

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**IMPORTANCIA DEL RASTREO DE LA ESCORRENTÍA EN MODELOS
HIDROLÓGICOS: APLICACIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO CAUTÍN, CHILE**

NICOLÁS CORTÉS-SALAZAR¹
NICOLÁS VÁSQUEZ¹
NAOKI MIZUKAMI²
PABLO A. MENDOZA^{1,3}
XIMENA VARGAS¹

1 RESUMEN

Los modelos hidrológicos espacialmente distribuidos se utilizan comúnmente en combinación con esquemas de rastreo, los cuales convierten la escorrentía instantánea en caudal. Sin embargo, el desarrollo de estos esquemas ha estado desconectado de las investigaciones de calibración de parámetros en modelos hidrológicos, donde en ambos casos se buscan simulaciones de caudal más realistas. En este trabajo, se intenta entender hasta qué punto la configuración de los esquemas de rastreo afecta la búsqueda de parámetros en aplicaciones de recursos hídricos. Para este fin, se configura el modelo de *Variable Infiltration Capacity* (VIC), acoplado con el modelo de rastreo mizuRoute en la cuenca del río Cautín (2770 km²), Chile. Se utiliza el método *Latin Hypercube Sampling* (LHS) para generar 3500 sets diferentes de parámetros, para los cuales se obtienen estimaciones de caudal sin rastrear, y rastreados con cuatro esquemas distintos (Hidrograma Unitario, Onda Cinemática, Muskingum-Cunge y Onda Difusiva) aplicados en cinco pasos de tiempo de rastreo diferentes (1, 2, 3, 4 y 6 horas). Los resultados muestran que la incorporación de estos esquemas puede alterar las simulaciones de caudal en escalas de tiempo subdiarias, diarias e incluso mensuales. El KGE (Kling Gupta Efficiency) para el caudal medio diario aumenta de 0.64 (sin rastreo) a 0.81 (para el mejor esquema). Además, los conjuntos de parámetros óptimos difieren según la configuración del esquema de rastreo, afectando la contribución del flujo base al caudal total. Además, la inclusión de esquemas de rastreo disminuye los valores de caudal en las curvas de frecuencia. En general, los resultados presentados destacan los impactos potenciales de la implementación de rastreo en modelos hidrológicos para aplicaciones de recursos hídricos y, en particular, calibración de parámetros.

¹ Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile

² National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, USA

³ Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile, Santiago, Chile

1. INTRODUCCIÓN

Los modelos hidrológicos son herramientas poderosas para caracterizar el ciclo del agua y proporcionar información valiosa para la planificación de recursos hídricos bajo escenarios climáticos futuros (ej. Vano et al., 2012; Mendoza et al., 2016). En aplicaciones a escala de cuenca o más amplia, estos modelos se suelen utilizar en combinación con modelos de rastreo que convierten la escorrentía instantánea en estimaciones realistas de caudal en cualquier ubicación dentro de la red fluvial (Oki and Sud, 1998; Olivera et al., 2000; Lucas-Picher et al., 2003). El caudal obtenido se puede utilizar para diversas aplicaciones de recursos hídricos, incluidas evaluaciones de riesgo de inundaciones (Wobus et al., 2017), pronósticos de caudal a corto plazo (Tang et al., 2007; Emerton et al., 2016) y operaciones de embalses (Salas et al., 2018; Shaad, 2018).

Durante las últimas tres décadas, se han desarrollado muchos modelos de rastreo, los cuales se han acoplado con modelos hidrológicos (Shaad, 2018). Estos varían en la resolución espacial y el tipo de discretización de la red fluvial, ya sea en base a grillas o vectorial (Lehner and Grill, 2013; Mizukami et al., 2016, 2021) y la representación de los procesos (en adelante, denominado esquema de rastreo) abarcando desde un método simple de hidrograma unitario (Lohmann et al., 1996, 1998) hasta esquemas de rastreo basados en almacenamiento como Muskingum (David et al., 2011), simplificaciones de las ecuaciones de Saint-Venant como la onda cinemática (Decharme et al., 2010; Ye et al., 2013; Thober et al., 2019) o la onda difusiva (Gong et al., 2009; Yamazaki et al., 2011), ecuaciones locales de inercia (Bates et al., 2010; Yamazaki et al., 2013) y enfoques de onda dinámica completa (Paiva et al., 2011).

Dada la amplia gama de métodos de rastreo disponibles, es importante comprender los beneficios y limitaciones de cada uno para distintas aplicaciones (Shaad, 2018). Muchos estudios han realizado experimentos de intercomparación centrados en esquemas de rastreo para evaluar sus impactos en las simulaciones de caudales. Por ejemplo, Arora et al. (2001) compararon un algoritmo de velocidad variable que utiliza la ecuación de Manning con un esquema de rastreo basado en almacenamiento (sin utilizar la ecuación de momento). Específicamente, concluyeron que el esquema de velocidad variable puede producir valores más altos de caudal *peak*. Gong et al. (2009) demostraron los beneficios del rastreo mediante onda difusiva en comparación a un método de rastreo de embalse lineal obteniendo atenuaciones temporales más realistas en los hidrogramas de una cuenca ubicada en el sur de China. David et al. (2011) presentaron el *Routing Application for Parallel Computation of Discharge*, basada en el método tradicional de Muskingum (McCarthy, 1938), obteniendo mejoras en términos del Error Cuadrático Medio (RMSE por sus siglas en inglés) y la Eficiencia de Nash-Sutcliffe (Nash and Sutcliffe, 1970) en comparación con un esquema de escorrentía agrupada, que acumula escorrentía instantánea aguas arriba sin ningún retraso.

Aunque muchos estudios anteriores han demostrado que la elección del esquema de rastreo afecta las simulaciones de caudales fluviales la modelación hidrológica aún se centran en la calibración de parámetros para mejorar las simulaciones de caudal, excluyendo o descuidando los posibles impactos de las configuraciones del rastreo (esquema y paso de tiempo; Beck et al., 2020; Newman et al., 2021). Por otro lado, el desarrollo y la evaluación de los modelos de rastreo utilizan la salida de los modelos hidrológicos que contiene un grado

variable de errores, complejizándose en cuencas fluviales grandes o dominios espaciales más amplios (ej, Mizukami et al., 2016; F. Zhao et al., 2017). Además, el papel clave de los parámetros de los esquemas de rastreo para reproducir las características observadas del caudal se ha reconocido previamente (Boyle et al., 2001; Butts et al., 2004; Sheikholeslami et al., 2021), resaltando la necesidad de estrategias conjuntas (es decir, hidrológicas y de rastreo) de búsqueda de parámetros para caracterizar los beneficios de las configuraciones de rastreo y los posibles efectos compensatorios en la reproducción de métricas específicas de la aplicación.

En este trabajo, se busca comprender mejor las implicaciones que la configuración de los modelos de rastreo puede tener al calibrar modelos hidrológicos en aplicaciones de recursos hídricos. Para este fin, se realizan experimentos numéricos en la cuenca del río Cautín en Cajón (Araucanía, Chile) utilizando el modelo *Variable Infiltration Capacity* (VIC) (Liang et al., 1994) y el modelo de rastreo vectorial mizuRoute (Mizukami et al., 2016). Específicamente, se evalúan los impactos de los parámetros del modelo y los diferentes esquemas de rastreo (todos implementados para cinco pasos de tiempo) mediante la combinación de una gran muestra de simulaciones VIC obtenidas a partir de 3500 conjuntos de parámetros y simulaciones de rastreo con cuatro métodos diferentes implementados en mizuRoute. El objetivo final es encontrar cómo la elección del esquema y el paso de tiempo de rastreo afectan: (i) el caudal simulado en diferentes resoluciones temporales, (ii) las métricas objetivos, (iii) el balance hídrico simulado y la partición de escorrentía (es decir, la proporción de flujo de base), y (iv) las señales hidrológicas utilizadas para la toma de decisiones, como las curvas de análisis de frecuencia de crecidas. Los resultados y conclusiones aquí presentados reflejan el impacto que decisiones de modelado aparentemente inofensivas pueden tener en la gestión de recursos hídricos.

2. ZONA DE ESTUDIO Y DATOS

2.1. LA CUENCA DEL RÍO CAUTÍN

La zona de estudio es la cuenca del río Cautín en Cajón (CatC) (Figura 1), una subcuenca de la cuenca del río Imperial, ubicada en la Región de la Araucanía, Chile. La elevación de la cuenca varía entre 125 y 3104 m s.n.m., el área aportante es de 2770 km², y los tipos de cobertura terrestre dominantes son la rotación de cultivos-pastos (44%) y el bosque nativo (40%). Además, la cuenca es propensa a eventos de inundaciones impulsados por lluvias durante el invierno y, por lo tanto, ha sido objeto de estudios destinados a mejorar las capacidades predictivas (ej., Mendoza et al., 2012).

2.2. INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA

Los datos de precipitación diaria, temperatura máxima y mínima se obtienen del set de datos CR2MET v2.0 (Boisier et al., 2018, disponible en <https://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/>), que abarca Chile continental con una resolución horizontal de 0.05° x 0.05° durante el período 1979-2020. Las series temporales de precipitación y temperatura diaria se desagregan en intervalos horarios utilizando la distribución subdiaria proporcionada por ERA5-Land (Muñoz-Sabater et al., 2021). La humedad relativa, la velocidad del viento y la radiación de onda corta se derivan para la misma resolución horizontal mediante la

interpolación espacial de los productos de ERA5-Land. La radiación de onda larga se calculó con la parametrización propuesta por Iziomon et al. (2003).

Los datos de caudal diario se obtienen de estaciones fluviométricas (Figura 1) a cargo de la Dirección General de Aguas de Chile (DGA, disponibles en el Explorador Climático CR2 <https://www.cr2.cl/datos-de-caudales/>). De manera similar, los registros de caudal horario para la cuenca CatC se obtuvieron del sitio web oficial de la DGA (<https://dga.mop.gob.cl/servicioshidrometeorologicos>).

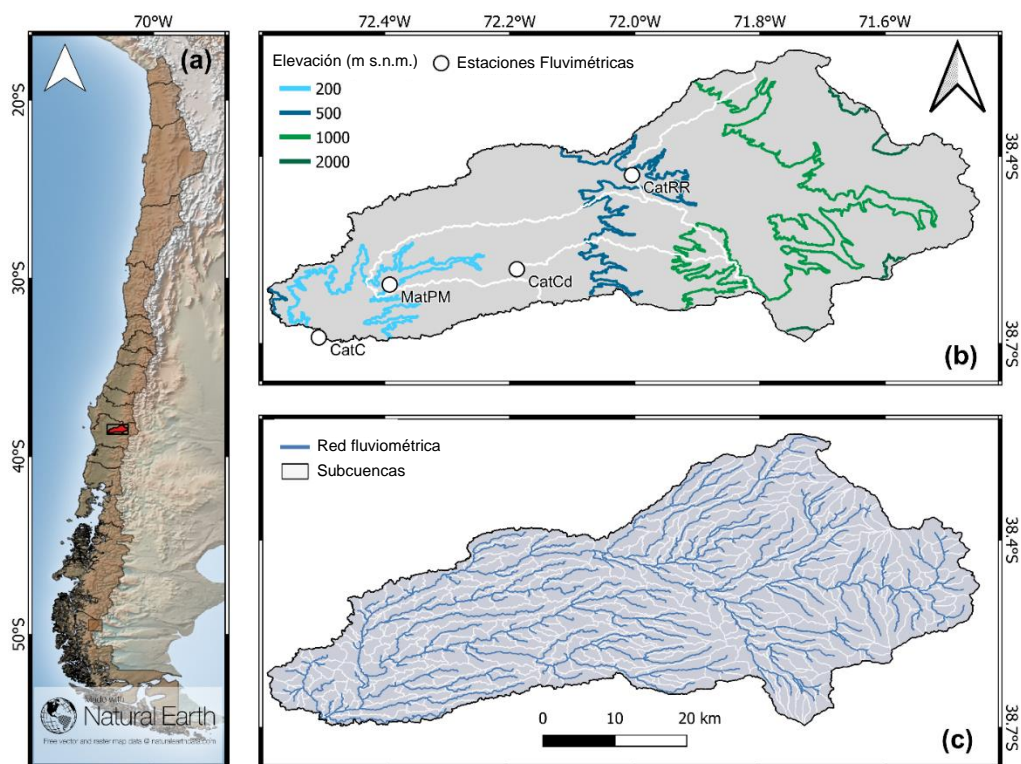


Figura 1. (a) Ubicación de la cuenca del río Cautín en Cajón en Chile (CatC, 2770 km²). (b) Ubicación de las estaciones fluviométricas (círculos blancos) y áreas de drenaje (líneas blancas). Las estaciones interiores son río Muco en el puente Muco (MatPM, 651 km²), río Collín en Codahue (CatCD, 259 km²) y río Cautín en Rariruca (CatRR, 1305 km²). (c) Red digital de ríos y límites de subcuencas utilizados en mizuRoute.

3. MODELACIÓN

3.1. MODELO HIDROLÓGICO

Se utiliza el modelo VIC (Liang et al., 1994) para simular variables de estado y flujos a una resolución horizontal de 0.05° x 0.05°. VIC es un modelo hidrológico físico que resuelve ecuaciones de balance de energía y masa. La precipitación puede dividirse en nieve o lluvia. El suelo está representado por tres capas que controlan la infiltración (primera capa del suelo) y el flujo base (tercera capa del suelo). El exceso de escorrentía se genera en aquellas áreas donde la precipitación excede la cantidad de almacenamiento de humedad del suelo disponible de la primera capa del suelo. VIC supone que el drenaje está impulsado por la gravedad, utilizando la formulación propuesta por Brooks & Corey (1964). En este sentido,

el agua entra en la celda solo desde la atmósfera, es decir, VIC no considera flujos laterales entre celdas de la cuadrícula.

3.2. MODELO DE RASTREO

MizuRoute primero realiza un rastreo en ladera utilizando la función hidrograma unitario basado en la distribución gamma para retrasar la escorrentía instantánea del modelo VIC, luego rastrea la escorrentía retrasada para cada tramo de río en el orden definido por la topología de la red fluvial. mizuRoute originalmente incluía dos esquemas de rastreo en río: (1) rastreo de onda cinemática (KWT, por sus siglas en inglés), y (2) rastreo función de impulso-respuesta (IRF, por sus siglas en inglés), similar al modelo de Lohmann et al. (1996) basado en hidrograma unitario. En este trabajo, se utiliza mizuRoute con dos esquemas de rastreo adicionales comúnmente utilizados en muchas aplicaciones de recursos hídricos: rastreo de onda difusiva (DW) y Muskingum Cunge (MC). Todos los esquemas de rastreo en río, excepto IRF (que utiliza una celeridad y difusividad de onda prescritas), comparten dos parámetros: el coeficiente de rugosidad de Manning (n) y el ancho del canal (suponiendo un canal rectangular).

4. METODOLOGÍA

La Figura 2 resume el enfoque utilizado en este artículo, que consta de los siguientes pasos:

- a. Muestrear sets de parámetros del modelo (VIC y mizuRoute) y obtener, para cada uno, series temporales de caudal con cinco esquemas de rastreo (incluyendo escorrentía instantánea o sin rastreo como referencia) y cinco resoluciones temporales (Figura 2a).
- b. Examinar el efecto de las configuraciones del modelo de rastreo (es decir, esquemas de y pasos de tiempo) en los hidrogramas diarios simulados en Cautín en Cajón (Figura 2b) y analizar el impacto de excluir el proceso de rastreo en el caudal simulado en pasos de tiempo anuales, mensuales, diarios y subdiarios.
- c. Explorar los impactos generales de las decisiones de modelación de rastreo en las métricas de desempeño calculadas con diferentes resoluciones temporales (Figura 2c).
- d. Caracterizar los efectos de la configuración de rastreo en el balance hídrico anual simulado (específicamente, la relación media anual de escorrentía) y la contribución de flujo base (calculada a partir de la salida de VIC) al escurrimiento total (Figura 2d).
- e. Analizar los efectos de las configuraciones de rastreo en el análisis de frecuencia de crecidas (Figura 2e).

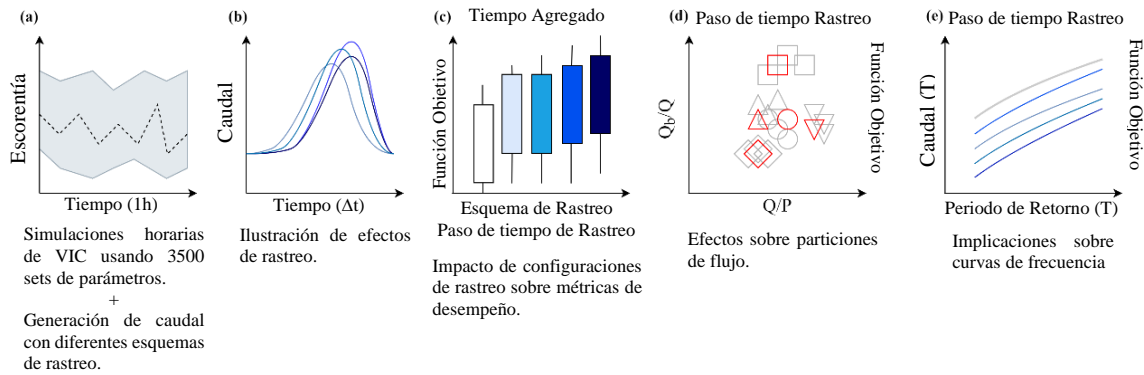


Figura 2. Resumen metodología de este trabajo. (a) Simulaciones del modelo VIC-mizuRoute en intervalos horarios para 3500 conjuntos de parámetros. (b) Ilustración los efectos del rastreo en hidrogramas simulados. (c) Para cada configuración, se obtienen métricas de desempeño donde en (c) se muestran los resultados a diferentes intervalos de tiempo, utilizando el 1% de las mejores simulaciones. (d) Se analiza el balance hídrico anual promedio simulado y la contribución de flujo base al escurrimiento total. (e) Finalmente, se analizan las implicaciones de las configuraciones de rastreo en (e) las curvas de frecuencia.

Los pasos (a)-(d) se realizan utilizando datos observados y simulados para el período de abril de 2008 a marzo de 2012, mientras que el paso (e) se lleva a cabo mediante simulaciones para el período de abril de 1985 a marzo de 2020. Todos los pasos excepto c (Figura 2) utilizan conjuntos de parámetros de VIC y mizuRoute que maximizan las métricas de desempeño calculadas con caudales diarios simulados y observados.

Se muestrean 3500 conjuntos de parámetros del modelo (Figura 2a) considerando los 13 parámetros de VIC identificados por Sepúlveda et al. (2022) como los más sensibles, y tres parámetros del modelo de rastreo: uno (el coeficiente de rugosidad de Manning) para los métodos KWT, MC y DW, y dos para el método IRF (coeficientes de advección y difusión). Para cada conjunto de parámetros, se ejecuta VIC y mizuRoute en intervalos horarios durante el período de abril de 2006 a marzo de 2012. Generando simulaciones de caudal en pasos de tiempo de 2, 3, 4 y 6 horas.

Para cada simulación, se evalúa el desempeño de los valores de caudal de VIC-mizuRoute utilizando cuatro métricas objetico. La primera es la eficiencia de Kling Gupta (KGE; Gupta et al., 2009; Kling et al., 2012), que cuantifica el desempeño en términos de variabilidad, volumen y sincronización; la segunda y tercera es la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE; Nash & Sutcliffe, 1970) calculada para los valores de caudal y su logaritmo. Finalmente, se calcula el sesgo porcentual del segmento alto de la curva de duración (%BiasFHV, por sus siglas en inglés; Yilmaz et al., 2008). Donde, %BiasFHV es una medida de la respuesta de la cuenca a eventos de alta precipitación.

Dado que los valores de crecidas son relevantes para aplicaciones ingenieriles, en particular para el diseño de infraestructura, se analizan las implicaciones de las configuraciones de rastreo en el cálculo de las curvas de análisis de frecuencia (Figura 2 e). Para ello, se corre VIC horariamente desde abril de 1981 hasta marzo de 2020 utilizando los parámetros asociados a los valores más altos de KGE, NSE y %BiasFHV (todos calculados con flujos diarios) para cada configuración de rastreo. Luego, la escorrentía total horaria de VIC se

agrega y se rastrea en diferentes intervalos de tiempo (es decir, 2, 3, 4 y 6 h), y se obtienen caudales diarios máximos anuales para el período de abril de 1985 a marzo de 2020 (es decir, se excluye el período de abril de 1981 a marzo de 1985). Por lo tanto, para cada paso de tiempo de rastreo, obtenemos cinco series de tiempo anuales con $n = 35$ valores (obtenidos del valor de referencia y los cuatro esquemas de rastreo) que se utilizan para calcular los caudales diarios máximos en períodos de retorno de 20, 50, 100 y 200 años. Se utiliza la distribución paramétrica Log-Normal, que proporciona los mejores resultados para el *test* de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov, para las series de tiempo observadas de flujos diarios máximos.

5. RESULTADOS

5.1. ILUSTRACIÓN DE EFECTOS DEL RASTREO

La figura 3 ilustra la sensibilidad de las simulaciones diarias de caudal para diferentes decisiones de rastreo, incluido el paso de tiempo en el esquema IRF (Figura 3a), la elección del esquema (Figura 3b) y el coeficiente de rugosidad de Manning en los resultados de KWT (Figura 3c). Se puede observar que la elección del esquema y los valores del coeficiente de Manning tienen un mayor efecto en la forma de la onda de crecida. Además, aumentar los pasos de tiempo de rastreo para IRF acelera el momento del *peak* del hidrograma en un día. La elección del esquema de rastreo afecta la forma de los hidrogramas de tormenta, especialmente en los caudales altos. Finalmente, se obtiene un retraso en las simulaciones de flujo máximo para coeficientes de rugosidad de Manning más grandes.

La figura 4 Compara el caudal obtenido de mizuRoute (eje y) con la escorrentía instantánea de VIC (eje x) para varias resoluciones temporales y diferentes esquemas de rastreo. Los resultados para pasos de tiempo horarios muestran que la falta de rastreo produce valores mucho mayores ($> 1300 \text{ m}^3/\text{s}$ en algunos casos) en comparación con el caudal rastreado. Estas diferencias se reducen gradualmente cuando el paso de tiempo de rastreo aumenta a $\Delta t = 3 \text{ h}$ y 6 h , aunque las diferencias pueden ser mayores de $1200 \text{ m}^3/\text{s}$. El impacto de excluir el rastreo disminuye a medida que el paso de tiempo aumenta, pero puede ser importante incluso para simulaciones de caudal a un paso de tiempo de $\Delta t = 24 \text{ h}$. A pasos de tiempo mensuales, las diferencias entre el caudal enrutado y la escorrentía instantánea se reducen considerablemente, aunque aún pueden ser tan grandes como $27 \text{ m}^3/\text{s}$ (es decir, una diferencia del 10%). Además, las diferencias se vuelven insignificantes a nivel anual.

5.2. EFECTOS EN METRICAS DE DESEMPEÑO

La figura 5 muestra los valores de KGE, NSE, NSE-log y %BiasFHV obtenidos con el 1% de los mejores sets de parámetros (es decir, 35) para cada combinación de esquema de rastreo, paso de tiempo de rastreo y paso de tiempo de cálculo de la métrica. Para comparar las métricas de diferentes configuraciones, las simulaciones se agregaron a la resolución temporal de cálculo de la métrica (columnas). Por brevedad, solo se muestran los pasos de tiempo de cálculo de 1 y 24 h. En general, los resultados muestran una clara diferencia entre incluir rastreo o no (Inst), lo que se vuelve más evidente para las métricas de desempeño calculadas a resoluciones temporales más pequeñas. Además, ninguno de los sets de parámetros pertenecientes al 1% mejor para KGE y NSE con escorrentía instantánea puede

producir un mejor desempeño que incluir el rastreo. Por otro lado, la elección del paso de tiempo de rastreo es comparativamente menos influyente para un paso de tiempo de cálculo dado. El KGE máximo va de 0.69 a 0.73 para la escorrentía instantánea, aumentando a 0.8 o más cuando se incluye el rastreo. Se observan mejoras similares para NSE, con incrementos que pueden ser mayores de 0.3 unidades (por ejemplo, 1 h). En comparación con la métrica anterior, el rastreo produce beneficios más pequeños para NSE-log y diferencias menos notables entre las configuraciones, principalmente debido a la poca influencia de los valores de caudal alto. En todos los casos, se obtiene una mayor dispersión en %BiasFHV con escorrentía instantánea (en comparación con los esquemas de rastreo), lo que indica que muchos conjuntos de parámetros de VIC no compensan la falta de rastreo para obtener una simulación precisa de flujo alto. Finalmente, los resultados muestran que el impacto de representar el rastreo en %BiasFHV es más relevante cuando esta métrica se calcula a resolución horaria.

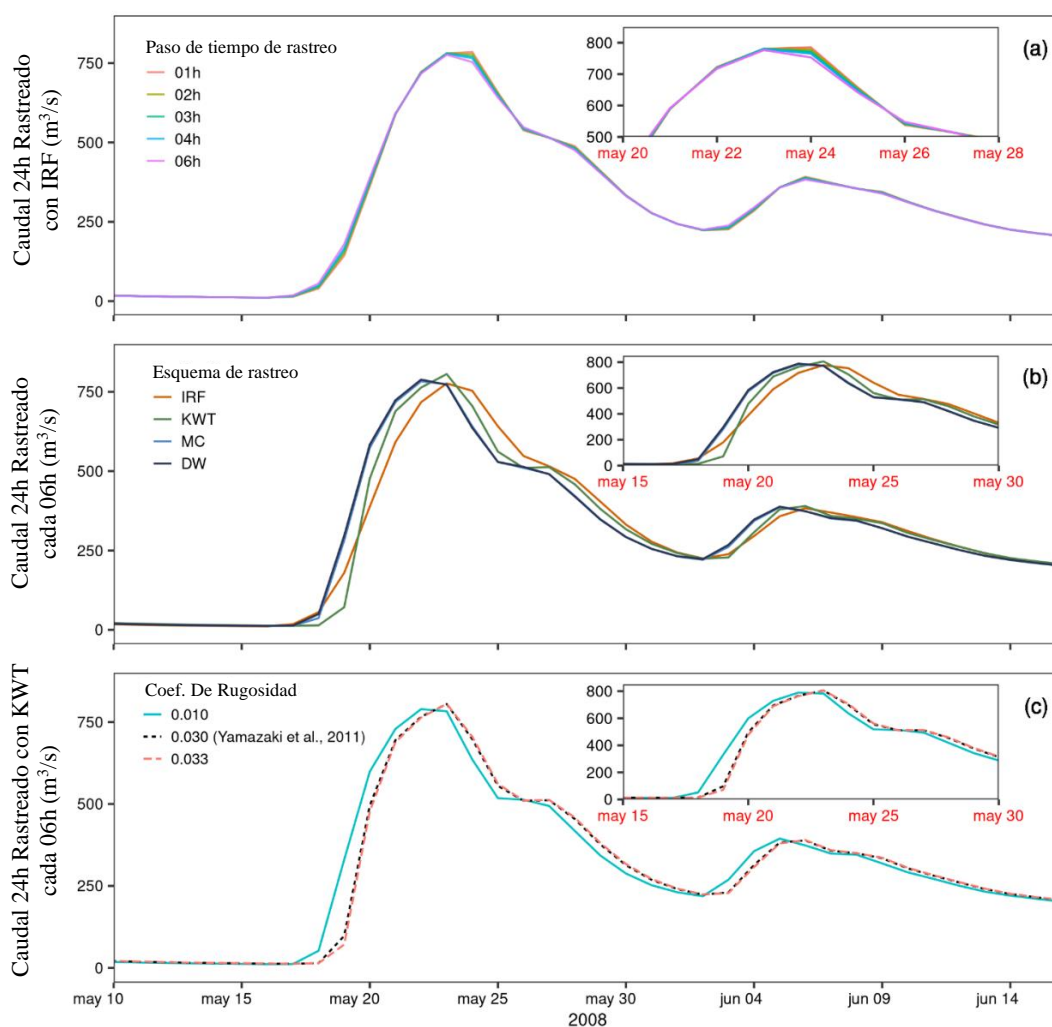


Figura 3. Series de tiempo con caudal diario en Cautín en Cajón, obtenidas de simulaciones horarias de VIC rastreadas con diferentes configuraciones de mizuRoute. (a) Aplicación del esquema IRF con cinco pasos de tiempo de rastreo diferentes, (b) efectos de diferentes esquemas de rastreo utilizando $\Delta t = 6$ h, y (c) efectos del coeficiente de rugosidad de Manning (n) al aplicar el esquema de rastreo de onda cinemática con $\Delta t = 6$ h, la

línea naranja ($n = 0.033$) está asociada con el conjunto de parámetros que maximiza el KGE calculado con el caudal diario.

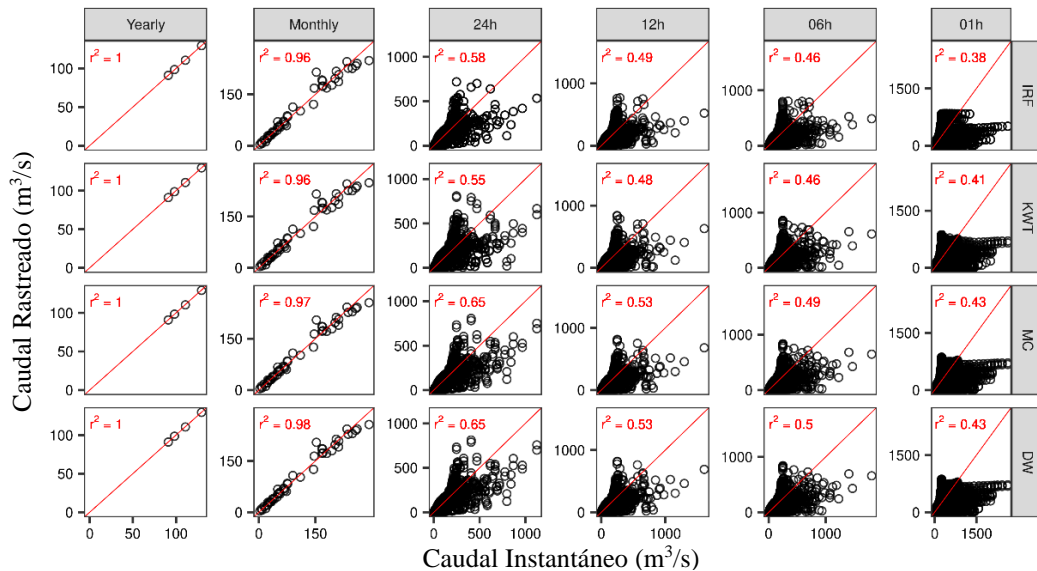


Figura 4. Caudal simulado (VIC+mizuRoute) vs. escorrentía instantánea de VIC en Cautín en Cajón para el período de abril de 2008 a marzo de 2012, utilizando diferentes intervalos de tiempo (columnas) y esquemas de rastreo (filas): escorrentía instantánea (Inst), IRF, KWT, MC y DW. Los caudales medios anuales, mensuales, diarios y de 12 h se calculan a partir de valores promedios temporales de 6 h, mientras que los caudales de 1, 3 y 6 h se obtienen a partir de simulaciones de mizuRoute con pasos de tiempo de 1, 3 y 6 h, respectivamente. La línea de 1:1 se muestra en rojo con el coeficiente de determinación (r^2).

5.3. EFECTOS EN METRICAS OBJETIVO

Para el resto de este documento, se ilustran los efectos del paso de tiempo de rastreo mostrando resultados para 1, 3 y 6 h. La Figura 6 presenta los impactos de la elección del esquema de rastreo en la partición media anual de escorrentía (partición de la precipitación en escorrentía y evapotranspiración: eje x) y la partición entre la escorrentía base y la total media anual (eje y) para cada paso de tiempo de rastreo (columnas) y métricas de desempeño (todas calculadas con caudal diario y mostradas en diferentes filas). Los símbolos rojos representan los resultados para el mejor set de parámetros para cada configuración correspondiente. Para tener en cuenta los efectos de equifinalidad, se incluye los resultados con los conjuntos de parámetros que producen las mejores simulaciones del 0.1% para las respectivas métricas objetivo (es decir, cuatro conjuntos de parámetros). La partición de precipitación (Q/P) cambia relativamente poco, ya sea que se utilice rastreo o no, independientemente de los esquemas para cualquier métrica excepto %BiasFHV, para el cual se obtienen patrones menos claros en la partición de escorrentía y los componentes de flujo. Por el contrario, los mayores impactos se observan en la partición de escorrentía base (bf/Q). Para KGE y NSE, se obtiene una separación clara en los componentes de escorrentía entre la instantánea y los esquemas de rastreo (para cualquier paso de tiempo), con una contribución de escorrentía base mucho mayor al total para Inst. Cuando los parámetros del modelo VIC se seleccionan en función de la métrica NSE-log, las diferencias entre las opciones de configuración de rastreo son generalmente más pequeñas en comparación con KGE y NSE, aunque el conjunto de parámetros con mejor desempeño produce menos escorrentía base.

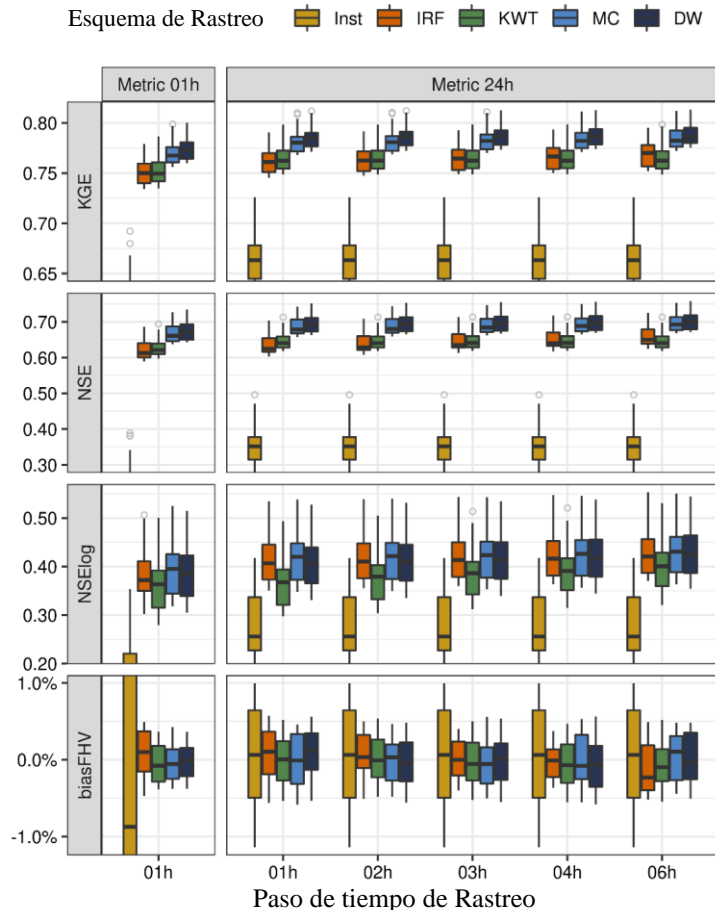


Figura 5. Impacto del esquema y el paso de tiempo de rastreo en las métricas de desempeño (filas) para el período de abril de 2008 a marzo de 2012 en Cautín en Cajón, calculadas con resoluciones temporales de caudal de 1 h y 24 h (columnas) y los mejores 1% de conjuntos de parámetros obtenidos mediante LHS. Los resultados se presentan para la escorrentía instantánea (Inst), IRF, KWT, MC y DW.

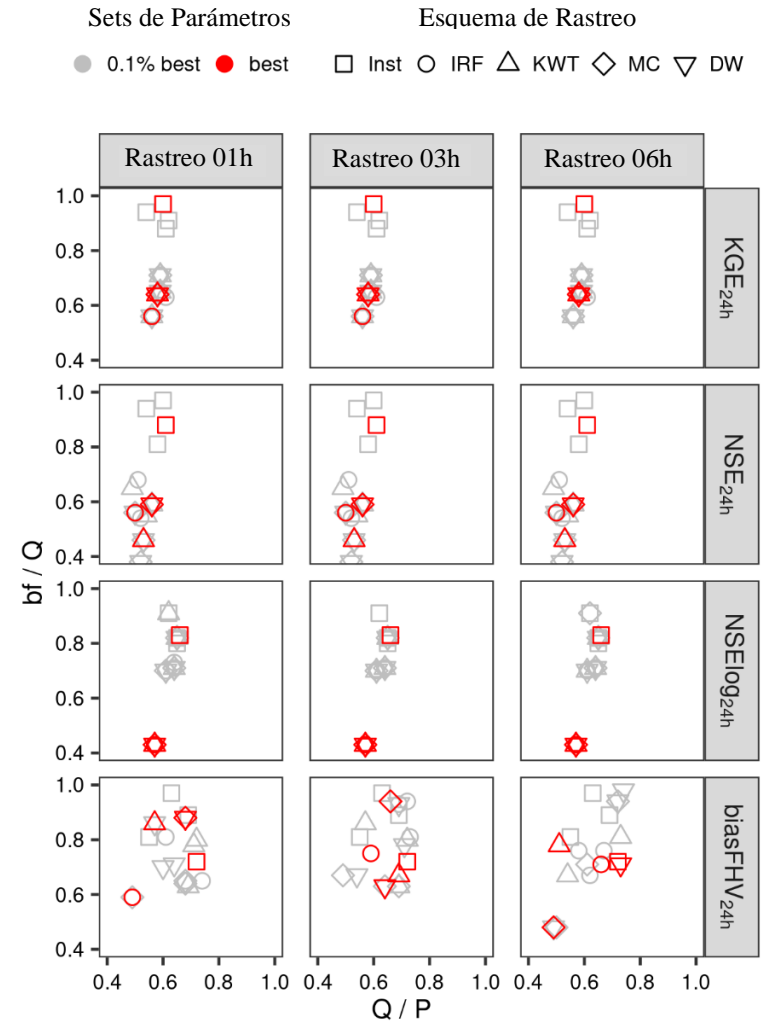


Figura 7. Efectos de la métrica de desempeño (filas), el paso de tiempo de rastreo (columnas) y el esquema de rastreo en el balance hídrico medio anual simulado (caracterizado con la proporción de escorrentía anual, eje x) y la proporción de caudal base (eje y) obtenidos para los mejores 0.1% de conjuntos de parámetros en Cautín en Cajón. Los resultados se presentan para la escorrentía instantánea (Inst), IRF, KWT, MC y DW. En cada panel, los resultados obtenidos con el set de parámetros (entre las 3500 muestras) que maximiza cada métrica se muestran en rojo, los resultados para los mejores 0,1% sets de parámetros de VIC ($n = 4$) se muestran en gris.

5.4. EFECTOS SOBRE CURVAS DE ANÁLISIS DE FRECUENCIA

La Figura 8 muestra las curvas de análisis de frecuencia a partir de las series anuales de caudales máximos diarios, utilizando parámetros del modelo obtenidos con KGE, NSE y %BiasFHV como métricas objetivo. Cabe destacar que la curva para la escorrentía instantánea diaria es la misma para cada métrica. Como era de esperar, las diferencias en las estimaciones entre la escorrentía instantánea y cualquier otro esquema de rastreo son considerablemente grandes, superando los $400 \text{ m}^3/\text{s}$ en algunos casos (ver resultados para $T = 200$ con KGE y %BiasFHV). Además, la dispersión entre los esquemas de rastreo aumenta con pasos de tiempo más grandes para KGE y, en particular, para %BiasFHV, lo cual puede explicarse por las diferencias obtenidas en los valores de los parámetros del modelo. Incluso si se obtienen los mismos sets de parámetros para una métrica objetivo y una serie de esquemas de rastreo, independientemente de la elección de Δt (por ejemplo, KWT, MC y DW para KGE,) las variaciones en el paso de tiempo de rastreo afectan las series temporales de caudales diarios y, por lo tanto, los cuantiles obtenidos con un esquema de rastreo específico, así como las diferencias entre métodos para un período de retorno dado. Por ejemplo, cuando la métrica objetivo es KGE, los valores de $Q(T=100 \text{ años})$ obtenidos con KWT y DW para $\Delta t = 1 \text{ h}$ son $1202 \text{ m}^3/\text{s}$ y $1189 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente, mientras que $\Delta t = 6 \text{ h}$ produce $1196 \text{ m}^3/\text{s}$ y $1171 \text{ m}^3/\text{s}$ utilizando los mismos esquemas. Curiosamente, las diferencias en las curvas de frecuencia que surgen de la elección del esquema de rastreo con NSE disminuyen con pasos de tiempo más grandes.

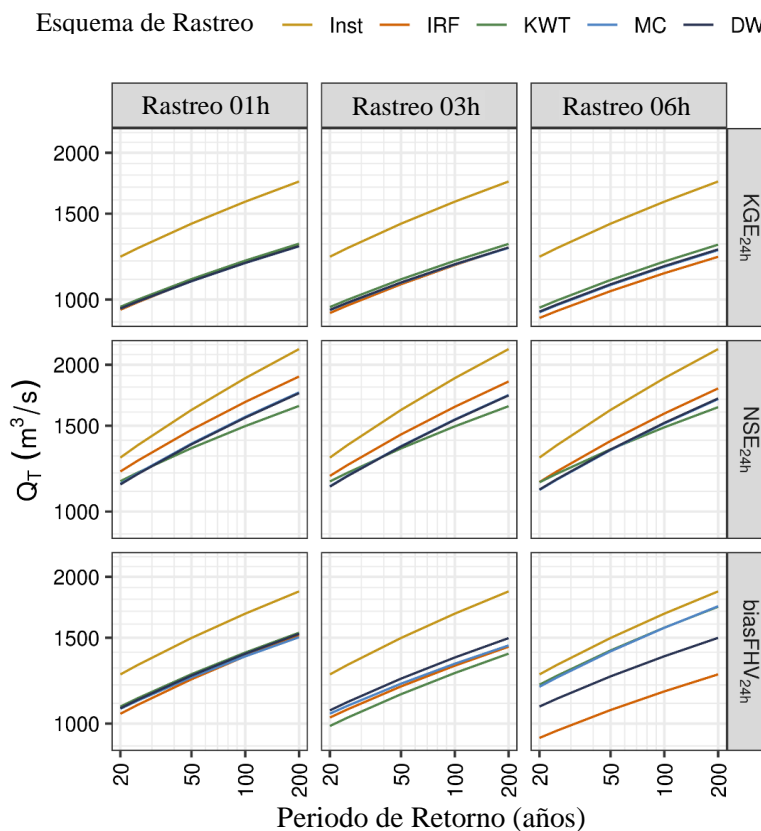


Figura 9. Curvas de frecuencia para caudales máximos diarios anuales (eje y) en Cautín en Cajón, simulaciones numéricas realizadas con diferentes esquemas de rastreo, pasos de tiempo de rastreo (columnas) y métricas objetivo (filas). Todas las curvas de frecuencia se calculan a partir de series anuales de $n = 35$ caudales máximos diarios anuales (abril de 1985 - marzo de 2020) se utiliza una función de densidad Log-Normal. Los resultados se presentan para la escorrentía instantánea (Inst), IRF, KWT, MC y DW.

6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este trabajo, se utiliza el enfoque LHS para evaluar el impacto del rastreo en las métricas objetivo de modelación de caudales a lo largo del espacio de parámetros. Los resultados sugieren que, independientemente del esquema de rastreo, la inclusión del proceso mejora en general la simulación de caudales. En otras palabras, la falta de rastreo en la cadena de modelación hidrológica puede no ser completamente compensada a través de la calibración de los parámetros del modelo hidrológico. Sin embargo, esta conclusión puede depender del régimen hidrológico de la cuenca y la configuración espacial distribuida en la implementación del rastreo. La cuenca del río Cautín tiene un régimen de escorrentía dominado por la lluvia, con *peaks* de caudal asociados a eventos de precipitación intensas durante la temporada de invierno y una ligera influencia del deshielo durante la primavera. El tiempo de respuesta de la cuenca y el caudal máximo dependen del proceso de rastreo de escorrentía en la red fluvial; por lo tanto, su inclusión explícita en la modelización hidrológica puede producir mejores resultados, especialmente para las métricas objetivo influenciadas por caudales altos (Clark et al., 2021).

Los resultados presentados muestran que la implementación del rastreo también es relevante para caudales medios y bajos. Por ejemplo, la inclusión del proceso proporcionó valores más altos para NSE-log (mejorando la simulación de los caudales bajos), que son métricas características de la "repentina" respuesta de la escorrentía y del flujo base a largo plazo, respectivamente (Yilmaz et al., 2008). Los efectos del rastreo también se reflejan en la partición de escorrentía entre la escorrentía base y la total. De hecho, los resultados presentados aquí muestran que el proceso de búsqueda de parámetros compensa la falta de rastreo al modificar otros flujos y variables de estado (Khatami et al., 2019) para aumentar las métricas de desempeño orientadas al caudal. Por ejemplo, cuando las métricas objetivo son KGE, NSE o NSE-log, la exclusión del rastreo obliga a VIC a compensar la ausencia de este proceso retrasando la respuesta de la escorrentía con una mayor contribución del flujo de base a la escorrentía total, en comparación con cualquier esquema de rastreo. En tales casos, la contribución del flujo base a la escorrentía total aumenta en más del 30% cuando se excluye el rastreo, lo cual se logra modificando parámetros del suelo, retrasando la respuesta de la escorrentía. Este resultado sugiere que la inclusión de procesos de rastreo puede impactar los resultados de estudios orientados a sequías, ya que la escorrentía base es el principal flujo que mantiene el caudal durante períodos de escasez de agua (Karki et al., 2021).

Por otro lado, se encontraron variaciones más pequeñas en la partición de la precipitación entre la evapotranspiración y la escorrentía en ausencia de rastreo, especialmente para KGE, NSE y NSE-log. Por lo que, cuando los modelos se configuran para maximizar estas métricas en estudios hidroclimáticos o de balance hídrico a escala anual, la incorporación de rastreo es relativamente menos importante.

REFERENCIAS

- Arora, V., Seglenieks, F., Kouwen, N., and Soulis, E.: Scaling aspects of river flow routing, *Hydrol. Process.*, 15, 461–477, <https://doi.org/10.1002/hyp.161>, 2001.
- Arora, V. K. and Boer, G. J.: A variable velocity flow routing algorithm for GCMs, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 104, 30965–30979, <https://doi.org/10.1029/1999JD900905>, 1999.

Bates, P. D., Horritt, M. S., and Fewtrell, T. J.: A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling, *J. Hydrol.*, 387, 33–45, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.03.027>, 2010.

Beck, H. E., Pan, M., Lin, P., Seibert, J., van Dijk, A. I. J. M., and Wood, E. F.: Global Fully Distributed Parameter Regionalization Based on Observed Streamflow From 4,229 Headwater Catchments, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 125, <https://doi.org/10.1029/2019JD031485>, 2020.

Boisier, J. P., Alvarez-Garretón, C., Cepeda, J., Osses, A., Vásquez, N., and Rondanelli, R.: CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for hydroclimatic research in Chile, in: EGU General Assembly Conference Abstracts, 19739, 2018.

Brooks, R. H. and Corey, A. T.: Hydraulic properties of porous media. Hydrology Paper 1964, № 3, Civ. Eng. Dep., Color. State Univ., Fort Collins, Color. 27pp, 1964.

Chegwidden, O. S. S., Nijssen, B., Rupp, D. E. E., Arnold, J. R. R., Clark, M. P. P., Hamman, J. J. J., Kao, S. C. S. C., Mao, Y., Mizukami, N., Mote, P. W., Pan, M., Pytlak, E., and Xiao, M.: 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 Futur.*, 7, 623–637, <https://doi.org/10.1029/2018EF001047>, 2019.

David, C. H., Maidment, D. R., Niu, G. Y., Yang, Z. L., Habets, F., and Eijkhout, V.: River network routing on the NHDPlus dataset, *J. Hydrometeorol.*, 12, 913–934, <https://doi.org/10.1175/2011JHM1345.1>, 2011.

Decharme, B., Alkama, R., Douville, H., Becker, M., and Cazenave, A.: Global Evaluation of the ISBA-TRIP Continental Hydrological System. Part II: Uncertainties in River Routing Simulation Related to Flow Velocity and Groundwater Storage, *J. Hydrometeorol.*, 11, 601–617, <https://doi.org/10.1175/2010JHM1212.1>, 2010.

Emerton, R. E., Stephens, E. M., Pappenberger, F., Pagano, T. C., Weerts, A. H., Wood, A. W., Salamon, P., Brown, J. D., Hjerdt, N., Donnelly, C., Baugh, C. A., and Cloke, H. L.: Continental and global scale flood forecasting systems, *Wiley Interdiscip. Rev. Water*, 3, n/a-n/a, <https://doi.org/10.1002/wat2.1137>, 2016.

Gong, L., Widén-Nilsson, E., Halldin, S., and Xu, C. Y.: Large-scale runoff routing with an aggregated network-response function, *J. Hydrol.*, 368, 237–250, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.02.007>, 2009.

Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., and Martinez, G. F.: Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling, *J. Hydrol.*, 377, 80–91, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>, 2009.

Iziomon, M. G., Mayer, H., and Matzarakis, A.: Downward atmospheric longwave irradiance under clear and cloudy skies: Measurement and parameterization, *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.*, 65, 1107–1116, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jastp.2003.07.007>, 2003.

Kling, H., Fuchs, M., and Paulin, M.: Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios, *J. Hydrol.*, 424–425, 264–277, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.011>, 2012.

Lehner, B. and Grill, G.: Global river hydrography and network routing: Baseline data and new approaches to study the world's large river systems, *Hydrol. Process.*, 27, 2171–2186, <https://doi.org/10.1002/hyp.9740>, 2013.

Liang, X., Lettenmaier, D. P., Wood, E. F., and Burges, S. J.: A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models, *J. Geophys. Res.*, 99, 14,415.14.428, <https://doi.org/10.1029/94jd00483>, 1994.

Lohmann, D., Nolte-Holube, R., and Raschke, E.: A large scale horizontal routing model to be coupled to land surface parametrization schemes, *Tellus*, 48A, 708–721, <https://doi.org/10.3402/tellusa.v48i5.12200>, 1996.

Lohmann, D., Raschke, E., Nijssen, B., and Lettenmaier, D. P.: Regional scale hydrology: II. Application of the VIC-2L model to the Weser River, Germany, *Hydrol. Sci. J.*, 43, 143–158, <https://doi.org/10.1080/02626669809492108>, 1998.

Lucas-Picher, P., Arora, V. K., Caya, D., and Laprise, R.: Implementation of a large-scale variable velocity river flow routing algorithm in the Canadian Regional Climate Model (CRCM), *Atmos. - Ocean*, 41, 139–153, <https://doi.org/10.3137/ao.410203>, 2003.

McCarthy, G.: The Unit Hydrograph and Flood Routing., in: Unpublished manuscript presented at a conference of the North Atlantic Division, 1938.

Melsen, L. A., Addor, N., Mizukami, N., Newman, A. J., Torfs, P. J. J. F., Clark, M. P., Uijlenhoet, R., and Teuling, A. J.: Mapping (dis)agreement in hydrologic projections, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 1775–1791, <https://doi.org/10.5194/hess-22-1775-2018>, 2018.

Mendoza, P. A., Clark, M. P., Mizukami, N., Gutmann, E. D., Arnold, J. R., Brekke, L. D., and Rajagopalan, B.: How do hydrologic modeling decisions affect the portrayal of climate change impacts?, *Hydrol. Process.*, 30, 1071–1095, <https://doi.org/10.1002/hyp.10684>, 2016.

Mizukami, N., Clark, M. P., Sampson, K., Nijssen, B., Mao, Y., McMillan, H., Viger, R. J., Markstrom, S. L., Hay, L. E., Woods, R., Arnold, J. R., and Brekke, L. D.: mizuRoute version 1: a river network routing tool for a continental domain water resources applications, *Geosci. Model Dev.*, 9, 2223–2238, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-2223-2016>, 2016.

Mizukami, N., Clark, M. P., Gharari, S., Kluzek, E., Pan, M., Lin, P., Beck, H. E., and Yamazaki, D.: A Vector-Based River Routing Model for Earth System Models: Parallelization and Global Applications, *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 13, 1–20, <https://doi.org/10.1029/2020MS002434>, 2021.

Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., Martens, B., Miralles, D. G., Piles, M., Rodríguez-Fernández, N. J., Zsoter, E., Buontempo, C., and Thépaut, J.-N.: ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications, *Earth Syst. Sci. Data*, 13, 4349–4383, <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>, 2021.

Nash, J. and Sutcliffe, J.: River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles, *J. Hydrol.*, 10, 282–290, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6), 1970.

Newman, A. J., Stone, A. G., Saharia, M., Holman, K. D., Addor, N., and Clark, M. P.: Identifying sensitivities in flood frequency analyses using a stochastic hydrologic modeling system, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 25, 5603–5621, <https://doi.org/10.5194/hess-25-5603-2021>, 2021.

Oki, T. and Sud, Y. C.: Design of Total Runoff Integrating Pathways (TRIP)—A Global River Channel Network, *Earth Interact.*, 2, 1–37, [https://doi.org/10.1175/1087-3562\(1998\)002<0001:dotrip>2.3.co;2](https://doi.org/10.1175/1087-3562(1998)002<0001:dotrip>2.3.co;2), 1998.

Olivera, F., Famiglietti, J., and Asante, K.: Global-scale flow routing using a source-to-sink algorithm, *Water Resour. Res.*, 36, 2197–2207, <https://doi.org/10.1029/2000WR900113>, 2000.

Paiva, R. C. D., Collischonn, W., and Tucci, C. E. M.: Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach, *J. Hydrol.*, 406, 170–181, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.06.007>, 2011.

Sepúlveda, U. M., Mendoza, P. A., Mizukami, N., and Newman, A. J.: Revisiting parameter sensitivities in the variable infiltration capacity model across a hydroclimatic gradient, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 26, 3419–3445, <https://doi.org/10.5194/hess-26-3419-2022>, 2022.

Shaad, K.: Evolution of river-routing schemes in macro-scale models and their potential for watershed management, *Hydrol. Sci. J.*, 63, 1062–1077, <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1473871>, 2018.

Tang, Y., Reed, P., van Werkhoven, K., and Wagener, T.: Advancing the identification and evaluation of distributed rainfall-runoff models using global sensitivity analysis, *Water Resour. Res.*, 43, 1–14, <https://doi.org/10.1029/2006WR005813>, 2007.

Thober, S., Cuntz, M., Kelbling, M., Kumar, R., Mai, J., and Samaniego, L.: The multiscale routing model mRM v1.0: simple river routing at resolutions from 1 to 50 km, *Geosci. Model Dev.*, 12, 2501–2521, <https://doi.org/10.5194/gmd-12-2501-2019>, 2019.

Vano, J. A., Das, T., and Lettenmaier, D. P.: Hydrologic Sensitivities of Colorado River Runoff to Changes in Precipitation and Temperature, *J. Hydrometeorol.*, 13, 932–949, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-069.1>, 2012.

Wobus, C., Gutmann, E., Jones, R., Rissing, M., Mizukami, N., Lorie, M., Mahoney, H., Wood, A. W. W., Mills, D., and Martinich, J.: Climate change impacts on flood risk and asset damages within mapped 100-year floodplains of the contiguous United States, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 17, 2199–2211, <https://doi.org/10.5194/nhess-17-2199-2017>, 2017.

Yamazaki, D., Kanae, S., Kim, H., and Oki, T.: A physically based description of floodplain inundation dynamics in a global river routing model, *Water Resour. Res.*, 47, 1–21, <https://doi.org/10.1029/2010WR009726>, 2011.

Yamazaki, D., De Almeida, G. A. M., and Bates, P. D.: Improving computational efficiency in global river models by implementing the local inertial flow equation and a vector-based river network map, *Water Resour. Res.*, 49, 7221–7235, <https://doi.org/10.1002/wrcr.20552>, 2013.

Ye, A., Duan, Q., Zhan, C., Liu, Z., and Mao, Y.: Improving kinematic wave routing scheme in Community Land Model, *Hydrol. Res.*, 44, 886–903, <https://doi.org/10.2166/nh.2012.145>, 2013.

Yilmaz, K. K., Gupta, H. V., and Wagener, T.: A process-based diagnostic approach to model evaluation: Application to the NWS distributed hydrologic model, *Water Resour. Res.*, 44, W09417, <https://doi.org/10.1029/2007WR006716>, 2008.

Zhao, F., Veldkamp, T. I. E., Frieler, K., Schewe, J., Ostberg, S., Willner, S., Schauburger, B., Gosling, S. N., Schmied, H. M., Portmann, F. T., Leng, G., Huang, M., Liu, X., Tang, Q., Hanasaki, N., Biemans, H., Gerten, D., Satoh, Y., Pokhrel, Y., Stacke, T., Ciais, P., Chang, J., Ducharne, A., Guimberteau, M., Wada, Y., Kim, H., and Yamazaki, D.: The critical role of the routing scheme in simulating peak river discharge in global hydrological models, *Environ. Res. Lett.*, 12, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa7250>, 2017.