

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXIV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**EXTENSIÓN DE REGISTROS FLUVIOMÉTRICOS EN  
CHILE UTILIZANDO PRINCIPIOS DE SIMILITUD**

**MARIO QUEVEDO.<sup>1</sup>**  
**PABLO MENDOZA.<sup>2</sup>**  
**NICOLÁS VÁSQUEZ.<sup>3</sup>**  
**XIMENA VARGAS.<sup>4</sup>**

**RESUMEN**

La disponibilidad de series continuas de caudal a lo largo del territorio nacional es esencial para cualquier caracterización hidrológica y toma de decisiones respecto al uso del recurso hídrico. En este artículo, se analizan los registros fluviométricos del país a escala temporal anual en cuencas en régimen cercano al natural.

En primera instancia, se entrega un diagnóstico general sobre los registros fluviométricos de Chile. Posteriormente se propone una metodología para realizar la extensión del registro fluviométrico en base a criterios de proximidad espacial y similitud. Los resultados de validación cruzada indican que el método más confiable para la estimación de caudal medio anual debería incorporar cuencas cercanas e hidrológicamente similares. Sin embargo, sólo es posible chequear la consistencia de las nuevas series en algunas estaciones, debido a la limitada extensión temporal de las series originales.

---

<sup>1</sup>Estudiante, Ingeniería Civil mención Hidráulica, Sanitaria y Ambiental, Universidad de Chile-  
m.quevedo1997@gmail.com

<sup>2</sup>Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile- pamendoz@uchile.cl

<sup>3</sup>Ingeniero Civil, M.Sc., Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile- nvasquez.plac@gmail.com

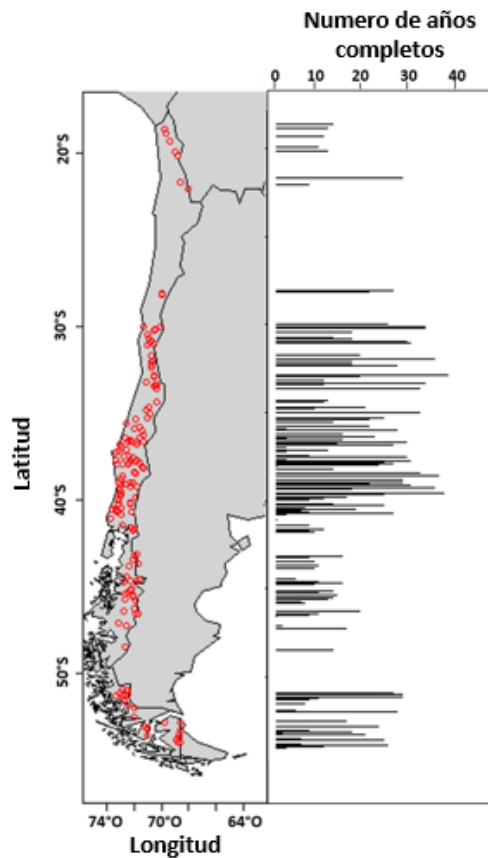
<sup>4</sup>Profesora Asociada, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile- xvargas@uchile.cl

## 1. INTRODUCCIÓN

La escorrentía es una variable clave para caracterizar el comportamiento hidrológico de las cuencas, por lo tanto, es de suma importancia contar con datos históricos de caudales medidos en las estaciones fluviométricas, tal que cualquier estudio hidrológico cuente con un registro confiable e idealmente continuo en el tiempo. En Chile esto no se cumple (Figura 1), lo que dificulta cualquier tipo de caracterización hidrológica a la escala de cuenca, tanto para condiciones climáticas históricas como futuras. Este último punto cobra mayor importancia en un contexto de cambio global, que requiere una comprensión de variables hidroclimáticas en el presente antes de efectuar extrapolaciones – típicamente mediante modelos hidrológicos – en escenarios climáticos futuros (e.g., Wilby and Harris, 2006; Chen et al., 2011; Chegwiddden et al., 2019).

Durante las últimas décadas, se ha masificado el uso de principios de similitud en metodologías de estimación de caudales en cuencas no controladas (e.g., Oudin et al., 2008, 2010; Hrachowitz et al., 2013; Parajka et al., 2013; Beck et al., 2016), ayudado en parte por la aparición de nuevas bases de datos integradas de cuencas (e.g., Newman et al., 2015; Addor et al., 2017; Alvarez-Garreton et al., 2018). En aplicaciones de ingeniería, la estimación de caudal medio anual para años sin información es típicamente efectuada mediante modelos de regresión lineal simple con estaciones vecinas que presenten un régimen de escorrentía similar. Sin embargo, se desconoce si la inclusión de cuencas físicamente (e.g., áreas, pendientes o tipo de suelo similar) o climáticamente (e.g., temperatura media anual, índice de aridez) similares entre el grupo de candidatas para extrapolar información podría mejorar las estimaciones en cuencas no controladas.

Por lo tanto, el objetivo general del presente estudio es generar series de información que permitan el correcto estudio de la escorrentía en las cuencas nacionales. Específicamente, se propone: (i) probar distintos criterios para la selección de cuencas utilizadas para la extensión de series de caudal medio anual, y (ii) analizar la consistencia de los caudales medios anuales observados en el país. Para ello, se utiliza la base de datos CAMELS-CL (Alvarez-Garreton et al., 2018). que contiene cuencas delimitadas a partir del punto de control ubicado exactamente en las estaciones fluviométricas. Del total de cuencas, se seleccionan aquéllas que se encuentran con un bajo nivel de intervención humana para considerarlas en el estudio, obteniéndose un sub-conjunto de 158 cuencas. Si bien se considera como periodo de referencia 1979-2016, sólo una cuenca cuenta con todos los años de registro, y 11 cuencas con al menos 30 años de registro. Además, se considera un año completo a aquel que posee los 12 meses con registro, y cada mes cuenta con al menos 25 días de registro.



**Figura 1.** Extensión del registro de caudales medios anuales 1979-2016 en 158 cuencas cercanas al régimen natural incluidas en este estudio.

## 2. METODOLOGÍA

La Figura 2 ilustra el flujo metodológico propuesto, el cual consiste en realizar el relleno de caudales medios a nivel anual, transfiriendo información hidrológica de una cuenca a otra mediante el ajuste de un modelo de regresión lineal simple. A continuación, se presenta una descripción detallada de cada paso.

### **Paso 1: selección de cuencas**

Se analiza la base de datos completa de CAMELS-CL y se seleccionan las cuencas que se encuentran con un bajo nivel de intervención humana, obteniéndose un sub-conjunto de 158 cuencas.

### **Paso 2: similitud**

En este estudio, se definen diferentes criterios de similitud en base a atributos físicos, climáticos e hidrológicos.

La similitud hidrológica es cuantificada según el centro de gravedad  $T$ [mes] de la curva de variación estacional de los caudales medios mensuales (Stewart et al., 2005; Cortés et al., 2011), que indica el régimen hidrológico de la cuenca.

$$T = \frac{\sum(Q_i t_i)}{\sum Q_i} \quad (1)$$

Donde:

$T$ : Ubicación temporal del centro de gravedad de la curva de variación estacional.

$Q_i$ : Caudal medio mensual del mes  $i$  [ $m^3/s$ ].

$t_i$ : Número del 1 al 12 correspondiente al mes  $i$  ( $i=1$  corresponde a abril).

Los atributos escogidos para determinar el grado de similitud física son área de la cuenca, elevación media y pendiente media, mientras que, en el caso de la similitud climática se incluye la fracción de nieve de una cuenca y al análisis estacional de la precipitación.

La comparación de cuencas  $i$  y  $j$  bajo distintos criterios de similitud es efectuada utilizando el índice de disimilitud  $S_{ij}$  propuesto por Beck et al. (2016):

$$S_{ij} = \frac{\sum |A_i - A_j|}{IQR(A)} \quad (2)$$

Donde:

$S_{ij}$ : disimilitud entre la cuenca  $i$  y la cuenca  $j$ .

$A_i$ : atributo de la cuenca  $i$ .

$A_j$ : atributo de la cuenca  $j$ .

$IQR(A)$ : rango inter-cuartil de la serie completa de atributos.

Valores cercanos a cero de  $S_{ij}$  indican que existe un alto grado de similitud entre las cuencas  $i$  y  $j$ , mientras que valores elevados indican una mayor disimilitud bajo el criterio de comparación utilizado.

### **Paso 3: criterios de selección de cuencas donantes**

Se definen 6 criterios basados en similitud hidrológica, física y climática. Por otra parte, también se considera como opción complementaria un cuarto requisito que corresponde a proximidad espacial, entendiendo esta como cuencas vecinas que se encuentren a lo más a 200 km de distancia.

- Criterio 1: sólo similitud hidrológica.
- Criterio 2: considera cuencas cercanas y similitud hidrológica.
- Criterio 3: considera similitud hidrológica y similitud física.
- Criterio 4: considera cuencas cercanas, similitud hidrológica y similitud física.
- Criterio 5: considera similitud hidrológica, similitud física y similitud climática.
- Criterio 6: considera cuencas cercanas, similitud hidrológica, similitud física y similitud climática.

#### Paso 4: relleno y chequeo de consistencia

Primero se deben filtrar las cuencas candidatas a transferir información hidrológica, para lo cual el coeficiente de determinación lineal ( $R^2$ ) entre las series de caudales medios anuales de las cuencas candidatas y la cuenca a rellenar debe ser mayor o igual a 0,5. De todas las cuencas que cuentan con esta condición se extraen las 4 que cuenten con el menor índice de disimilitud para efectuar parte del relleno mediante el ajuste de un modelo de regresión lineal simple, con el fin de estimar lo años faltantes en la cuenca de interés.

Una vez finalizada la estimación de los caudales medios anuales faltantes, se grafican las curvas doble acumuladas (CDA) en las estaciones que posean series de información continuas, considerando el periodo de referencia 1985-2015. Para que una estación forme parte del patrón de corrección de otra estación, debe tener el mismo régimen hidrológico, y encontrarse dentro de un rango de búsqueda de 200 km. Por último, las estaciones que forman parte del patrón deben tener a lo menos 15 años completos de registro y deben ser consistentes con el mismo patrón.

La corrección de CDA se realiza mediante la búsqueda de quiebres de pendiente estadísticamente significativos, teniendo como restricción poseer a lo menos 5 años con una tendencia que indique un cambio en la pendiente. Este proceso anteriormente descrito se repite una vez, para cada criterio, en cada una de las 158 cuencas en régimen natural. Es decir, se tienen seis formas diferentes de extender el registro fluviométrico en cada estación.

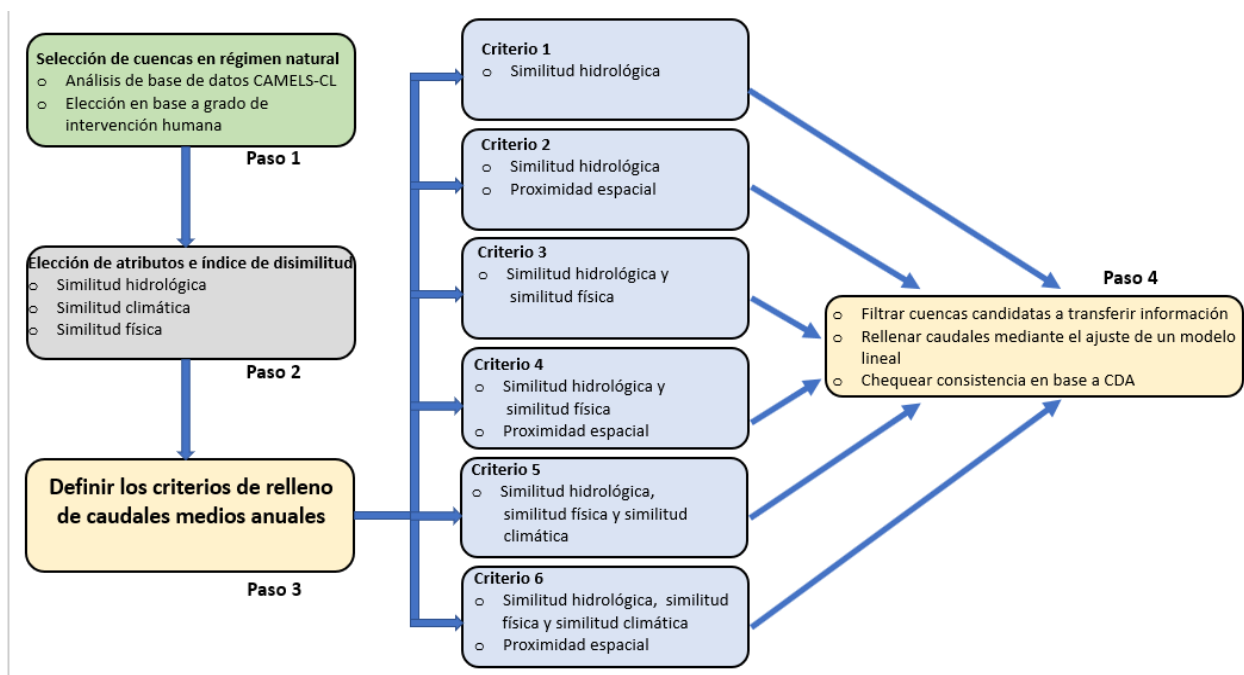
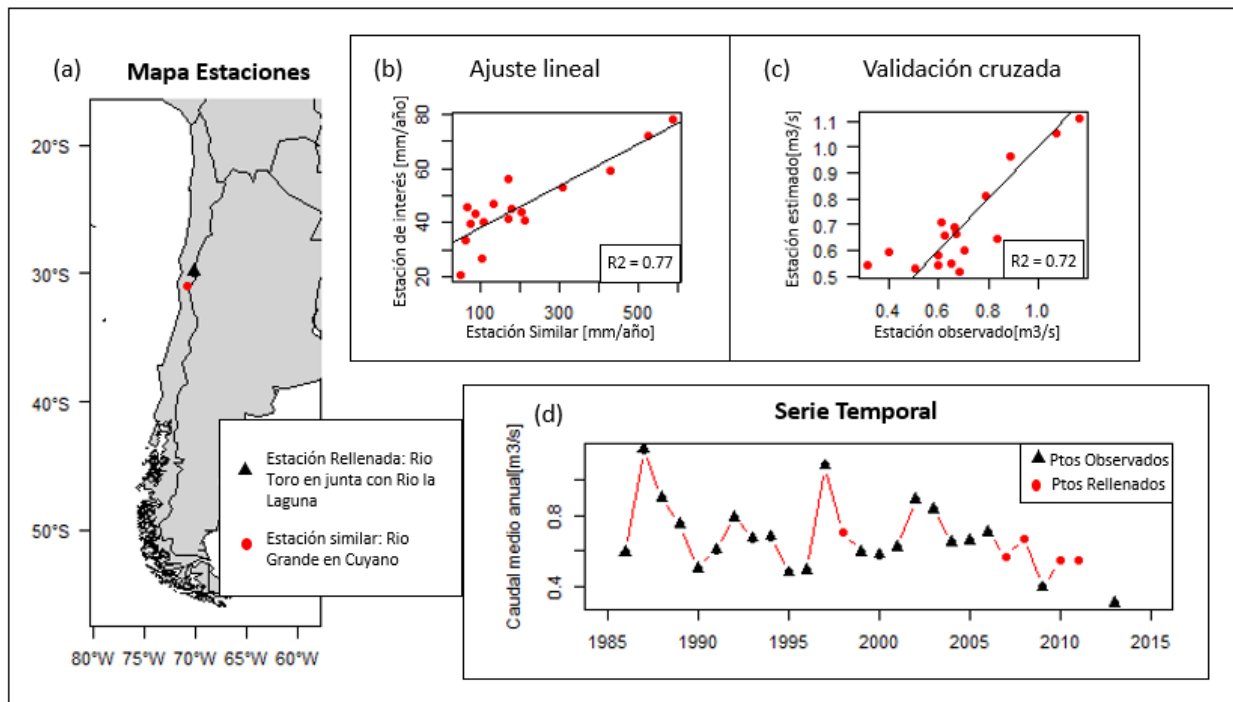


Figura 2. Estructura metodológica.

### 3. RESULTADOS

La Figura 3, ilustra la ejecución del relleno de caudales medios anuales en la estación río Toro en junta con río La Laguna (-29,97 S, -70,09 E) con el criterio 2 (similitud hidrológica y proximidad espacial). Los diferentes paneles siguen la secuencia de trabajo utilizada para extender los registros de caudales en cuencas chilenas. La Figura 3b muestra el ajuste del modelo de regresión lineal simple entre la cuenca de interés y la cuenca candidata a transferir información hidrológica. Para ello, a modo de facilitar algunos cálculos posteriores, se toman los caudales medios anuales registrados en las respectivas estaciones en unidades de  $m^3/s$  y se normalizan por el área de la cuenca en  $km^2$ , expresando estos valores en términos de escorrentía media anual ( $mm/año$ ). La Figura 3c ilustra la validación cruzada con la cuenca candidata para determinar la habilidad predictiva del modelo. Finalmente, la Figura 3d muestra la situación final de la estación de interés con la serie temporal de puntos observados y rellenos, donde se logra un relleno casi completo para el periodo analizado, quedando pendiente la estimación de tres años hidrológicos.

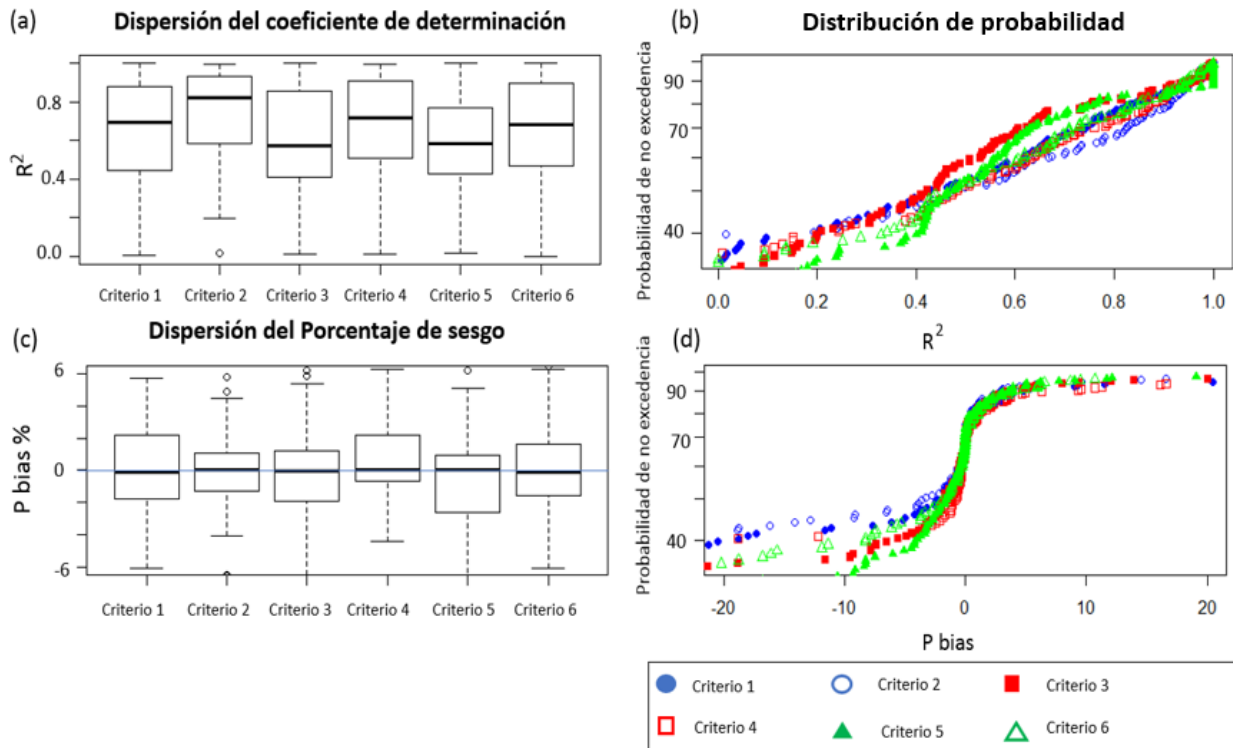


**Figura 3.** Estimación de caudales en la cuenca Río Toro en junta con Río la Laguna con el criterio 2: (a) ubicación geográfica de las cuencas de interés; (b) regresión lineal de serie de caudales medios anuales expresados en  $mm/año$ ; (c) validación cruzada del método; (d) serie temporal con los puntos observados y estimados según la estación que corresponda.

#### Comparación de criterios

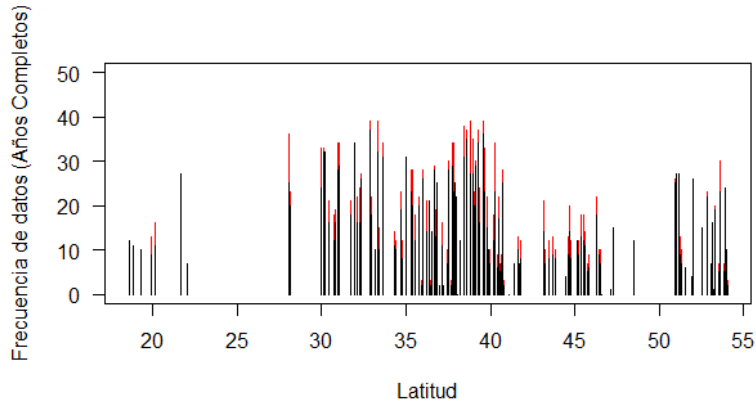
La Figura 4 sintetiza los resultados obtenidos del proceso de validación cruzada, para cada criterio. Al observar dicha figura, se puede apreciar que el criterio 2 (similitud hidrológica y proximidad espacial) tiene el mejor coeficiente de determinación lineal, además de poseer el menor porcentaje de sesgo. Por otra parte, se puede observar que los resultados menos precisos se obtienen con el criterio 3 (similitud hidrológica y similitud física), lo que indica que los atributos físicos no bastan

para establecer una relación de similitud hidrológica. Es importante destacar que, para obtener los resultados presentados en la Figura 4, no se impusieron restricciones a las diferentes validaciones cruzadas. Es decir, existieron casos en donde la validación cruzada contaba con 20 puntos y otros casos en los que sólo contaba con 12 puntos, y aun así fueron considerados en el análisis para no perder información.



**Figura 4.** Estadísticos de interés en la validación cruzada: (a) dispersión del coeficiente de determinación lineal; (b) distribución de probabilidad del coeficiente de determinación; (c) dispersión del porcentaje de sesgo; (d) distribución de probabilidad del porcentaje de sesgo.

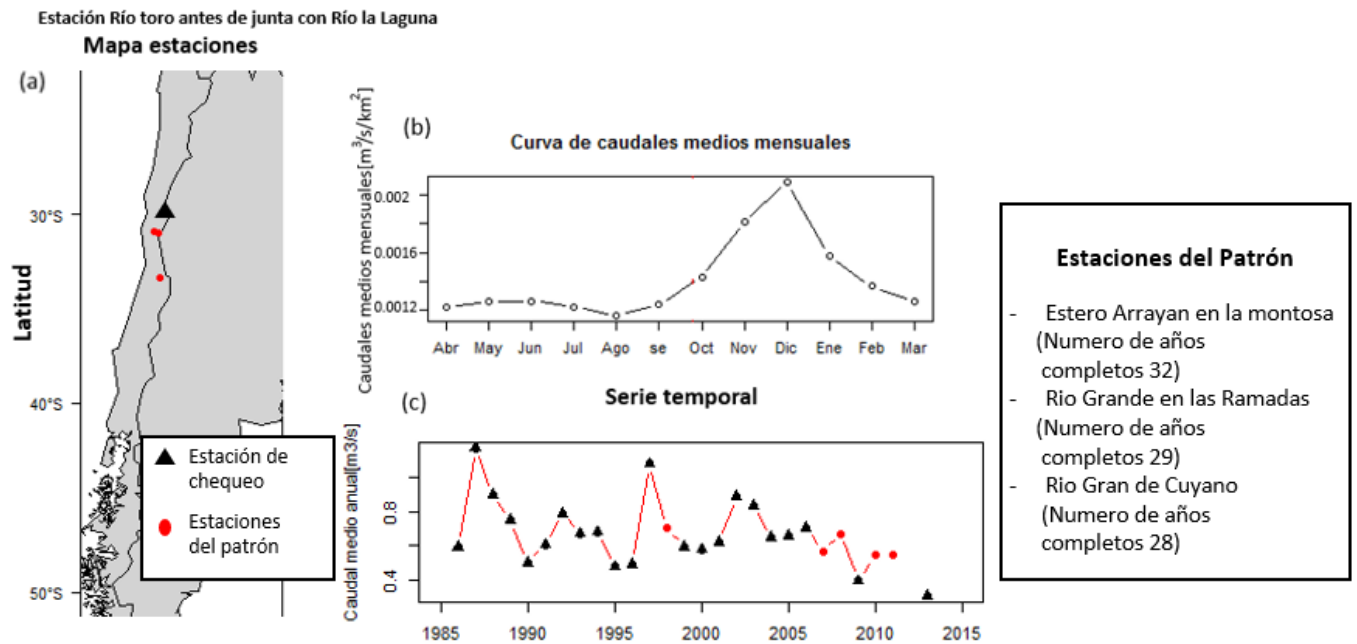
Considerando que el criterio 2 entrega los mejores resultados (Figura 4), en la Figura 5 se muestra la extensión del registro fluviométrico original y los resultados del proceso de extensión estadística de los mismos. Cabe mencionar que más del 90% de los datos estimados con el criterio 2 están entre los  $30^\circ$  y  $45^\circ$ , lo cual se debe a varios factores. En primer lugar, en la zona norte hay pocas estaciones fluviométricas por lo cual, el sub-conjunto de estaciones vecinas es acotado, agregándose a esto, las estaciones poseen pocos años completos de medición. En consecuencia, el paso 4 de la estructura metodológica (Figura 2) falla, dado que existen pocas estaciones candidatas, y a estas no se les puede ajustar un modelo de regresión lineal por la falta de datos. En segundo lugar, las estaciones de la zona sur cuentan con una mayor cantidad de estaciones vecinas, pero también poseen pocas mediciones completas en su registro.



**Figura 5.** Extensión del registro fluviométrico en función de ubicación latitudinal utilizando el criterio 2 (proximidad espacial y similitud hidrológica).

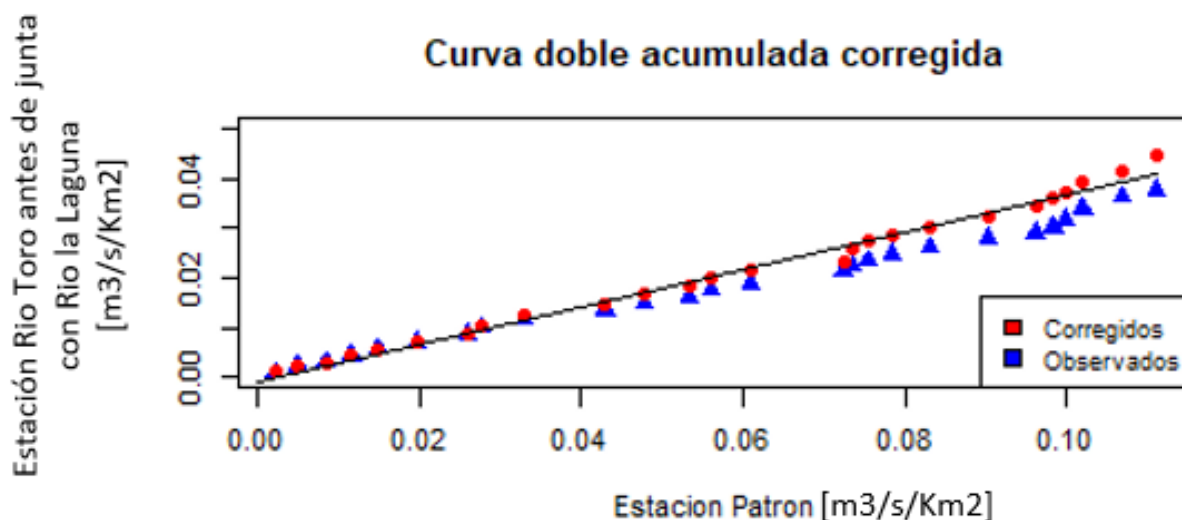
### Curvas doble acumuladas

A continuación, se expone un ejemplo del análisis de CDA en la estación Río Toro antes de junta con Río la Laguna, rellenada con el criterio 2. La Figura 6 ilustra las estaciones que conforman el patrón de corrección para la estación de chequeo de consistencia, además de la serie temporal que se requiere corregir. Finalmente, la Figura 7 muestra la curva doble acumulada, con sus respectivos puntos observados y rellenados, con el objetivo de analizar si existe alguna tendencia del registro fluviométrico. Por otra parte, se observa la CDA corregida mediante la detección de un quiebre de pendiente estadísticamente significativo.



**Figura 6.** Chequeo de consistencia en la estación Río Toro antes de junta con Río la Laguna con el criterio 2: (a) ubicación geográfica de las cuencas de interés; (b) estacionalidad de la estación de chequeo; (c) serie temporal de caudales medios anuales.





**Figura 7.** Curva doble acumulada en la estación Río Toro antes de junta con Río la Laguna

### CDA en los diferentes criterios

Los diferentes criterios de relleno pueden ser analizados cuantitativamente por el número total de años rellenados y por la cantidad de estaciones con CDA para desarrollar el chequeo de consistencia (Tabla 1). A partir de este análisis, se obtuvo aproximadamente un 10% de estaciones con series temporales continuas. En consecuencia, hay pocas estaciones con CDA que pueden formar parte del análisis de consistencia

**Tabla 1.** Comparación cuantitativa de criterios.

	<b>Criterio 1</b>	<b>Criterio 2</b>	<b>Criterio 3</b>	<b>Criterio 4</b>	<b>Criterio 5</b>	<b>Criterio 6</b>
<b>Número total de años rellenados</b>	575	462	651	587	639	602
<b>Número total de CDA</b>	13	10	13	10	10	15
<b>Número de estaciones consistentes</b>	2	2	1	1	2	2

### 3. CONCLUSIONES

En este estudio se exploran 6 criterios de selección de cuencas para extender los registros fluviométricos basados en distintas combinaciones de atributos hidrológicos, físicos y climáticos para cuantificar similitud. Todo indica que los resultados más confiables se obtienen al integrar la similitud hidrológica y la proximidad espacial en la transmisión de información. Aun así, existen condiciones exógenas que no permiten la extensión exitosa de los registros fluviométricos, incluyendo: (i) la falta de estaciones divididas homogéneamente a lo largo del país y (ii) que sólo

un 9% de las estaciones cuentan con 30 años de registro. Estas condiciones se dan mayormente en la zona norte y sur de Chile, por lo que la extensión del registro se logra en un 90% en las cuencas de la zona central. Dicho lo anterior a partir de este trabajo se extraen las siguientes conclusiones:

1. La inclusión de proximidad espacial permite rellenar una menor cantidad de datos, lo que se debe principalmente a que el rango de búsqueda se acota.
2. El proceso de validación cruzada indica que se obtienen resultados más confiables al incluir proximidad espacial como filtro, y que el criterio 2 (utilizar cuencas cercanas e hidrológicamente similares) entrega mejores resultados que el resto.
3. Existen pocas estaciones fluviométricas con una extensión de registro mayor a 15 años para desarrollar un chequeo de consistencia. Además, sólo puede ser desarrollado en la zona centro del país, independiente del criterio que se utilice para el relleno, y en ciertos casos no es resolutivo debido a que la corrección de pendiente se realiza en base a datos rellenos o a los años que componen la mega sequía.

En resumen, sólo se logra obtener como máximo un 10 % de las cuencas totales con curvas doble acumuladas con cualquiera de los criterios que se utilice para la extensión del registro fluviométrico. Como futuro trabajo, se contempla incluir escalas temporales menores en la extensión del registro, llegando a una serie continua de caudales medios diarios.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen los valiosos comentarios de Javier Cepeda, Eduardo Muñoz y Miguel Lagos durante la implementación de metodología y generación de resultados.

## REFERENCIAS

- Addor N, Newman AJ, Mizukami N, Clark MP. 2017. The CAMELS data set: Catchment attributes and meteorology for large-sample studies. *Hydrology and Earth System Sciences* DOI: 10.5194/hess-21-5293-2017
- Alvarez-Garreton C, Mendoza PA, Boisier JP, Addor N, Galleguillos M, Zambrano-Bigiarini M, Lara A, Puelma C, Cortes G, Garreaud R, 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 DOI: 10.5194/hess-22-5817-2018
- Beck HE, van Dijk AIJM, de Roo A, Miralles DG, McVicar TR, Schellekens J, Bruijnzeel LA. 2016. Global-scale regionalization of hydrologic model parameters. *Water Resources Research* **52** (5): 3599–3622 DOI: 10.1002/2015WR018247
- Chegwidden OS, Nijssen B, Rupp DE, Arnold JR, Clark MP, Hamman JJ, Kao S, Mao Y, Mizukami N, Mote P, 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**: 623–637 DOI: 10.1029/2018EF001047
- Chen J, Brissette FP, Poulin A, Leconte R. 2011. Overall uncertainty study of the hydrological impacts of climate change for a Canadian watershed. *Water Resources Research* **47**:

W12509 DOI: 10.1029/2011WR010602

- Cortés G, Vargas X, McPhee J. 2011. Climatic sensitivity of streamflow timing in the extratropical western Andes Cordillera. *Journal of Hydrology* 405 (1–2): 93–109 DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.05.013
- Hrachowitz M, Savenije HHG, Blöschl G, McDonnell JJ, Sivapalan M, Pomeroy JW, Arheimer B, Blume T, Clark MP, Ehret U, et al. 2013. A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB)—a review. *Hydrological Sciences Journal* 58 (6): 1198–1255 DOI: 10.1080/02626667.2013.803183
- Newman AJ, Clark MP, Sampson K, Wood A, Hay LE, Bock A, Viger RJ, Blodgett D, Brekke L, Arnold JR, et al. 2015. Development of a large-sample watershed-scale hydrometeorological data set for the contiguous USA: data set characteristics and assessment of regional variability in hydrologic model performance. *Hydrology and Earth System Sciences* 19 (1): 209–223 DOI: 10.5194/hess-19-209-2015
- Oudin L, Andréassian V, Perrin C, Michel C, Le Moine N. 2008. Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments. *Water Resources Research* 44 (3): 1–15 DOI: 10.1029/2007WR006240
- Oudin L, Kay A, Andréassian V, Perrin C. 2010. Are seemingly physically similar catchments truly hydrologically similar? *Water Resources Research* 46 (11): W11558 DOI: 10.1029/2009WR008887
- Parajka J, Viglione A, Rogger M, Salinas JL, Sivapalan M, Blöschl G. 2013. Comparative assessment of predictions in ungauged basins - Part 1: Runoff-hydrograph studies. *Hydrology and Earth System Sciences* 17 (5): 1783–1795 DOI: 10.5194/hess-17-1783-2013
- Stewart IT, Cayan DR, Dettinger MD. 2005. Changes toward earlier streamflow timing across western North America. *Journal of Climate* 18 (8): 1136–1155 DOI: 10.1175/JCLI3321.1
- Wilby RL, Harris I. 2006. A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Resources Research* 42 (2): W02419 DOI: 10.1029/2005WR004065