

# GENERACIÓN DE CAUDALES PARA DISEÑO DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA

Marcelo Uriburu Quirno

Consultor Independiente, República Argentina.  
E-mail: marcelo\_uriburu@yahoo.com

## Introducción

Como parte del estudio del Pequeño Aprovechamiento Hidroeléctrico del Río Mojotoro, se realizó una generación de series sintéticas diarias de caudal en la sección de implantación de la obra, con el objeto de evaluar alternativas de configuración del proyecto y, para la alternativa seleccionada, estimar la energía anual media a generar por la central y el beneficio económico.

La generación sintética de series hidrológicas es una práctica aceptada para la planificación y gestión del agua. Dado que una secuencia de caudales observados tiene una probabilidad prácticamente nula de volver a ocurrir en el futuro y sabiendo que dicha secuencia representa una única muestra de entre todos los eventos posibles (es una y sólo una realización del proceso estocástico subyacente), es fácil comprender la importancia de la generación de caudales y otras variables hidrológicas en el diseño de obras hidráulicas. Las series de tiempo generadas preservan algunas propiedades estadísticas de los datos históricos y tienen la misma probabilidad de ocurrencia, permitiendo la simulación de varios escenarios posibles (Guimarães y Santos, 2011).

Dado que sólo hay disponibles registros de caudal medio mensual (y no diario) en la estación El Angosto en la zona de obra, previamente a la generación sintética fue necesario simular mediante modelación hidrológica conceptual, en función de precipitación y evapotranspiración potencial, una serie de caudales diarios de longitud coincidente con la de dichos forzantes (del orden de veinte años). Los parámetros del modelo sólo pudieron ser calibrados de forma tal que las medias mensuales de los hidrogramas diarios simulados presentaran un buen grado de acuerdo con respecto a los caudales medios mensuales observados, en los meses donde dicha comparación era posible por su coexistencia. Los caudales medios mensuales en la estación El Angosto (Código 0625) fueron tomados de la Base de Datos Hidrológica Integrada de la ex Subsecretaría de Recursos Hídricos (Argentina).

A continuación, se presenta una breve descripción de la cuenca del Río Mojotoro, la metodología empleada y su aplicación concreta a la cuenca de estudio, los resultados obtenidos, y las conclusiones extraídas.

## Descripción de la cuenca del Río Mojotoro

El Río Mojotoro, perteneciente a la cuenca del Río Bermejo, tiene sus nacientes en el Cordón de Lesser, al noroeste de la ciudad de Salta, capital de la provincia homónima (República Argentina). El Mojotoro y el Río Las Pavas dan lugar, en su confluencia, al Río Lavayén, importante tributario del San Francisco. El Mojotoro nace en cumbres de unos 5000 msnm, mientras que la sección de emplazamiento de la obra se encuentra próxima a la curva de nivel de 1100 msnm. Las fuertes pendientes resultantes implican una alta torrencialidad en el régimen del curso. El área de la cuenca en El Angosto es de unos 861km<sup>2</sup>. Las isoyetas anuales (COREBE, 2013) presentan un fuerte gradiente, con precipitaciones anuales crecientes de NO a SE, entre unos 300mm y 1300mm, crecientes hacia agua abajo y con una media areal en la cuenca de 1100mm.

El caudal módulo en la estación El Angosto es de 15.0m<sup>3</sup>/s, mientras el mínimo/máximo característico es de 2.36 /

58.13m<sup>3</sup>/s. El año hidrológico se extiende de septiembre a agosto, con el caudal medio mensual máximo en febrero (51.50m<sup>3</sup>/s). La temperatura media anual ronda los 12.5°C, con mínimos en invierno que en las nacientes llegan a -15°C y máximos en verano superiores a 30°C. La evapotranspiración potencial anual es de unos 1400mm. En la Figura 1 se presenta el límite de la cuenca sobre un modelo digital de elevación.

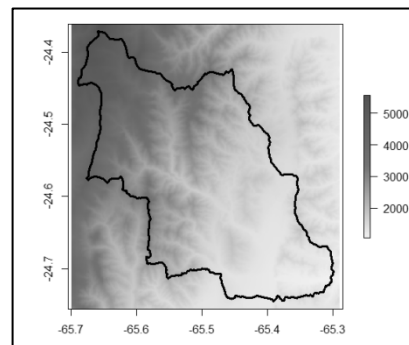


Figura 1.- Cuenca del Mojotoro sobre modelo digital de elevación.

## Metodología y resultados

La generación de secuencias de caudal diario se realizó en dos pasos:

1- Generación de una muestra independiente de caudales módulo anual (proporcional al derrame anual), de tantos valores como secuencias anuales se requieran, a partir de los módulos anuales observados, y preservando sus estadísticos (Guimarães y Santos, 2011).

2- Generación de secuencias anuales de caudal diario cuyo módulo, año a año, se corresponde con los de la muestra generada en el punto anterior, y tales que la relación entre el volumen diario y el anual de cada día del año respeta la proporción de alguna de las series diarias observadas más parecidas en cuanto a su módulo anual. El criterio de semejanza utilizado es el de K- vecinos más cercanos (Nowak et al., 2010).

### 1- Generación de caudales anuales

La muestra de caudales módulo anuales se obtiene mediante un modelo estocástico basado en la distribución log-normal de dos parámetros, combinada con la transformación de Wilson - Hilferty (1931), elegida para preservar la asimetría de los caudales históricos después de la transformación logarítmica de los datos.

### 2- Desagregación de caudales anuales a paso diario

Nowak et al. (2010) propusieron un enfoque estocástico no paramétrico para la desagregación de caudal anual a diario. Se trata de un método que simula directamente los valores diarios a partir de un único valor del caudal módulo anual (generado según el método del apartado anterior). Para ello, se escala el vector observado de proporciones diarias de volumen con respecto al volumen anual observado, tomado de uno de los K vecinos más cercanos entre los observados (es decir, uno de los años históricos), elegido aleatoriamente, con mayor peso el de más parecido volumen anual. El factor de escalamiento es el volumen anual generado (365 por caudal módulo anual generado).

El método siempre genera valores positivos y satisface que la suma de los volúmenes diarios desagregados automáticamente es

el volumen agregado (el anual). Los valores obtenidos tienen buena variabilidad, e incluyen caudales que exceden el rango de valores observados. Sin embargo, el principal inconveniente de esta técnica es el que habitualmente afecta a los esquemas de desagregación no paramétricos: la continuidad de caudal entre el final de un año y el comienzo de un año posterior. No obstante, esto no constituye un inconveniente mayor para el propósito aquí buscado.

#### Modelación hidrológica con GR4J

Dado que sólo hay disponibles registros de caudal medio mensual (y no diario) en la estación El Angosto, previamente a la aplicación del algoritmo descrito más arriba fue necesario simular, mediante modelación hidrológica conceptual y continua de la cuenca, una serie de caudales diarios. La misma se realizó con el conocido modelo GR4J (Perrin et al., 2003), forzado con series continuas diarias de precipitación y evapotranspiración potencial medias areales observadas. Por tanto, la serie diaria de caudales resulta de longitud coincidente con la de dichos forzantes. Como se dijo, los parámetros del GR4J fueron ajustados dentro de sus rangos de validez, como para que las medias mensuales de los hidrogramas diarios simulados presentaran un buen grado de acuerdo con respecto a los caudales medios mensuales observados, en los meses donde dicha comparación era posible por su coexistencia. Se alcanzó un acuerdo satisfactorio con un coeficiente de determinación  $R^2$  de 87% y una eficiencia de Nash-Sutcliffe de 85%, para el período 1942 – 1961, y un  $R^2$  de 73% para el período 1971 – 1985 (período en que no se evaluó Nash-Sutcliffe por la existencia de huecos de información observada). Dado el satisfactorio ajuste alcanzado por el modelo GR4J, se utilizaron sus resultados para la generación sintética de series diarias. En Figura 2 se grafica la curva de duración de los caudales medios mensuales observados contra la de los simulados.

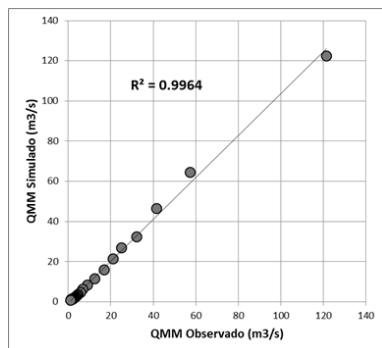


Figura 2.- Curvas de duración de caudal medio observado vs simulado.

#### Resultados de la generación

Dado que los 55 caudales módulo que se deducen de las series diarias simuladas mostraron un acuerdo muy satisfactorio con los 33 módulos observados, a partir de aquellos se generó un conjunto de unos 1000 caudales módulo anual, según el punto (1) de la metodología expuesta más arriba. Sus estadísticos se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1.- Estadísticos de los caudales módulo anual generados ( $m^3/s$ ).

Mín. Abs.	Mín. Caract.	Mediana	Media	Máx. Caract.	Máx. Abs.
0.82	5.02	13.52	14.26	25.20	40.85

A partir de los caudales anuales mencionados, se generaron unas 1000 series anuales de caudal diario, según el punto (2) de la metodología explicada más arriba. A modo de ejemplo, en la Figura 3 se grafican unos 20 años consecutivos de caudales diarios generados sintéticamente (las divisiones verticales

corresponden a un año cronológico).

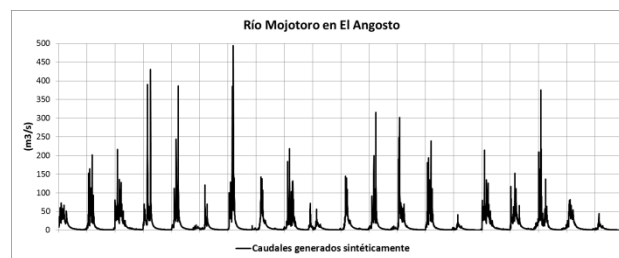


Figura 3.- Hidrograma de caudal diario generado en El Angosto.

#### Verificaciones

Se realizó sobre las series generadas un conjunto de verificaciones que permitieron validar su uso posterior:

- Independencia de caudales módulo anual generados, mediante la inspección de su función de autocorrelación.
- Acuerdo entre series diarias según cuantiles de frecuencia, consistente en la evaluación del coeficiente de determinación entre dos vectores, uno asociado a la serie modelada (GR4J) y el otro asociado a una serie simulada de igual longitud que la modelada. El rendimiento fue superior al 99.6% en todos los casos.
- Acuerdo visual entre curvas de duración de caudales diarios, de la serie modelada con GR4J, por un lado, y de dos secuencias de 50 años consecutivos cada una, tomadas de las 1000 series anuales generadas de caudal diario.

#### Conclusiones

Se presentaron los resultados de la generación sintética de series de caudal diario para su uso en la definición de la configuración del aprovechamiento y para el análisis de la producción hidroenergética. Se utilizaron técnicas probadas de generación y desagregación, se realizó la generación sintética de numerosas secuencias anuales de caudal diario, y se analizaron los resultados obtenidos. Para ello, primeramente fue necesario ajustar los parámetros del modelo hidrológico GR4J para obtener series diarias de caudal, dado que no se disponía de esa información en la base de datos oficial. Sobre las series anuales de caudal diario generadas, se efectuaron, además, verificaciones sobre independencia de los caudales módulo anual que de ellas se deducen, el acuerdo entre cuantiles de frecuencia, y el acuerdo entre curvas de duración de la serie diaria modelada y distintas series diarias generadas sintéticamente, de 50 años de longitud. En función del análisis anterior, puede concluirse que las series generadas cumplieron satisfactoriamente su propósito.

#### Referencias bibliográficas

- COREBE (2013) "Plan de Aprovechamiento Múltiple de los Recursos Hídricos de la Alta Cuenca del Río Bermejo en la República Argentina", Proyecto PNUD ARG/12/006, Argentina
- Guimarães, R. y Santos, E.G. (2011). "Principles of stochastic generation of hydrologic time series for reservoir planning and design: a case study". Journal of Hydrologic Engineering, 1, 237.
- Nowak, K., Prairie, J., Rajagopalan, B. y Lall U. (2010) "A nonparametric stochastic approach for multisite disaggregation of annual to daily streamflow", Water Resour. Res., 46, W08529, doi:10.1029/2009WR008530.
- Perrin, C., Michel, C., Andreassian, V. (2001). "Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchments model structures on 429 catchments". J. Hydrol. 242 (3-4), 275-301.
- Wilson, E.B. y Hilferty, M.M. (1931). Distribution of Chi-square. Proceedings National Academy of Science, 17, 648-688.