DOI: 10.24850/j-tyca-13-05-03

Artículos

Análisis comparativo de la tendencia de los caudales punta anuales y mensuales, para dos periodos en Chile centro-norte

Comparative analysis of annual and monthly peak flow tendencies, considering two periods in north-central Chile

Roberto Pizarro[1], ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6601-3811

Pablo García-Chevesich[2], ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9668-4560

Francisco Balocchi[3], ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9171-2382

Juan Pino[4], ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1506-7174

Alfredo Ibáñez[5], ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9774-5601

Claudia Sangüesa[6], ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3363-3424

Carlos Vallejos[7], ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2986-2590

Romina Mendoza[8], ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3206-8355

Ben Ingram[9], ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4557-4342

Jonathan O Sharp[10], ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2942-1066

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

[1]Universidad de Talca, Talca, Chile / Cátedra Unesco en Hidrología de Superficie, Universidad de Talca, Talca, Chile, rpizarro@utalca.cl

[2]Colorado School of Mines, Department of Civil and Environmental Engineering, Denver, Colorado, United States / Unesco, International Hydrological Programme, Paris, France, pchevesich@mines.edu

[3]Bioforest SA, Coronel, Chile / Water Resources and Energy for Agriculture PhD Program, Water Resources Department, Universidad de Concepción, Chillán, Chile, francisco.balocchi@arauco.com

[4]Dirección de Transferencia Tecnológica, Universidad Tecnológica Metropolitana, Santiago, Chile, juan.pino@utem.cl

[5]Cátedra Unesco en Hidrología de Superficie, Universidad de Talca, Talca, Chile, alfredoibacor@gmail.com

[6]Cátedra Unesco en Hidrología de Superficie, Universidad de Talca, Talca, Chile, claudiasanguesa@gmail.com

[7]Cátedra Unesco en Hidrología de Superficie, Universidad de Talca, Talca, Chile, cvallejoscarrera@gmail.com

[8]Cátedra Unesco en Hidrología de Superficie, Universidad de Talca, Talca, Chile, rmendoza@utalca.cl

[9]Cátedra Unesco en Hidrología de Superficie, Universidad de Talca, Talca, Chile, ingrambr@gmail.com

[10]Colorado School of Mines, Department of Civil and Environmental Engineering, Denver, Colorado, United States, jsharp@mines.edu

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(5), 73-100. DOI: 10.24850/j-tyca-13-05-03

Autor para correspondencia: Pablo García-Chevesich, pchevesich@mines.edu

Resumen

El recurso agua es limitado en la zona norte de Chile por tratarse de una zona árida, de ahí la importancia de estudiar si en ellas se están verificando cambios hidrológicos que pudiesen alertar sobre un incremento de tal situación. Para ello, se estudiaron las tendencias de los caudales punta (caudal máximo instantáneo) de la Región de Coquimbo, a través de la prueba estadística de Mann-Kendall (5 % error) en el periodo 1984-2014 (periodo reciente) y en un segundo periodo extendido (1976-2014). Los resultados indican que para los caudales punta anuales en ambos periodos todas las series presentan tendencia a disminuir, pero un 80 % lo hace significativamente en el periodo 1984-2014, y un 29 % en el periodo extendido. En tanto, para los caudales punta mensuales, en el periodo 1984-2014, un 99.2 % de las series manifiesta una tendencia a disminuir, donde 45.8 % lo hace de forma significativa. Sin embargo, en el periodo extendido, un 73.8 % de series presenta tendencia a disminuir, pero sólo 11.9 % lo hace de manera significativa. Este fenómeno de la baja en las tendencias negativas y significativas al incorporar años anteriores a 1984 demostraría que dichas situaciones se han producido anteriormente. Por último, esta variación en el nivel de significancia al considerar diferentes longitudes temporales estaría

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

evidenciando un proceso cíclico que influencia el comportamiento de los caudales punta.

Palabras clave: tendencias de los caudales punta, Mann-Kendall, variabilidad climática.

Abstract

It is essential to understand long-term trends associated with water resources in arid climates such as Chili's to prepare and predict potential adverse implications of climate change in these already water-stressed regions. Trends in annual peak flows (instantaneous maximum flows) of the Coquimbo Region were studied through the Mann-Kendall statistical test (5 % error), considering the 1984-2014 period and, in a second analysis, extending the series to at least 29 % more (1976-2014). Results indicate that for the annual peak flows, in both periods, all analyzed series showed a tendency to decrease (80 % of them significantly in the 1984-2014 period and 29 % in the 1976-2014 period). In contrast, analysis of monthly peak flows revealed a more nuanced shift where 99 % of the series tended to decrease in the 1984-2014 period, with 46 % being significant. However, in the 1976-2014 period, 74 % of series tended to decrease, but only 12 % were significant. This decline in negative and significant trends after incorporating years before 1984 suggests that these situations have occurred previously. Finally, this variation in the significance level when considering different time lengths would evidence a cyclic process that influences the behavior of peak flows.

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Keywords: Peak flows trends, Mann-Kendall, climate variability.

Recibido: 05/02/2020

Aceptado: 04/07/2021

Introducción

Chile se encuentra en una región de gran variabilidad climática, lo que aumenta la preocupación por los impactos del cambio climático en la disponibilidad, fiabilidad y uso de los recursos hídricos (Ivanova & Corredor, 2006). Las variables hidrológicas, como las precipitaciones y los caudales, proporcionan un conjunto de datos directos a largo plazo que pueden utilizarse para comprender los impactos locales de las influencias climáticas temporales y espaciales más amplias (Whitaker, Younes, Beckers, & Toews, 2002; Waylen & Woo, 2008).

Rosenblüth, Fuenzalida y Aceituno (1997); Carrasco, Casassa y Quintana (2005), y Carrasco, Osorio y Casassa (2008) analizaron el comportamiento de la isoterma de 0 ºC en Chile, encontrando que ha subido de nivel debido a un aumento significativo de la temperatura.

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Como resultado, las elevaciones históricamente dominadas por el manto de nieve pueden haberse desplazado hacia arriba, dando lugar a un aumento de la escorrentía superficial, a eventos de inundación aguas abajo y a un menor almacenamiento asociado con el manto de nieve en los Andes. Si esto es cierto en la región árida de Chile, entonces esperaríamos ver una tendencia negativa en la producción de caudales máximos como resultado de una menor contribución del deshielo. En consecuencia, surge la pregunta de si los caudales máximos han presentado alguna tendencia en las últimas décadas, a escala anual y/o mensual.

Un área de interés hidrológico a estudiar en Chile es su porción árida, una zona sensible en términos de variabilidad o cambio climático, debido a que se encuentra en una situación límite en cuanto a disponibilidad de agua. Este es el caso de la región de Coquimbo en Chile, que presenta una precipitación media anual entre 20 y 300 mm Favier, Falvey, Rabatel, Praderio, & López, 2009), con tormentas en los meses de invierno y una prolongada estación seca de más de ocho meses (Pizarro-Araya, Cepeda-Pizarro, Barriga, & Bodini, 2009; BCN, n.d.). Al igual que la mayor parte del territorio de Chile, esta región presenta una zona orográfica muy importante, que corresponde a la cordillera de los Andes, con picos que superan los 6 000 msnm. En esta zona, los valles transversales conectan el área con el océano Pacífico, combinados con un descenso de la red hidrográfica de más de 5 000 m en menos de 100 km de recorrido horizontal. El deshielo estival en la cordillera de los Andes es el principal suministro de agua para la región. Esta zona es especialmente

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

importante para el desarrollo minero, agrícola y turístico (FAO, 2014). En los últimos años, la región ha sufrido una grave megasequía, que ha limitado su suministro de agua y ha llevado sus embalses a niveles históricamente bajos (CR2, 2015).

Pellicciotti, Burlando y Van Vliet (2007) estudiaron el comportamiento de los caudales máximos en cinco subcuencas pertenecientes a la cuenca del río Aconcagua (zona semiárida de Chile), y encontraron una disminución significativa de la producción de agua entre los años estudiados (1972-2002), a pesar de que las precipitaciones no mostraron una disminución significativa para el mismo periodo. Rubio-Álvarez y McPhee (2010), por su parte, describieron el comportamiento temporal de los caudales en el centro-sur de Chile (clima semiárido y húmedo), documentando tendencias negativas. Por su parte, Boisier *et al*. (2018) analizaron el comportamiento de los caudales y la precipitación entre las latitudes 30° S y 48° S. Se observaron tendencias lineales negativas para ambas variables en el periodo 1960-2016. Si bien estos estudios avalan la escasez de agua en el país, los análisis no consideran las variaciones en los distintos periodos de duración que pueden sesgar la interpretación y los resultados.

Según Valdés-Pineda *et al*. (2014), la disponibilidad media de agua en Chile es de 53 953 m^3/hab-año, y la disponibilidad mundial es de sólo 6 600 m^3/hab-año. La región de Coquimbo, sin embargo, tiene una disponibilidad de agua de 1 020 m^3/hab-año. Es decir, se trata de una zona árida donde la disponibilidad de agua es la sexta parte de la media mundial. Como ya se ha indicado, las reservas de nieve en los altos Andes

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

son la fuente dominante de agua (Favier *et al*., 2009) y, por lo tanto, los caudales máximos están en función de la acumulación de nieve durante los meses de invierno y su posterior derretimiento. Así, los caudales máximos en las zonas áridas de Chile proporcionan un mecanismo para consultar cómo la variabilidad y el cambio climático pueden influir en los recursos hídricos.

El objetivo de este estudio era analizar las tendencias de los caudales máximos en la región, centrándose en los patrones anuales y mensuales de las cuencas fluviales naturales. La comparación de las tendencias a lo largo de diferentes periodos permite comprender mejor los patrones y la variabilidad a largo plazo.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio abarcó la región de Coquimbo de Chile (entre 29° 20’ S y 32° 15' S), ubicada en la porción centro-norte del país (Figura 1). El territorio

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

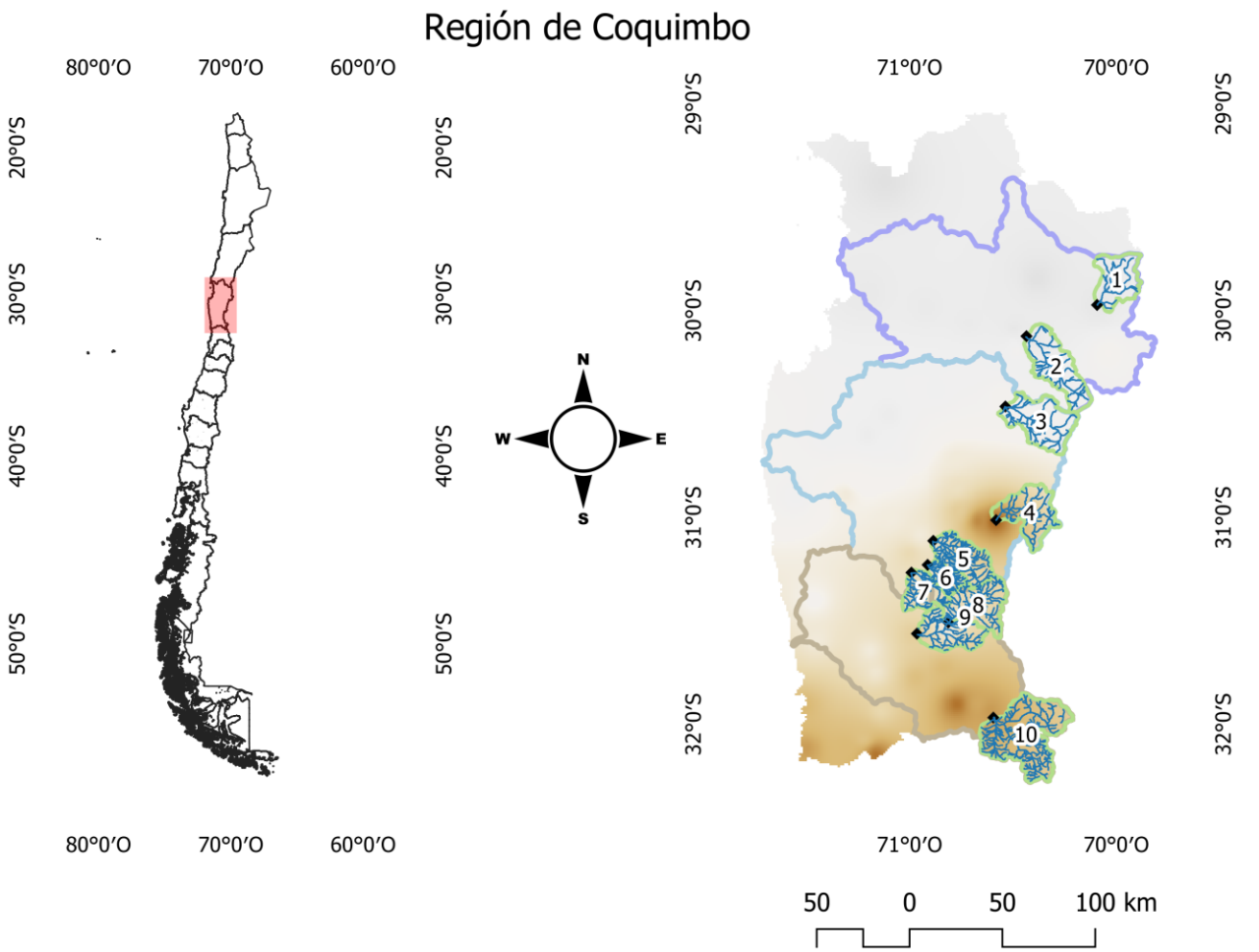
está dividido en tres provincias administrativas definidas por las cuencas hidrográficas que conforman los tres ríos principales de la región. Las cabeceras de los ríos se originan en los Andes y desembocan en el océano Pacífico. Estas cuencas son el río Elqui (9 826 km^2), el río Limarí (11 927 km^2) y el río Choapa (8 239 km^2). De estas cuencas se seleccionaron 10 subcuencas con registros fluviométricos en régimen natural (Tabla 1).

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y Ciencias del Agua

OPEN ACCESS

Check for updates



ID	Sub-cuenca	ID	Sub-cuenca
1	Río Toro antes junta río La Laguna	6	Río Combarbalá en Ramadillas
2	Río Cochiguaz en El Peñón	7	Río Pama en Valle Hermoso
3	Río Hurtado en San Agustín	8	Río Illapel en Las Burras
4	Río Grande en Las Ramadas	9	Río Illapel en Huintil
5	Río Cogotí en Fraguita	10	Río Choapa en Cuncumén

Figura 1. Ubicación de las estaciones y precipitación de la zona.

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tabla 1. Parámetros morfométricos y periodo analizado para cada cuenca estudiada.

ID	Área (km^2)	Perímetro (km)	Cuenca	*Kc*	*Re*	Periodo
1	479	111	Río Toro antes junta el río La Laguna	1.42	4.19	1984-2014
2	659	139	Río Cochiguaz en El Peñón	1.52	5.13	1984-2014
3	666	131	Río Hurtado en San Agustín	1.42	4.20	1963-2014
4	565	130	Río Grande en Las Ramadas	1.53	5.29	1969-2014
5	485	103	Río Cogotí en Fraguita	1.31	3.15	1972-2014
6	185	65	Río Combarbalá en Ramadillas	1.34	3.42	1976-2014
7	305	80	Río Pama en Valle Hermoso	1.28	2.90	1984-2014
8	569	127	Río Illapel en Las Burras	1.49	4.88	1962-2014
9	1 035	160	Río Illapel en Huintil	1.39	3.93	1968-2014
10	1 115	192	Río Choapa en Cuncumén	1.61	6.10	1965-2014

Kc: índice de Gravelius; *Re*: rectángulo equivalente.

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y Ciencias del Agua

OPEN ACCESS

Check for updates

Información fluviométrica

La información necesaria fue proporcionada por la Dirección General de Aguas (DGA), institución gubernamental perteneciente al Ministerio de Obras Públicas (MOP) de Chile. Se utilizó la información de las estaciones fluviométricas que presentaban al menos 25 años de datos, entre los años 1984 y 2014, en cuencas de régimen natural, es decir, cuencas que no contaban con obras hidráulicas (p. ej., represas) que provocaran cambios en la producción natural de agua, hecho que determinó una disminución en las posibilidades de obtener información válida para el estudio.

Se utilizó la información de caudales máximos mensuales (o caudales máximos instantáneos, que es el mayor caudal registrado en un mes determinado), y los caudales máximos anuales. Asimismo, se decidió no completar los datos faltantes, para evitar sesgos en los análisis (Pizarro *et al*., 2009).

Análisis de tendencias de Mann-Kendall

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Se utilizó el análisis de tendencia no paramétrico de Mann-Kendall, con un nivel de significación del 5 % ($Z \pm 1.96$) (Liu *et al*., 2012; Sharif, Archer, Fowler, & Forsythe, 2013). Esta es una de las pruebas más comunes para detectar tendencias y es ampliamente utilizada en las ciencias hidrológicas (Méndez, Návar, De Jesús, & González, 2008). La principal razón para aplicar este test, en relación con otras técnicas paramétricas, radica en ser el indicado para distribuciones que no presentan normalidad estadística (Mann, 1945; Kendall, 1975; Hamed, 2008; Song *et al*., 2015).

A continuación se analizaron los datos fluviométricos de caudal máximo de 10 cuencas hidrográficas de la región a nivel anual y mensual. Posteriormente, se realizó un análisis de tendencia, ampliando la serie en al menos nueve años (29 % de la serie), reduciendo el análisis a siete cuencas. Este periodo ampliado comienza entre 1962 y 1976, según la información disponible de cada cuenca (Tabla 1).

La prueba de Mann-Kendall valida una posible hipótesis nula de ausencia de tendencia (H0) cuando el estadístico Z supera el umbral definido (± 1.96). Por el contrario, si el estadístico Z no supera el umbral, se rechaza la hipótesis nula H0 y se valida la presencia de una tendencia significativa.

El análisis se realizó para cada una de las series de caudales máximos anuales y mensuales de cada estación. Además, el método considera el cálculo del estadístico S y su varianza (Ecuación (1)), que se

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

obtienen a partir de la Ecuación (2), donde q es el número de grupos relacionados y t_p el número de datos en el grupo p^{th}:

$$VAR(S) = \frac{1}{18}\left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^{q} t_p(t_p-1)(2t_p+5)\right] \quad (1)$$

$$S = \sum_{k=1}^{n-1}\sum_{j=k+1}^{n} sign(x_j - x_k) \quad (2)$$

Donde la función sign(x_j-x_k) asumirá un valor de 1 si x_j-x_k > 0; un valor de 0 si x_j-x_k = 0, y un valor de -1 si x_j-x_k < 0. Además, x_j y x_k son valores consecutivos de la variable estudiada. Finalmente, los valores de la Ecuación (1) y la Ecuación (2) se utilizan para calcular la prueba estadística Z, como se muestra a continuación (Ecuación (3)):

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{VAR(S)}} \; ; \; si \; S > 0 \\ 0 \; ; \; \text{si } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{VAR(S)}} \; ; \; si \; S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Asimismo, se calculó la magnitud del tipo de cambio a través de la pendiente Sen. Esta técnica tiene la particularidad de no ser paramétrica y, por lo tanto, es una prueba fiable para analizar los datos de caudal (Ali, Kuriqi, Abubaker, & Kisi, 2019). Este estimador se calcula de la siguiente manera:

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

$$Pendiente\ de\ Sen\ = mediana\left(\frac{x_j - x_k}{j-k}\right) \quad (4)$$

Donde x_j y x_k son los valores de la variable en el año j y k, respectivamente.

La presencia de una tendencia estadísticamente significativa se evalúa mediante el valor Z (Ecuación (3)). Un valor positivo o negativo de Z indica una tendencia positiva o negativa de los datos, respectivamente. El estadístico Z tiene una distribución normal con un nivel de significación α. Se rechaza $H0$ si el valor absoluto de Z es mayor que $Z1-(\alpha/2)$, donde $Z1-(\alpha/2)$ se obtiene de las tablas establecidas de la distribución normal acumulada.

Resultados y discusión

Caudales máximos anuales

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Los resultados del análisis de las tendencias de los caudales máximos anuales en la región de Coquimbo (Tabla 2) indican que de un total de 10 estaciones, todas muestran una tendencia a la disminución (valor *Z* negativo), y de éstas, ocho (80 %) tienen una tendencia significativa (*Z* ± 1.96). Adicionalmente, y dado que 7 de las 10 estaciones contaban con series de datos más largas (al menos 39 años), se realizó la misma prueba estadística de Mann-Kendall para el periodo extendido, con el fin de comparar los resultados con la serie más reciente (1984-2014), visualizando si existen diferencias significativas en el comportamiento de los caudales máximos. Al analizar la serie extendida, sólo las cuencas correspondientes a los ríos Combarbalá y Cogotí mantienen una tendencia negativa y significativa en los caudales máximos anuales, reduciendo el número de cuencas con tendencia significativa del 80 al 29 %. Asimismo, la pendiente Sen muestra un comportamiento similar al del test de Mann-Kendall, es decir, los valores obtenidos en el periodo de 1984 a 2014 muestran un descenso mayor que el del análisis de la serie completa.

Tabla 2. Valores estadísticos obtenidos mediante la prueba de Mann-Kendall (valor *Z* y valor *p*), la pendiente de Sen y la longitud de la serie de datos (*n*) analizada (en años), para los dos periodos estudiados.

ID	Estación		Periodo				Periodo extendido		
		Z	**Pendiente de Sen**	**Valor-*p***	***n***	***Z***	**Pendiente de Sen**	**Valor-*p***	***n***

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

1	Río Toro antes junta Río La Laguna	-1.78	-0.04	0.07	29	---	---	---	---
2	Río Cochiguaz en El Peñón	-2.23	-0.18	0.03	29	---	---	---	---
3	Río Hurtado en San Agustín	-2.69	-0.23	0.01	31	-1.21	-0.06	0.23	52
4	Río Grande en Las Ramadas	-2.65	-0.49	0.01	31	-0.97	-0.12	0.33	46
5	Río Cogotí en Fraguita	-2.58	-0.40	0.01	31	-2.24	-0.25	0.03	43
6	Río Combarbalá en Ramadillas	-2.52	-0.17	0.01	31	-2.64	-0.13	0.01	39
7	Río Pama en Valle Hermoso	-1.96	-0.13	0.05	28	---	---	---	---
8	Río Illapel en Las Burras	-3.09	-0.60	0.00	31	-1.40	-0.06	0.16	53
9	Río Illapel en Huintil	-2.04	-0.44	0.04	31	-0.68	-0.07	0.5	41
10	Río Choapa en Cuncumén	-2.41	-1.70	0.02	31	-1.22	-0.48	0.22	50

Iroumé y Palacios (2013) aplicaron el test de Mann-Kendall a los caudales anuales de tres cuencas del centro-sur de Chile (Región del Bío-Bío), evaluando dos periodos de tiempo: uno de calibración (1962-1992) y el periodo de estudio (1962-2005); se encontró que los valores *Z* del

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

periodo de calibración suelen ser mayores que los valores del periodo completo, cuando el valor *Z* es positivo. Asimismo, determinaron que los valores *Z* del periodo de calibración son menores que los de la serie completa de datos, cuando el valor *Z* es negativo. Tal situación es corroborada por esta investigación en el marco de los caudales máximos anuales.

Martínez, Fernández y Rubio (2012) analizaron las tendencias de los caudales medios mensuales de ocho subcuencas que alimentan el río Aconcagua (región de Valparaíso, Chile central) para el periodo 1960-2000; encontraron paridad entre tendencias positivas y negativas. Además, en esta investigación se encontró que los caudales máximos y mínimos de la cuenca del Aconcagua varían en función del fenómeno ENSO: aumentan en la fase cálida y disminuyen en la fase fría. Aunque en este estudio no se correlacionaron los caudales con las fases del fenómeno ENSO, Masiokas *et al*. (2019) encontraron que los caudales en esta zona se explican hasta en un 45 % por el ENSO. Con base en lo anterior, se espera que respondan de manera similar a los del Aconcagua.

Caudales máximos mensuales

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

En relación con las series de caudales máximos mensuales para el periodo 1984-2014, en general existe una tendencia negativa en los caudales máximos (Tabla 3), pues de las 120 series (combinación de 10 estaciones para 12 meses) analizadas, 119 (99.2 %) tienen tendencias negativas y de ellas, aproximadamente la mitad denotan significación estadística (45.8 %, equivalente a 55 series). Por otra parte, sólo una serie es positiva, pero no de forma significativa.

Tabla 3. Número de estaciones con tendencias positivas y negativas de los caudales máximos (análisis mensual) para el periodo regular (columna a) y el periodo ampliado (columna b) tras la aplicación de la prueba de Mann-Kendall.

Mes	Total positivas		Total negativas		Total positivas y significativas		Total negativas y significativas	
	a	b	a	b	a	b	a	b
Enero	0 (0 %)	2 (2.4 %)	10 (8.3 %)	4 (4.8 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	4 (3.3 %)	1 (1.2 %)
Febrero	0 (0 %)	1 (1.2 %)	10 (8.3 %)	6 (7.1 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	6 (5.0 %)	1 (1.2 %)
Marzo	0 (0 %)	3 (3.6 %)	10 (8.3 %)	4 (4.8 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	7 (5.8 %)	1 (1.2 %)
Abril	0 (0 %)	3 (3.6 %)	10 (8.3 %)	4 (4.8 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	6 (5.0 %)	1 (1.2 %)
Mayo	0 (0 %)	2 (2.4 %)	10 (8.3 %)	5 (6.0 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	5 (4.2 %)	1 (1.2 %)
Junio	0 (0 %)	3 (3.6 %)	10 (8.3 %)	4 (4.8 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	1 (0.8 %)	0 (0 %)
Julio	0 (0 %)	1 (1.2 %)	10 (8.3 %)	6 (7.1 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	6 (5.0 %)	1 (1.2 %)
Agosto	0 (0 %)	2 (2.4 %)	10 (8.3 %)	5 (6.0 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	5 (4.2 %)	1 (1.2 %)
Septiembre	0 (0 %)	1 (1.2 %)	10 (8.3 %)	6 (7.1 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	4 (3.3 %)	0 (0 %)
Octubre	1 (0.8 %)	1 (1.2 %)	9 (7.5 %)	6 (7.1 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	3 (2.8 %)	1 (1.2 %)

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Noviembre	0 (0 %)	1 (1.2 %)	10 (8.3 %)	6 (7.1 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	3 (2.8 %)	0 (0 %)
Diciembre	0 (0 %)	1 (1.2 %)	10 (8.3 %)	6 (7.1 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	5 (4.2 %)	2 (2.4 %)
Total	**1 (0.8 %)**	**21 (25 %)**	**119 (99.2 %)**	**62 (73.8 %)**	**0 (0 %)**	**0 (0 %)**	**55 (45.8 %)**	**10 (11.9 %)**

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede apreciar que los meses de febrero, marzo, abril y julio son los que presentan un mayor número de series negativas y significativas, llegando a 7 series significativas en el mes de marzo, seguido de los meses de febrero, abril y julio con 6 series significativas (Tabla 3).

En cuanto a las series de caudales máximos mensuales en el periodo ampliado (Tabla 3), se observan en general tendencias negativas (aunque en menor número que en el periodo 1984-2014), ya que de las 84 series (combinación de siete estaciones y 12 meses) analizadas con Mann-Kendall, 62 (73.8 %) presentaron tendencias negativas. Es importante destacar que las tendencias negativas y significativas disminuyeron del 45.8 % en el periodo 1984-2014, al 11.9 % en el periodo ampliado. Esta variación en el nivel de significación al considerar distintas duraciones estaría evidenciando un proceso cíclico que alteraría los comportamientos del flujo máximo. Este patrón cíclico podría ser explicado por la Oscilación Decadal del Pacífico (Núñez, Rovera, Oyarzún, & Arumí, 2013; Valdés-Pineda, Cañón, & Valdés, 2017), que estaría influyendo manifiestamente en el comportamiento hidrológico de los ríos de esta porción del país.

Estos resultados difieren de los obtenidos por Pizarro, Cabrera, Morales y Flores (2011), quienes compararon los montos de caudales

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

medios mensuales asociados con un periodo de retorno de 50 años en dos cuencas de la región Metropolitana (Chile central), para los periodos 1963-1976, 1963-1986, 1963-1996 y 1963-2006, encontrando una relación positiva entre la longitud temporal y el monto asociado con un periodo de retorno de 50 años. Esta discordancia en los resultados puede explicarse sobre la base de que el número de ajustes (4) realizados en la comparación hecha por Pizarro *et al*. (2011) no permite verificar la dispersión de los datos.

Los resultados alcanzados en este estudio, y los observados en otros similares, definen la presencia de resultados diferentes en función de las longitudes de las series de datos con las que se cuenta y se trabaja. Este hecho es bastante importante a la hora de utilizar esta información con fines de elaboración y aplicación de políticas públicas, o al tratar de inferir el comportamiento de determinadas cuencas hidrográficas en términos climáticos, pues las diferencias obtenidas pueden ser sustanciales y siempre es necesario contar con la mayor cantidad de información disponible.

Conclusión

© 2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Las tendencias encontradas son mayoritariamente negativas tanto a nivel anual como mensual, aunque la mayoría de ellas no son significativas.

La mayoría de las cuencas (80 %) mostraron una tendencia negativa significativa a nivel anual para el periodo 1984-2014. Sin embargo, al incorporar el periodo ampliado, se reducen al 29 %.

A nivel mensual, y considerando el periodo 1984-2014, se observa que el 99.2% de las series muestran una tendencia negativa y, de ellas, el 45.8% son significativas. Sin embargo, al incorporar el periodo ampliado, se produce una situación similar a la de la serie anual, ya que las tendencias negativas significativas disminuyen, pasando del 45.8 % al 11.9 %. Cuando se incorpora la información anterior a 1984 en el análisis de la tendencia, se observa una reducción de las tendencias negativas significativas, lo que denota que estos eventos han ocurrido con anterioridad.

Finalmente, se concluye que la oscilación de los valores de *Z* de las cuencas estudiadas al segmentar las series temporales hace relevante seguir realizando este tipo de investigaciones.

Referencias

Ali, R., Kuriqi, A., Abubaker, S., & Kisi, O. (2019). Long-term trends and seasonality detection of the observed flow in Yangtze River using Mann-Kendall and Sen's innovative trend method. *Water*, 11, 1855. DOI: 10.3390/w11091855

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

BCN, Biblioteca del Congreso Nacional. (n.d.). *Clima y vegetación. Región de Coquimbo*. Recuperado de http://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region4/clima.htm

Boisier, J., Alvarez-Garretón, C., Cordero, R., Damiani, A., Gallardo, L., Garreaud, R.,…, & Rondanelli, R. (2018). Anthropogenic drying in central-southern Chile evidenced by long-term observations and climate model simulations. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 6(1). DOI: 10.1525/elementa.328

Carrasco, J., Casassa, G., & Quintana, J. (2005). Changes of the 0 °C isotherm and the equilibrium line altitude in central Chile during the last quarter of the 20th century. *Hydrological Sciences Journal*, 50(6), 933-948. DOI:10.1623/ hysj.2005.50.6.933

Carrasco, J., Osorio, R., & Casassa, G. (2008). Secular trend of the equilibrium-line altitude on the western side of the southern Andes, derived from radiosonde and surface observations. *Journal of Glaciology*, 54(186), 538-550. DOI:10.3189/002214308785837002

CR2, Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia. (2015). *Informe a La Nación. La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro*. Recuperado de http://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2015/11/informe-megasequia-cr21.pdf

FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2014). *Cordillera de Los Andes, una oportunidad para la integración y desarrollo de América del Sur*. Santiago, Chile:

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Recuperado de http://www.fao.org/3/a-i3854.pdf

Favier, V., Falvey, M., Rabatel, A., Praderio, E., & López, D. (2009). Interpreting discrepancies between discharge and precipitation in high-altitude area of Chile's Norte Chico region (26-32°S). *Water Resources Research*, 45, W02424. DOI: 10.1029/2008WR006802

Hamed, K. (2008). Trend detection in hydrologic data: The Mann–Kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of Hydrology*, 349, 350-363. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2007.11.009

Iroumé, A., & Palacios, H. (2013). Afforestation and changes in forest composition affect runoff in large river basins with pluvial regime and Mediterranean climate, Chile. *Journal of Hydrology*, 505, 113-125. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.09.031

Ivanova, Y., & Corredor, J. (2006). Evaluación de la sensibilidad de los caudales máximos de diseño ante la influencia del cambio climático. *Avances en Recursos Hidráulicos*, (13), 89-98. Recuperado de http://revistas.unal.edu.co/index.php/arh/article/view/9341/9984

Kendall, M. G. (1975). *Kendall rank correlation methods*. London, UK: Griffin.

Liu, L., Hong, Y., Hocker, J., Shafer, M., Carter, L., Gourley, J., Bednarczyk, C., Yong, B., & Adhikari, P. (2012). Analyzing projected changes and trends of temperature and precipitation in the southern USA from 16 downscaled global climate models. *Theoretical and*

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Applied Climatology, 109, 345-360. DOI:10.1007/s00704-011-0567-9

Mann, H. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econométrica*, 13(3), 245-259.

Martínez, C., Fernández, A., & Rubio, P. (2012). Caudales y variabilidad climática en una cuenca de latitudes medias en Sudamérica: río Aconcagua, Chile central (33° S). *Asociación de Geógrafos Españoles*, (58), 227-248. Recuperado de https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3886867

Masiokas, M., Cara, L., Villalba, R., Pitte, P., Luckman, B., Toum, E., Christie, C., Le Quesne, C., & Mauget, S. (2019). Streamflow variations across the Andes (18°-55° S) during the instrumental era. *Scientific Reports*, 9, 17879. DOI: 10.1038/s41598-019-53981-x

Méndez, J., Návar, C., De Jesús, J., & González, V. (2008). Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México. *Investigaciones Geográficas*, (65), 38-55. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112008000100004

Núñez, J., Rovera, D., Oyarzún, E., & Arumí, J. (2013). Influence of Pacific Ocean multidecadal variability on the distributional properties of hydrological variables in north-central Chile. *Journal of Hydrology*, 501, 227-240. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.07.035

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Pellicciotti, F., Burlando, P., & Van Vliet, K. (2007). Recent trends in precipitation and streamflow in the Aconcagua River Basin, central Chile. In: *IAHS. Glacier mass balance changes and meltwater discharge* (pp. 17-38). Oxford, UK: International Association of Hydrological Sciences.

Pizarro-Araya, J., Cepeda-Pizarro, J., Barriga, J., & Bodini, A. (2009). Biological vulnerability in the Elqui Valley (Coquimbo Region, Chile) to economically important arthropods. *Ciencia e Investigación Agraria*, 36, 215-228. DOI: 10.4067/S0718-16202009000200006

Pizarro, R., Cabrera, C., Morales, C., & Flores, J. (2011). Variación temporal de las precipitaciones y caudales en la cuenca del Maipo, y la potencial influencia glaciar en la producción de agua (1963-2006). *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2(3), 5-19. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222011000300001

Pizarro, R., Ausensi, P., León, L., Aravena, D., Sangüesa, C., & Balocchi, F. (2009). Evaluación de métodos hidrológicos para la completación de datos faltantes de precipitación en estaciones de la región del Maule, Chile. *Aqua-LAC*, 1, 172-184. Recuperado de http://unesdoc.unesco.org/Ulis/cgibin/ulis.pl?catno=185073&set=005A3C5EF5_1_54&gp=1&lin=1&ll=1

Rosenblüth, B., Fuenzalida, H., & Aceituno, P. (1997). Recent temperature variations in southern South America. *International*

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Journal of Climatology, 17, 67-85. DOI:10.1002/(SICI)1097-0088(199701)17:1<67::AID-JOC120>3.0.CO;2-G/full

Rubio-Álvarez, E., & McPhee, J. (2010). Patterns of spatial and temporal variability in streamflow records in south-central Chile in the period 1952-2003. *Water Resources Research*, 46(5). DOI: 10.1029/2009WR007982, 2010

Sharif, M., Archer, D., Fowler, H., & Forsythe, N. (2013). Trends in timing and magnitude of flow in the Upper Indus Basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 1503-1516. DOI: 10.5194/hess-17-1503-2013

Song, X., Song, S., Sun, W., Mu, X., Wang, S., Li, J., & Li, Y. (2015). Recent changes in extreme precipitation and drought over the Songhua River Basin, China, during 1960-2013. *Atmospheric Research*, 157, 137-152. DOI: 10.1016/j.atmosres.2015.01.022

Valdés-Pineda, R., Cañón, J., & Valdés, J. (2017). Multi-decadal 40- to 60-year cycles of precipitation variability in Chile (South America) and their relationship to the AMO and PDO signals. *Journal of Hydrology*. 556, 1153-1170. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.01.031

Valdés-Pineda, R., Pizarro, R., García-Chevesich, P., Valdés, J., Olivares, C., Vera, M.,…, & Helwig, B. (2014). Water governance in Chile: Availability, management and climate change. *Journal of Hydrology*, 519, 2538-2567. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.04.016

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Waylen, P., & Woo, M. (2008). Prediction of annual floods generated by mixed processes. *Water Resources Research*, 18(4), 1283-1286. DOI: 10.1029/WR018i004p01283

Whitaker, A., Younes, A., Beckers, J., & Toews, D. (2002). Evaluating peak flow sensitivity to clear-cutting in different elevation bands of a snowmelt-dominated mountainous catchment. *Water Resources Research*, 38(9). DOI:10.1029/2001WR000514

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)