



Asociación de Universidades
GRUPO MONTEVIDEO



Integración de ensembles de pronósticos hidrológicos a las herramientas de operación del sistema eléctrico en Uruguay

De Vera A.^a, Flieller G.^b, Crisci M.^a, Terra R.^a, Chaer R.^b

^a *Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay, adevera@fing.edu.uy, mcrisci@fing.edu.uy, rterra@fing.edu.uy*

^b *Administración del Mercado Eléctrico, Uruguay, gflieller@adme.com.uy, rchaer@adme.com.uy*

RESUMEN: En el marco de la operación del sistema eléctrico uruguayo con énfasis en la generación a partir de recursos naturales renovables, es de relevancia la capacidad de prever con antelación los caudales de aporte para la generación hidráulica. En este trabajo se desarrolla una metodología para la generación y procesado de un ensemble de pronósticos de aportes hidrológicos a la represa de Rincón del Bonete, a partir de un ensemble de pronósticos de precipitación, que permita asimilarlo en las herramientas de operación, conjuntamente con los pronósticos de eólica y solar. Para generar los caudales de aporte se emplea un modelo hidrológico simple de paso diario (GR4J) combinado con un modelo de tránsito hidrológico (Muskingum). El ensemble de pronósticos de caudal se incorpora dentro del sintetizador de aportes del modelo de simulación del sistema eléctrico a través de los sesgos y una serie de atenuadores por paso de tiempo, ajustados por máxima verosimilitud. De los resultados preliminares obtenidos se desprende que, para la implementación del modelo en modo operativo, es crítica la asimilación de datos observados de precipitación y caudal en tiempo real.

PALABRAS CLAVE: ensemble de pronósticos, modelación hidrológica, previsión de caudales, procesos estocásticos, simulación del sistema eléctrico.

1 INTRODUCCIÓN

En el marco de la operación del Sistema Interconectado Nacional (SIN), con énfasis en la generación eléctrica a partir de recursos naturales renovables que lleva adelante Uruguay, la generación hidráulica mantiene una participación muy significativa (en el año 2017 cubrió el 58% de la generación total). Un factor clave para la toma de decisión en la programación de la generación de dicho sistema es la capacidad de prever con antelación los caudales de aporte a los embalses de las represas hidroeléctricas, contribuyendo así a optimizar el uso de cada fuente de energía del SIN, con el correspondiente beneficio económico y ambiental. Un caso particular, de relevancia estratégica para el país, es la posibilidad de exportar energía a los países vecinos (Argentina y Brasil), práctica que en los últimos años redundó en importantes beneficios económicos para Uruguay. La capacidad de ofertar bloques de energía exportables dentro de la programación semanal, pasa por la capacidad de poder predecir el comportamiento de los recursos (de generación renovables) en los siguientes días.

En este sentido, la experiencia contemporánea en varias regiones del mundo, incluyendo a Uruguay, indica que realizar previsiones hidrológicas operativas en base a predicciones numéricas de precipitación, permite la extensión del horizonte de pronóstico con resultados satisfactorios [1]. Asimismo, la técnica de simulaciones por ensembles, que busca representar la incertidumbre asociada a la evolución del flujo atmosférico a través de la realización de múltiples simulaciones empleando condiciones iniciales ligeramente perturbadas o diferentes modelos, permite

obtener una reducción del error en los pronósticos a la vez que brinda información sobre la incertidumbre a lo largo del horizonte de la previsión. Este valor agregado en la información, impacta directamente sobre los productos o herramientas que se pueden desarrollar y que asisten al proceso de toma de decisión de los diferentes usuarios del pronóstico [2].

Trabajos previos en Uruguay [3] se centraron en la incorporación de información climática asociada al fenómeno El Niño - Oscilación Sur (ENOS) en la simulación de los aportes hidrológicos dentro de los modelos para la gestión del sistema eléctrico, con el propósito de informar la planificación energética estacional (escala temporal de varias semanas a pocos meses).

El objetivo de este trabajo consiste en desarrollar una metodología para la generación y procesamiento de un ensemble de pronósticos de aportes a las represas hidroeléctricas, a partir de un ensemble de predicciones numéricas de precipitación, que permita asimilarlo en las herramientas de operación del SIN, conjuntamente con los pronósticos de eólica y solar. En particular, se presenta la implementación y los resultados preliminares obtenidos para la represa de Gabriel Terra (Rincón del Bonete), ver Figura 1a.

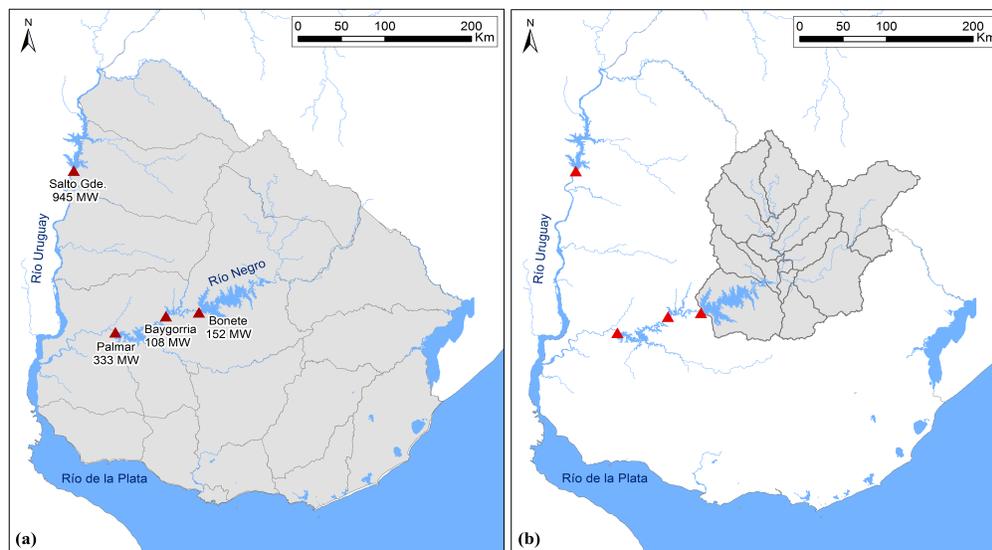


Figura 1. (a) Localización de las centrales hidroeléctricas con su respectiva potencia instalada. (b) Discretización en subcuencas considerada para la cuenca de aporte al embalse de Rincón del Bonete.

2 METODOLOGÍA

2.1 Información empleada

Como información de entrada al modelo hidrológico (Sección 2.2) se consideraron:

- * Ensemble de predicciones numéricas de precipitación a 14 días del modelo GEFS (Global Ensemble Forecast System del NCEP-NOAA), compuesto por la corrida de control más 20 miembros perturbados [4].

- * Boletín pluviométrico del Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET, <https://www.inumet.gub.uy/clima/recursos-hidricos/boletin-pluviometrico>), que consiste en un mapa de precipitación diaria para Uruguay. Este es el producto oficial y para su construcción (una vez al día) tiene en cuenta toda la información disponible en dicho momento. Actualmente está disponible en formato imagen, pero se espera que en el corto plazo se encuentre disponible en formato numérico y se pueda incorporar a la implementación del modelo en modo operativo (Sección 2.5).

- * Ciclo medio anual de evapotranspiración potencial (ETP), construido a partir de datos históricos registrados en las estaciones del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA).

Para representar la capacidad de almacenamiento de agua del suelo se elaboró el mapa de agua potencialmente disponible (AD) en los suelos de Uruguay, a partir de la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay, escala 1:1.000.000 [5].

Para la evaluación del modelo hidrológico, como referencia, se dispuso de la serie diaria de caudales de aporte teóricos al embalse de Rincón de Bonete brindada por la Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas (UTE). Los caudales de aportes teóricos se obtienen de forma indirecta, a partir de la medida de la variación de la cota del lago, los caudales turbinados y los caudales vertidos, siendo sensible al modelado del lago y al efecto del viento.

2.2 Modelación hidrológica

Para generar los aportes hidrológicos se empleó un modelo hidrológico simple de paso diario, denominado “GR4J” (Génie Rural à 4 paramètres Journalier) propuesto y mejorado por [6]. Consiste en un modelo diario concentrado, de cuatro parámetros (Tabla 1), basado en la cuantificación de la humedad del suelo. Dicho modelo no pretende ser una modelación hidrológica-hidrodinámica exhaustiva. Por el contrario, el objetivo es desarrollar una metodología general que sea lo suficientemente flexible y que en particular permita incorporar a futuro otras fuentes de pronóstico. Cabe destacar que el modelo hidrológico en sí es determinístico, pero, al ser alimentado con un conjunto de pronósticos de precipitación, se obtiene igual número de previsiones para los caudales.

La cuenca de aporte a la represa de Rincón del Bonete (39.500 km²) se discretizó en 17 subcuencas de área menor a 7000 km² (Figura 1b), en base al modelo digital del terreno de la NASA SRTM con una resolución de 90x90m, disponible en <http://srtm.csi.cgiar.org/index.asp>. El modelo hidrológico se implementa en cada una de estas subcuencas, a partir de los datos diarios de precipitación y evapotranspiración potencial disponibles. La precipitación media en cada subcuenca se obtiene a partir del método de los polígonos de Thiessen.

Una vez obtenidos los caudales diarios de aporte de cada subcuenca, los mismos se transitan a lo largo del cauce hasta los puntos de interés aguas abajo, mediante el método de Muskingum, método para el tránsito hidrológico en ríos que requiere de dos parámetros (Tabla 1).

En estudios antecedentes [7] los parámetros del modelo GR4J fueron calibrados y regionalizados en siete cuencas de Uruguay, cuyos resultados fueron utilizados como primera aproximación en este trabajo. En la Tabla 1 se presentan los valores adoptados para cada uno de los parámetros.

Tabla 1: Parámetros del modelo GR4J+Muskingum y valor adoptado en cada caso.

Parámetro	Descripción del parámetro	Valor
x ₁	Capacidad máxima del reservorio de producción	AD mm
x ₂	Coefficiente de intercambio con el agua subterránea	0 mm
x ₃	Capacidad máxima del reservorio de tránsito	42.4 mm
x ₄	Tiempo base del hidrograma unitario	2.4 días
X	Factor de ponderación	0.20
K	Tiempo de tránsito de una onda de creciente	2 días

2.3 Simulación del sistema eléctrico

La modelación del sistema eléctrico se realiza mediante la plataforma SimSEE [8] (<https://sim-see.org/>). La misma permite simular la operación óptima del sistema incorporando distintos tipos de pronósticos, como ser generación de energías renovables, demanda eléctrica, precios futuros de tecnologías y combustibles, intercambios internacionales, etc., por lo que ha sido extensamente utilizada para el sistema eléctrico uruguayo [3].

En particular para el caso de la generación hidráulica, el SimSEE implementa un generador estocástico de series sintéticas de aportes a los embalses que permite realizar simulaciones utilizando un modelo CEGH: Correlaciones en Espacio Gaussiano con Histograma [9]. Dicho sintetizador es utilizado por el SimSEE para caracterizar la incertidumbre esperada durante la optimización, donde se determina la política de operación óptima. También se utiliza el generador de series sintéticas en la etapa de simulación, para calcular costos esperados y su dispersión.

2.4 Acople del ensemble de pronósticos hidrológicos dentro del SimSEE

Los pronósticos, tanto hidrológicos como de otras fuentes, se modelan mediante CEGH. En base a datos de una realización histórica, que puede tener múltiples canales, se genera una transformación a Espacio Gaussiano (EG) para la fuente. La transformación se aplica mediante deformadores por paso de tiempo. En EG el proceso estocástico se modela como sistema lineal, como se presenta en la Ecuación 1.

$$X_{k+1} = AX_k + \Lambda_k B R_k + S_k \quad (1)$$

Donde X_k es el valor de la señal para el paso de tiempo k , A es la matriz de filtros, B es la matriz global de ruido, R_k es la señal de ruido, Λ_k es la matriz de atenuadores de ruido y S_k es el sesgo para el paso k .

Los pronósticos se incorporan a la fuente actuando sobre los sesgos y una serie de atenuadores por paso de tiempo. Dado un ensemble de pronósticos, se genera una guía y un cono de pronósticos CEGH. Las series del ensemble se transforman a EG usando los deformadores de la fuente. Se toma como guía de la fuente en EG, al promedio por paso de tiempo del ensemble de pronósticos. Dado que la señal R_k es de ruido blanco normal de valor esperado 0, y que el valor esperado de X_k es el de la guía para el paso k , se calcula el sesgo para el paso k como se presenta en la Ecuación 2.

$$S_k = X_{k+1} - A X_k \quad (2)$$

En segunda instancia se ajustan por máxima verosimilitud el ensemble de pronósticos y el cono de pronósticos de la fuente CEGH, donde como variable de ajuste se utilizan los atenuadores por paso. Para maximizar la verosimilitud entre el ensemble y el pronóstico CEGH se recurre a que la covarianza del pronóstico producido por el CEGH está dada por la Ecuación 3, donde Z_k se construye iterativamente según como se presenta en las Ecuaciones 4 y 5.

$$\Sigma_k = \Lambda_k B B^T \Lambda_k^T + Z_k \quad (3)$$

$$Z_0 = A \tilde{X}_0 \tilde{X}_0^T A^T \quad (4)$$

$$Z_k = A (Z_{k-1} + \Lambda_{k-1} B B^T \Lambda_{k-1}) A^T \quad (5)$$

Operando sobre las covarianzas se llega al sistema de la Ecuación 7, donde λ_{ij} es la entrada ij de la matriz Λ para el paso j , c_{pq} es el elemento pq de la matriz C de la Ecuación 6 y ξ_{mn} es el elemento mn de la matriz de covarianzas. Con lo cual el modelado del acople de los pronósticos a la fuente queda completado.

$$C = (B B^T)^{-1} \quad (6)$$

$$\left[\begin{array}{cccc} \xi_{11} c_{11} & \xi_{21} c_{21} & \dots & \xi_{m1} c_{m1} \\ \xi_{12} c_{12} & \xi_{22} c_{22} & \dots & \xi_{m1} c_{m2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \xi_{1m} c_{1m} & \xi_{2m} c_{2m} & \dots & \xi_{mm} c_{mm} \end{array} \right] k \left[\begin{array}{c} 1 \\ \frac{1}{\lambda_{1k}} \\ 1 \\ \frac{1}{\lambda_{2k}} \\ \dots \\ 1 \\ \frac{1}{\lambda_{mk}} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \lambda_{1k} \\ \lambda_{2k} \\ \dots \\ \lambda_{mk} \end{array} \right] \quad (7)$$

2.5 Modo operativo (a implementar)

En su versión operativa, el modelo se actualiza cada vez que se dispone de un nuevo pronóstico de precipitación del GEFS. Asumiendo que la representación del campo de precipitaciones observado es siempre imperfecta, sumado a los errores introducidos en la modelación hidrológica, se considera necesario implementar un proceso de ajuste que opere como parte de la simulación continua. El mismo podrá ser implementado solo en aquellas cuencas en donde se cuenta con registro observado de caudales y por tanto se puede estimar el error del modelo. El ajuste se plantea como una relajación de las variables de estado a sus valores extremos proporcional a la amplitud del error relativo asociado a la escala temporal pertinente (10 y 2 días para las variables de estado asociadas al primer y segundo reservorio del modelo respectivamente).

3 RESULTADOS PRELIMINARES

En primer lugar, a modo de diagnóstico, se realizó una simulación para el período junio 2018 a marzo 2019 a partir de la corrida de control del GEFS corregida por el boletín pluviométrico de INUMET (información histórica disponible). En la Figura 2 se presenta la serie de caudales resultante y se incluye, a modo de referencia, la serie de caudales teóricos de UTE. Además se incluyen las medias móviles de 10 días. Se observa que el modelo sigue la tendencia de la serie teórica, pero suavizada, y con sesgos a menores montos. El coeficiente de escorrentía ($C = Esc/P$) calculado a partir de la corrida de control del GEFS con la serie simulada y la serie teórica de caudales es de 0.34 y 0.52 respectivamente. Asumiendo como válida la serie de caudales teóricos, resulta una subestimación del modelo que podría deberse a una subestimación de la precipitación y/o a una deficiencia en la representación del proceso de transformación P-Q. Dado que según [10], para la región de estudio corresponde un C promedio anual de entre 0.3 y 0.4 (0.37), valor muy próximo al obtenido con la serie simulada, se deduce que el problema está mayormente en la serie de precipitación considerada.

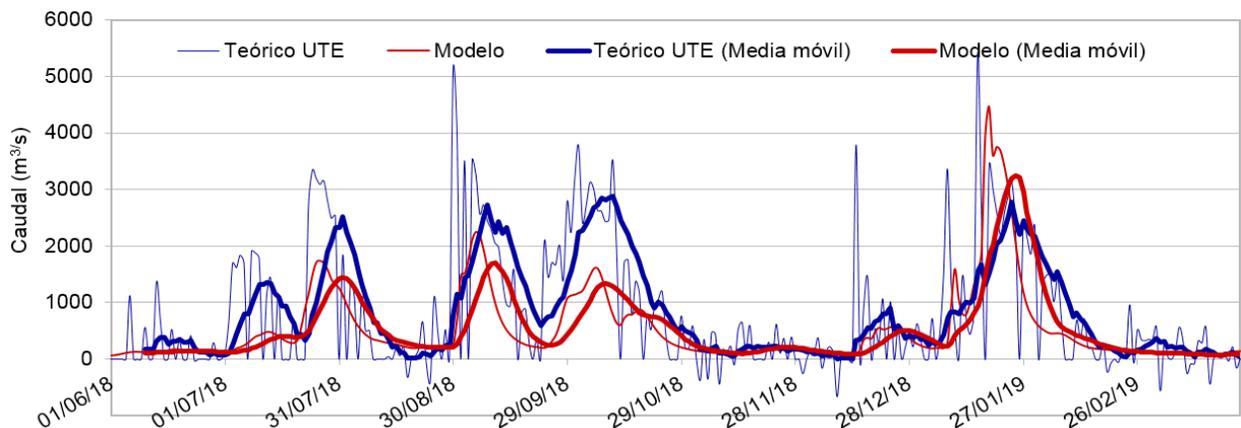


Figura 2. Resultados de la simulación en modo diagnóstico para el período junio de 2018 a marzo de 2019.

En la Figura 3, a modo de ejemplo, se presentan los conos de pronósticos de caudales obtenidos para dos casos de distinto desempeño. En la simulación iniciada el día 29/04/2019 (derecha), el ensemble sigue la tendencia del caudal teórico durante los primeros 10 días, luego se amplía su dispersión. En la simulación del día 11/01/2019 (izquierda), el caudal teórico tiende a aproximarse al de los miembros más altos del ensemble. Asimismo, es interesante notar el efecto de compensación (por la acción del viento) en la estimación teórica entre los días 15 al 17 de enero, donde el promedio de los aportes es de 2600 m³/s, valor muy próximo al que prevén los pronósticos.

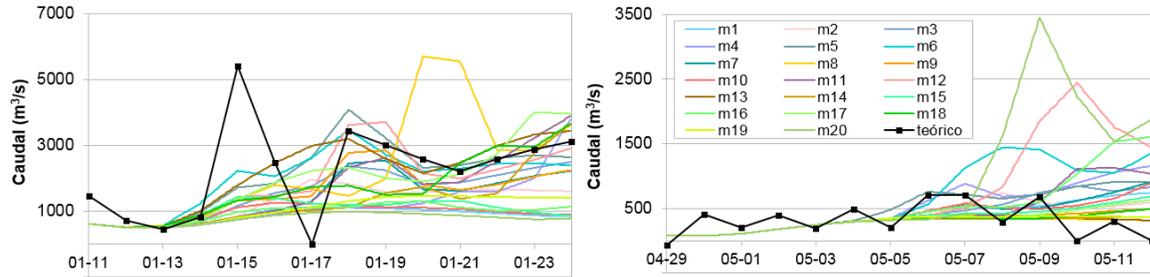


Figura 3. Ejemplos de conos de pronósticos de caudales a 14 días y caudal teórico de UTE.

4 CONCLUSIONES Y PASOS FUTUROS

Se desarrolló una metodología para la generación y acople dentro del SimSEE de un ensemble de pronósticos de aportes a la represa de Rincón del Bonete a partir de un ensemble de pronósticos de precipitación. Dicha metodología es lo suficientemente general y flexible como para permitir incorporar a futuro otras fuentes de pronóstico, además de poder ser operada adecuadamente con la información hidrometeorológica disponible en tiempo real.

En base a los resultados obtenidos se desprende que, para la implementación en modo operativo, la asimilación de datos observados de precipitación y caudal en tiempo real es crítica, ya que se identificaron algunas limitaciones: la versión actual del boletín pluviométrico de INUMET es discreta (mapa con rango de valores), la serie de caudales teóricos de UTE (estimada de modo indirecto) presenta excesiva variabilidad diaria asociada al efecto del viento en el embalse.

Dentro de los pasos a seguir se destacan: (i) optimización del modelo a partir de una mejor estimación de la precipitación histórica, (ii) transmisión en tiempo real de los datos observados de precipitación y caudal y de los pronósticos de precipitación que alimentan la operación continua del sistema, (iii) implementación en modo operativo, incluyendo el ajuste en tiempo real en base a registros de precipitación y caudal. Una vez hecho el aprendizaje en la cuenca de Bonete, se podrá extender la metodología a las otras centrales hidroeléctricas, en particular las del Río Negro.

5 REFERENCIAS

- [1] Cuo, L., Pagano, T. y Wang Q. (2011). A review of quantitative precipitation forecasts and their use in short -to medium- range streamflow forecasting. *J. Hydrometeor.*, 12, 713-728. <https://doi.org/10.1175/2011JHM1347.1>
- [2] Eugenia Kalnay (2003). *Atmospheric modelling, data assimilation and predictability*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511802270>
- [3] Maciel, F., Terra, R. y Chaer R. (2015). Economic impact of considering El Niño - Southern Oscillation on the representation of streamflow in an electric system simulator. *Int. J. Climatol.*, 35: 4094-4102.
- [4] Zhu, Y. (2018). NCEP Global Ensemble Forecast System (GEFS). Global EPS Report to WMO on NCEP GEFS, DPFS/ET-OWFPS/Doc. 7.1(3). <https://www.emc.ncep.noaa.gov/GEFS/mconf.php>
- [5] MGAP (2001). Compendio Actualizado de Información de Suelos del Uruguay a escala 1/1000.000. División Suelos y Aguas, Dirección de Recursos Naturales, Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca, Uruguay.
- [6] Perrin, C., Michel, C. y Andréassian V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279 (1), 275-289. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7)
- [7] IMFIA (2016). Mejora en la estimación de caudales fluviales en Uruguay y su aplicación para evaluar el potencial de generación hidro-cinético. Segundo Informe de Avances. Proyecto ANII FSE, Convocatoria 2014.
- [8] Chaer, R. (2008). Simulación de sistemas de energía eléctrica. Tesis de maestría en Ingeniería Eléctrica, Universidad de la República. <http://ie.fing.edu.uy/publicaciones/2008/Cha08/Cha08.pdf>
- [9] Chaer, R. (2005). Modelo de series correlacionadas CEGH. http://ie.fing.edu.uy/simsee/curso2010/Cap9_sintetizadorCEGH.pdf
- [10] DINAGUA (2012). Ciclos anuales y estacionales de parámetros hidrológicos (1980-2004). Informe temático de la División Recursos Hídricos, Departamento de Hidrología, Dirección Nacional de Aguas, MVOTMA.