

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**¿QUÉ REFLEJA EL ÍNDICE ESTANDARIZADO DE CAUDALES?
PERSPECTIVAS Y ANÁLISIS DE SEQUÍAS HIDROLÓGICAS**

FABIÁN LEMA¹
PABLO MENDOZA²
NICOLÁS VÁSQUEZ³
NAOKI MIZUKAMI⁴
MAURICIO ZAMBRANO BIGIARINI⁵
XIMENA VARGAS⁶

RESUMEN

El Índice Estandarizado de Caudal (SSI) se emplea comúnmente para detectar y caracterizar eventos de sequía hidrológica debido a su simplicidad, pero existe una comprensión limitada sobre su relación con variables del ciclo hidrológico. En este estudio se analizan las relaciones entre el SSI y otras variables hidrológicas mediante la implementación del modelo SUMMA, acoplado al modelo de rastreo hidrológico mizuRoute, en seis cuencas con distintos regímenes hidrológicos en Chile Central. Usando datos de precipitación del producto CR2MET v.2.0 y salidas del modelo a escala mensual, se evaluaron las correlaciones entre el SSI y variables clave como precipitación, humedad del suelo, nieve (SWE) y contenido de agua subterránea, considerando diferentes escalas de agregación temporal. Los resultados muestran que la respuesta del SSI varía según el régimen hidrológico de la cuenca, siendo más sensible en cuencas pluviales cuando se utilizan agregaciones superiores a nueve meses. Las correlaciones más altas (coeficiente de Spearman $> 0,7$) se lograron con un SSI de seis meses y variables hidrológicas agregadas a nueve y doce meses. Además, se observó que la trayectoria de propagación de sequías, desde una meteorológica a una hidrológica, puede cambiar drásticamente según la escala temporal utilizada, lo que subraya la necesidad de una mayor precaución en la aplicación del SSI.

¹ Ingeniero Civil, MSc., Universidad de Chile – email: fabian.leva@ug.uchile.cl

² Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – email: pamendoz@uchile.cl

³ Postdoctoral Associate, University of Calgary, Canadá – email: nicolas.vasquez@ucalgary.ca

⁴ Associate Scientist, National Center for Atmospheric Research, EE.UU. – email: mizukami@ucar.edu

⁵ Profesor Asociado, Ingeniería Civil, Universidad de la Frontera – email: mauricio.zambrano@ufrontera.cl

⁶ Profesora Asociada, Depto. de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – email: xvargas.uchile@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

Las sequías son amenazas naturales recurrentes que pueden cubrir grandes extensiones territoriales y perdurar por períodos que van desde algunos meses hasta incluso décadas, generando un gran impacto tanto para los ecosistemas naturales como para las actividades socioeconómicas. Chile Central es una región que frecuentemente se ha visto afectada por este fenómeno, destacando eventos de sequías recientes como la del año 1998 y la denominada “mega-sequía”, originada en el año 2010, la cual perduró en forma ininterrumpida hasta el año 2022 (Garreaud et al., 2019).

Para detectar y estudiar las características de los eventos de sequía, como por ejemplo su duración e intensidad, es común el uso de índices estandarizados como, por ejemplo, el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI por sus siglas en inglés; McKee et al., 1993), el Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI por sus siglas en inglés; Vicente-Serrano et al., 2010), el Índice Estandarizado de Caudales (SSI por sus siglas en inglés; Vicente-Serrano et al., 2012) y el Índice Estandarizado de Humedad del Suelo (SSMI por sus siglas en inglés; Carrao et al., 2013). Si bien estos índices permiten comparar en forma directa sequías de distinto tipo (meteorológicas, de humedad del suelo o hidrológicas) ocurridas en distintas regiones climáticas y geográficas, existe un conocimiento limitado sobre los procesos que realmente explican sus fluctuaciones.

En particular, el uso del SSI para caracterizar sequías hidrológicas se ha hecho cada vez más popular debido a su sencilla formulación, cálculo e interpretabilidad de resultados. Las numerosas aplicaciones del SSI abarcan diversas áreas, incluyendo el monitoreo y pronóstico de sequías (Núñez et al., 2014), además del análisis de propagación de sequías bajo condiciones históricas observadas (Barker et al., 2016) y proyecciones climáticas (Wan et al., 2018).

La aplicabilidad del SSI presenta como principales desafíos la cantidad y calidad de los datos, además de la metodología utilizada para su cálculo, la cual involucra aspectos como la elección de un período de referencia para la estandarización, la selección de una distribución de probabilidad, la estimación de parámetros (Tijdeman et al., 2020) y, en particular, la escala temporal o período de acumulación a la cual se realiza el cálculo (Barker et al., 2016; Baez-Villanueva et al., 2024). Este último aspecto se refiere al período de tiempo hacia atrás (usualmente, medido como número de meses) sobre el cual los valores de caudales son promediados o acumulados antes de calcular el índice. En la actualidad, no hay consenso en cuanto a la escala temporal más adecuada a usar tanto para el SSI como para otros índices estandarizados, lo que puede deberse a la limitada comprensión de lo que el SSI revela realmente sobre los mecanismos físicos subyacentes que impulsan las sequías hidrológicas.

Para abordar este desafío, la modelación hidrológica surge como un enfoque útil. Este trabajo contribuye a este campo al considerar otro enfoque respecto a anteriores estudios de sequía que utilizaron una única escala temporal para el SSI (por ejemplo, Wan et al., 2018 y Gautam et al., 2024) mediante la realización de análisis exploratorios de correlación entre los flujos y almacenamientos de agua modelados a escala de cuenca y el SSI para posteriormente evaluar las implicancias de la elección de períodos de acumulación sobre la detección, caracterización y análisis de propagación de eventos de sequía.

2. ÁREA DE ESTUDIO Y DATOS

Los análisis de este estudio se realizaron sobre seis cuencas en régimen natural localizadas en la Cordillera de Los Andes en Chile Central: (a) Río Cochiguaz en el Peñón, (b) Río Choapa en Cuncumén, (c) Río Claro en el Valle, (d) Río Palos en junta con Río Colorado, (e) Río Ñuble en la Punilla, y (f) Río Cautín en Rari-Ruca. La ubicación y variabilidad estacional de precipitación, caudal y temperatura de cada cuenca se presenta en la Figura 1, mientras que para identificar cada cuenca en este estudio se utilizará solamente el nombre del río. Las cuencas abarcan un amplio rango de características fisiográficas y condiciones climáticas, que incluyen valores de precipitación anual que oscilan entre 260 y 2900 mm/año, temperaturas medias anuales entre 9 y 16 °C, escorrentía anual que abarca 114-2090 mm/año y coeficientes de escorrentía entre 0,44 y 0,86. Esta diversidad climática se traduce en diferentes regímenes hidrológicos: las cuencas de los ríos Cochiguaz y Choapa tienen un régimen nival, Palos y Ñuble tienen un régimen mixto nivo-pluvial, mientras que Claro y Cautín tienen un régimen mayoritariamente pluvial.

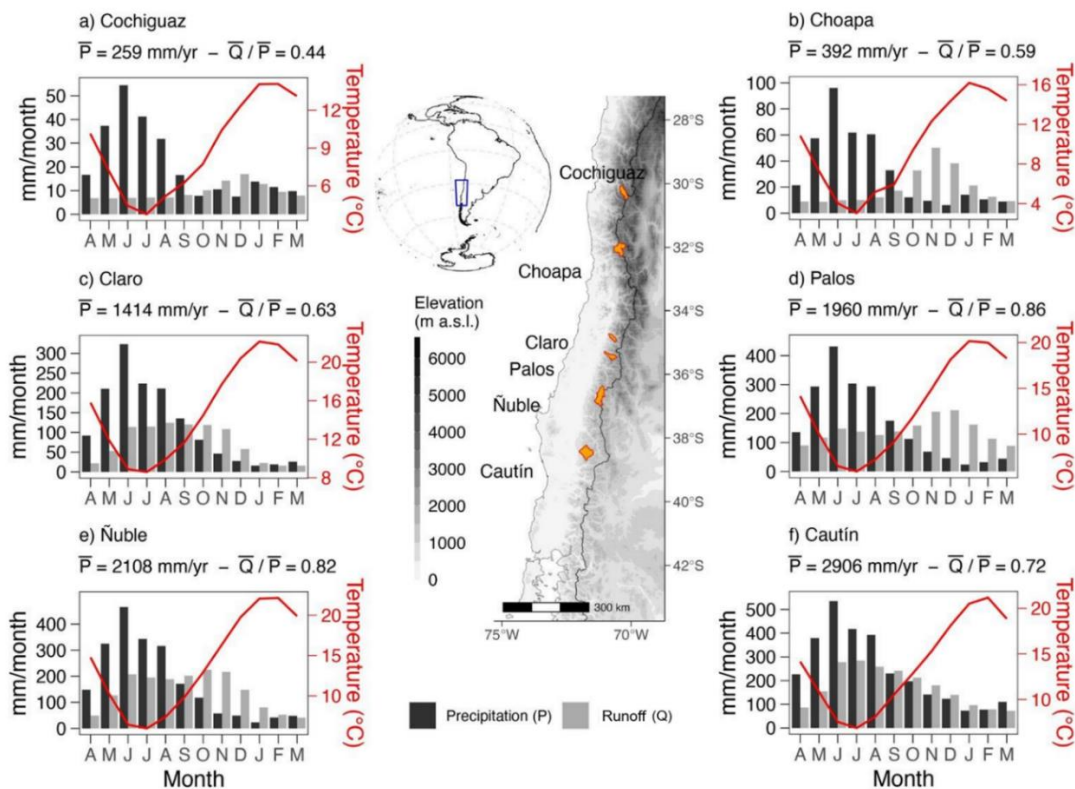


Figura 1: Ubicación y variabilidad estacional de la precipitación, caudal y temperatura de las seis cuencas consideradas en el estudio (años hidrológicos 1985/86-2014/15).

Los datos meteorológicos diarios se obtuvieron desde el producto grillado CR2MET v.2.0 (DGA, 2017; Boisier et al., 2018), que proporciona estimaciones diarias de precipitación y temperaturas extremas para todo el territorio continental de Chile en el periodo 1979-2020, a una resolución horizontal de $0,05^\circ \times 0,05^\circ$. Los datos de viento, radiación incidente de onda corta, presión atmosférica y humedad relativa se obtuvieron del reanálisis atmosférico ERA5-Land. Los datos de cobertura de suelo y tipos de vegetación en el área de estudio se

obtuvieron desde imágenes satelitales provenientes del producto Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). Los registros de caudales diarios son recopilados por la Dirección General de Aguas (DGA) y se obtuvieron del sitio web del Centro de Investigación en Clima y Resiliencia (CR2; <https://www.cr2.cl/datos-de-caudales/>, último acceso: 18 de septiembre de 2023).

3. METODOLOGÍA

El enfoque considerado en el estudio consideró las siguientes cinco etapas (Figura 2):

(a) Modelación hidrológica: para cada cuenca se implementaron modelos hidrológicos mediante la plataforma de modelación SUMMA (Clark et al., 2015a), la cual ofrece diferentes opciones de configuración y representación de procesos físicos. Algunas de las principales decisiones de modelación seleccionadas fueron las siguientes: suponer un perfil logarítmico del viento, representar la redistribución vertical del agua en la columna de suelo por medio de la ecuación de Richards y considerar una conductividad hidráulica constante en la vertical, un modelo de acuífero concentrado y una tasa de decaimiento del albedo constante para la nieve. Se utilizaron como forzantes datos diarios de precipitación y temperatura desagregados a una escala tri-horaria en base a distribuciones probabilísticas, y datos tri-horarios de radiación solar incidente de onda corta y larga, presión atmosférica, humedad relativa y velocidad del viento. Las simulaciones numéricas también fueron ejecutadas cada tres horas. En cuanto a la estructura de los modelos, cada cuenca fue dividida espacialmente en una grilla de celdas coincidentes con las de CR2MET (0,05° x 0,05°), cada una de las cuales presenta características fisiográficas específicas (pendiente, elevación, cobertura de suelo), un máximo de cinco capas de nieve, tres capas de suelo con un espesor total de 5 m y una capa acuífera no confinada sin flujo de agua lateral. Adicionalmente, se utilizó el modelo de rastreo hidrológico mizuRoute (Mizukami et al., 2016) para convertir la escorrentía instantánea de cada celda del modelo en caudal de salida de la cuenca.

(b) Calibración de parámetros: se calibraron 14 parámetros del modelo SUMMA utilizando el algoritmo Dynamically Dimensioned Search (DDS, Tolson and Shomoecker, 2007), buscando maximizar la función objetivo (OF) propuesta por García et al. (2017) (Ecuación 1), la cual proporciona un buen equilibrio entre simulaciones de caudales altos y bajos:

$$OF = 0,5 \cdot KGE(Q) + 0,5 \cdot KGE\left(\frac{1}{Q}\right) \quad (1)$$

donde KGE es la eficiencia de Kling-Gupta (Gupta et al., 2009) calculada con series diarias simuladas y observadas de caudal. Para cada modelo, se consideraron 2000 iteraciones del algoritmo. Para ejecutar la calibración, los datos de caudales diarios observados se dividieron en un periodo de *warm-up* (abril de 2004 a marzo de 2006), un periodo de calibración (abril de 2010 a marzo de 2017) y dos periodos de evaluación no consecutivos (abril de 2006 a marzo de 2010 y abril de 2017 a marzo de 2020). Una vez calibrado cada uno de los modelos, el período de simulación finalmente considerado fue desde abril de 1983 hasta marzo de 2020, considerando tres años hidrológicos (abril de 1980 a marzo de 1983) como *warm-up*.

(c) Cálculo de Índices Estandarizados de Sequía (SDIs): para la detección de eventos de sequías se consideraron los siguientes SDIs: SPI y SPEI para sequías meteorológicas, SSMI para sequías de humedad del suelo y SSI para sequías hidrológicas. El cálculo de cada uno de estos índices comparte la misma metodología de base, que esencialmente considera los siguientes pasos: (i) seleccionar una función de densidad de probabilidad y sus parámetros para obtener la distribución a largo plazo en un período de referencia (normalmente de 30 años) para la variable hidrológica acumulada; (ii) obtener la función de distribución acumulada (CDF) a partir de la distribución ajustada; y (iii) transformar la CDF en una distribución normal estandarizada (es decir, con media igual a cero y desviaciones estándar igual a uno), utilizando una transformación inversa equi-percentil para derivar los valores del SDI. En el presente estudio, se consideró la distribución Gamma para el cálculo de los índices meteorológicos (SPI y SPEI), la distribución logística generalizada para el SSI y una distribución empírica para el SSMI.

Adicionalmente, se replicó la metodología de cálculo del SSMI involucrando a todos los almacenamientos de cada cuenca (humedad del suelo, vegetación, SWE, acuífero), obteniendo como resultado el índice aquí denominado Standardized Water Storage Index (SWSI). Cabe destacar, que para evaluar cómo la elección subjetiva de las escalas temporales puede afectar a la detección y caracterización de los distintos tipos de eventos de sequías, se calculó en cada caso SDI-n con $n=1, 3, 6, 9, 12, 18$ y 24 meses.

Por otra parte, también se analizó el efecto de emplear diferentes criterios de detección de sequías, en particular sobre la frecuencia e intensidad de eventos de sequía hidrológica. Para ello, se fijó en -1 el umbral para definir un evento, de dos maneras diferentes: (i) un evento de sequía comienza cuando el SDI-n cae por debajo de -1 y concluye cuando alcanza o supera -1 (es decir, es posible detectar eventos de 1 mes de duración), y (ii) un evento de sequía comienza cuando el SDI-n se mantiene por debajo de -1 durante al menos 3 meses consecutivos y concluye cuando alcanza o supera -1.

(d) Análisis de correlación: se calculó el coeficiente de correlación de Spearman entre SSI-n con $n=1, 3$, y 6 meses, que son las escalas temporales más comúnmente utilizadas en los estudios de sequía (por ejemplo, Núñez et al., 2014), y los principales flujos y almacenamientos de agua agregados a distintas escalas temporales (1, 3, 6, 9, 12, 18 y 24 meses). En este análisis, se supuso que los factores no simulados por los modelos hidrológicos y de enrutamiento (por ejemplo, cambio en la cubierta terrestre, extracciones de agua, glaciares) tienen una influencia insignificante en la ocurrencia de sequía hidrológica en las cuencas seleccionadas.

(e) Análisis de propagación de sequías: utilizando las escalas temporales que maximizaron las correlaciones identificadas en la etapa (d), se estimó el valor de SPI, SSMI y SSI para examinar las transiciones desde eventos de sequía meteorológica a eventos de sequía hidrológica en el espacio duración-intensidad, pasando por la sequía de humedad del suelo. Esto se realizó analizando la duración (en meses) y la intensidad, cuantificada como el valor del SDI promediado temporalmente durante la duración del evento de sequía, con énfasis en los eventos de 1998/99 y 2012-2016 (un subperíodo de la megasequía), que afectaron simultáneamente a las seis cuencas estudiadas. Finalmente, se compararon las trayectorias de

propagación de la sequía derivadas de las escalas temporales maximizadas en este estudio con las de otros criterios adoptados en estudios recientes.

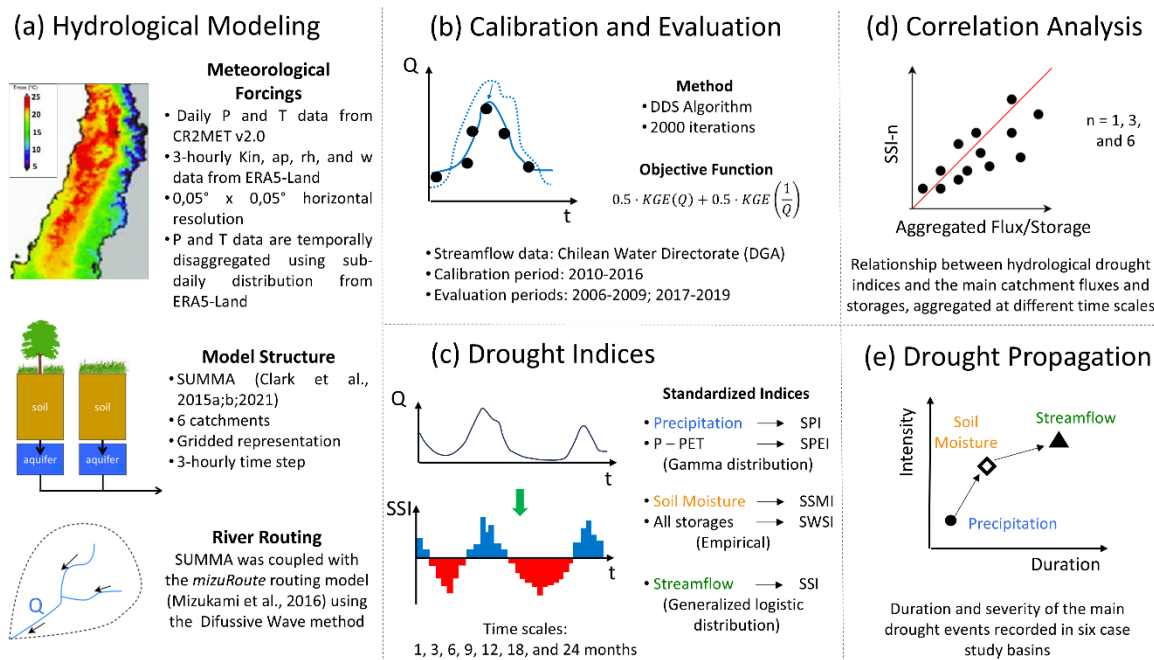


Figura 2: Esquema de la metodología empleada en el estudio.

4. RESULTADOS

La Figura 3 muestra una evaluación entre el caudal simulado por el modelo hidrológico SUMMA y el observado en cada una de las cuencas, tras el proceso de calibración de parámetros. En particular, se analizaron series de tiempo, curvas de duración y variación estacional, además de estimar métricas de desempeño como RMSE, KGE y sesgo porcentual (BIAS). Entre los principales resultados, se destaca que el valor de la función objetivo (Ec. 1) durante el período de evaluación fue superior a 0,73 en todas las cuencas y que los valores de KGE (Q) van desde 0,74 (Choapa) hasta valores de 0,83 (Palos) y 0,82 (Cautín). Se obtienen sesgos negativos (es decir, subestimación de los volúmenes de escorrentía) para Cochiguaz (-15,4 %) y Ñuble (-5,8 %), mientras que en el resto de las cuencas se obtienen sesgos positivos pequeños (<8 %). En general, las curvas de duración de caudales diarios observadas son bien simuladas por el modelo SUMMA en todas las cuencas, existiendo una sobreestimación de los caudales bajos con probabilidades de excedencia mayores al 90 % en las cuencas Choapa y Claro (< 2 m³/s). La estacionalidad de los caudales es bien reproducida en todas las cuencas, aunque hay una sobreestimación (<10 %) de los caudales medios mensuales durante septiembre - noviembre (período de deshielo) en las cuencas de los ríos Choapa y Claro y durante marzo - octubre (período de concentración de precipitaciones) en las cuencas de los ríos Ñuble y Cautín.

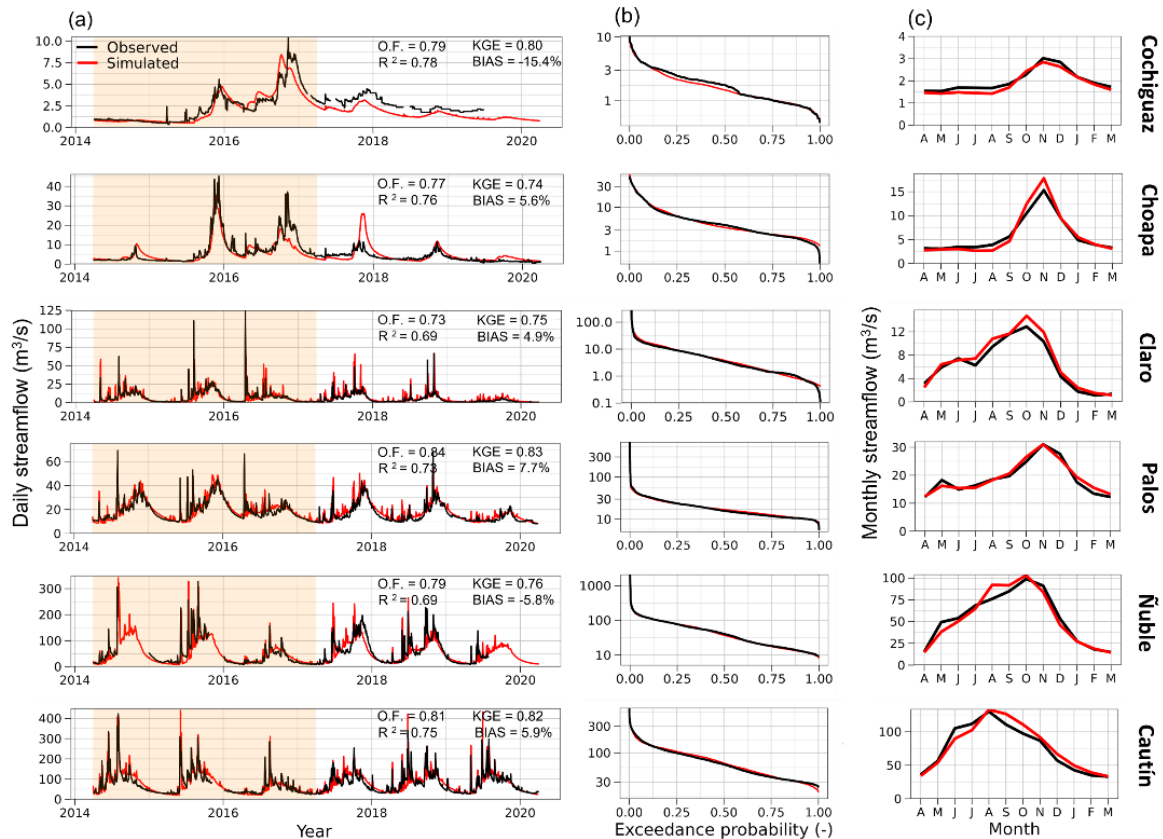


Figura 3: Comparación entre caudal simulado en SUMMA y observado.

En la Figura 4 se compara el número de eventos de sequías hidrológicas detectadas en cada cuenca al estimar el SSI-1, SSI-3 y SSI-6, además de la distribución acumulada de las duraciones de cada evento a lo largo de todo el periodo de simulación (abril 1983 a marzo 2020), considerando dos criterios: detección de eventos de duración mínima 1 mes (columna b) y de duración mínima 3 meses (columna c). La Figura 4a muestra diferencias sustanciales en el número de eventos detectados en función de los criterios y la escala temporal utilizada, con la única excepción de la cuenca del río Cochiguaz. En general, el número de eventos detectados con el criterio libre (1 mes) disminuye para escalas de tiempo más largas, a diferencia del criterio restringido (3 meses), en donde dicho número tiende a mantenerse constante o incluso a aumentar (ver por ejemplo, la cuenca del río Choapa). Las mayores discrepancias se encuentran en las cuencas pluviales; por ejemplo, en la cuenca del río Cautín se detectaron 28 y 13 eventos con SSI-1 y SSI-6, respectivamente, utilizando el criterio libre. En la Figura 4b y 4c se muestran las densidades de frecuencia de las duraciones de sequía obtenidas con los criterios libre y restringido, para todas las cuencas y escalas temporales. Se observa que la elección de la escala temporal tiene efectos considerables sobre las duraciones de las sequías en las cuencas pluviales, especialmente con el criterio libre, con una transición de funciones de densidad de probabilidad sesgadas positivamente con medias entre 1-3 meses cuando se utiliza SSI-1 a distribuciones más homogéneas, centradas alrededor de 8 meses, cuando se utiliza SSI-6.

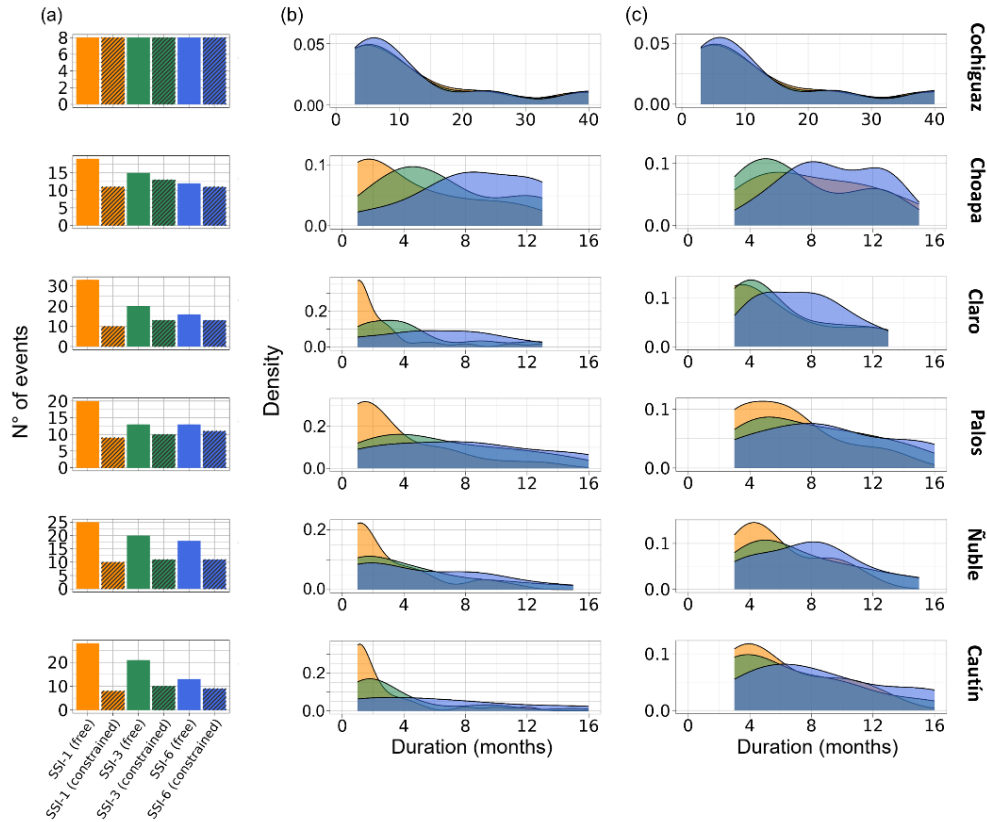


Figura 4: Efectos de la elección de la escala temporal (1, 3 y 6 meses) en los cálculos del SSI. (a) Frecuencia de eventos de sequías, (b) densidades de frecuencia de las duraciones de eventos de sequía bajo el criterio libre, y (c) densidades de frecuencia de las duraciones de eventos de sequía bajo el criterio restringido.

La Figura 5 ilustra cómo la elección de la escala de tiempo utilizada para el SSI afecta a la correlación de Spearman obtenida entre este índice y las principales variables hidrológicas (precipitación y almacenamientos de las cuencas). Se puede notar que las diferencias son mínimas entre SSI-1, SSI-3 y SSI-6 para las dos cuencas nivales (es decir, Cochiguaz y Choapa). Además, la forma de las curvas es similar en la mayoría de los casos, alcanzando las correlaciones más altas con la precipitación y SWE en una escala de 12 meses y las correlaciones más altas con la humedad del suelo y el almacenamiento total usando escalas de tiempo entre 6 y 12 meses. Un caso particular corresponde al almacenamiento del acuífero, en donde la fuerza de la relación entre el SSI y esta variable cambia dependiendo del régimen hidrológico: en cuencas nivales, las correlaciones son mayores para escalas temporales de 3-6 meses de almacenamiento del acuífero, mientras que la correlación se maximiza con escalas temporales de 9-12 meses en cuencas mixtas y pluviales.

En la mayoría de los casos, las correlaciones más altas (más bajas) se obtienen usando SSI-6 (SSI-1), aunque hay algunas excepciones en escalas de tiempo menores a 9 meses en las cuencas de los ríos Palos y Ñuble (régimen mixto), donde se logran correlaciones más altas al usar SSI-1. Los impactos de la elección de la escala temporal sobre los resultados de correlación son considerablemente mayores en las cuencas de régimen mixto o pluvial, en donde se observa una mayor dispersión en la correlación alcanzada por los índices, llegando

a diferencias de hasta 0,5 en las cuencas de los ríos Ñuble y Cautín para una escala de 12 meses. Del mismo modo, se observa un aumento progresivo en la dispersión de las correlaciones cuando se evalúan los índices a escalas temporales mayores (> 9 meses) para todos los almacenamientos en cuencas mixtas y pluviales. En general, los resultados de la Figura 5 sugieren que, si el objetivo es investigar la relación entre las principales variables hidrológicas y las fluctuaciones en el SSI, la elección de la escala temporal utilizada para calcular este índice se vuelve menos relevante en las cuencas con una mayor componente nival o con grandes contribuciones de flujo de base, en comparación con las cuencas dominadas por las precipitaciones.

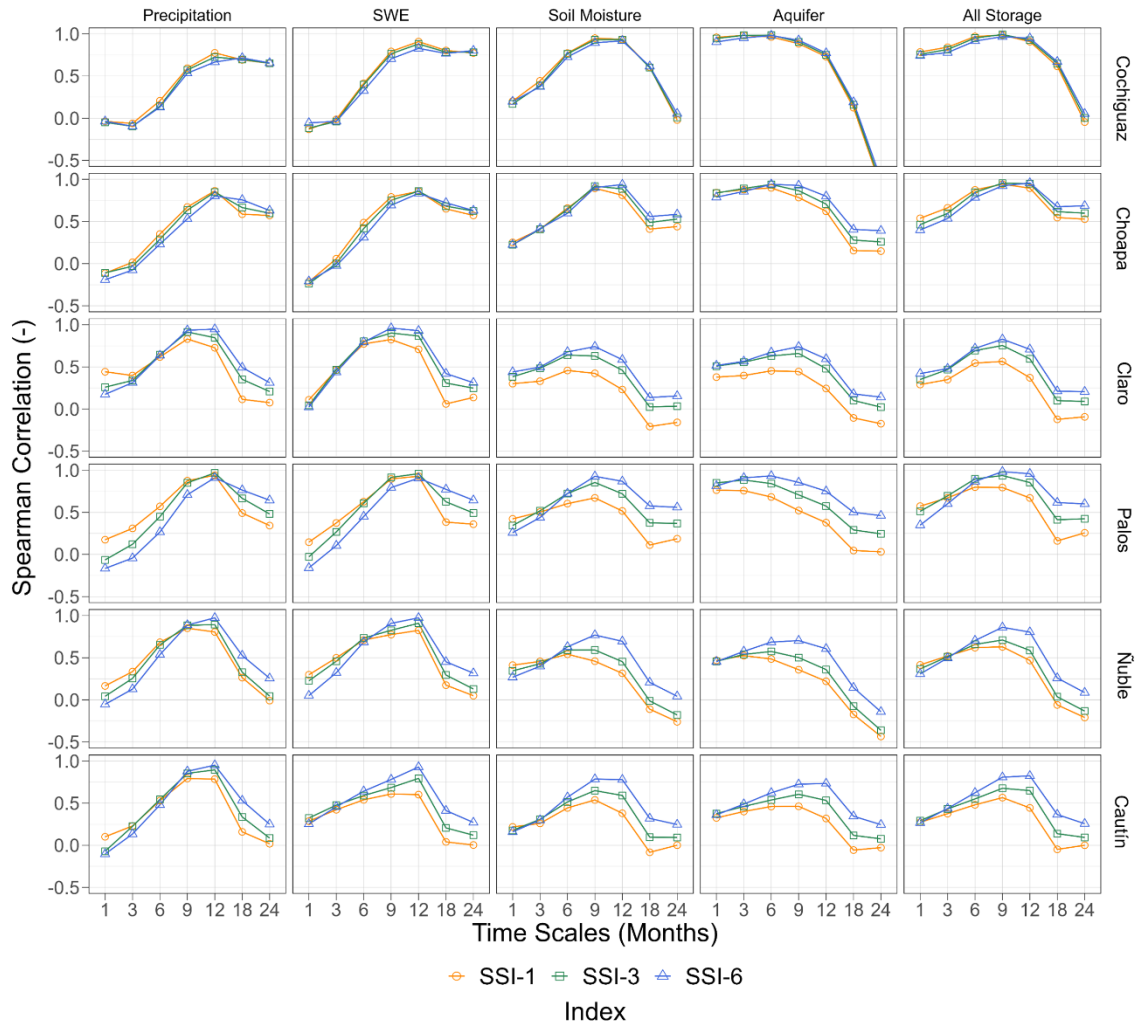


Figura 5: Coeficientes de correlación de Spearman entre el SSI calculado a diferentes escalas temporales (1, 3 y 6 meses) y variables hidrológicas agregadas temporalmente.

En la Figura 6 se exploran los efectos potenciales de los regímenes hidrológicos en las correlaciones de rango de Spearman entre SSI-6 y las variables hidrológicas agregadas a diferentes escalas temporales para tres periodos: el evento de sequía de 1998/1999, la megasequía de Chile central (2010-2019), y el período completo de modelación (abril 1983 a marzo 2020). El análisis de los diferentes almacenamientos a lo largo de todo el periodo revela que, en general, se obtienen correlaciones de Spearman más elevadas en las cuencas

áridas y mayormente nival en comparación con las cuencas húmedas y mayormente pluvial, independientemente de la escala temporal analizada. En otras palabras, existen relaciones más fuertes con SSI-6 en las regiones del norte (índice de aridez > 2 y precipitación media anual < 400 mm/año), que gradualmente se vuelven más débiles hacia el sur (índice de aridez < 0,5 y precipitación media anual > 2000 mm/año), de forma similar al gradiente hidroclimático de Chile central. Estos patrones son más evidentes cuando se agregan todos los almacenamientos de las cuencas (última fila de la Figura 7) y en menor grado en almacenamientos individuales (SWE, humedad del suelo y almacenamiento en acuíferos).

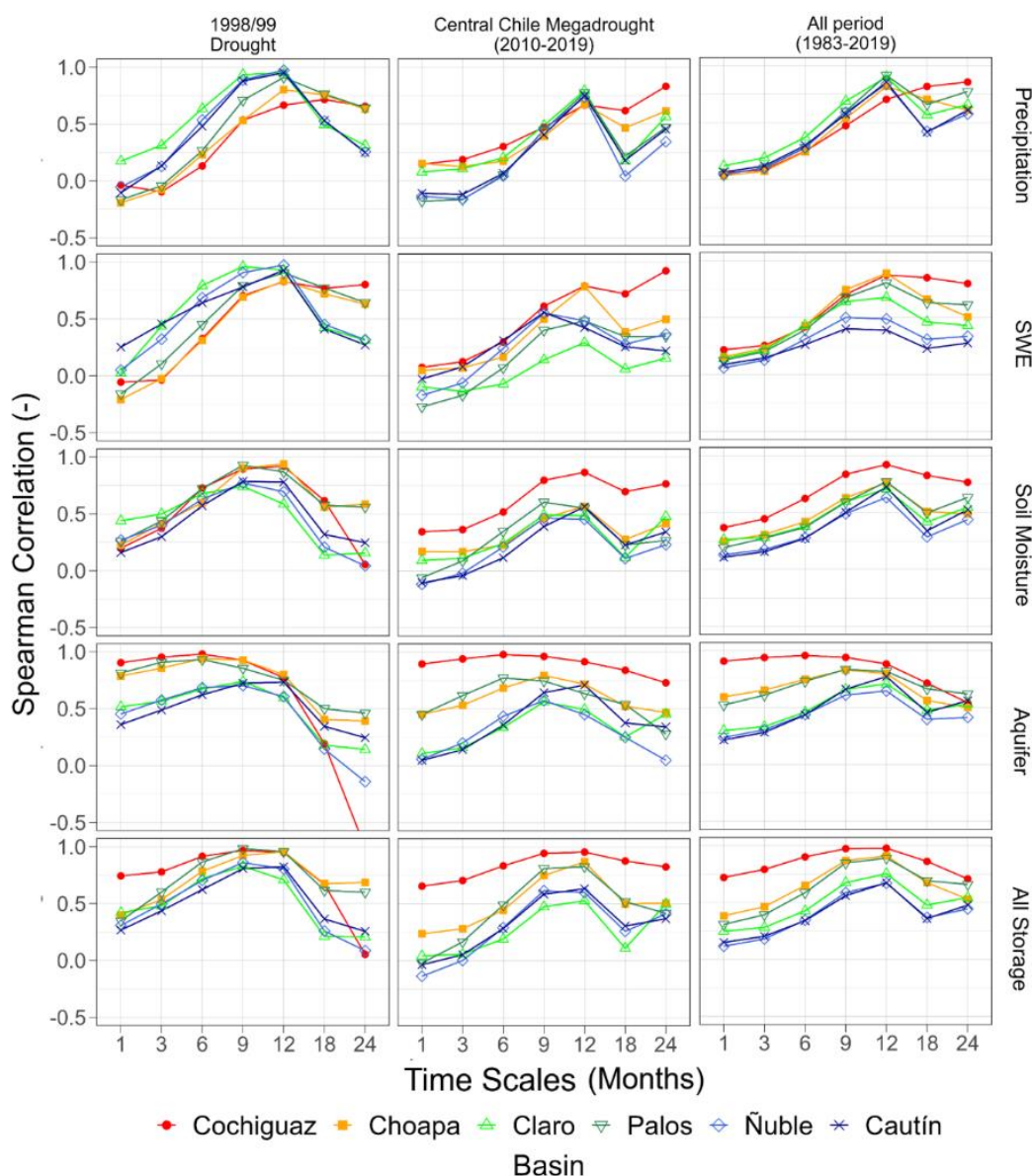


Figura 6: Coeficientes de correlación de Spearman entre SSI-6 y variables hidrológicas para tres periodos diferentes: (a) el evento de sequía de octubre de 1998 a septiembre de 1999, (b) la megasequía de Chile central (abril de 2010 a marzo de 2019), y (c) todo el periodo de análisis (abril de 1983 a marzo de 2020).

La Figura 7 muestra la transición desde eventos de sequía meteorológica hacia eventos de sequía de humedad del suelo e hidrológica en el espacio duración-intensidad para las cuencas de los ríos Choapa (régimen nival), Palos (régimen mixto) y Cautín (régimen pluvial). Los resultados revelan que el uso de diferentes criterios de escalas temporales afecta a la caracterización de la duración e intensidad de las sequías y a la propagación de tales atributos en un sistema hidrológico específico, incluso dentro de un mismo evento. Por ejemplo, los resultados para el evento 1998/99 en la cuenca del Río Choapa muestran que al usar escalas temporales fijas de 1 mes (púrpura; Wan et al., 2018), 3 meses (verde; Gautam et al., 2024) y las que maximizan la correlación en este estudio (rojo; que considera SPI-12, SSMI-12 y SSI-6) producen una transición hacia una sequía hidrológica relativamente más larga e intensa, comparada con la sequía meteorológica; mientras que las escalas de tiempo recomendadas por Baez-Villanueva et al. (2024) (azul; que considera SPI 3-12, SSMI 1-12 y SSI-1, con valores de escala temporal que varían según el régimen hidrológico de la cuenca) proporcionan una progresión hacia una sequía hidrológica más intensa y ligeramente más corta. En la cuenca del río Palos, al analizar el evento de 2012-2016, todos los criterios de escalas temporales muestran que la columna de suelo amortigua la intensidad de la sequía meteorológica, que transita hacia una sequía hidrológica menos intensa, aunque con una duración similar o mayor. Lo mismo ocurre en el evento de 1988/99, aunque con la particular excepción del criterio derivado de este estudio, el cual señala que la intensidad de la sequía hidrológica aumenta y su duración disminuye, respecto a los otros dos tipos de sequías. En el caso de la cuenca del río Cautín, todas las trayectorias de propagación obtenidas el evento 1988/99 son muy diferentes, mientras que en el evento de 2012-2016 se observa nuevamente el efecto amortiguador de intensidad de sequía de la columna de suelo.

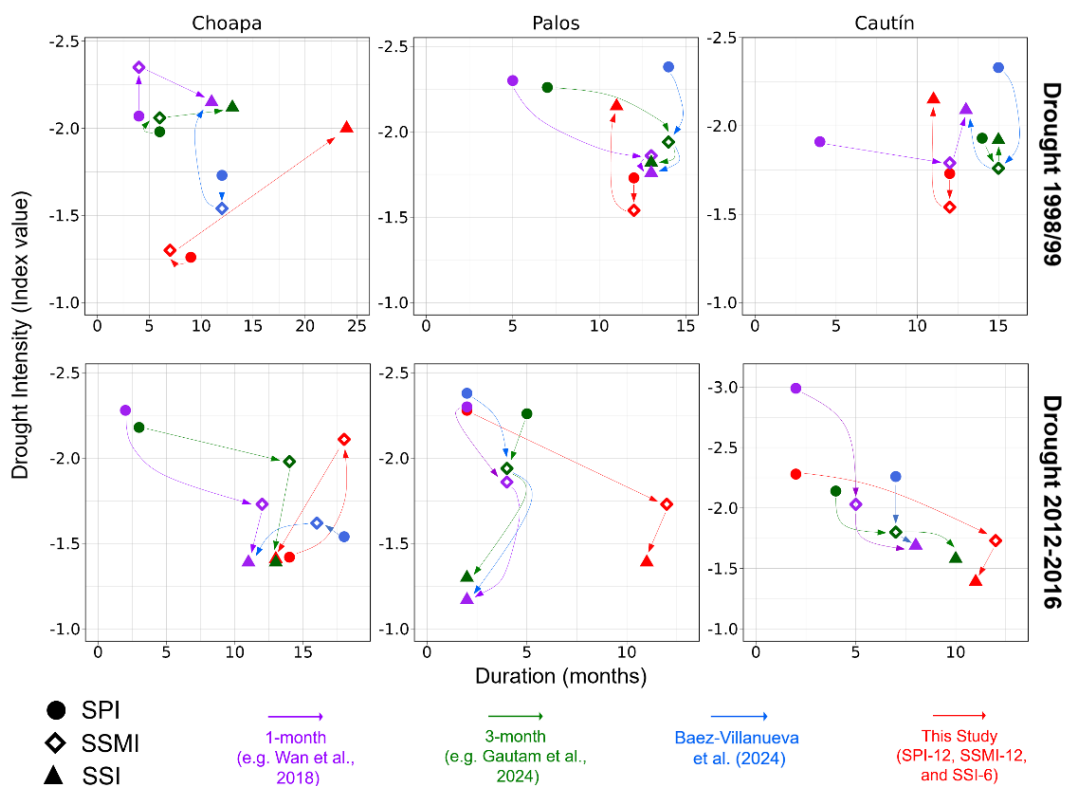


Figura 7: Propagación de eventos de sequía utilizando distintas escalas temporales.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo, se presentó un análisis crítico del Índice Estandarizado de Caudal (SSI), describiéndose las implicancias de la elección de la escala temporal en la detección y caracterización de eventos de sequía. En particular, los principales hallazgos que se obtuvieron en este trabajo fueron los siguientes:

1. Existen al menos dos aspectos claves que influyen en la detección de eventos de sequías por medio del SSI. Por un lado, resulta relevante la escala temporal escogida para su cálculo, mientras que también impacta la decisión de escoger algún tipo de restricción asociada a una duración mínima del evento. Ambos factores afectan a la caracterización de la frecuencia y duración promedio de los eventos, teniendo una mayor preponderancia sobre las cuencas pluviales.
2. En general, las mayores correlaciones se obtuvieron cuando el índice SSI-6 se contrastó con variables hidrológicas agregadas a una escala entre 9 y 12 meses, disminuyendo al evaluar en escalas temporales mayores. Sin embargo, se identificaron algunas excepciones, como el almacenamiento del acuífero en la cuenca del río Cochiguaz (cuenca árida y de régimen nival), en donde esta variable se correlaciona mejor con los índices SSI-1 y SSI-3 en comparación al SSI-6. Una posible explicación de este fenómeno puede radicar que en este tipo de cuencas existe una mayor contribución a la generación de escorrentía por parte de fuentes subterráneas (flujo base).
3. Entre las cuencas analizadas, aquellas de régimen nival son las que entregaron las mayores correlaciones entre los almacenamientos y el SSI, relación que va disminuyendo de forma progresiva en cuencas en que la componente pluvial se vuelve más relevante para la generación de escorrentía. Este patrón, que sigue un gradiente hidroclimático, es particularmente notorio al analizar el almacenamiento total y se hace más débil al evaluar períodos de sequía específicos.
4. El uso de distintos criterios en el cálculo de índices estandarizados puede generar resultados drásticamente diferentes sobre los principales atributos que caracterizan a los eventos de sequías, como lo son su duración e intensidad, y a la propagación de estos dentro de un sistema hidrológico, desde una sequía meteorológica hacia sequías de humedad del suelo e hidrológicas. Por ejemplo, la evolución de la intensidad muestra en algunos casos direcciones opuestas (intensificación o amortiguación) al analizar un evento de sequía en particular en una misma cuenca. Estas discrepancias ocurren incluso si se utiliza el mismo set de datos.

REFERENCIAS

Baez-Villanueva, O. M., Zambrano-Bigiarini, M., Miralles, D. G., Beck, H. E., Siegmund, J. F., Alvarez-Garreton, C., Verbist, K., Garreaud, R., Boisier, J. P., and Galleguillos, M.: On the timescale of drought indices for monitoring streamflow drought considering catchment hydrological regimes, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 28, 1415–1439, <https://doi.org/10.5194/hess-28-1415-2024>, 2024.

Barker, L. J., Hannaford, J., Chiverton, A., and Svensson, C.: From meteorological to hydrological drought using standardised indicators, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20, 2483–2505, <https://doi.org/10.5194/hess-20-2483-2016>, 2016.

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, Center for Climate and Resilience Research [data set], <https://www.cr2.cl/datos-productos-grillados> (last access: 1 April 2023), 2018.

Carrão, H., Russo, S., Sepulcre, G., and Barbosa, P.: Agricultural Drought Assessment In Latin America Based On A Standardized Soil Moisture Index, *ESA Living Planet Symposium*, December, 9–13 September 2013, Edinburgh, UK, 2013.

Clark, M. P., Nijssen, B., Lundquist, J. D., Kavetski, D., Rupp, D. E., Woods, R. A., Freer, J. E., Gutmann, E. D., Wood, A. W., Brekke, L. D., Arnold, J. R., Gochis, D. J., and Rasmussen, R. M.: A unified approach for process-based hydrologic modeling: 1. Modeling concept, *Water Resour. Res.*, 51, 2498–2514, <https://doi.org/10.1002/2015WR017198>, 2015a.

Garcia, F., Folton, N. and Oudin, L.: Which objective function to calibrate rainfall–runoff models for low-flow index simulations?, *Hydrol. Sci. J.*, 62(7), 1149–1166, [doi:10.1080/02626667.2017.1308511](https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1308511), 2017.

Garreaud, R. D., Boisier, J. P. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H. H., and Veloso-Aguila, D.: The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective, *Int. J. Climatol.*, 40, 1–19, <https://doi.org/10.1002/joc.6219>, 2019.

Gautam, S., Samantaray, A., Babbar-Sebens, M., and Ramadas, M.: Characterization and Propagation of Historical and Projected Droughts in the Umatilla River Basin, Oregon, USA, *Adv. Atmos. Sci.*, 41, 247–262, <https://doi.org/10.1007/s00376-023-2302-8>, 2024.

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.

McKee, T. B., Doesken, N. J., and Kleist, J.: The relationship of drought frequency and duration to time scales, in: *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, California*, 17–22 January 1993, vol. 17, 179–183,

<https://www.scirp.org/reference/ReferencesPapers?ReferenceID=2099290> (last access: 28 December 2023), 1993.

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.

Núñez, J., Rivera, D., Oyarzún, R., and Arumí, J. L.: On the use of Standardized Drought Indices under decadal climate variability: Critical assessment and drought policy implications, *J. Hydrol.*, 517, 458–470, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.038>, 2014.

Tallaksen, L. M. and Van Lanen, H. A. J.: *Hydrological Drought Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*. *Developments in Water Science*, 48, Elsevier Science B.V., 579 pp., <http://europeandroughtcentre.com/resources/hydrological-drought-1st-edition/> (last access: 20 December 2023), 2004.

Tijdeman, E., Stahl, K., and Tallaksen, L. M.: Drought Characteristics Derived Based on the Standardized Streamflow Index: A Large Sample Comparison for Parametric and Nonparametric Methods, *Water Resour. Res.*, 56, e2019WR026315, <https://doi.org/10.1029/2019WR026315>, 2020.

Tolson, B. A. and Shoemaker, C. A.: Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration, *Water Resour. Res.*, 43, 1–16, <https://doi.org/10.1029/2005WR004723>, 2007.

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., and López-Moreno, J. I.: A multiscale drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index, *J. Climate*, 23, 1696–1718, <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>, 2010.

Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, J. I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Azorin-Molina, C., and Morán-Tejeda, E.: Accurate Computation of a Streamflow Drought Index, *J. Hydrol. Eng.*, 17, 318–332, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0000433](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0000433), 2012.

Wan, W., Zhao, J., Li, H. Y., Mishra, A., Hejazi, M., Lu, H., Demissie, Y., and Wang, H.: A Holistic View of Water Management Impacts on Future Droughts: A Global Multimodel Analysis, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 123, 5947–5972, <https://doi.org/10.1029/2017JD027825>, 2018.