

# PLANIFICACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA HIDROLÓGICA USANDO EL ABORDAJE "SEVERIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA"

Diego A. Guzmán A. y Eduardo M. Menciondo

<sup>1</sup>Profesor Asistente Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) –Seccional Bucaramanga, Kilómetro 7, vía Piedecuesta  
Floridablanca, Santander, Colombia.

<sup>2</sup>Profesor Doctor Universidad de São Paulo – Escuela de Ingeniería de São Carlos – Programa de Postgrado en Ingeniería Hidráulica  
y Saneamiento. Av. Trabalhador São-carlense, 400, Arnold Schimidt São Carlos – Brasil.  
E-mail: diego.guzman@upb.edu.co, emm@sc.usp.br

## Resumen

Recientes estudios se han concentrado en la caracterización de la sequía en cada una de sus fases, p. ej. la sequía meteorológica, humedad del suelo, hidrológica o hasta la sequía socio-económica. Sin embargo, la complejidad del fenómeno y la incertidumbre asociada de informaciones dificulta la previsión del peligro y sus impactos resultantes. Por lo tanto, en este trabajo es presentado el abordaje Severidad-Duración-Frecuencia (SDF) de la sequía hidrológica, para el análisis de riesgo del Sistema Cantareira en Brasil, principal sistema de cuencas proveedoras de agua para la Región Metropolitana de Sao Paulo (RMSP), recientemente afectado por la sequía. El enfoque es planteado a partir de dos ejercicios de simulación de déficit hídrico, adoptando por un lado, dos umbrales de demanda de agua, uno estacionario (E) y otro no estacionario (NE); caudales de oferta hídrica obtenidos el primero, a partir de la simulación hidrológica del sistema en WEAP (Water Evaluation and Planning System), bajo las salidas históricas (1962-2015) del modelo climático regional (MCR) Eta-INPE HadGEM-ES y MIROC5; y el segundo, a partir de los caudales mensuales históricos reconstruidos y base de datos recientes (1930-2016), para el estudio de concesión de agua (ANA and DAEE, 2004). Para el ajuste de los datos de déficit hídrico, fue adoptada la función generalizada de valores extremos (GEV) para periodos de retorno (Tr) de 2, 10, 20 y 100 años. Los resultados mostraron que para el análisis en que fueron usados los datos reconstruidos (serie más extensa), las sequías presentan déficits de mayor magnitud, si se compara con el caso donde se usaron los datos del MCR y la modelación hidrológica. Así, este enfoque puede servir como una herramienta útil para gestión del recurso hídrico, ayudando en la cuantificación de impactos por las sequías hidrológicas.

## Introducción

El cambio climático y el crecimiento poblacional descontrolado han generado una mayor necesidad de fuentes de agua (Montanari et al., 2013). Esta necesidad ha llevado a la sociedad a repensar las estrategias para disminuir la vulnerabilidad frente a la escasez de agua, sea por, la exploración y explotación de nuevas fuentes (movilización de agua) o mediante la regulación y racionalización de la demanda (Wanders and Wada, 2015). Para la gestión del agua, la sequía es tradicionalmente abordada a partir de sus diferentes estados o fases dentro del ciclo del hidrológico, por ejemplo, el déficit de precipitación dentro de un área definida está relacionado con la componente meteorológica de la sequía. Así mismo, la interconexión entre la precipitación y el agua de escurrimiento, puede repercutir en anomalías negativas en los caudales superficiales definiendo de esta forma una sequía hidrológica (Van Loon, 2015; Van Loon et al., 2016; Wanders et al., 2017). Estas anomalías negativas en la superficie, relacionadas con la demanda de agua, pueden provocar el colapso de los sistemas altamente dependientes y desencadenar fuertes impactos socioeconómicos o la llamada sequía socioeconómica (Mehran et al., 2015). Entre las herramientas más usadas para el análisis y monitoreo del complejo fenómeno de la sequía se encuentran los índices, algunos de estos estudian la sequía en cada uno de sus estados independientemente o los analizan de forma integrada

(Hao and Singh, 2015; Wanders et al., 2017). Sin embargo, los índices no ofrecen una medida del impacto directo sobre los sectores directamente dependientes del recurso hídrico, por ejemplo, el abastecimiento urbano. Por lo tanto, son propuestas otras herramientas como el análisis severidad-duración-frecuencia (SDF) de la sequía, en las que se relacionan la oferta y la demanda de agua (Sung and Chung, 2014; Tallaksen et al., 1997).

En este trabajo se muestra el desarrollo de las curvas SDF para el sistema de embalses de Cantareira, principal proveedor de agua para la región metropolitana de Sao Paulo (RMSP) en Brasil. El sistema, que durante el periodo 2013-2015 fue afectado por la sequía más fuerte de su historia (Nobre et al., 2016; Taffarello et al., 2017) impactó profundamente la economía regional y dejó en evidencia de la baja preparación frente a un evento de sequía de tal magnitud (Guzman, 2018; Marengo et al., 2015). Para la construcción de las curvas SDF, fueron definidos los caudales mensuales de oferta hídrica a partir de dos fuentes de información base. La primera, definida por los caudales reconstruidos y complemento de las series 1930-2016 del sistema (ANA & DAEE, 2004); el segundo, mediante la modelación hidrológica en WEAP (Yates et al., 2005) del sistema, forzado por el conjunto de datos de salida histórico 1962-2015 del modelo climático regional (MCR) Eta-INPE corrido bajo condiciones de borde de los modelos climáticos globales (MCG) HadGEM-ES y MIROC5 con resolución 20x20 km (Chou et al., 2014a, 2014b). Para la definición de los umbrales de demanda fueron establecidos dos escenarios de retirada de agua, el primero a partir del consumo medio de la RMSP en sistema Cantareira "definido como Estacionario" (E) y una variación al consumo con base en el registro histórico poblacional "definido como No-Estacionario" (NE). El ajuste estadístico de las series de déficit hídrico fue realizado mediante la función generalizada de valores extremos (GEV) para periodos de retorno 2, 10, 20 y 100 años; esta función es ampliamente utilizada en este tipo de abordajes con comprobados buenos resultados para su implementación (Sung and Chung, 2014; Svensson et al., 2016; Todisco et al., 2013).

## Metodología

El sistema de abastecimiento de agua de Cantareira está localizado en el sur este de Brasil entre los estados de Sao Paulo y Minas Gerais, el clima regional es clasificado como subtropical a sub-húmedo con una máxima media anual de 25°C y mínima media anual de 15°C (Blain, 2010; Rodríguez-Lado et al., 2007). La temporada de lluvias en el Sistema Cantareira generalmente comienza a fines de septiembre y finaliza en marzo. En este período, en promedio se acumula el 72% de las precipitaciones en la región (Marengo et al., 2015). El área de drenaje del sistema comprende 2256 km<sup>2</sup> en donde cuatro embalses componen una compleja red de captación, transporte y suministro de agua para aproximadamente 11 millones de personas en la RMSP (ver Figura 1) (Guzman et al., 2017). La oferta de agua fue definida a partir de dos metodologías, por un lado, la reconstrucción de datos de caudales medios mensuales del sistema y por otro, la modelación hidrológica basada en los

datos históricos de salida del MCR Eta-INPE, esto soportado por la falta de información histórica disponible. La reconstrucción de los datos de caudal, fue realizada mediante la utilización de un modelo lluvia – escorrentía (SMAP) para la complementación de datos y con el objetivo de soportar la definición del proceso de concesión de agua en el año 2004 (ANA and DAEE, 2004). Por otro lado, la modelación hidrológica del sistema Cantareira utilizando el conjunto de datos de salida histórico del MCR Eta-INPE, el modelo anidado dentro de los MCGs HadGEM-ES y MIROC5, reproduce informaciones de parámetros hidro meteorológicos bajo resolución horizontal de 20 x 20 km y vertical a través de 38 niveles verticales con una línea base de tiempo 1961 – 2005 (Chou et al., 2014b). El modelo hidrológico del sistema, construido en WEAP, comprende 16 sub-cuencas, con áreas que varía desde 67 km<sup>2</sup> hasta 272 km<sup>2</sup>. Con base en la información de uso de suelo (Molin, 2014) y la observada de una red de monitoreamiento hidro climática conformada por: precipitación (52 estaciones), temperatura - humedad relativa – nubosidad - velocidad del viento (14 estaciones) y caudal de las principales corrientes (11 estaciones), el modelo fue calibrado y validado en los periodos (2006 – 2010) y (2011 – 2015) respectivamente (Guzman et al., 2017).

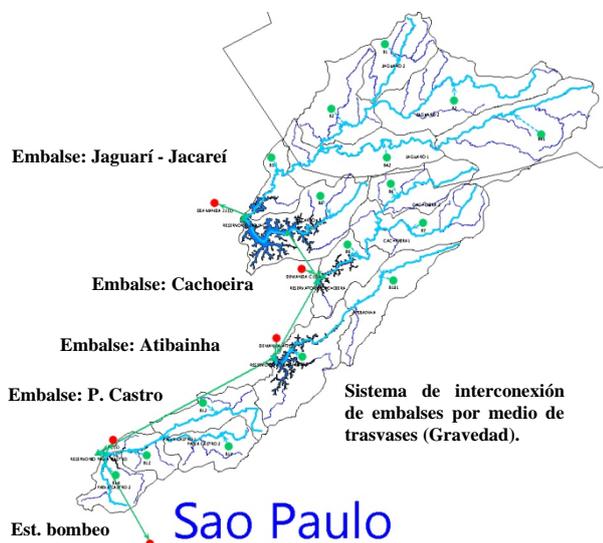


Figura 1. Sistema Cantareira, definición esquema de modelamiento hidrológico en WEAP.

Para la implementación de la metodología, deben ser definidas las demandas de agua para estimar los periodos de déficit hídrico (-) de la siguiente forma:  $Déficit_{i(-)} = Oferta_i - Demanda_i$  (Hisdal et al., 2004), ver ejemplo Figura 2 a, b y c (demanda estacionaria de agua igual a 31 m<sup>3</sup>/s). Por lo tanto, fueron definidos dos escenarios de demanda de agua para cada metodología de oferta propuesta, en resumen, cada uno de los parámetros para el análisis SDF se encuentra resumido en la Tabla 1:

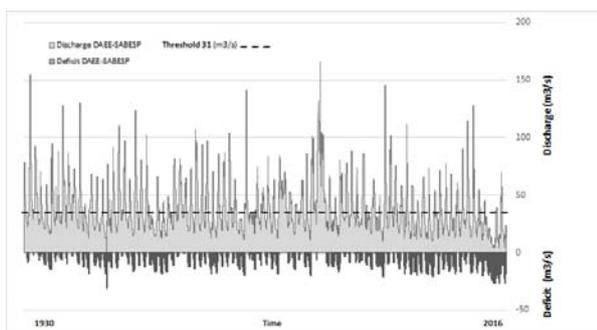


Figura 2a. Umbral de demanda para oferta hídrica modelada a partir de los datos de caudal reconstruidos (ANA-DAEE) y demanda estacionaria (E) 31 m<sup>3</sup>/s.

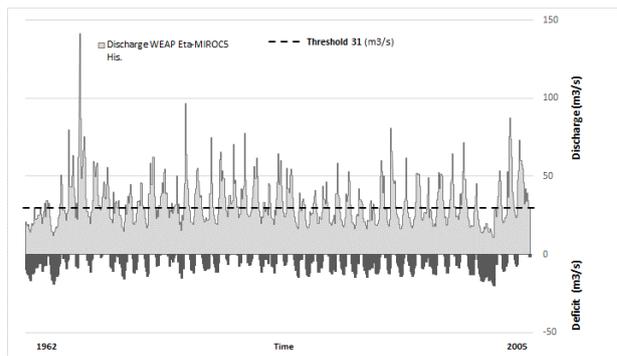


Figura 2b. Umbral de demanda para oferta hídrica modelada a partir de los resultados del MCR Eta-MIROC5 Histórico y demanda estacionaria (E) 31 m<sup>3</sup>/s.

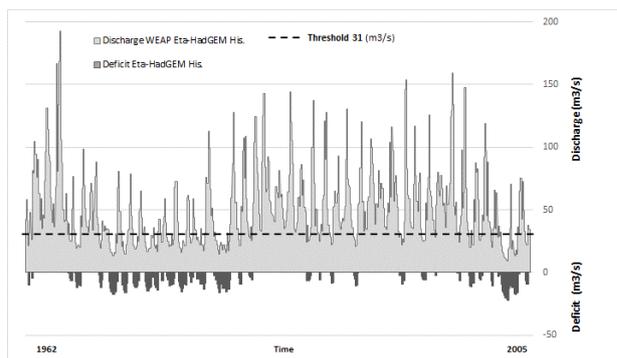


Figura 2c. Umbral de demanda para oferta hídrica modelada a partir de los resultados del MCR Eta-HadGEM Histórico y demanda estacionaria (E) 31 m<sup>3</sup>/s.

Tabla 1. Definición de parámetros para el análisis SDF de la sequía.

Parámetro	Definición
Oferta Hídrica.	1. Datos reconstruidos (1930-2016). 2. Datos modelados (MCR):Eta/MIROC5.HadGEM-ES (1962-2016).
Demanda Hídrica.	1. Estacionaria: Caudal medio mensual retirado del sistema 31 m <sup>3</sup> /s. 2. No- Estacionaria: Regresión con base en el crecimiento poblacional 24 – 31 – 35 m <sup>3</sup> /s.

Con base en las series anuales de déficit hídrico (m<sup>3</sup>) de duración definida en días, fue utilizada la función generalizada de valores extremos (GEV) para el análisis de frecuencia (ecuaciones 1.1 y 1.2). El análisis fue definido para periodos de retorno (Tr) de 2, 10, 20 y 100 años y para duraciones de sequía de 31, 60, 90, 150, 210 y 356 días (Stedinger et al., 1993).

$$F(x) = \exp \left[ - \left\{ 1 + \xi \left( \frac{x-\mu}{\sigma} \right) \right\}^{1/\xi} \right] \quad \xi \neq 0 \quad [1.1]$$

$$F(x) = \exp \left[ - \exp \left( - \frac{x-\mu}{\alpha} \right) \right] \quad \xi = 0 \quad [1.2]$$

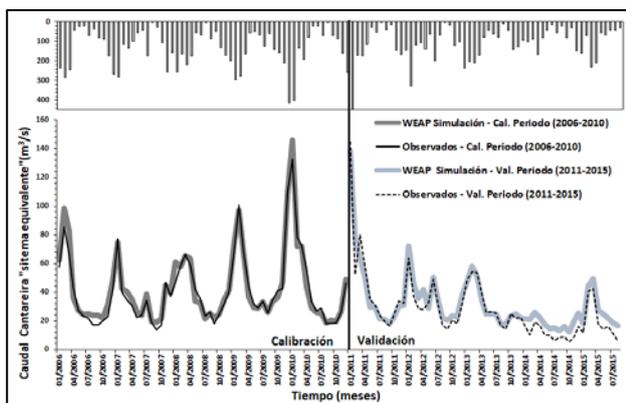
Donde la función de distribución acumulada  $F(x)$  depende de  $\mu$  como parámetro de localización,  $\alpha$  como parámetro de escala y  $\xi$  como parámetro de forma. Por lo tanto, si,  $\mu + \alpha/\xi \leq x \leq \infty$  para  $\xi < 0$  es una distribución tipo III (Weibull),  $-\infty \leq x \leq \infty$  con  $\xi = 0$  es una tipo I (Gumbel) y  $-\infty \leq x \leq \mu + \alpha/\xi$  con  $\xi > 0$  es una distribución tipo II (Frechét), esto muestra la versatilidad de la GEV para el ajuste de datos extremos. Considerando la adopción de la distribución GEV, fueron estimados los parámetros  $\xi$ ,  $\alpha$  y  $\mu$  utilizando el método del Estimador de máxima verosimilitud (MLE).

## Resultados

Como parte del ejercicio del análisis mediante la metodología SDF requería del proceso de modelamiento hidrológico, fueron evaluados algunos de los principales indicadores de desempeño del modelo, en este caso Nash Sutcliffe y PBIAS. Así, con base en el documento Moriasi, 2007, se evaluaron los indicadores durante los periodos de calibración y validación (ver Tabla 2 y figura 3). Según Moriasi, "muy bueno" ( $NSE > 0.75$  y  $PBIAS < \pm 10\%$ ); "bueno o satisfactorio" ( $0.75 > NSE > 0.5$  y  $\pm 10\% < PBIAS < \pm 25\%$ ).

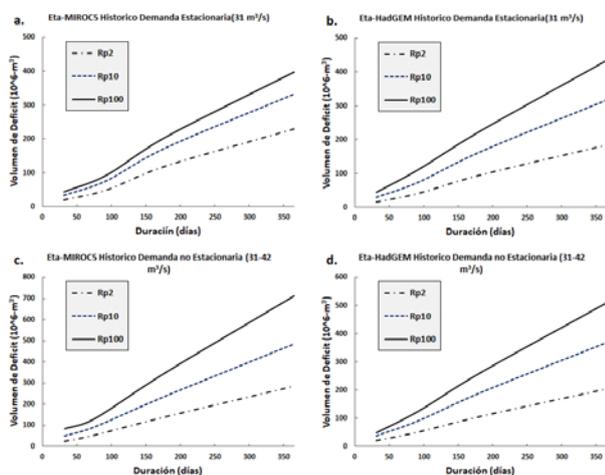
**Tabla 1.-** Indicadores de calibración y validación Nash – PBIAS.

Cantareira Equivalent System	Area (km <sup>2</sup> )	NSE		PBIAS (%)	
		Cal.	Val.	Cal.	Val.
	2265.0	0.95	0.90	-3.40	-12.36

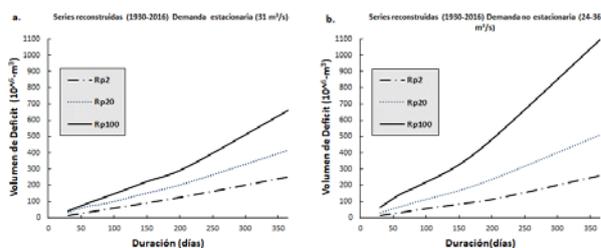


**Figura 3.** Resultado calibración – validación sistema Cantareira periodo (2006-2015). (Modificado de Guzman et al. 2017).

Como resultado principal de este trabajo, es propuesta una herramienta de análisis para el estudio y planificación del fenómeno de la sequía hidrológica en el sistema Cantareira. En las Figuras 4 y 5 se observa los resultados de la implementación del método SDF bajo diferentes escenarios de oferta y demanda hídrica. Para destacar, el análisis bajo el supuesto No-Estacionario (NE) de la demanda para la serie reconstruida, mostro déficits de mayor magnitud para duraciones de sequía más prolongadas. Mientras que, para el escenario Estacionario (E) de la demanda bajo la oferta hídrica del modelo Eta-MIROC5 las magnitudes del déficit presentaron resultados más conservadores.



**Figura 4.** Análisis SDF a partir del MCR Histórico (1962-2015); a. Eta-MIROC5 (E). b. Eta-HadGEM (E). c. Eta-MIROC5 (NE). d. Eta-HadGEM (NE) (Modificado de Guzman et al. 2017).



**Figura 5.** Análisis SDF a partir de caudales reconstruidos ANA-DAEE 2004 (1930-2016); a. (E). b. (NE).

Aunque la ventana temporal de las series de oferta hídrica analizadas no era correspondiente, es posible tener una aproximación de los potenciales impactos sobre el abastecimiento de agua en el sistema Cantareira basado en la duración de la sequía; donde de forma directa se incorporan conductores de clima y de origen antropogénico como la demanda de agua. Por otra parte, este conjunto de resultados se propone como una serie de alternativas para el análisis y gestión del agua, que deben ser consideradas por el tomador de decisiones, consciente de que existe una importante carga de incertidumbre en el análisis.

Con base en las gráficas de diagnóstico estadístico: QQ-plot, Density-plot y Return Level-plot, fueron evaluados los ajustes de los datos a la función de valores extremos GEV. Los resultados mostraron en general mejores ajustes para la distribución tipo I (Gumbel)  $\xi = 0$  a las sequías con duraciones más prologadas mayores a 200 días aproximadamente. Mientras que sequías con menor duración mostraron mejores ajustes para funciones tipo II y III con  $\xi > 0$  y  $\xi < 0$  respectivamente.

Para la realización de este trabajo los autores agradecen a: Programa de Doctorados en el Exterior convocatoria No. 728 de COLCIENCIAS (Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación) – Colombia. CAPES- PROEX 1650/2017/23038.013525/2017-30. FAPESP 2014/50848-9 Water Security del INCT-Climate Change II.

## Referencias

- Ana, Daee, 2004. Subsídios para a Análise do Pedido de Outorga do Sistema Cantareira e Para a Definição das Condições de Operação dos seus Reservatórios. Estado de São Paulo.
- Blain, G.C., 2010. Precipitação pluvial e temperatura do ar no Estado de São Paulo: periodicidades, probabilidades associadas, tendências e variações climáticas. Universidade de São Paulo.
- Chou, S.C., Lyra, A., Mourão, C., Dereczynski, C., Pilotto, I., Gomes, J., Bustamante, J., Tavares, P., Silva, A., Rodrigues, D., Campos, D., Chagas, D., Sueiro, G., Siqueira, G., Marengo, J., 2014a. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. *Am. J. Clim. Chang.* 3, 512–527. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2014.35043>
- Chou, S.C., Lyra, A., Mourão, C., Dereczynski, C., Pilotto, I., Gomes, J., Bustamante, J., Tavares, P., Silva, A., Rodrigues, D., Campos, D., Chagas, D., Sueiro, G., Siqueira, G., Nobre, P., Marengo, J., 2014 b. Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. *Am. J. Clim. Chang.* 3, 438–454. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2014.35039>
- Guzman, D.A., 2018. Hydrological risk transfer planning under the drought “severity- duration-frequency” approach as a climate change impact mitigation strategy. Sao Paulo Univeristy.
- Guzman, D.A., Mohor, G.S., Taffarello, D., Mendiondo, E.M., Guzman, D., Mohor, G.S., Taffarello, D., Mendiondo, E.M., 2017. Economic impacts of drought risks for water utilities through Severity-Duration-Frequency framework under climate change scenarios. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* In discuss, 1–39. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/hess-2017-615>