

Principios de modelación hidrológica aplicados a estimaciones de balance hídrico

Motivación:

Cuantificar la disponibilidad hídrica en una cierta zona de interés, y prever potenciales cambios futuros resulta clave para un manejo eficiente y sustentable de los recursos hídricos. Dicha tarea conlleva la necesidad de entender y caracterizar los procesos que dominan el almacenamiento de agua y la generación de escorrentía a diferentes escalas. No obstante, la escasez de registros locales de larga data, espacialmente representativos, que den cuenta de procesos como la sublimación, infiltración, recarga, acumulación/derretimiento del manto nival, y transpiración desde plantas, entre otros, dificulta la comprensión de cómo se mueve el agua hasta salir del sistema hidrológico de interés (e.g., cuenca).

La falta de control continuo y distribuido de los procesos del ciclo hidrológico dificulta la obtención directa de ciertas variables de flujo (e.g., caudal, evapotranspiración) o estado (e.g., humedad del suelo, profundidad del manto nival) que se desee caracterizar. Así, la combinación de información proveniente de observaciones (e.g., registros fluviométricos) con modelos hidrológicos toma fuerza como una potencial alternativa para resolver el problema, más aún con las nuevas bases de datos disponibles (e.g., CAMELS-CL; Alvarez-Garreton et al., 2018) y los avances de la percepción remota (e.g., Entekhabi et al., 2010; Hall et al., 2006). En consecuencia, los modelos hidrológicos son una herramienta de gran utilidad en aplicaciones ligadas a: la gestión de recursos hídricos (e.g., Hublart et al., 2015; Westerberg et al., 2011), pronósticos operacionales (e.g., Emerton et al., 2018; Prudhomme et al., 2017; Wanders et al., 2019), análisis de eventos extremos (e.g., Thober et al., 2015), y estudios de impacto del cambio climático en la hidrología (e.g., Addor et al., 2014; Chegwiddden et al., 2019; Driessen et al., 2010), entre otros.

La Actualización del Balance Hídrico Nacional es un proyecto inter-disciplinario que toma ventaja de los últimos avances en información climática e hidrológica, modelos numéricos y técnicas de estimación de parámetros para estimar los principales almacenamientos y flujos de agua a lo largo del territorio nacional, tanto para un periodo climatológico base (1985-2015) como futuro (2030-2060). Para ello, se utilizó el modelo hidrológico de balance de energía y agua *Variable Infiltration Capacity* (VIC; Liang et al., 1996; Wood et al., 1992), distribuido espacialmente a una resolución de 0,05° latitud – longitud a lo largo de Chile continental, y forzado con series de precipitación, velocidad del viento, temperatura media y humedad relativa a escala tri-horaria, derivados de productos de reanálisis atmosféricos globales y productos grillados locales.

Objetivos:

El curso pretende capacitar e introducir a profesionales e investigadores del área de los recursos hídricos en la modelación hidrológica superficial, entregando herramientas que le permitan comprender, manipular y aplicar los resultados obtenidos en el proyecto Actualización del Balance Hídrico Nacional, BH, (DGA, 2017, 2018, 2019a, 2019b). A su vez, se discutirán los alcances y limitaciones de los diferentes resultados obtenidos, poniendo énfasis en los aprendizajes derivados del estudio y los desafíos que quedan por resolver.

Público objetivo:

El curso está orientado a profesionales e investigadores del área de los recursos hídricos, con interés en la utilización de los resultados generados en el contexto del BH. Los asistentes deberán acreditar que poseen conocimientos básicos sobre ciencias hidrológicas e, idealmente, una formación profesional en el ámbito de recursos hídricos. También es deseable que los asistentes tengan experiencia en modelación hidrológica, y nociones básicas de algún lenguaje de programación (e.g., R, Octave, Python, Matlab).

Modalidad del curso, cupos y valor:

El curso contempla clases teóricas, donde se proveerá al alumno de las competencias básicas para entender y manipular los resultados del BH, y prácticas, donde se resolverán problemas reales, utilizando bases de datos de la Dirección General de Aguas. A su vez, el curso considera un total de 27 horas de clases efectivas (formato en línea, sincrónicas, no grabadas) y 10 horas de dedicación personal, las cuales estarán destinadas a preparar el proyecto final del curso y acompañadas de sesiones de trabajo dirigido. **Las clases teóricas se realizarán los lunes, miércoles y viernes entre las 16:00 y 19:10 hrs**, incluyendo un descanso de 10 minutos entre cada módulo. Cada módulo teórico tiene una duración de 1,0 hrs, e incluye un módulo de discusión y preguntas de 0,5 hrs al finalizar el bloque. Por otro lado, **los módulos de taller práctico se realizarán los días sábado entre las 9:00 y 12:10 hrs y 14:30-16:00 hrs**, donde se incluyen dos bloques de 1,5 hrs y un receso de 10 minutos en la jornada de la mañana y un bloque en la tarde.

Se dispondrá de un total de **40 cupos** distribuidos entre público general (profesionales del área de recursos hídricos). Las **inscripciones estarán abiertas hasta el 16 de julio de 2021** o hasta llenar los cupos. Asimismo, el **valor del curso será de 20 UF**. Se dispondrá de algunos beneficios relativos a la inscripción anticipada¹ y descuentos² para empresas, ex – alumnos, y funcionarios públicos, los cuales se indican a continuación:

- 25% Funcionarios UChile.
- 20% Ex-alumnos pregrado/postgrado y educación continua UChile.
- 20% Funcionarios de instituciones públicas.
- 20% para 2 o más postulantes de una empresa.
- 15% Inscripción anticipada.
- 5% pago al contado (transferencia o pago en 1 cuota – acumulable con otros descuentos).

¹ Inscripción y pago del curso antes del 2 de julio de 2021 a las 17:59 hrs.

² Salvo por pago al contado, los descuentos no son acumulables y se aplica el mayor, según sea el caso, previa verificación de los antecedentes proporcionados por el postulante.

Cabe mencionar que todas las postulaciones serán revisadas por los coordinadores del curso y, de ser necesario, se solicitarán los antecedentes³ para respaldar las competencias básicas exigidas, las cuales se listan a continuación:

- Conocimientos generales sobre el ciclo del agua, hidrología superficial y nociones de modelación de sistemas ambientales.
- Carrera relacionada a recursos hídricos: Ingeniería Civil Hidráulica, Ingeniería en Recursos Naturales, Geología, etc.
- Manejo básico de algún lenguaje de programación.

Evaluaciones y requisitos de aprobación del curso:

La evaluación del curso consistirá en el promedio de reportes sobre los talleres prácticos desarrollados durante las semanas de clases, los que serán entregados vía U-Cursos y tendrán una ponderación del 40% sobre la nota final del curso. A su vez, se deberá preparar un examen en grupos de 2-3 personas que tendrá una ponderación del 60%, el cual consistirá en la aplicación de los aprendizajes a un caso de estudio definido por el cuerpo docente. Para aprobar el curso, es necesario tener en ambas notas una calificación mayor o igual a 4.0 (escala de 1.0 a 7.0) y una asistencia mínima del 75%.

Programa del curso:

Clases teóricas (módulos de 1,0 hrs + 0,5 hrs preguntas/discusión):

1. Una visión histórica e integral al balance hídrico en Chile desde 1987 a 2019 [XV]

El módulo tiene por objetivo proveer al alumno de una visión histórica de la realización del balance hídrico a nivel nacional, desde sus inicios en los años 80's como parte de los estudios de balance hídrico promovidos por la UNESCO (1982), hasta la incorporación de nuevas bases de datos y técnicas de modelación hidrológica que dan forma al proyecto de Actualización del Balance Hídrico Nacional. A su vez, se espera dar cuenta de la importancia de caracterizar y cuantificar las diferentes componentes del ciclo del agua como medio para una planificación y gestión estratégica y eficiente del recurso hídrico.

2. Caracterización de cuencas: una mirada hacia la unicidad del lugar [ML]

El módulo tiene por objetivo revisar conceptos necesarios para la caracterización de cuencas a través del análisis de índices hidrológico, a modo de identificar procesos predominantes en cada dominio de estudio. A su vez, se espera entregar ideas generales sobre el concepto de similitud hidrológica, proveer al alumno de herramientas para analizarla, y entender los alcances y limitaciones de la similitud en un contexto de unicidad del lugar (*uniqueness of place*; Beven, 2000).

3. Técnicas de medición de variables hidrometeorológicas y bases de datos disponibles [NV]

El módulo tiene por objetivo proveer al alumno de conocimientos generales sobre técnicas de medición de variables hidrológicas in situ y satelitales, dando cuenta de la incertidumbre asociada a cada una y los desafíos que sugiere la manipulación de las mismas. Adicionalmente, se busca presentar al alumno diferentes bases de datos que agrupan información que facilita el estudio de

³ Copia de certificado de título o grado y currículum actualizado al 2021 donde se detallen antecedentes académicos y laborales.

la hidrología y los recursos hídricos (e.g., CAMELS-CL, Alvarez-Garreton et al., 2018; ERA5, C3S, 2017).

4. Introducción a la modelación hidrológica: Nociones y aplicaciones [PM]

El módulo tiene por objetivo proveer al alumno de conceptos básicos de modelación hidrológica superficial, abordando temas como, por ejemplo, taxonomía y filosofías de modelación (Hrachowitz & Clark, 2017), rastreo de caudales, equifinalidad, y fuentes de incertidumbre.

5. Evaluación de modelos hidrológicos [PM]

En este módulo, se expondrán enfoques para evaluar la fidelidad de modelos hidrológicos (i.e., la capacidad de representar procesos). Para ello, se revisarán métricas clásicas formuladas en el dominio del tiempo (e.g., Nash & Sutcliffe, 1970) y otras derivadas (Fowler et al., 2018; e.g., Gupta et al., 2009), así como métricas formuladas en el dominio de ‘firmas’ hidrológicas (McMillan, 2021; e.g., Yilmaz et al., 2008), con énfasis en la evaluación de simulaciones de caudal. Además, se revisarán estrategias para evaluar la consistencia hidrológica de flujos internos (Khatami et al., 2019) y la fidelidad de patrones espaciales simulados (Dembélé et al., 2020; Koch et al., 2018).

6. Análisis de sensibilidad en modelos hidrológicos [PM]

El módulo tiene por objetivo introducir a los/as modeladores nociones de sensibilidad en modelación ambiental (Gupta & Razavi, 2018; Razavi & Gupta, 2015). Específicamente, se revisarán los conceptos de superficie de respuesta, factores y análisis de sensibilidad; la diferencia entre análisis de sensibilidad local, global e híbrido, y se expondrán las metodologías más utilizadas en modelación hidrológica, así como casos de estudio.

7. Calibración y validación de modelos basada en el diagnóstico del desempeño hidrológico [PM]

El módulo tiene por objetivo revisar definiciones generales y estrategias de calibración, discutiendo las implicancias de la transferencia espaciotemporal de parámetros. Por otro lado, se espera discutir sobre medidas clásicas de evaluación del desempeño de modelos hidrológicos y el enfoque de diagnóstico basado en la evaluación de procesos (e.g., curvas de variación estacional, curvas de duración, etc.) y patrones de covariabilidad hidroclimáticas.

8. Modelación en cuencas sin control fluviométrico: técnicas de regionalización y transferencia espacial de parámetros [NV]

El módulo tiene por objetivo presentar al alumno diferentes estrategias que posibilitan la modelación de cuencas donde no se cuenta con observaciones para llevar a cabo la calibración del modelo. Dicha necesidad surge debido a que las cuencas que califican para el proceso de calibración representan el 21% de la superficie de Chile continental, por lo que se deben adoptar técnicas que permitan llevar a cabo la modelación del 79% restante del territorio nacional. Así, se espera que el alumno comprenda que el problema de estimar el balance hídrico en Chile corresponde a un problema de cuencas no controladas o PUB (e.g., Blöschl et al., 2013; M. Hrachowitz et al., 2013), por sus siglas en inglés.

9. Proyecciones climáticas e impactos en el ciclo hidrológico [ML]

El módulo tiene por objetivo proveer al alumno de conceptos básicos relacionados a cambio climático, Modelos de Circulación Global (MCG o GCM por sus siglas en inglés), métodos para la selección de MCG de acuerdo a la representación de patrones climáticos locales, y técnicas de escalamiento y corrección de sesgo. Asimismo, se busca presentar la forma en que dichas

proyecciones climáticas se acoplan al modelo hidrológico VIC para realizar estimaciones de cambio hidrológico en el territorio nacional.

10. Modelación externa de variables hidrológicas no incorporadas en VIC y acoplamiento para la estimación de flujos y estados hidrológicos [NV]

El módulo tiene por objetivo detallar el proceso metodológico a través del cual se conceptualizaron e incluyeron en VIC, aquellos procesos hidrológicos que no se encuentran implementados directamente en el modelo como, por ejemplo, el riego, derretimiento glacial, y la recarga.

11. Resultados del balance hídrico nacional: interpretación, alcances y limitaciones [ML].

Tomando en cuenta los aprendizajes adquiridos en los módulos precedentes, se tiene por objetivo unificar los conceptos presentando una visión general de los diferentes resultados obtenidos en el contexto de la actualización del balance hídrico nacional y cómo se compara respecto al Balance Hídrico anterior (DGA, 1987), enfatizando las diferencias metodológicas y los alcances de dicha comparación.

12. Actualización del Balance Hídrico Nacional: aprendizajes y desafíos pendientes para la hidrología nacional. [XV]

El módulo tiene por objetivo evaluar los aprendizajes adquiridos durante el desarrollo de las diferentes etapas en las cuales se configuró el proyecto de actualización del balance hídrico nacional, los avances que sugieren los nuevos resultados en la práctica de la hidrología nacional, y los desafíos pendientes. Adicionalmente, se busca proveer de lineamientos del rumbo que debiese tomar el desarrollo de la ingeniería en Chile más allá del balance y generar una instancia de diálogo y reflexión en torno a ello.

Talleres prácticos (módulos de 1,5 hrs):

1. Introducción a la programación en R y aplicaciones en hidrología.
2. Preparación de forzantes y entradas del modelo hidrológico VIC.
3. Configuración del modelo VIC y generación de simulaciones.
4. Simulaciones hidrológicas con VIC y análisis de resultados.
5. Procesamiento de productos derivados del proyecto Actualización del Balance Hídrico.
6. Aplicación de los resultados del Balance Hídrico Nacional a diferentes casos de estudio.
7. Preparación del examen final (4 sesiones).

Programas computacionales requeridos:

- R (<https://www.r-project.org/>) y el entorno de trabajo R-Studio (<https://www.rstudio.com/>).
- Sistema operativo Linux/Ubuntu o máquina virtual instalada (se proveerá de un tutorial).
- QGIS (<https://www.qgis.org/es/site/>).

Equipo docente:

Profesores de cátedra:

- **Ximena Vargas Mesa (XV):** Ingeniera Civil de la Universidad de Chile. Especialista en Hidrología, con más de 30 años de experiencia en modelación hidrológica y cambio climático. Jefa de proyecto de las cuatro etapas parciales del proyecto Actualización del Balance Hídrico Nacional.
- **Pablo Mendoza Zúñiga (PM):** Ingeniero Civil, Magíster en Recursos y Medio Ambiente Hídrico de la Universidad de Chile, Doctor en Ingeniería Civil de la Universidad de Colorado Boulder, Profesor del Departamento de Ingeniería Civil e Investigador Asociado del Advanced Mining Technology Center. Especialista en hidrología y técnicas avanzadas de análisis de datos. Con 12 años de experiencia en modelación hidrológica, cambio climático, pronóstico de caudales, hidroclimatología y criósfera.
- **Miguel Lagos Zúñiga (ML):** Ingeniero Civil, Magíster en Recursos y Medio Ambiente Hídrico de la Universidad de Chile, Profesor del Departamento de Ingeniería Civil e Investigador Asociado del Advanced Mining Technology Center. Especialista en hidrología y análisis geoespacial de recursos hídricos. Con 8 años de experiencia en modelación hidrológica, cambio climático y percepción remota y consultoría en recursos hídricos para sectores públicos y privados.
- **Nicolás Vázquez Placencia (NV):** Ingeniero Civil, Magíster en Recursos y Medio Ambiente hídrico de la Universidad de Chile, con más de 5 años de experiencia como hidrólogo en diversos proyectos de consultoría pública y privada. Actualmente cursando el Doctorado en Ingeniería Civil en la Universidad de Chile.

Fecha de realización del curso y calendario de clases:

El curso se desarrollará en un total de tres semanas, comprendidas entre el **26 de julio y 14 de agosto del 2021**. Como se desglosa en las Tablas 1, 2 y 3, las clases teóricas y talleres prácticos estarán concentradas durante las dos primeras semanas (26/07-7/08), destinando la última semana (9-14/08) a sesiones de trabajo en el proyecto de cierre del curso (i.e., talleres de preparación del examen final). El examen será presentado en jornada extendida entre el viernes 13 y sábado 14 de agosto.

Tabla 1: Calendario de clases de la semana 1 del curso, comprendida entre el 26/07 y 31/07. La numeración de las clases y talleres corresponde con la indicada en el programa del curso.

Bloque	Horario		Semana 1: 26-31/07						
	Inicio	Fin	Lunes 26/07	Miércoles 28/07	Viernes 30/07	Bloque	Inicio	Fin	Sábado 31/07
1	16:00	17:30	Clase 1 [XV]	Clase 3 [NV]	Clase 5 [PM]	1	9:00	10:30	Taller 1
2	17:40	19:10	Clase 2 [ML]	Clase 4 [PM]	Clase 6 [PM]	2	10:40	12:10	Taller 2
						3	14:30	16:00	Taller 3

Tabla 2: Calendario de clases de la semana 2 del curso, comprendida entre el 2/08 y 7/08. La numeración de las clases y talleres corresponde con la indicada en el programa del curso.

Bloque	Horario		Semana 2: 2-7/08						
	Inicio	Fin	Lunes 02/08	Miércoles 04/08	Viernes 06/08	Bloque	Inicio	Fin	Sábado 7/08
1	16:00	17:30	Clase 7 [PM]	Clase 9 [ML]	Clase 11 [ML]	1	9:00	10:30	Taller 4
2	17:40	19:10	Clase 8 [NV]	Clase 10 [NV]	Clase 12 [XV]	2	10:40	12:10	Taller 5
						3	14:30	16:00	Taller 6

Tabla 3: Calendario de clases de la semana 3 del curso, comprendida entre el 9/08 y 14/08. La numeración de las clases y talleres corresponde con la indicada en el programa del curso.

Bloque	Horario		Semana 3: 9-14/08						
	Inicio	Fin	Lunes 09/08	Miércoles 11/08	Viernes 13/08*	Bloque	Inicio	Fin	Sábado 14/08**
1	16:00	17:30	Taller 7-1	Taller 7-3	Presentación Examen	1	9:00	10:30	Presentación Examen
2	17:40	19:10	Taller 7-2	Taller 7-4		2	10:40	12:10	

* Horario extendido hasta las 20:00 hrs.

** Módulo auxiliar dispuesto en caso de no terminar el examen el Viernes 13/08

Referencias:

- Addor, N., Rössler, O., Köplin, N., Huss, M., Weingartner, R., & Seibert, J. (2014). Robust changes and sources of uncertainty in the projected hydrological regimes of Swiss catchments. *Water Resources Research*, 50(10), 7541–7562. <https://doi.org/10.1002/2014WR015549>
- Alvarez-Garreton, C., Ryu, D., Western, A. W., Crow, W. T., & Robertson, D. E. (2014). The impacts of assimilating satellite soil moisture into a rainfall-runoff model in a semi-arid catchment. *Journal of Hydrology*, 519(PD), 2763–2774. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.07.041>
- Alvarez-Garreton, Camila, Mendoza, P. A., Pablo Boisier, J., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., et al. (2018). The CAMELS-CL dataset: Catchment attributes and meteorology for large sample studies-Chile dataset. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 5817–5846. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5817-2018>
- Alvarez-Garreton, Camila, Mendoza, P. A., Boisier, J. P., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., et al. (2018). The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies – Chile dataset. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. <https://doi.org/10.5194/hess-2018-23>
- Beven, K. J. (2000). Uniqueness of place and process representations in hydrological modelling. *Hydrology and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/hess-4-203-2000>
- Blöschl, G., Sivapalan, M., Savenije, H., Wagener, T., & Viglione, A. (2013). *Runoff prediction in ungauged basins: synthesis across processes, places and scales*. Cambridge University Press.
- C3S, & Copernicus Climate Change Service (C3S). (2017). ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Retrieved January 20, 2018, from <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>
- Chegwidden, O. S., Nijssen, B., Rupp, D. E., Arnold, J. R., Clark, M. P., Hamman, J. J., et al. (2019). How Do Modeling Decisions Affect the Spread Among Hydrologic Climate Change Projections? Exploring a Large Ensemble of Simulations Across a Diversity of Hydroclimates. *Earth's Future*, 7(6), 623–637. <https://doi.org/10.1029/2018EF001047>
- Dembélé, M., Hrachowitz, M., Savenije, H. H. G., Mariéthoz, G., & Schaefli, B. (2020). Improving the Predictive Skill of a Distributed Hydrological Model by Calibration on Spatial Patterns With Multiple Satellite Data Sets. *Water Resources Research*, 56(1), 1–26. <https://doi.org/10.1029/2019WR026085>
- DGA. (1987). *Balance hídrico de Chile*.
- DGA. (2017). *Actualización del Balance Hídrico Nacional, SIT N° 417, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile. Realizado por: Universidad de Chile & Pontificia Universidad Católica de Chile*.
- DGA. (2018). *Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional a las macrozonas Norte y Centro, SIT N° 435. Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación. Elaborado por UNTEC en UTP con la P.U. Católica de Chile*.
- DGA. (2019a). *Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en la macrozona sur y parte norte de la macrozona Austral, SIT N° 441*.
- DGA. (2019b). *Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de la parte sur de la Macrozona Austral e Isla de Pascua, SIT N° 444*.
- Driessen, T. L. A., Hurkmans, R. T. W. L., Terink, W., Hazenberg, P., Torfs, P. J. J. F., & Uijlenhoet, R. (2010). The hydrological response of the Ourthe catchment to climate change as modelled by the HBV model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(4), 651–665. <https://doi.org/10.5194/hess-14-651-2010>

- Emerton, R., Zsoter, E., Arnal, L., Cloke, H. L., Muraro, D., Prudhomme, C., et al. (2018). Developing a global operational seasonal hydro-meteorological forecasting system: GloFAS-Seasonal v1.0. *Geoscientific Model Development*, 11(8), 3327–3346. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-3327-2018>
- Entekhabi, D., Njoku, E. G., O'Neill, P. E., Kellogg, K. H., Crow, W. T., Edelstein, W. N., et al. (2010). The Soil Moisture Active Passive (SMAP) Mission. *Proceedings of the IEEE*, 98(5), 704–716. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2043918>
- Fowler, K., Peel, M., Western, A., & Zhang, L. (2018). Improved Rainfall-Runoff Calibration for Drying Climate: Choice of Objective Function. *Water Resources Research*, 54(5), 3392–3408. <https://doi.org/10.1029/2017WR022466>
- Gupta, H. V., & Razavi, S. (2018). Revisiting the Basis of Sensitivity Analysis for Dynamical Earth System Models. *Water Resources Research*, 54(11), 8692–8717. <https://doi.org/10.1029/2018WR022668>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Hall, D. K., Riggs, G. A., & Salomonson, V. V. (2006). MODIS/Terra Snow Cover 5-Min L2 Swath 500 m. Version 5, NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, Boulder, Colorado USA.
- Hrachowitz, M., Savenije, H. H. G., Blöschl, G., McDonnell, J. J., Sivapalan, M., Pomeroy, J. W., et al. (2013). A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB)—a review. *Hydrological Sciences Journal*, 58(6), 1198–1255. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.803183>
- Hrachowitz, Markus, & Clark, M. P. (2017). HESS Opinions : The complementary merits of competing modelling philosophies in hydrology. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 3953–3973. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3953-2017>
- Hublart, P., Ruelland, D., García De Cortázar Atauri, I., & Ibacache, A. (2015). Reliability of a conceptual hydrological model in a semi-arid Andean catchment facing water-use changes. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 371(2010), 203–209. <https://doi.org/10.5194/piahs-371-203-2015>
- Khatami, S., Peel, M. C., Peterson, T. J., & Western, A. W. (2019). Equifinality and Flux Mapping: A New Approach to Model Evaluation and Process Representation Under Uncertainty. *Water Resources Research*, 55(11), 8922–8941. <https://doi.org/10.1029/2018WR023750>
- Koch, J., Demirel, M. C., & Stisen, S. (2018). The SPATial EFFiciency metric (SPAEF): Multiple-component evaluation of spatial patterns for optimization of hydrological models. *Geoscientific Model Development*, 11(5), 1873–1886. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-1873-2018>
- Liang, X., Wood, E. F., & Lettenmaier, D. P. (1996). Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model: Evaluation and modification. *Global and Planetary Change*, 13(1–4), 195–206. [https://doi.org/10.1016/0921-8181\(95\)00046-1](https://doi.org/10.1016/0921-8181(95)00046-1)
- McMillan, H. K. (2021). A review of hydrologic signatures and their applications. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 8(1), 1–23. <https://doi.org/10.1002/wat2.1499>
- Nash, J., & Sutcliffe, J. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Prudhomme, C., Hannaford, J., Harrigan, S., Boorman, D., Knight, J., Bell, V., et al. (2017). Hydrological Outlook UK: an operational streamflow and groundwater level forecasting system at monthly to seasonal time scales. *Hydrological Sciences Journal*, 62(16), 2753–2768. <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1395032>
- Rakovec, O., Weerts, A. H., Sumihar, J., & Uijlenhoet, R. (2015). Operational aspects of asynchronous filtering for flood forecasting. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(6), 2911–2924. <https://doi.org/10.5194/hess-19-2911-2015>
- Razavi, S., & Gupta, H. V. (2015). What do we mean by sensitivity analysis? The need for comprehensive characterization of “global” sensitivity in Earth and Environmental systems models. *Water Resources Research*, 51(5), 3070–3092. <https://doi.org/10.1002/2014WR016527>
- Thober, S., Kumar, R., Sheffield, J., Mai, J., Schäfer, D., & Samaniego, L. (2015). Seasonal soil moisture drought prediction over Europe using the North American Multi-Model Ensemble (NMME). *Journal of Hydrometeorology*, 16(6), 2329–2344. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0053.1>
- UNESCO. (1982). *Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur. Estudios e*

informes en hidrología, UNESCO I ROSTLAC, Montevideo, 130 p.

- Wanders, N., Thober, S., Kumar, R., Pan, M., Sheffield, J., Samaniego, L., & Wood, E. F. (2019). Development and evaluation of a pan-European multimodel seasonal hydrological forecasting system. *Journal of Hydrometeorology*, 20(1), 99–115. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0040.1>
- Westerberg, I. K., Guerrero, J. L., Younger, P. M., Beven, K. J., Seibert, J., Halldin, S., et al. (2011). Calibration of hydrological models using flow-duration curves. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(7), 2205–2227. <https://doi.org/10.5194/hess-15-2205-2011>
- Wood, E. F., Lettenmaier, D. P., & Zartarian, V. G. (1992). A land-surface hydrology parameterization with subgrid variability for general circulation models. *Journal of Geophysical Research*, 97(D3), 2717–2728. <https://doi.org/10.1029/91JD01786>
- Yilmaz, K. K., Gupta, H. V., & Wagener, T. (2008). A process-based diagnostic approach to model evaluation: Application to the NWS distributed hydrologic model. *Water Resources Research*, 44(9), W09417. <https://doi.org/10.1029/2007WR006716>