

DOI: 10.24850/j-tyca-2025-03-04

Artículos

Evaluación de la respuesta hidrológica del modelo DWB en la curva de duración de caudales a nivel de cuenca y microcuenca, caso de estudio la cuenca del río Sogamoso, Colombia

Evaluation of the hydrological response of the DWB model in the flow exceedance curves at the basin and micro-basin scale, case study of the Sogamoso River basin, Colombia

Camila García-Echeverri¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8227-7684>

Christian Rodríguez-Castiblanco², ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6396-9395>

Nestor Alonso Mancipe-Muñoz³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6708-0290>

Carlos González-Murillo⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2920-8425>

David Zamora⁵, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2256-7054>

¹Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia / Water Group, Stockholm Environment

Institute, Bogotá, Colombia, cagarciae@unal.edu.co,
camila.garcia@sei.org

²Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, chdrodriguezca@unal.edu.co

³Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, nmancipe@unal.edu.co

⁴Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, cagonzalezmu@unal.edu.co

⁵Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, / Water Group, Stockholm Environment Institute, Bogotá, Colombia, dazamora@unal.edu.co,
david.zamora@sei.org

Autora para correspondencia: Camila García-Echeverri,
cagarciae@unal.edu.co

Resumen

Las curvas de duración de caudales (CDC) reflejan los efectos de las características de una cuenca sobre los caudales, esto sin tener en cuenta la temporalidad de ocurrencia. Tradicionalmente, se construyen a partir de registros históricos registrados por estaciones y son insumo para el cálculo de índices de gestión del recurso hídrico, como el índice de regulación hídrica (IRH). Debido a la escasez de registros hidrológicos, en la práctica se recurre a estrategias de regionalización de las CDC para estudiar aquellas cuencas no instrumentadas. Este trabajo busca evaluar

el desempeño del modelo DWB a partir de entradas diarias en la simulación de CDC en dos subcuencas del río Sogamoso que tienen características diferentes (El Tablazo y Puente Colonial). Se desarrolla una metodología que usa el índice de aridez para identificar cuatro periodos hidrológicamente contrastantes: dos periodos húmedos y dos periodos secos. Posteriormente, se implementaron ocho experimentos de calibración-validación a partir de la combinación de los periodos previamente identificados. Por último, a partir de la revisión cualitativa y cuantitativa con firmas de sesgo en los flujos medios, altos y bajos se evaluaron los resultados arrojados por el modelo DWB. En términos generales, se encontró que el ejercicio fue exitoso en la subcuenca de mayor tamaño (El Tablazo) y que el modelo no logra reproducir los caudales bajos, lo que genera subestimaciones en todos los experimentos realizados.

Palabras clave: modelo DWB, CDC, firmas de CDC, calibración cruzada.

Abstract

Flow duration curves (FDC) depict a flow Basin's effects on its physical characteristics, regardless of the time of occurrence. Commonly, the FDCs are estimated from historical records recorded by measuring stations, and they are input to calculate water resources management indexes such as the water regulation index. In practice, CDC regionalization techniques are used to study ungauged basins due to the scarcity of hydrological records. This research seeks to assess the performance of the DWB model based on daily inputs for simulating CDC in two sub-basins of the Sogamoso River with different characteristics (El Tablazo y Puente

Colonial). A methodology is developed that uses the aridity index to identify four hydrologically contrasted periods, two wet and two dry periods. Subsequently, eight calibration-validation experiments were implemented based on combining the previously identified periods. Finally, from the qualitative and quantitative comparison with bias signatures in the medium, high, and low flows, the results obtained by the DWB model were evaluated. In general terms, it was found that the exercise was successful in the largest sub-basin and that the model failed to reproduce low flows, underestimating flow values for all the experiments assessed.

Keywords: DWB model, FDC, signature FDC indices, cross-calibration.

Recibido: 04/09/2023

Aceptado: 14/03/2024

Publicado *online*: 02/04/2024

Introducción

La información hidrológica disponible en las redes de monitoreo y registrada en tierra es fundamental en los estudios del recurso hídrico (Krabbenhoft *et al.*, 2022). A pesar de que se reconoce su rol e importancia, se ha encontrado que a nivel mundial las estaciones de registro de caudal se encuentran ubicadas en su mayoría sobre ríos grandes que abastecen diferentes usos de los ecosistemas, y es posible que no capturen la diversidad de las propiedades de la red fluvial y las influencias antropogénicas. También se conoce que la cantidad de

estaciones y sus registros escasean en áreas de ecosistemas protegidos o en ríos no permanentes (Krabbenhoft *et al.*, 2022). Esta afirmación también aplica para Colombia, donde a partir de un análisis del catálogo de estaciones administradas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), se encontró que para el año 2022 el 52 % de estaciones hidrológicas activas se ubicaban en el área hidrográfica Magdalena-Cauca, que representa el 24 % del territorio colombiano.

Lo anterior implica que para las demás áreas hidrográficas de Colombia (Amazonía, Orinoquía, Pacífica y Caribe), la información que caracteriza la dinámica de los caudales sea limitada, lo que dificulta la adecuada gestión del recurso hídrico en estas regiones.

Frente a la ausencia o la reducida existencia de registros de la variable caudal, la modelación hidrológica ha sido aceptada como una solución que permite simular caudal con aceptables grados de precisión e incertidumbre, reproduciendo así la información hidrológica que no ha sido medida por estaciones (Cortés, Ragettli, Pellicciotti, & Mcphee, 2011; Kwakye & Bárdossy, 2020).

Dentro de las aplicaciones basadas en información simulada se encuentran los derivados de la CDC. En la actualidad, las CDC se utilizan como insumo de índices en la gestión del recurso hídrico, tal como el índice de Regulación Hídrica empleado en el Estudio Nacional del Agua 2018 (ENA2018) (IDEAM, 2019) o como insumo para el cálculo del caudal ambiental.

De forma tradicional, las CDC han dependido de los registros dados por las estaciones *in situ* y son una fotografía de las características físicas de una cuenca. Su análisis permite describir aspectos hidrológicos, del

suelo, de la vegetación y del clima de la cuenca (Mohamoud, 2008). Esta capacidad de sintetizar ha convertido a la CDC en una herramienta de apoyo en el control de inundaciones, manejo de la calidad del agua, sedimentación fluvial, estudios de potencial hidroeléctrico y algunas otras aplicaciones ecohidrológicas (Botter, Zanardo, Porporato, Rodriguez-Iturbe, & Rinaldo, 2008; Ridolfi, Kumar, & Bárdossy, 2020).

En Colombia, el modelo conceptual *Dynamic Water Balance* (DWB) (Zhang, Potter, Hickel, Zhang, & Shao, 2008) ha sido usado tanto en el ámbito académico (Rodríguez *et al.*, 2016) como institucionales en el ENA2018. Los resultados obtenidos con DWB lo han posicionado como una alternativa viable para la simulación hidrológica en Colombia (García-Echeverri, 2017); ello se ha reforzado con los resultados logrados por otros autores en diferentes partes del planeta (Tekleab *et al.*, 2011; Bai, Liu, & Guo, 2014; Hwang & Devineni, 2022).

Aunque la estructura de este modelo inicialmente fue concebida para evaluar la hidrología a paso de tiempo mensual, Zhang *et al.* (2008) reportaron la habilidad de la estructura matemática y conceptual de DWB para representar a la CDC a paso de tiempo diario. Esta aparente ventaja no ha sido verificada con métodos diferentes a la comparación por observación, es decir, no se han utilizado métricas que cuantifiquen la bondad del modelo al reproducir diferentes porcentajes de excedencia de la CDC.

Cabe destacar que el modelo DWB genera escorrentía como variable de salida, así que la agregación espacial de esta variable permite la construcción de la CDC en puntos de control reales o virtuales, lo cual lo convierte en una alternativa para complementar estudios en cuencas con ausencia de información.

Es posible entonces enfocar el estudio del desempeño del modelo hidrológico DWB en función de la representación de las CDC diarias. Al respecto, Casper *et al.* (2011) sugieren el cálculo de firmas que evalúan el sesgo y el ajuste entre curvas observadas y simuladas en diferentes porciones de estas curvas, por ejemplo, caudales máximos (menores probabilidades de excedencia) y caudales mínimos (mayores probabilidades de excedencia).

En la presente investigación se evalúa la capacidad del modelo DWB para simular CDC en dos subcuencas del río Sogamoso, ubicado en Colombia, bajo un proceso de calibración-validación cruzada de condiciones climáticas y tamaño de cuencas contrastantes.

Materiales y métodos

Zona de estudio y datos hidrometeorológicos

El estudio se desarrolla en la cuenca del río Sogamoso, localizada en la cuenca media de la macrocuenca Magdalena-Cauca (Figura 1a y Figura 1b) y presenta su cierre en la estación Puente Sogamoso (24067020). Como parte de la evaluación del modelo se seleccionaron dos subcuencas para realizar análisis de contraste: la primera es toda la cuenca del río Sogamoso, con su punto de cierre en la estación El Tablazo (24067010), y la segunda es una subcuenca con punto de cierre en la estación Puente Colonial (24037300). La estación de El Tablazo se encuentra sobre el cauce del río Sogamoso a 90 kilómetros aguas arriba de su desembocadura en el río Magdalena. Por otro lado, la estación de Puente Colonial está instalada sobre el cauce del río Monguí, que es un tributario

del río Chicamocha, y que a su vez es tributario del río Sogamoso. En la Figura 1c se presenta un esquema de localización de las subcuencas de estudio y la Tabla 1 corresponde un resumen de información acerca de las estaciones escogidas para el análisis.

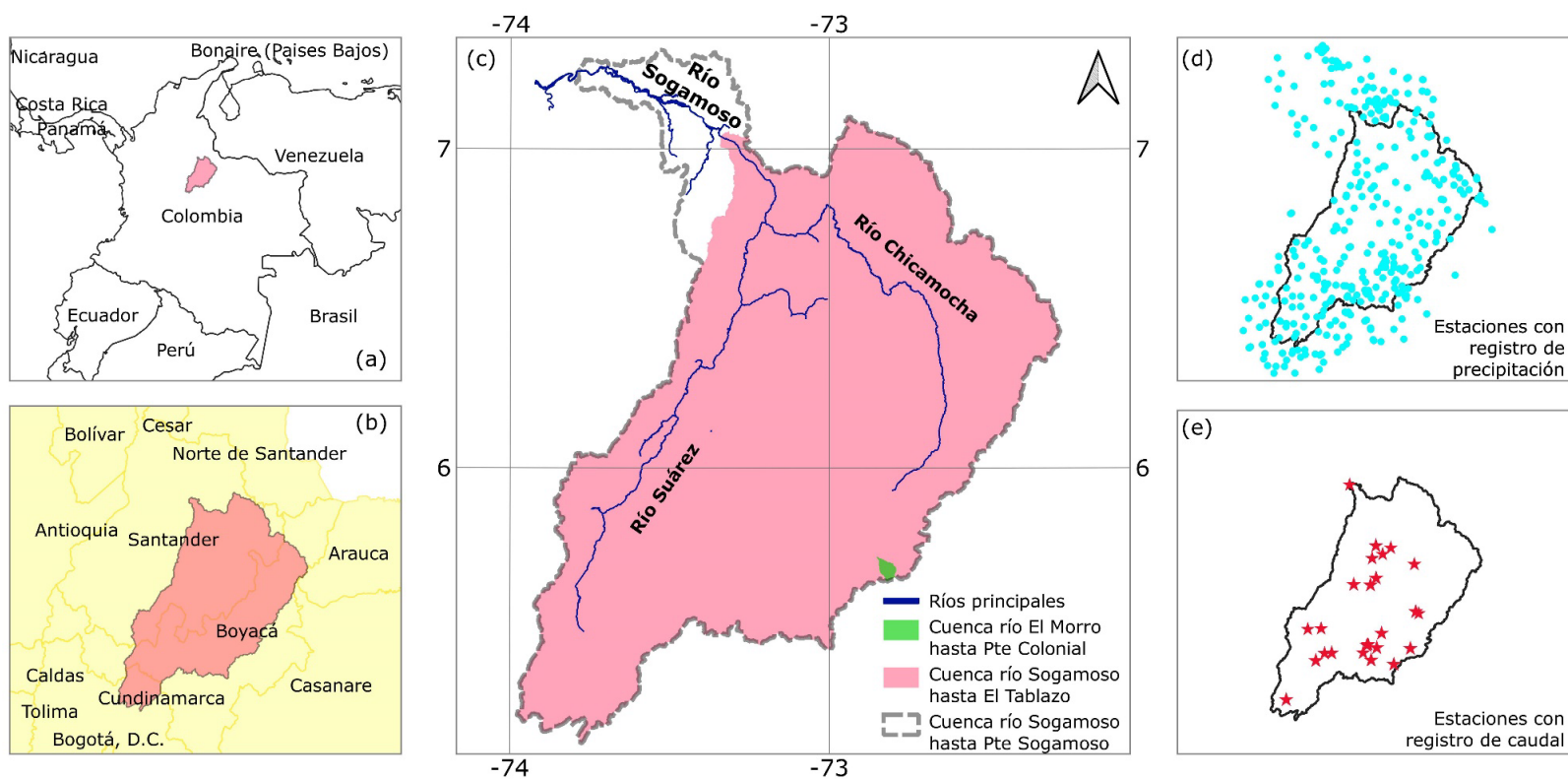


Figura 1. a) Localización del área de estudio frente a la división política de países; b) localización del área de estudio frente a la división política departamental; c) ríos más importantes dentro de las subcuencas de estudio; d) ubicación de las estaciones de precipitación, y e) ubicación de las estaciones de caudal.

Tabla 1. Características de las subcuencas y estaciones hidrológicas seleccionadas para el análisis.

Nombre	Código	Área de la cuenca (km ²)	Clasificación según área*	Elevación media (msnm)**	Caudal medio (m ³ /s)
Puente Sogamoso	24067020	22 223	Muy grande	2 282	441.2
El Tablazo***	24067010	20 439	Muy grande	2 424	416.7
Puente Colonial	24037300	32	Pequeña	3 597	1.1

*Clasificación realizada siguiendo los criterios de Campos-Aranda (1992).

**Elevación tomada del modelo de elevación digital HydroSHEDS.

***La estación El Tablazo presenta registros hasta 2013, ya que fue suspendida a causa del inicio de operación de la central hidroeléctrica Hidrosogamoso.

Los caudales utilizados para implementar el modelo fueron obtenidos del repositorio de Datos Hidrológicos y Meteorológicos (DHIME) del IDEAM. La variable descargada fue caudal medio diario para el periodo 1983-2019 (36 años). En el área de interés se localizan 25 estaciones hidrológicas (Figura 1e), de las cuales dos fueron las utilizadas para realizar los análisis y las 23 restantes sirvieron como puntos de control en el cálculo de la escorrentía simulada al interior de las subcuencas.

Para la precipitación (P) se realizó la combinación de productos de reanálisis CHIRPSv2 (Funk *et al.*, 2015) y productos del sensor remoto PERSIANN-CDR (Ashouri *et al.*, 2015; Sorooshian *et al.*, 2000). Esta combinación se hizo a resolución espacial de 0.05° (5.5 km aproximadamente) con el algoritmo *Random Forest Merging Procedure* (Baez-Villanueva *et al.*, 2020), codificado en el paquete RFmerge del

lenguaje de programación R (Zambrano-Bigiarini, Baez-Villanueva, & Giraldo-Osorio, 2020). En este proceso se utilizó como covariables el modelo digital de elevación (MDE) HydroSHEDS (Lehner, Verdin, & Jarvis, 2008) y las series de tiempo de la precipitación de 134 estaciones que el IDEAM tiene disponibles en la zona de estudio (Figura 1d).

En cuanto a la evapotranspiración potencial (ETP), se utilizó el modelo de Hargreaves-Samani (Hargreaves & Samani, 1985) a partir de los campos de temperatura mínima, media y máxima producidos por el IDEAM a escala diaria en el marco del ENA 2018 (IDEAM, 2019). Este producto de ETP, al igual que los productos de P CHIRPS y PERSIAN-CDR, están distribuidos espacialmente a una escala de 0.05° (5.5 km aproximadamente).

En la Figura 2 se puede apreciar la distribución espacial de la P y la ETP total media multianual sobre el área de estudio, que se calcularon para el periodo mencionado (1983-2019). En la Tabla 2 se presentan los valores para cada una de las subcuencas de análisis.

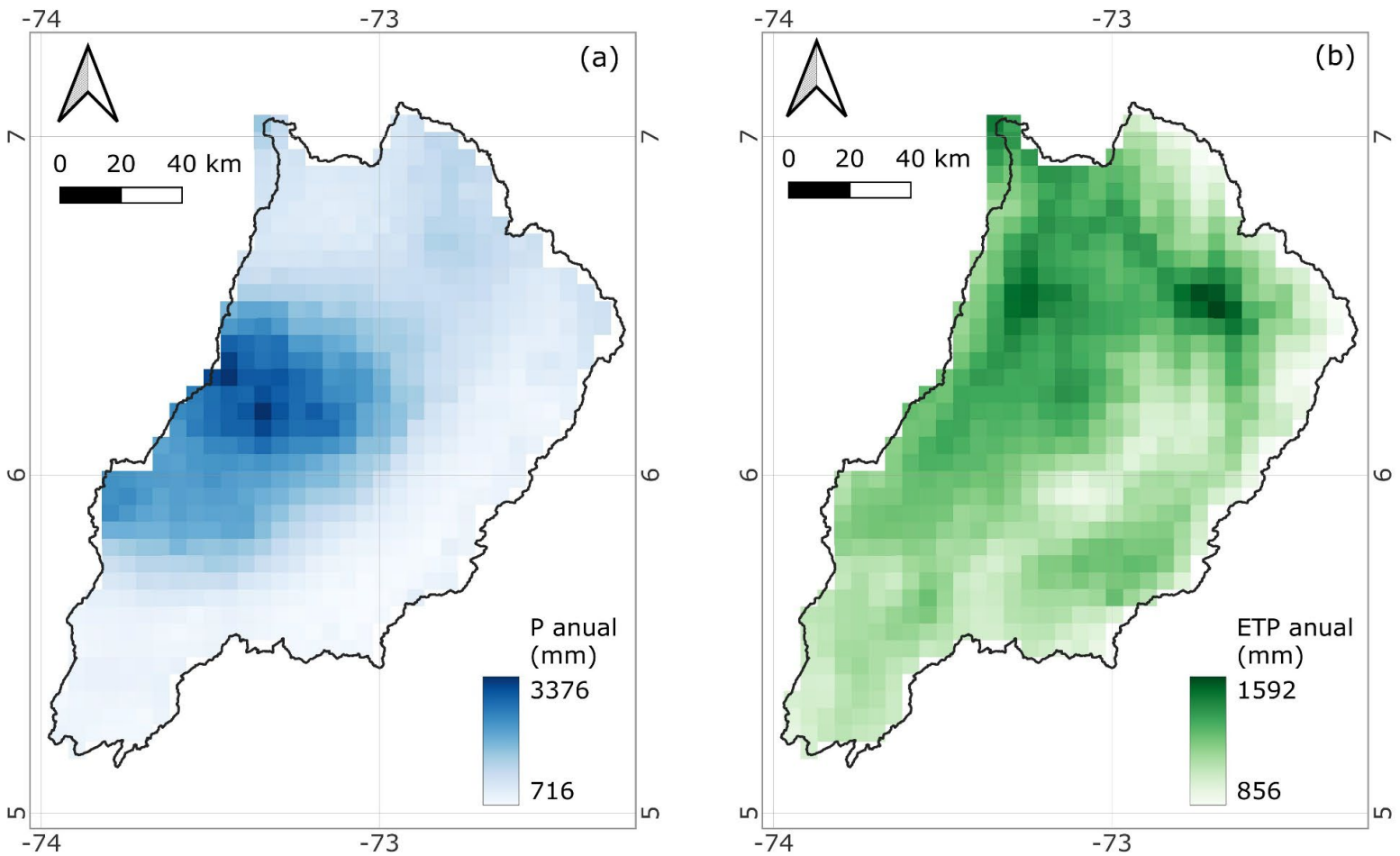


Figura 2. Distribución espacial de los valores anuales de a) precipitación y b) evapotranspiración potencial.

Tabla 2. P y ETP anual para las subcuencas de análisis.

Subcuenca	Código	P (mm/año)	ETP (mm/año)	ETP/P
El Tablazo	24067010	1453	1 186	0.81
Puente Colonial	24037300	904	1 032	1.14

De la Tabla 1 y la Tabla 2 se pueden confirmar las diferencias entre las dos subcuencas seleccionadas para los análisis. Por un lado, se tiene que son subcuencas con áreas de diferentes órdenes de magnitud (32 km² frente a 20 439 km²); por el otro lado, el comportamiento anual de la P y ETP son diferentes. La subcuenca con cierre en El Tablazo es una cuenca limitada por la energía y la de Puente Colonial una limitada por la disponibilidad de agua (Budyko, 1974).

Modelo Dynamic Water Balance (DWB)

DWB es un modelo propuesto por Zhang *et al.* (2008), de tipo conceptual y que ha sido implementado exitosamente en diferentes estudios realizados en el territorio colombiano (García-Echeverri, 2017; IDEAM, 2019; Londoño, Ortiz, Carvajal, & Mesa, 2010; Rodríguez *et al.*, 2020). Para el presente trabajo se utilizó la versión semidistribuida disponible en el paquete de R DWBmodelUN (Duque, Vega, Arboleda, & Zamora, 2020).

La esquematización del modelo DWB se presenta en la Figura 3. Este modelo utiliza P y ETP como entradas de tipo rejilla o ráster. Se apoya en dos tanques que conceptualizan almacenamientos subsuperficiales y subterráneos. El tanque superior representa el agua almacenada en la zona radicular del suelo (S) y el inferior almacenamiento de agua subterránea susceptible a aportar caudal base a una corriente superficial de agua (G). La salida del modelo es caudal total (Qt), que corresponde a la suma entre el caudal de escorrentía directa (Qd) y el caudal base de la corriente (Qb). Los procesos intermedios son retención de la lluvia (X), agua disponible para el consumo de la cuenca (W), recarga (R), oportunidad de evapotranspiración (Y) y evapotranspiración

real (ETR). Se pueden consultar descripciones más completas del modelo DWB en diferentes autores, como en Zhang *et al.* (2008) o en García-Echeverri (2017).

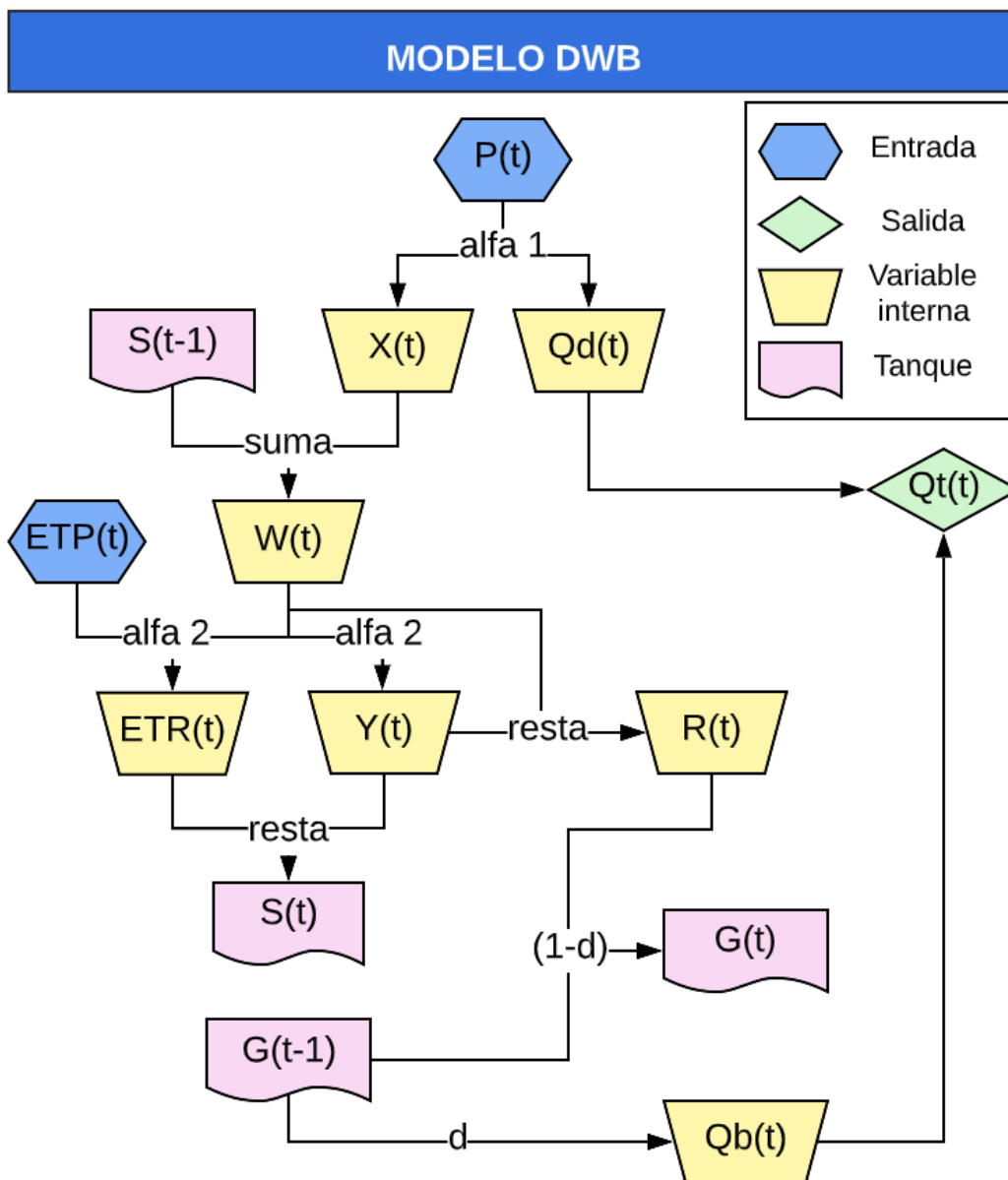


Figura 3. Esquematización de los procesos y flujos del modelo DWB.

Todos los procesos de DWB se ajustan a las condiciones de cada cuenca mediante cuatro parámetros (García-Echeverri, 2022; Rodríguez, 2021; Zhang *et al.*, 2008). En la Tabla 3 se presenta una descripción de cada uno de ellos.

Tabla 3. Descripción de los parámetros de DWB.

Símbolo	Descripción	Dominio
α_1	Eficiencia de la retención de agua en el suelo radicular	(0, 1)
α_2	Eficiencia del proceso de evapotranspiración	(0, 1)
d	Constante de proporcionalidad lineal entre el almacenamiento de agua subterránea y la producción de caudal base	(0, 1)
S_{max}	Almacenamiento máximo de agua en el suelo radicular	(0, 2 000)

Firmas de las CDC

Las firmas o métricas utilizadas para evaluar de forma cuantitativa la similitud entre las CDC observadas y simuladas fueron propuestas por Casper *et al.* (2011). Con estas firmas se evalúa el sesgo en diferentes partes de la curva. En este caso se utilizaron aquellas enfocadas en la representación de los caudales medio BiasRR (Ecuación (1)), máximo BiasFHV (Ecuación (2)) y mínimo BiasFLV (Ecuación (3)):

$$\text{BiasRR} = \frac{\text{media}(\text{CDC}_{\text{sim}}) - \text{media}(\text{CDC}_{\text{obs}})}{\text{media}(\text{CDC}_{\text{obs}})} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{BiasFHV} = \frac{\int_0^{0.02} \text{CDC}_{\text{sim},p} dp - \int_0^{0.02} \text{CDC}_{\text{obs},p} dp}{\int_0^{0.02} \text{CDC}_{\text{obs},p} dp} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{BIASFLV} = \frac{\int_{0.7}^1 [\log(\text{CDC}_{\text{sim},p}) - \log(Q_{\text{min}})] dp - \int_{0.7}^1 [\log(\text{CDC}_{\text{obs},p}) - \log(Q_{\text{min}})] dp}{\int_{0.7}^1 [\log(\text{CDC}_{\text{obs},p}) - \log(Q_{\text{min}})] dp} \times 100 \quad (3)$$

Donde:

Qobs = caudales observados.

Qsim = caudales simulados.

Qmin = caudal mínimo de todos los valores analizados, es decir, del total de registros observados y simulados.

CDCobs = curvas observadas.

CDCsim = curvas simuladas.

Metodología

Se elaboró una metodología adaptando la propuesta de Bai, Liu y Xie (2021). Inicialmente se identificaron cuatro subperiodos de cuatro años dentro del periodo evaluado (1983-2019). Esta identificación se basó en la estacionalidad del índice de aridez (IA) anual que se estimó para la zona de estudio (Ecuación (4)). Con base en el IA se seleccionaron los dos periodos más secos y los dos periodos más húmedos. La Ecuación (4) es adimensional y fue la misma aplicada en el ENA 2018 (IDEAM, 2019):

$$\text{IA} = \frac{\text{ETP} - \text{ETR}}{\text{ETR}} \quad (4)$$

Para estimar la evapotranspiración real (ETR) requerida en la ecuación anterior se usó la Ecuación (5) propuesta por Budyko (1974), la cual es función de la P total y la ETP total, ambas a paso de tiempo anual:

$$ETR = P \cdot \sqrt{\left(1 - e^{-\frac{ETP}{P}}\right) \cdot \frac{ETP}{P} \cdot \tanh\left(\frac{P}{ETP}\right)} \quad (5)$$

A partir del cálculo de la media móvil con una ventana de cinco años de la serie anual del IA, se identifican los periodos más húmedos (H1 Y H2) y los más secos (S1 y S2).

Con la identificación de los dos periodos más secos y los dos más húmedos se implementó un esquema de calibración propuesto por Bai *et al.* (2021) para estudiar el efecto que tiene la variabilidad climática sobre los resultados del modelo DWB. El esquema de calibración consiste en la realización de experimentos calibración-validación, de tal manera que existan experimentos donde la calibración y validación se ejecuten en subperiodos climáticamente contrastantes, y que también haya experimentos en donde se involucren subperiodos climáticamente similares.

En la Figura 4 se presentan los esquemas de calibración-validación planteados. La cola de cada flecha indica el subperiodo de calibración y la punta representa el periodo de validación. Por ejemplo, la flecha superior que tiene la cola en el periodo húmedo 1 (H1) y la punta en el periodo seco 1 (S1) indica un experimento calibración-validación (el H1-S1) en el que la calibración se realiza sobre la información disponible en el

subperiodo H1 y los parámetros obtenidos se validan en el subperiodo S1. Así las cosas, se propone un esquema de calibración con ocho conjuntos de parámetros diferentes, uno por cada flecha dibujada.

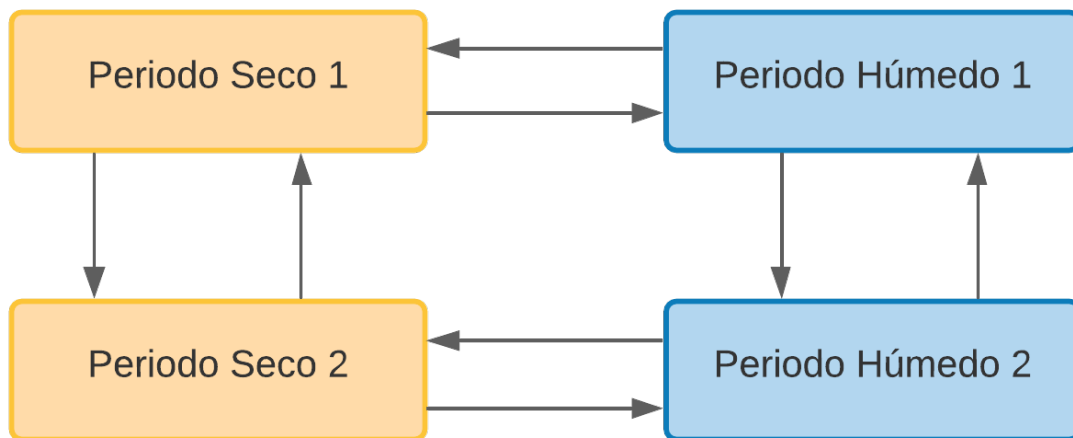


Figura 4. Experimentos de calibración-validación. Adaptado de Bai *et al.* (2021).

La calibración de cada uno de los experimentos planteados se realizó con el paquete de R DWBmodelUN, que permite el acople con el algoritmo *Dynamic Dimensional Search* (DDS) (Tolson & Shoemaker, 2007), codificado por Duque y Fuentes (2019). Dentro de la parametrización de DDS se definió realizar 1 000 iteraciones por experimento utilizando como función objetivo (FO) la Ecuación (6), basada en la eficiencia de Kling y Gupta (KGE) (Gupta, Kling, Yilmaz, & Martinez, 2009):

$$FO = -1 * \left(1 - \sqrt{(r-1)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2} \right) \quad (6)$$

En la Ecuación (6), r indica la correlación lineal; μ corresponde al promedio, y σ a la desviación estándar tanto de la serie observada (obs) como de la serie simulada (sim). Para la FO, el valor óptimo es -1 , alcanzando valores posibles de hasta ∞ .

Para el cálculo de la función objetivo se usó toda la información de caudal disponible registrada por las 25 estaciones hidrológicas presentes al interior de la zona de estudio para el periodo 1983-2019. Con los resultados de cada experimento se construyeron CDC diarias quinquenales y se compararon con las obtenidas de los datos observados en las dos estaciones de análisis. Estas curvas se generaron tanto para los resultados de calibración como de validación. Las CDC observadas y simuladas se evaluaron cualitativa y cuantitativamente.

Resultados

La Figura 5 muestra la serie de tiempo del IA en negro, la media móvil calculada al IA en azul (MedMov) y la media multianual del IA en rosado (MedMul). Por último, los polígonos de colores pastel indican los subperiodos seleccionados y su detalle temporal se presenta en la Tabla 4.

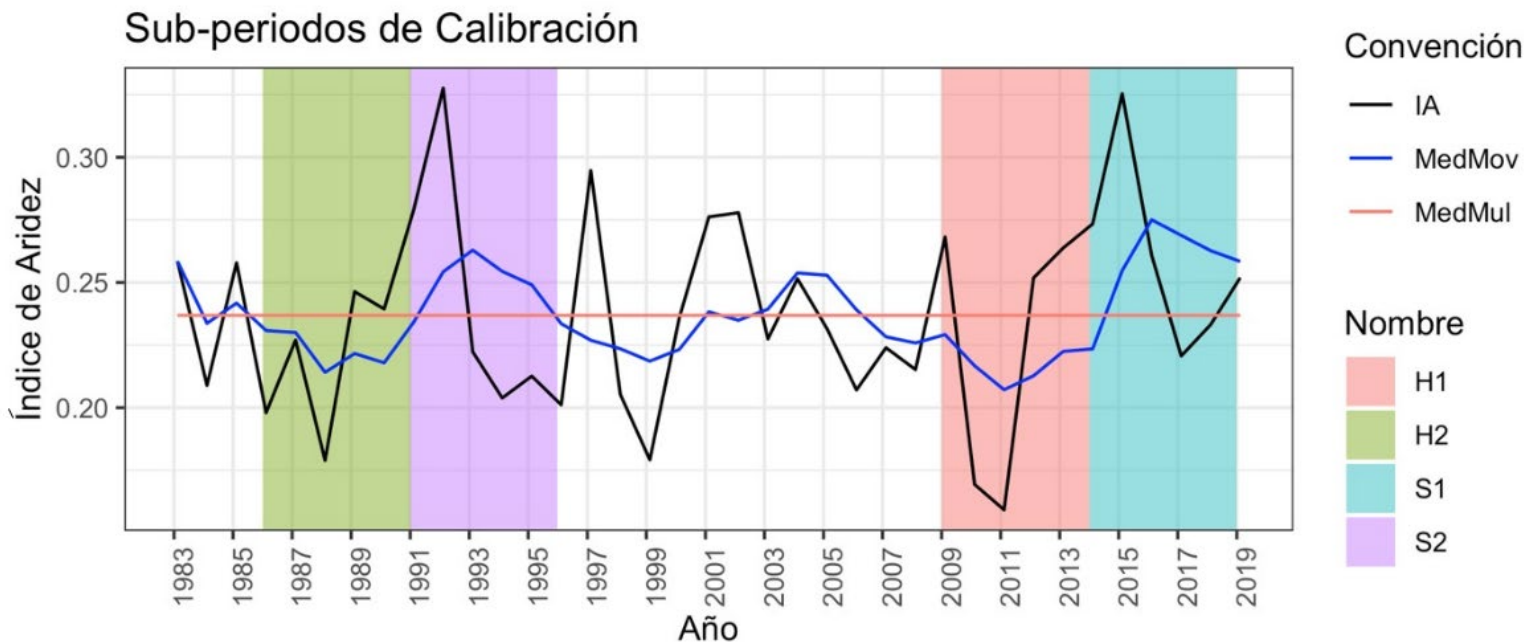


Figura 5. Serie de tiempo del índice de aridez promedio y selección de los cuatro periodos climáticamente contrastantes.

Tabla 4. Rango de los cuatro subperiodos seleccionados a partir del IA.

ID	Nombre	Fecha inicio	Fecha final
H1	Periodo más húmedo 1	2009-01-01	2013-12-31
H2	Periodo más húmedo 2	1986-01-01	1990-12-31
S1*	Periodo más seco 1	2014-01-01	2018-12-31
S2	Periodo más seco 2	1991-01-01	1995-12-31

*Este periodo no puede ser analizado en la estación El Tablazo debido a la disponibilidad de los datos.

En la Tabla 5 se muestra el FO obtenido en la calibración de cada experimento. Se puede ver que el experimento que mejor ajuste a los

caudales observados fue el H1-S1 (FO de -0.51) y el de peor ajuste fue el S2-S1 (FO de 0.22); estos valores se presentan sombreados con colores verde y naranja, respectivamente.

Tabla 5. Resultados de la función objetivo en la calibración de los ocho experimentos.

	S2-S1	S2-H2	H2-S2	H2-H1	S1-H1	H1-H2	S1-S2	H1-S1
FO	0.22	-0.02	-0.27	-0.34	-0.40	-0.39	-0.46	-0.51

Por otro lado, se puede observar que experimentos calibrados en un mismo periodo de tiempo generan valores de FO diferentes, por ejemplo, H2-S2 y H2-H1. Lo anterior indica que el número de iteraciones utilizadas en el algoritmo DDS puede ser aumentado para llegar a una identificación global de parámetros en cada periodo de calibración. La Figura 6 corresponde a un ejemplo de tres intentos de calibración realizados para el periodo H2, donde se puede observar que la FO mejora a medida que aumenta el número de iteraciones. Se hace énfasis en que los tres intentos mostraron un resultado diferente al realizar 1 000 iteraciones, esto puede deberse a que la información de caudal observado puede ser insuficiente para llegar a una solución global.

Calibración en H2

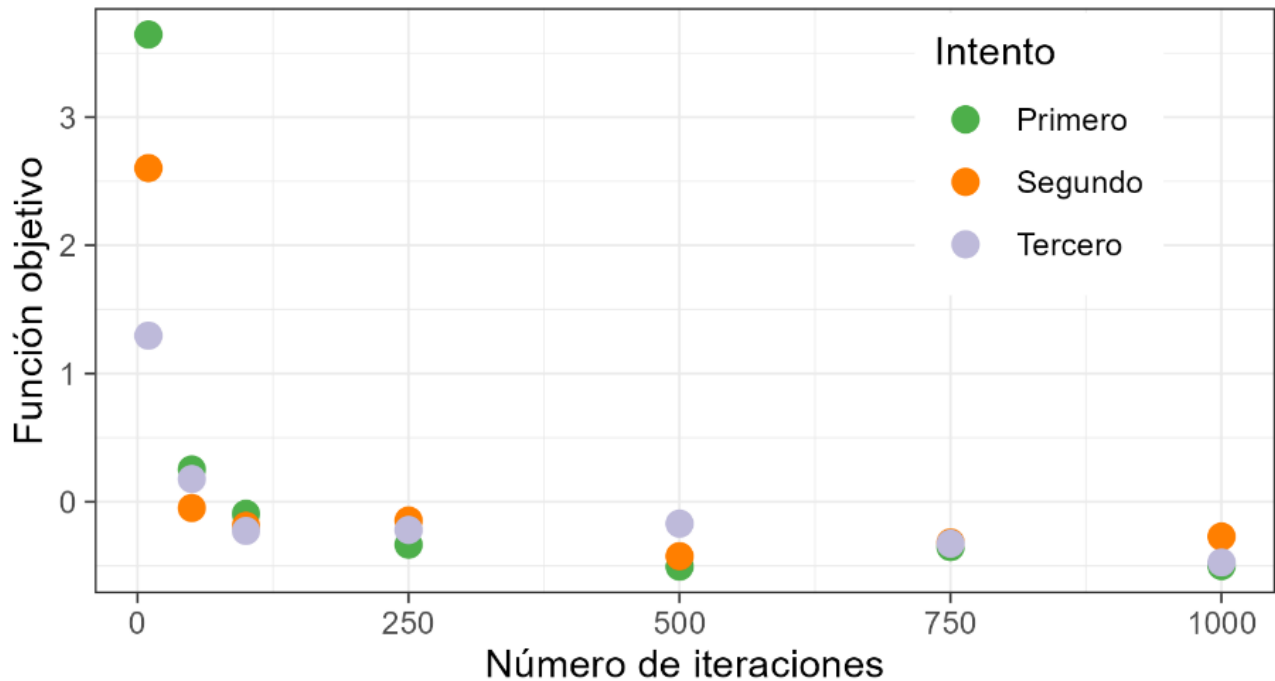


Figura 6. Función objetivo vs. número de iteraciones para la calibración en H2.

La Figura 7 muestra las CDC obtenidas en la etapa de calibración del experimento con mejor y peor desempeño (H1-S1 y S2-S1, respectivamente). En la Figura 7a se muestra el mejor resultado en la estación El Tablazo (H1-S1), aquí la CDC simulada presenta una buena estimación de la observación desde los caudales altos hasta aquellos con probabilidad de excedencia (P_e) del 50 %, pero a partir de esta probabilidad se empiezan a presentar resultados con sobreestimación. En la misma estación, el experimento que reportó el menor valor de la FO (S2-S1) también tiende a sobreestimar los caudales, con la diferencia que este comportamiento se observa a lo largo de toda la curva (Figura 7b).

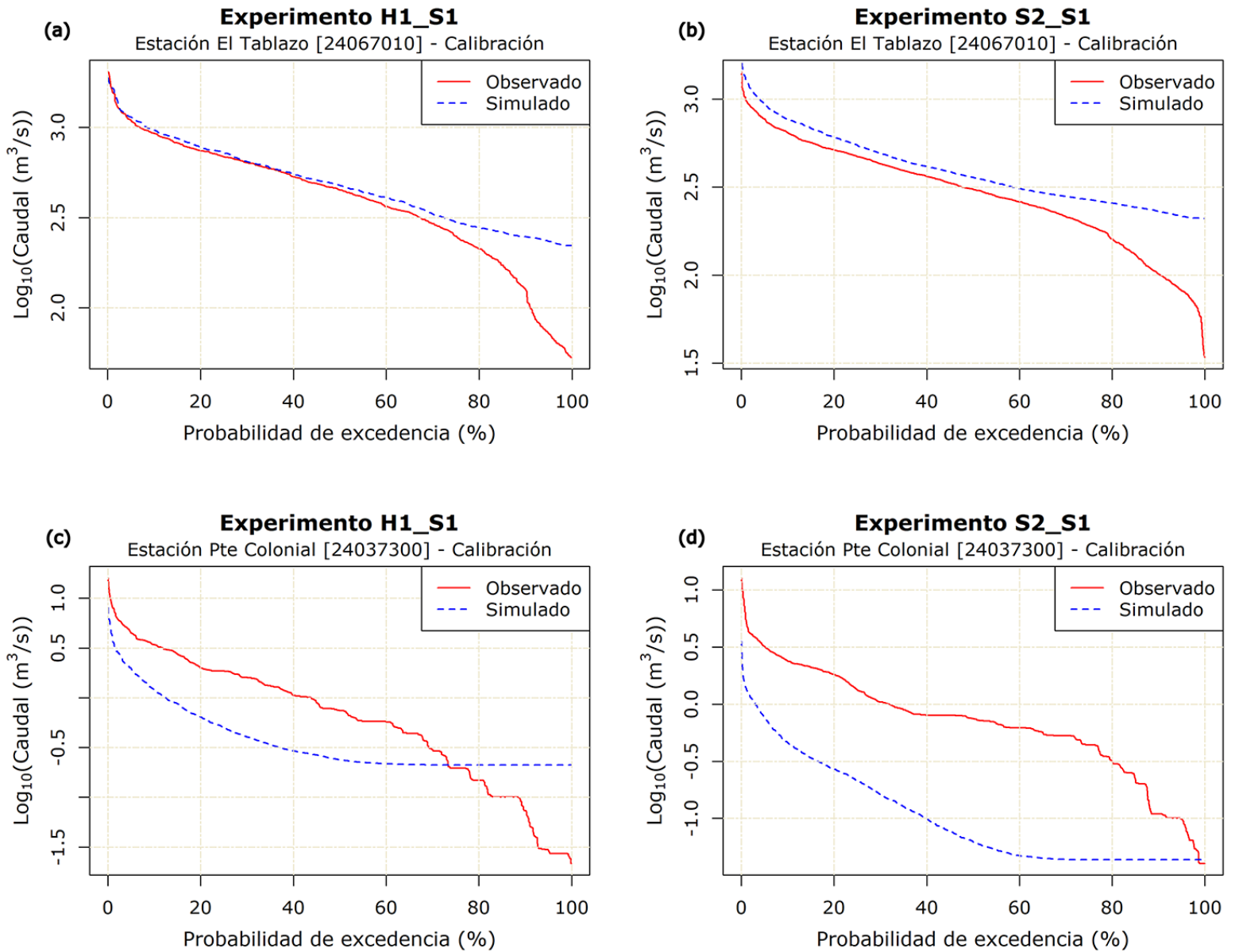


Figura 7. CDC de H1-S1 y S2-S1 en las estaciones de análisis para el periodo de calibración.

Las curvas de la estación Puente Colonial muestran visualmente un peor ajuste con respecto a lo reportado en la estación El Tablazo. En este caso, el modelo y sus parámetros calibrados no logran reproducir el rango de valores de caudales observados en la subcuenca, y por lo general hay una tendencia a subestimar el caudal (Figura 7c y 7d). En el caso del experimento H1-S1 (Figura 7c), la curva presenta una subestimación del caudal hasta la probabilidad de excedencia (P_e) del 75 %, y de este punto hasta 100 % de P_e la curva simulada comienza a sobreestimar con un caudal que permanece constante desde la una P_e de 52 % hasta el 100 %. Por otra parte, en el experimento S2-S1 (Figura 7d), se observa una subestimación del caudal a lo largo de toda la curva. Tanto en las gráficas c y d de la Figura 7 se presenta una tendencia de un caudal constante para P_e superiores al 50 %.

Según lo identificado en las CDCs descritas anteriormente, fue posible obtener curvas que logran un buen ajuste en los rangos de caudales altos y medios. Por otra parte, no fue posible obtener una estimación igual de buena para los caudales bajos. Lo último hace notar que el modelo escogido no logra con la estructura matemática que debe simular de modo adecuado la producción de caudal base, pero logra en cambio una sobreestimación de este en la mayoría de los casos.

La Tabla 6 presenta las firmas de sesgo obtenidas de las curvas simuladas y observadas en la etapa de calibración. Los colores verdes indican sobreestimación y los naranjas subestimación del caudal observado. Además, en esta tabla no hay valores disponibles de las firmas para los experimentos S1-H1 y S1-S2 para la estación El Tablazo debido a la inexistencia de registros en la estación El Tablazo para el periodo S1 (2014-2018).

Tabla 6. Firmas de sesgo de las CDC etapa de calibración.

	El Tablazo			Puente Colonial		
	BiasRR (%)	FHV (%)	FLV (%)	BiasRR (%)	FHV (%)	FLV (%)
H1_H2	15	7	-77	-57	-30	-100
H1_S1	10	-2	-81	-60	-50	-100
H2_H1	22	14	-90	-68	-54	-100
H2_S2	14	-8	-76	-70	-60	-91
S1_H1				-76	-66	-100
S1_S2				-70	-61	-100
S2_H2	29	37	-96	-77	-77	-100
S2_S1	26	28	-89	-83	-77	-100

Los resultados obtenidos muestran que en la estación El Tablazo en todos los casos el caudal medio (BiasRR) es sobreestimado y que la menor sobreestimación se dio con el experimento H1-S1 (10 %). Por otro lado, los caudales altos son generalmente sobreestimados (FHV), pero en menor magnitud. Con excepción a los experimentos H1-S1 y H2-S2, donde los caudales altos son subestimados en un 2 y 8 %, respectivamente. En cuanto a los caudales bajos, el FLV muestra subestimaciones mayores al 77 % en todos los experimentos. En la estación Puente Colonial, los caudales simulados medios, altos y bajos (BiasRR, FHV y FLV) subestiman el valor observado.

Los resultados presentados sobre las firmas de CDC en calibración indican que la estimación de los componentes de estas curvas (caudales

medios, altos o bajos) depende de factores adicionales al modelo hidrológico escogido, lo anterior debido a la diferencia notable entre las firmas de Puente Colonial y El Tablazo. La disponibilidad de información puede ser uno de esos factores adicionales, sin embargo se observa que la subcuenca que tuvo una cantidad de información más limitada para la calibración (El Tablazo) logra mejores resultados y esto se atribuye a que existen estaciones al interior de la cuenca que le aportan una ganancia en la FO durante la calibración, ventaja que no existe en la subcuenca de Puente Colonial, donde por su pequeño tamaño (32 km²) solo se tiene registro de caudal en el punto de cierre; aquí también puede plantearse que los procesos hidrológicos ocurren en una escala inferior a la diaria.

Es de resaltar la prevalencia que tiene la subestimación de caudales bajos en ambas áreas de estudio. Al respecto, ya otros autores han discutido acerca de las deficiencias que presenta DWB para estimar caudales bajos (Wang *et al.*, 2011), así que el bajo desempeño de la firma FLV puede deberse a la debilidad del modelo hidrológico escogido para simular el caudal base.

En la Tabla 7 se presentan las firmas de sesgo obtenidas de las curvas simuladas y observadas en la etapa de validación. Los colores verdes indican sobreestimación y los naranjas subestimación del caudal observado.

Tabla 7. Firmas de sesgo de las CDC etapa de validación.

	El Tablazo			Puente Colonial		
	BiasRR (%)	FHV (%)	FLV (%)	BiasRR (%)	FHV (%)	FLV (%)
H1_H2	23	14	-80	-58	-34	-100
H1_S1				-61	-61	-100
H2_H1	13	8	-89	-66	-49	-100
H2_S2	37	34	-82	-72	-62	-96
S1_H1	152	47	-96	-76	-57	-100
S1_S2	151	76	-96	-73	-72	-100
S2_H2	10	3	-92	-75	-64	-100
S2_S1				-83	-74	-100

En El Tablazo persiste la sobreestimación de caudales medios y altos (BiasRR y FHV); la firma BiasRR tiene un valor mínimo de 10 % en S2-H2, mientras que FHV tiene un valor mínimo de 3 % en S2-H2. La subestimación del caudal base también persiste y en validación toma un valor mínimo de 80 %. Es de notar las sobreestimaciones superiores a 100 % obtenidas en S1-H1 y S1-S2; eran esperadas debido a la no disponibilidad de información de caudal en El Tablazo para el periodo S1 (a partir del año 2013). En Puente Colonial se mantiene la subestimación de todos los componentes de la CDC estudiados.

Discusión

La inclusión de análisis de CDC en los estudios hidrológicos corresponde a una práctica extendida, especialmente porque estas curvas contienen información asociada con el régimen de descargas, el cual es importante por ejemplo en la definición de volúmenes a captar de una cuenca hidrográfica. Por este motivo, diversos autores se han enfocado en proponer metodologías de regionalización para la estimación de CDC en cuencas no instrumentadas (Salazar-Oliveiros, 2017; Gallego-Arias & Carvajal-Serna, 2017; Castellarin, Galeati, Brandimarte, Montanari, & Brath, 2004; Smakhtin, Hughes, & Creuse-Naudine, 1997).

Adicional a las metodologías de regionalización, es posible recurrir a la modelación hidrológica para la obtención de CDCs. Como resultado, modelos como WASMOD, Dynamic TOPMODEL, SACRAMENTO, HYMOD y DWB se han utilizado para su generación (Westerberg *et al.*, 2011; Chouaib, Alila, & Caldwell, 2019; Kim, Kwon, & Han, 2021). En el caso del modelo DWB, la representación de las CDC se analizó en cuencas australianas que tienen áreas entre 130 y 471 km², donde los resultados obtenidos indicaron que a escala diaria, las CDC fueron representadas de forma adecuada con tendencia a la sobreestimación del caudal observado, especialmente en las cuencas más pequeñas (Zhang *et al.*, 2008). Aquí se debe resaltar que los análisis de CDC se hicieron con estadísticos aplicados a la curva en su totalidad.

Los análisis de firmas de CDC se han utilizado para extraer y resumir información contenida en los caudales en partes específicas de las curvas. En su mayoría se han aplicado para evaluar la respuesta hidrológica ante el cambio climático en cuencas iraníes, suecas, estadounidenses

(Fatehifar, Goodarzi, Hedesh, & Dastjerdi, 2021; Teutschbein, Grabs, Karlsen, Laudon, & Bishop, 2015; Mendoza *et al.*, 2015). Específicamente, se han empleado para evaluar los flujos máximos y mínimos generados por diferentes modelos de predicción climatológica.

En el caso de Colombia, se evaluaron 30 cuencas con áreas en un rango entre 128 y 74 435 km² (García-Echeverri, 2022). En este trabajo se realizó el cálculo de las firmas de los diferentes segmentos de las CDC diarias; los resultados mostraron que los caudales bajos no son bien representados por DWB. Esta pobre representación se atribuye a la falta de una rutina de tránsito hidrológico y a limitaciones en el manejo de los flujos subsuperficiales por parte del modelo. Se debe destacar que en esta implementación no se observaron malos resultados en el BiasRR y FHV, lo cual se podría atribuir a la función objetivo utilizada, que estuvo compuesta por el KGE y el error relativo del volumen.

Un comportamiento similar se observa en las dos cuencas analizadas en el presente trabajo, donde en la subcuenca de mayor área (20 439 km² con cierre en El Tablazo) se logró una buena representación, sobre todo en caudales máximos. Para el caso de la subcuenca más pequeña (32 km² con cierre en Puente Colonial), la subestimación es bastante notoria, lo cual puede indicar que es demasiado pequeña para ser analizada a escala diaria y que puede requerir de un análisis a una menor escala temporal.

De manera general, en la estación de El Tablazo se presentaron mejores firmas de la CDC; esto se asocia con la cantidad de información hidrológica complementaria disponible al interior de la subcuenca. Al comparar los resultados de Puente Colonial y El Tablazo se hace evidente una diferencia en cuanto a la magnitud de los caudales altos y medios

simulados; en El Tablazo por lo general hay sobreestimación de caudales y en Puente Colonial hay subestimación.

El caudal base, por otro lado, no es bien representado y parece comportarse de manera diferente a los caudales altos y medios. Los factores que afectan la variación en las firmas FHV y BiasRR parecen no afectar de manera significativa la firma FLV. Todos los casos calibrados con periodos húmedos obtuvieron mejores firmas que las obtenidas al calibrar con periodos secos. En cuanto a la variación del valor del sesgo al pasar de calibración a validación, se encontró que las firmas presentan rangos de valores muy similares en calibración y validación.

Las firmas y funciones objetivo calculadas para los diferentes experimentos de calibración-validación indican que el modelo genera mejor respuesta en ciertas combinaciones de periodos climatológicos. Para el caso de la subcuenca con cierre en El Tablazo, el mejor resultado se obtuvo con el experimento H1_S1 (calibración en periodo húmedo H1 y validación en periodo seco S1) tanto en función objetivo como en términos de BiasRR y FHV. Aquí es importante enfatizar que en términos de firmas, los experimentos de comportamiento hidrológicos contrastantes tuvieron los valores más bajos. En cuanto a la firma FLV, la baja representación de los caudales bajos dada por el modelo impide evidenciar una tendencia concluyente.

Los resultados anteriores reafirman lo encontrado por Ley, Hellebrand, Casper y Fenicia (2016), quienes indican que las métricas tradicionales son adecuadas para categorizar el rendimiento de un modelo entre satisfactorio y no satisfactorio, pero que tienen limitaciones a la hora de evaluar las partes especiales de un hidrograma, como caudales altos y mínimos. Además, aunque los autores resaltan las bondades de

las firmas CDC aplicadas de forma independiente, sugieren la evaluación de una métrica compuesta por todas las firmas, con miras a simplificar el análisis de los resultados. Cabe resaltar que la selección entre una firma independiente o una métrica compuesta está dada por el objetivo de modelación de cada ejercicio.

Conclusiones

Cuando se estudia una subcuenca grande como la de El Tablazo (Tabla 1), el modelo DWB logra en el 58 % de los experimentos llegar a diferencias con la curva observada de menos del 20 % en sus componentes de caudal medio (BiasRR) y caudal alto (FHV), lo que parece indicar que la respuesta de la cuenca a un evento promedio y extremo de tormenta se puede analizar de forma adecuada con el modelo DWB a escala diaria.

Sin embargo, el componente relacionado con el caudal base no logra, en ningún caso, un valor aceptable, con valores superiores al 70 % de subestimación. Esto indica que el modelo DWB no puede reproducir las dinámicas que tienen lugar en la cuenca para producir el caudal base de la corriente. Así, una futura reformulación de DWB a escala diaria debe prestar atención a los componentes de su estructura encargados de simular la generación de escurrimiento subsuperficial.

Cuando se estudia una subcuenca pequeña como la de Puente Colonial (Tabla 1), los indicadores siempre tuvieron un valor negativo inferior al -40 %, que indica gran subestimación; en ningún caso se logró obtener una curva simulada en Puente Colonial que se desviara de la curva observada menos de un 30 %, lo que sí se logró en El Tablazo.

Se puede pensar inicialmente que la extensión de la cuenca tiene que ver con la capacidad de DWB para generar curvas de duración de caudal aceptables, es decir, a mayor área de la cuenca mejor es la simulación de la curva. No obstante, existen otros factores que pueden influir en la diferencia observada en los indicadores, como la selección de la función objetivo y la configuración del algoritmo de calibración (en este caso, DDS). Otros factores no analizados en este trabajo, como las diferencias de la cobertura y uso del suelo, y las características hidrogeológicas de la cuenca, también pueden estar relacionadas con las diferencias obtenidas en las dos cuencas.

A partir de la implementación de las firmas de la CDC en la metodología, se puede concluir que DWB es capaz de producir CDC con un ajuste aceptable en los componentes de caudal alto y medio. Por otro lado, se concluye que para la subcuenca del río Sogamoso con cierre en la estación El Tablazo, los experimentos de calibración-validación en condiciones contrastantes son los que mejores resultados generan. Aquí cabe aclarar que la anterior conclusión solo aplica para la cuenca estudiada y que se hace necesario implementar la metodología en otras áreas, para así concluir de forma general acerca de DWB y la estrategia de calibración por diferentes condiciones hidrológicas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto "Dynamic Water Balance model: herramienta de modelación hidrológica para cuencas tropicales a escala diaria" desarrollado en la Universidad Nacional de Colombia, el cual fue aprobado mediante resolución 997 de 2020 de la Vicerrectoría de la sede Bogotá e identificado con código Hermes 48510.

Referencias

- Ashouri, H., Hsu, K., Sorooshian, S., Braithwaite, D. K., Knapp, K. R., Cecil, L. D., Nelson, B. R., & Prat, O. P. (2015). PERSIANN-CDR: Daily precipitation climate data record from multisatellite observations for hydrological and climate studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(1), 69-83. DOI: 10.1175/BAMS-D-13-00068.1
- Baez-Villanueva, O. M., Zambrano-Bigiarini, M., Beck, H. E., McNamara, I., Ribbe, L., Nauditt, A., Birkel, C., Verbist, K., Giraldo-Osorio, J. D., & Xuan-Thinh, N. (2020). RF-MEP: A novel random forest method for merging gridded precipitation products and ground-based measurements. *Remote Sensing of Environment*, 239, 111606. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111606
- Bai, P., Liu, W., & Guo, M. (2014). Impacts of climate variability and human activities on decrease in streamflow in the Qinhe River, China. *Theoretical and Applied Climatology*, 117(1-2), 293-301. DOI: 10.1007/s00704-013-1009-7
- Bai, P., Liu, X., & Xie, J. (2021). Simulating runoff under changing climatic conditions: A comparison of the long short-term memory network with two conceptual hydrologic models. *Journal of Hydrology*, 592(August 2020), 125779. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125779
- Botter, G., Zanardo, S., Porporato, A., Rodriguez-Iturbe, I., & Rinaldo, A. (2008). Ecohydrological model of flow duration curves and annual minima. *Water Resources Research*, 44(8). DOI: 10.1029/2008wr006814

- Budyko, M. (1974). *Climate and Life*. XVII, Academic Press, New York.
- Campos-Aranda, D. (1992). *Procesos del ciclo hidrológico*. San Luis Potosí, México: Editorial Universitaria Potosina.
- Casper, M. C., Grigoryan, G., Gronz, O., Gutjahr, O., Heinemann, G., & Ley, R. (2011). Analysis of projected hydrological behavior of catchments based on signature indices. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 8(2), 3571-3597. DOI: 10.5194/hessd-8-3571-2011
- Castellarin, A., Galeati, G., Brandimarte, L., Montanari, A., & Brath, A. (2004). Regional flow-duration curves: Reliability for ungauged basins. *Advances in Water Resources*, 27(10), 953-965. DOI: 10.1016/j.advwatres.2004.08.005
- Chouaib, W., Alila, Y., & Caldwell, P. V. (2019). On the use of mean monthly runoff to predict the flow-duration curve in ungauged catchments. *Hydrological Sciences Journal*, 64(13), 1573-1587, DOI: 10.1080/02626667.2019.1657233
- Cortés, G., Ragettli, S., Pellicciotti, F., & Mcphee, J. (2011). Hydrological models and data scarcity: On the quest for a model structure appropriate for modeling water availability under the present and future climate. *AGU Fall Meeting Abstracts*. Recuperado de <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2011AGUFM.H32C..01C/abstract>
- Duque, N., Vega, C., Arboleda, P., & Zamora, D. (2020). *DWBmodelUN: Dynamic water balance a hydrological model*. Recuperado de <https://cran.r-project.org/package=DWBmodelUN>

- Duque, N., & Fuentes, C. (2019). Usando R para una fácil y eficiente predicción de la incertidumbre de simulaciones de modelos ambientales. *Revista Hidrolatinoamericana de Jóvenes Investigadores y Profesionales*, 3, 17-20.
- Fatehifar, A., Goodarzi, M. R., Hedesh, S. S., & Dastjerdi, P. S. (2021). Assessing watershed hydrological response to climate change based on signature indices. *Journal of Water and Climate Change*. Recuperado de <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:235574218>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2. DOI: 10.1038/sdata.2015.66
- Gallego-Arias, S., & Carvajal-Serna, L. F. (2017). Regionalización de curvas de duración de caudales en el departamento de Antioquia-Colombia. *Revista EIA*, 14(27), 21-30. DOI: 10.24050/reia.v14i27.1158
- García-Echeverri, C. (2017). Evaluación del desempeño del Modelo Dynamic Water Balance en la Macrocuenca Magdalena-Cauca. 103. Tesis de pregrado. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
- García-Echeverri, C. (2022). *Evaluación del modelo hidrológico Dynamic Water Balance a escala diaria en cuencas tropicales*. Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/81573>

- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1-2), 80-91. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.003
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96-99. DOI: 10.13031/2013.26773
- Hwang, J., & Devineni, N. (2022). An improved Zhang's dynamic water balance model using budyko-based snow representation for better streamflow predictions. *Water Resources Research*, 58. DOI: 10.1029/2021wr030203
- IDEAM, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2019). *Estudio nacional del agua 2018*. Recuperado de http://www.andi.com.co/Uploads/ENA_2018-comprimido.pdf
- Kim, K. B., Kwon, H.-H., & Han, D. (2021). Bias-correction schemes for calibrated flow in a conceptual hydrological model. *Hydrology Research*, 52(1), 196-211. DOI: 10.2166/nh.2021.043
- Krabbenhoft, C. A., Allen, G. H., Lin, P., Godsey, S. E., Allen, D. C., Burrows, R. M., DelVecchia, A. G., Fritz, K. M., Shanafield, M., Burgin, A. J., Zimmer, M. A., Datry, T., Dodds, W. K., Jones, C. N., Mims, M. C., Franklin, C., Hammond, J. C., Zipper, S., Ward, A. S., Costigan, K. H., Beck, H. E., & Olden, J. D. (2022). Assessing placement bias of the global river gauge network. *Nature Sustainability*, 5, 586-592. DOI: 10.1038/s41893-022-00873-0

- Kwakye, S. O., & Bárdossy, A. (2020). Hydrological modelling in data-scarce catchments: Black Volta basin in West Africa. *SN Applied Sciences*, 2, 628. DOI: 10.1007/s42452-020-2454-4
- Lehner, B., Verdin, K., & Jarvis, A. (2008). New global hydrography derived from spaceborne elevation data. *Eos*, 89(10), 93-94. DOI: 10.1029/2008EO100001
- Ley, R., Hellebrand, H., Casper, M. C., & Fenicia, F. (2016). Comparing classical performance measures with signature indices derived from flow duration curves to assess model structures as tools for catchment classification. *Hydrology Research*, 47, 1-14.
- Londoño, R. D., Ortiz, C., Carvajal, L. F., & Mesa, O. J. (2010). *Un modelo de balance hídrico a escalas mensual y diaria en cuencas colombianas*. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/8023>
- Mendoza, P. A., Clark, M. P., Mizukami, N., Newman, A. J., Barlage, M., Gutmann, E. D., Rasmussen, R. M., Rajagopalan, B., Brekke, L. D., & Arnold, J. R. (2015). Effects of hydrologic model choice and calibration on the portrayal of climate change impacts. *Journal of Hydrometeorology*, 16, 762-780. Recuperado de <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:59451691>
- Mohamoud, Y. (2008) Prediction of daily flow duration curves and streamflow for ungauged catchments using regional flow duration curves. *Hydrological Sciences Journal*, 53(4), 706-724. DOI: 10.1623/hysj.53.4.706

- Ridolfi, E., Kumar, H., & Bárdossy, A. (2020). A methodology to estimate flow duration curves at partially ungauged basins. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(4), 2043-2060. DOI: 10.5194/hess-24-2043-2020
- Rodríguez, C. D. (2021). Evaluación del desempeño del modelo DWB para estimar curvas de duración de caudales en la cuenca del río Sogamoso. Tesis de pregrado. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
- Rodríguez, E., Werner, M., Sánchez, I., Ramírez, W., Zamora, D., Duque, N., & Arboleda, P. (2016). *El proyecto Earth2Observe y su caso de estudio en la Macrocuenca Magdalena-Cauca, Colombia*. XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Lima, Perú.
- Rodríguez, E., Sánchez, I., Duque, N., Arboleda, P., Vega, C., Zamora, D., López, P., Kaune, A., Werner, M., García, C., & Burke, S. (2020). Combined use of local and global hydro meteorological data with hydrological models for water resources management in the Magdalena-Cauca Macro Basin, Colombia. *Water Resources Management*, 34(7), 2179-2199. DOI: 10.1007/s11269-019-02236-5
- Salazar-Oliveros, J. (2017). *Una metodología para la estimación de curvas de duración de caudales (cdc) en cuencas no instrumentadas. Caso de aplicación para Colombia en los departamentos de Santander y norte de Santander*. Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59160>

- Smakhtin, V. Y., Hughes, D. A., & Creuse-Naudine, E. (1997). Regionalization of daily flow characteristics in part of de Eastern Cape, South Africa. *Hydrological Sciences Journal*, 42(6). DOI: 10.1080/02626669709492088
- Sorooshian, S., Hsu, K., Gao, X., Gupta, H. V., Imam, B., & Braithwaite, D. (2000). Evaluation of PERSIANN system satellite-based estimates of tropical rainfall. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(9), 2035-2046. DOI: 10.1175/1520-0477(2000)081%3C2035:EOPSSE%3E2.3.CO;2
- Tekleab, S., Uhlenbrook, S., Mohamed, Y., Savenije, H. H. G., Temesgen, M., & Wenninger, J. (2011). Water balance modeling of Upper Blue Nile catchments using a top-down approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(7), 2179-2193. DOI: 10.5194/hess-15-2179-2011
- Teutschbein, C., Grabs, T., Karlsen, R. H., Laudon, H., & Bishop, K. (2015). Hydrological response to changing climate conditions: Spatial streamflow variability in the boreal region. *Water Resources Research*, 51(12), 9425-9446. DOI: 10.1002/2015WR017337
- Tolson, B. A., & Shoemaker, C. A. (2007). Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration. *Water Resources Research*, 43(1), 1-16. DOI: 10.1029/2005WR004723
- Wang, Q. J., Pagano, T. C., Zhou, S. L., Hapuarachchi, H. A. P., Zhang, L., & Robertson, D. E. (2011). Monthly versus daily water balance models in simulating monthly runoff. *Journal of Hydrology*, 404(3-4), 166-175. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.04.027

- Westerberg, I. K., Guerrero, J.-L., Younger, P. M., Beven, K. J., Seibert, J., Halldin, S., Freer, J. E., & Xu, C.-Y. (2011). Calibration of hydrological models using flow-duration curves. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 2205-2227. DOI: 10.5194/hess-15-2205-2011
- Zambrano-Bigiarini, M., Baez-Villanueva, O. M., & Giraldo-Osorio, J. (2020). *RFmerge: Merging of satellite datasets with ground observations using random forests. R package version 0.1-10*. Recuperado de <https://cran.r-project.org/package=RFmerge>
- Zhang, L., Potter, N., Hickel, K., Zhang, Y., & Shao, Q. (2008). Water balance modeling over variable time scales based on the Budyko framework - Model development and testing. *Journal of Hydrology*, 360(1-4), 117-131. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2008.07.021