaciones, la disparidad de los períodos de registro y sus interrupciones. El número de estaciones hidrométricas empleado en este estudio es bajo y esta situación condicionó la estructura de los modelos de regresión, que fueron diseñados de forma tal de emplear el menor número posible de variables explicativas para evitar una pérdida excesiva de grados de libertad.

Pese a las dificultades mencionadas, la evaluación del desempeño de los modelos regionales de regresión muestra que pueden ser aplicados para obtener curvas sintéticas en cuencas sin observaciones que verifiquen la homogeneidad regional.



La instalación de estaciones hidrométricas en la región, prevista por la Subsecretaría de Recursos Hídricos en el programa de Ampliación y Mejoramiento de la Red Hidrológica Nacional, proveerá información que podrá utilizarse para realizar una nueva estimación de los modelos presentados a fin de mejorar su desempeño.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Dirección de Hidrología y Evaluación de Recursos Hídricos de la Provincia de Catamarca por el suministro de información para la realización de este trabajo y por permitir la difusión de sus resultados.

## BIBLIOGRAFÍA

- Barry, R. G. y R. J. Chorley** (1985) *Atmósfera, tiempo y clima*. Ediciones Omega S.A. Barcelona.
- Birsan, M. V.; P. Molnar; P. Burlando y M. Pfaundler** (2005) “*Streamflow Trends in Switzerland*”. *Journal of Hydrology*. Vol. 314, pp. 312-329.
- Hamed, K. H. y A. R. Rao** (1998) “*A modified Mann-Kendall Trend Test for Autocorrelated Data*”. *Journal of Hydrology*. Vol. 204, pp. 182-196.
- Mimikou M. y S. Kaemaki** (1985) “*Regionalization of Flow Duration Characteristics*”. *Journal of Hydrology*. Vol. 82, pp. 77-91.
- Minetti, J. L.; W. M. Vargas; A. G. Poblete; L. R. Acuña y G. Casagrande** (2003) “*Non-linear Trends and Low Frequency Oscillations in Annual Precipitation over Argentina and Chile, 1931-1999*”. *Atmósfera*. Vol. 16, pp. 119-135.
- Quimpo, R. G.; A. A. Alejandrino y T. A. McNally** (1983) “*Regionalised Flow Duration Curves for Philippines*”. *Journal of Water Resources Planning and Management ASCE*. Vol. 109, N° 4, pp. 320-330.
- Secretaría de Minería de la Nación**. *Inventario de Recursos Naturales* [en línea]. Disponible en: <<http://www.mineria.gov.ar/estudios/inicioIRN.asp>>. [Consulta: 27-08-2009].
- Seoane, R. S.; P. M. López; M. C. Moyano; N. Tomazin y M. E. Koutsovitis** (2005) “*Análisis estadístico de series hidrológicas en la cuenca del río Limay (Argentina)*”. Libro de Resúmenes del XX Congreso Nacional del Agua y III Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur (ISBN 987-22143-0-1), pp. 334 y en CD (ISBN 987-22143-0-1)
- Subsecretaría de Recursos Hídricos** (2004) “*Estadística Hidrológica de la República Argentina. Edición 2004*” [CD-ROM]. ISBN 987-98869-3-3.
- Westmacott, J. R. y D. H. Burn** (1997) “*Climate changes Effects on the Hydrologic Regime within the Churchill-Nelson River Basin*”. *Journal of Hydrology*. Vol. 202, pp. 263-279.
- Yue, S.; P. Pilon; B. Phinney y G. Cavadias** (2002) “*The Influence of Autocorrelation on the Ability to Detect Trend in Hydrological Series*”. *Hydrological Processes*. Vol. 16, pp. 1807-1829.
- Yue, S.; P. Pilon y B. Phinney** (2003) “*Canadian Streamflow Trend Detection: Impacts of Serial and Cross-correlation*”. *Hydrological Sciences Journal*. Vol. 48. N° 1, pp. 51-63.