

ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DE TENDENCIA Y CORRELACIÓN DE LOS NIVELES FREÁTICOS EN LA REGIÓN DE COQUIMBO.

**CLAUDIO VARGAS H.¹
DENISSE DUHALDE S.²
RICARDO OYARZUN L.³**

RESUMEN

El presente trabajo se centra en el análisis espacio-temporal de los niveles freáticos de 49 pozos, medidos entre 1975-2015. Los pozos están ubicados en dos de los principales acuíferos aluviales en la región de Coquimbo, asociados a la cuenca de los ríos Elqui y Limarí. Este análisis incluyó la detección y cuantificación de las tendencias de los niveles freáticos mediante una combinación entre la prueba de Mann-Kendall (M-K) y el estimador de pendiente de Sen. Los resultados revelaron que aproximadamente un 88% de los pozos presentan tendencias decrecientes significativas. Por otro lado, el análisis de correlación entre los niveles freáticos (promedio anual) de cada pozo en estudio y la precipitación total anual, realizado a través del coeficiente de correlación de Spearman evidenció una importante correlación entre las precipitaciones de un año y los niveles freáticos del año siguiente para las cuencas en estudio. En base a los resultados obtenidos, a la prolongación del actual déficit de precipitaciones y al contexto de las proyecciones de cambio climático, se puede señalar que la situación de los recursos hídricos subterráneos se torne muy probablemente crítica a mediando y/o corto plazo, para las cuencas del estudio.

¹ Alumno Memorista, Departamento de Ing. en Minas, Universidad de La Serena– c.vargash@outlook.cl

² Profesor Asistente, Departamento de Ing. en Minas, Universidad de La Serena– duhalde@userena.cl

³ Profesor Titular, Departamento Ingeniería de Minas, Universidad de La Serena; CEAZA; CRHIAM-royarzun@userena.cl – royarzun@userena.cl

Introducción

En ese contexto, los acuíferos de zonas áridas y semiáridas, donde se encuentra la Región de Coquimbo, suelen estar sujetos a procesos de explotación intensiva, a veces incluso bajo condiciones de extracciones mayores a la recarga (Salas et al., 2016), esta condición ha provocado agotamiento de acuíferos como consecuencia de la extracción de agua especialmente con fines agrícolas (Siebert et al., 2010; Du Bui et al., 2012). Si a la situación de demanda creciente (extracción) se le agrega el componente de las predicciones de cambio climático, que en general proyectan disminuciones en las precipitaciones y aumento de las temperaturas, la presión sobre los recursos hídricos, incluidos los subterráneos, aumenta y el escenario se vuelve más complejo y preocupante, ya que los procesos de recarga (directa e indirecta) de los acuíferos podrían ser afectados. Esto sería especialmente crítico en zonas áridas y semiáridas, donde se espera aumente la frecuencia e intensidad de los eventos de sequía, lo que combinado con el aumento de la población y la expansión de la superficie cultivada se debiera traducir en un aumento en la extracción de aguas subterráneas (Garreaud et al. 2017; Taylor et al. 2013; Salas et al. 2016).

A pesar del clima existente y los inherentes problemas de disponibilidad hídrica, se desarrollan importantes actividades económicas como minería y agricultura que dependen directamente del recurso hídrico. Sin embargo, los periodos de escasez hídrica (menores precipitaciones y caudales en los principales cursos fluviales) han sido frecuentes y afectan la disponibilidad de agua, incluso para el consumo humano. Esta situación se volvió más extrema durante la Megasequía, lo que se evidencia por los constantes (y cada vez más frecuentes) usos de instrumentos de excepción como Declaraciones de Emergencia Agrícola, Declaraciones de Escasez Hídrica, y Decretos de Zonas de Catástrofe (Nuñez et al., 2018). Factores como los descritos permiten explicar el hecho de que en los últimos 30 años se ha registrado un aumento significativo en la demanda de aguas subterráneas en la Región de Coquimbo, situación que ha sido especialmente notoria desde el año 2000 (Tabla 1).

Tabla 1. Derechos históricos de agua subterránea otorgados (N) y caudales asociados (Q, m³/s) en la Región de Coquimbo (elaboración propia a partir de datos de la DGA, disponible en http://www.dga.cl/productosyservicios/derechos_historicos/Paginas/default.aspx)

Cuenca	Periodo					
	1900-1980		1981-2000		2001-2015	
	N	Q	N	Q	N	Q
Elqui	28	0.2	247	3.7	1599	14.8
Limarí	18	0.3	82	1.0	3084	5.2
Choapa	6	0.1	73	1.3	1340	3.5
<i>Total</i>	<i>52</i>	<i>0.6</i>	<i>402</i>	<i>6</i>	<i>6023</i>	<i>23.5</i>

Cabe señalar que, inicialmente la cuenca del río Choapa estaba considerada para este estudio, se decidió de omitir esta cuenca, debido a que solo los registros de cuatro pozos cumplían con las condiciones indicadas anteriormente en esta sección, número muy reducido en comparación a las cuencas seleccionadas que excedían los 20 pozos con registros aptos cada una.

De acuerdo a lo señalado por Taylor et al. (2013), un factor básico y necesario para la definición y adopción de estrategias de adaptación frente al escenario de mayores (y crecientes) requerimientos de recursos hídricos subterráneos es disponer de datos de terreno que permitan caracterizar la situación actual y el comportamiento histórico de los acuíferos. A pesar de lo simple y lógico de dicho concepto, la evidencia tanto a nivel mundial como en Chile en particular muestra que en

general los estudios enfocados en los cambios espacio-temporales de los niveles de agua subterránea han sido más bien pocos y recientes (Du Bui et al., 2012; Tabari et al., 2012). En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo principal realizar un análisis histórico de los niveles freáticos de las principales cuencas de la Región de Coquimbo. Por un lado, se propone extender espacial y temporalmente el trabajo de Ribeiro et al. (2015), quienes consideraron la situación de la cuenca de Elqui (Región de Coquimbo) para el período 1979-2008, proponiéndose ahora además establecer en forma simple la relación entre el régimen de precipitaciones y los niveles freáticos. En forma complementaria, se busca extender el completo trabajo de Garreud et al. (2017) hacia las aguas subterráneas (un componente prácticamente no abordado en el trabajo referido), tratando de identificar en forma cualitativa el grado de propagación de la “megasequía” hacia el componente hídrico sub-superficial.

Metodología

Área de Estudio

El área de estudio corresponde a las cuencas de los ríos Elqui y Limarí, Región de Coquimbo, en el centro-norte de Chile (Figura 1).

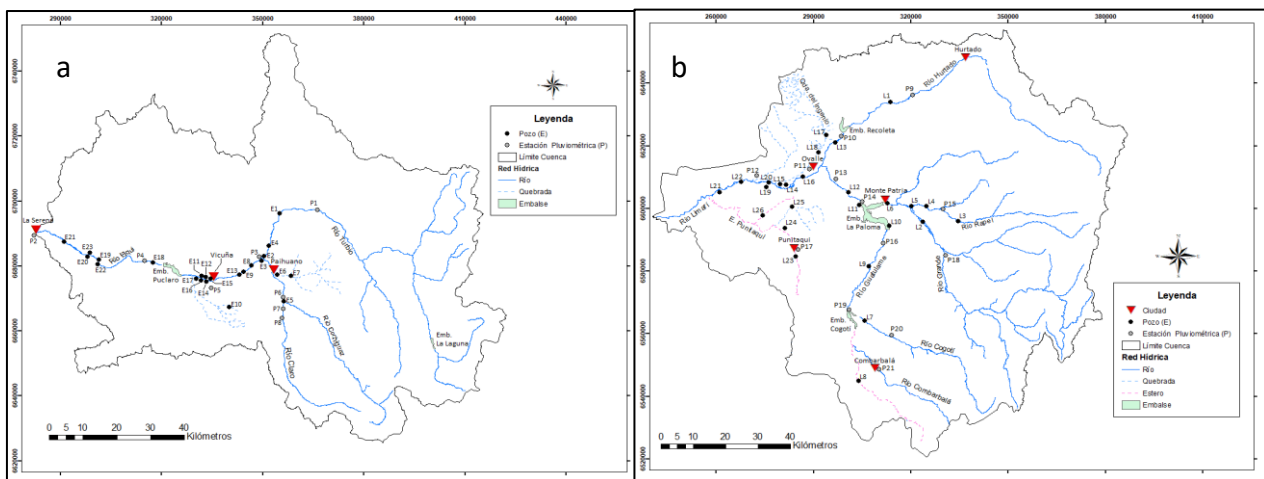


Figura 1. Área de estudio: (a) Cuenca del río Elqui, (b) Cuenca del río Limarí.

En términos generales, la región de Coquimbo presenta un clima de transición entre mediterráneo desértico y semi-desértico con un gradiente altitudinal marcado principalmente en la temperatura y la precipitación Fiebig-Wittmaak et al. (2008). La precipitación anual varía de forma aproximada entre los 20 mm en la parte costera-norte de la región hasta los 300 mm en la parte cordillerana-sur.

Base de Datos

La base de datos utilizada, tanto niveles estáticos en pozos como registro de precipitaciones, proviene de la red de estaciones de medición de DGA; (disponible en <http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes>), y del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)² (disponible en http://www.cr2.cl/download/cr2_pramon_2017/).

Con respecto a los datos de niveles freáticos, el trabajo se realizó en base a datos obtenidos de 49 pozos en un período comprendido entre 1975 y 2015, lo que corresponde nominalmente a 41 años de registros mensuales, equivalente a un máximo potencial de 492 datos por estación. A partir de

esto, para efectos de análisis, se decidió mantener aquellos pozos que presentasen al menos 200 registros (es decir, al menos un 40% del máximo potencial de datos).

En relación a los datos pluviométricos, se seleccionaron aquellas estaciones que presentaron mayor extensión de registros y que, además, estuviesen ubicadas en forma cercana a los pozos bajo análisis. (Figura 1).

Procesamiento de Datos

Se realizaron tres análisis: un análisis preliminar o exploratorio de datos, un análisis de tendencia y un análisis de correlación. El análisis preliminar o exploratorio de datos consistió en calcular, para cada serie de tiempo, el porcentaje de datos disponibles, el promedio, la desviación estándar, la mediana, el valor mínimo y máximo, el coeficiente de asimetría y el coeficiente de variación. De manera complementaria, se obtuvieron diagramas de caja de cada uno de los pozos de observación con el fin de visualizar de mejor manera la distribución de los datos.

Con respecto al análisis de tendencias, se aplicó a los registros mensuales de los niveles de aguas subterráneas de los pozos la prueba estadística no paramétrica de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) y el estimador de pendiente de Sen (Sen, 1968). Y el análisis de correlación, fue aplicado para establecer el grado de asociación entre los niveles freáticos (promedio anual) de cada pozo en estudio y la precipitación total anual, se realizó mediante el coeficiente de correlación de Spearman (Sperman, 1904).

Resultados y discusiones

De acuerdo a lo descrito en la sección previa, los resultados se presentan secuencialmente asociados a los análisis realizados (i.e., análisis exploratorio de datos, análisis de tendencia y análisis de correlación). Para una mayor comprensión de las variaciones espacio-temporales de los niveles freáticos en los pozos, el análisis consideró diferenciar las estaciones ubicadas aguas arriba de embalses y las estaciones ubicadas aguas abajo de embalses. Finalmente, los valores de los niveles freáticos se expresan con respecto a la superficie del terreno, tomando esta última un valor "0". Luego, mientras más negativo es el valor, menor (más profundo) será el nivel freático.

Análisis exploratorio

La estadística descriptiva básica se presenta para cada cuenca (Tabla 2). En general se advierte en los registros una alta variabilidad. Las máximas variaciones se presentan en los pozos E1, E4, E10, E13 y E23 en la cuenca del Elqui, los primeros ubicados en la parte alta de la cuenca y el último en la parte baja, con valores entre los 20 y 40 m aproximadamente, para toda la serie de tiempo considerada. En Limarí, las mayores diferencias se presentan en los pozos L18, L23, L24 y L25, con valores entre 20 y 30 m, en general. Estas variaciones de gran amplitud no parecen ser producto de valores aislados que se podrían asociar a errores en la obtención de los datos, sino que son más bien recurrentes, como se evidencia con la gran cantidad de valores atípicos que muestran los respectivos diagramas de cajas.

Tabla 2. Estadística descriptiva de niveles freáticos registrados en pozos de las cuencas en estudio en el periodo 1975 a 2015, aguas arriba (u) y aguas abajo (d) de los principales embalses de cada cuenca. El porcentaje de datos disponibles (% datos) se ha calculado en base a un total potencial de 492 registros.

Cuenca	Pozo	% datos	Prom [m]	Desv. Est. [m]	CV	Cuenca	Pozo	% datos	Prom [m]	Desv. Est. [m]	CV	
Elqui (u)	E1	69	-34.5	10.7	0.31	Limarí (u)	L1	56	-2.2	0.6	0.26	
	E2	44	-7.5	2.2	0.29		L2	50	-29.3	1.4	0.05	
	E3	64	-2.9	0.9	0.31		L3	65	-14.8	1.7	0.11	
	E4	39	-30.7	5.1	0.17		L4	62	-3.2	0.7	0.23	
	E5	71	-10.9	1.1	0.10		L5	80	-2.0	0.6	0.29	
	E6	45	-5.9	1.6	0.27		L6	49	-5.9	1.5	0.25	
	E7	57	-2.7	2.2	0.82		L7	57	-1.3	0.5	0.38	
	E8	75	-21.3	2.9	0.14		L8	53	-3.8	1.1	0.28	
	Elqui (d)	E9	72	-16.2	2.8	0.17	Limarí (d)	L9	59	-3.1	0.6	0.20
		E10	56	-15.3	5.7	0.37		L10	52	-8.4	3.5	0.41
		E11	61	-3.3	1.2	0.37		L11	54	-4.2	1.3	0.31
		E12	38	-7.1	2.7	0.38		L12	48	-1.8	0.5	0.30
		E13	43	-13.9	5.0	0.36		L13	54	-2.9	0.9	0.33
		E14	49	-4.3	2.4	0.56		L14	69	-3.3	0.7	0.20
		E15	52	-9.5	2.1	0.22		L15	58	-3.3	0.7	0.20
		E16	60	-8.1	2.3	0.29		L16	68	-0.7	0.2	0.28
		E17	55	-5.5	1.6	0.29		L17	57	-8.0	1.2	0.15
E18		63	-1.3	0.7	0.55	L18		58	-3.4	3.4	1.00	
E19		54	-2.5	0.6	0.25	L19		64	-0.5	0.2	0.32	
E20		65	-3.7	0.6	0.17	L20		56	-1.6	0.7	0.42	
E21		66	-0.9	0.8	0.86	L21		65	-3.1	0.5	0.18	
E22		59	-4.4	0.7	0.16	L22		65	-2.2	0.5	0.23	
E23		52	-10.1	6.3	0.62	L23		59	-4.1	2.8	0.66	
						L24		68	-16.4	2.9	0.18	
					L25	49	-8.0	5.5	0.68			
					L26	66	-1.7	0.3	0.16			

Adicionalmente, llama la atención en Elqui el que en general, con la excepción de E23, los pozos ubicados aguas abajo del embalse Puclaro presentan en forma notoria una menor variabilidad en los registros, acompañado de niveles freáticos menos profundos, lo cual sugiere una posible influencia del sistema de regulación (embalse y canales de riego asociados) sobre los niveles de los pozos ubicados aguas abajo de Puclaro, incluso en aquéllos más alejados. En el caso de Limarí, y con la excepción de L2, en general no se logran identificar diferencias importantes ni en términos de profundidad ni en términos de variabilidad entre los pozos ubicados aguas arriba y aguas abajo de los embalses. Sin embargo, en toda la cuenca se observa una menor variación y un nivel más somero (medianas entre -5 y -10 m en la mayor parte de los registros) de los niveles freáticos en comparación con la cuenca del Elqui. En forma complementaria y para efectos de facilitar la comparación visual, la Figura 2 presenta los diagramas de caja para los pozos considerados.

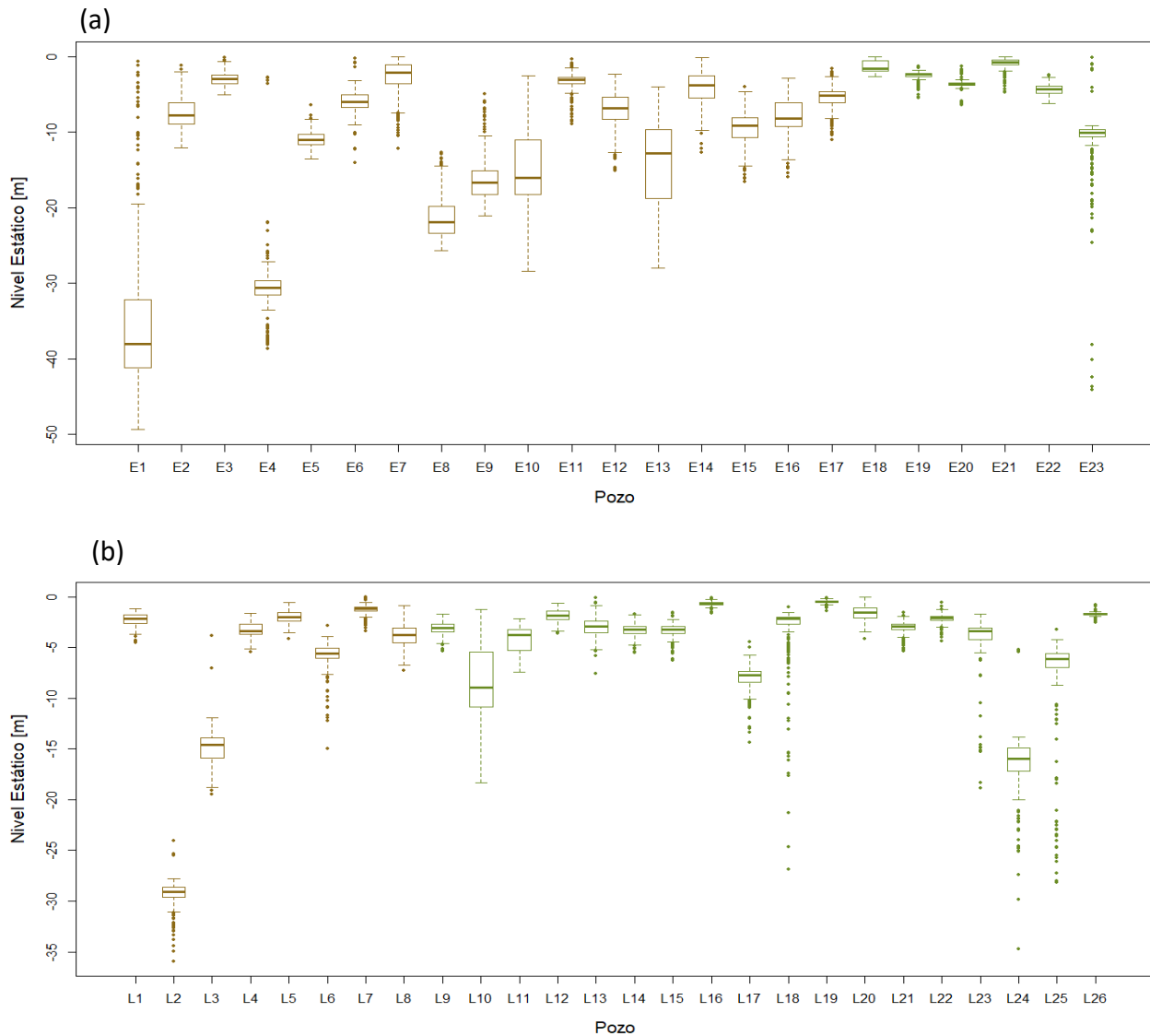


Figura 2. Diagrama de caja de los pozos de las cuencas de Elqui (a), Limarí (b). En color café (verde) los pozos ubicados aguas arriba (abajo) de embalses.

Análisis de tendencias

Los resultados de la prueba estadística de Mann-Kendall y el estimador de pendiente de Sen aplicadas a los registros mensuales de los niveles de aguas subterráneas de los pozos en cada una de las cuencas en estudio se presentan en la Tabla 3.

Se detectaron tendencias significativas decrecientes en el 88% de los pozos en las dos cuencas en estudio, situación que resulta de especial preocupación en una zona con las características descritas (i.e., árida a semiárido, incremento sostenido en la demanda de recursos hídricos subterráneos). La única tendencia significativa creciente fue detectada en el pozo E 18, ubicado en la cuenca del Elqui, aproximadamente 5 km aguas abajo del embalse Puclaro, el cual ha experimentado un aumento de 0.04 m/año. De hecho, dicho pozo (E18) registra un repentino aumento en el nivel freático y una menor variabilidad a partir del año 2000 aproximadamente (año en el que comenzó a operar el

embalse) lo que apunta a un efecto directo del Embalse Puclaro en los niveles registrados (Fig. 3a). Este resultado es coincidente con lo descrito previamente por Ribeiro et al. (2015).

Al hacer un análisis más detallado se advierte una marcada diferencia entre las cuencas, dado que las mayores pendientes (Sen) fueron encontradas en la cuenca del Elqui, con una disminución promedio de 0.08 m/año, mientras que en Limarí, la disminución promedio de los niveles freáticos fue de 0.04 m/año. En particular, en Elqui los pozos E1, E2, E12, E13, E14, E16 y E23 son los que presentan un mayor descenso en el nivel de las aguas subterráneas (≥ 0.10 m/año). De éstos, resulta de particular interés E13, con un descenso de casi 0.4 m/año, o aproximadamente 15 m en total en el periodo de estudio (1975-2015) (Figura 3b). En cambio en la cuenca del Limarí solamente dos pozos (L10 y L25) evidencian descensos relativamente comparables (ej., 0.11 y 0.13 m/año), mientras que la mayoría registran descensos menores a 0.05 m/año.

Tabla 3. Tendencias de niveles freáticos de los pozos para las cuencas en estudio aguas arriba (u) y aguas abajo (d) de los principales embalses de cada cuenca.

Cuenca	Pozo	Tendencia	β [m/año]	Cuenca	Pozo	Tendencia	β [m/año]	
Elqui (u)	E1	↓	-0.114	Limarí (u)	L1	↓	-0.023	
	E2	↓	-0.130		L2	↓	-0.031	
	E3	↓	-0.052		L3	–	n/a	
	E4	–	n/a		L4	↓	-0.034	
	E5	↓	-0.029		L5	↓	-0.032	
	E6	–	n/a		L6	–	n/a	
	E7	↓	-0.057		L7	↓	-0.013	
	E8	↓	-0.081		L8	↓	-0.040	
	Elqui (d)	E9	↓	-0.067	Limarí (d)	L9	↓	-0.035
		E10	↓	-0.077		L10	↓	-0.112
		E11	↓	-0.015		L11	↓	-0.050
		E12	↓	-0.118		L12	↓	-0.048
		E13	↓	-0.392		L13	↓	-0.021
		E14	↓	-0.108		L14	↓	-0.028
		E15	↓	-0.074		L15	↓	-0.035
		E16	↓	-0.118		L16	↓	-0.002
		E17	↓	-0.052		L17	↓	-0.063
E18		↑	0.044	L18		↓	-0.006	
E19	↓	-0.007	L19	↓	-0.005			
E20	↓	-0.006	L20	↓	-0.020			
E21	–	n/a	L21	↓	-0.032			
E22	↓	-0.012	L22	↓	-0.012			
E23	↓	-0.097	L23	↓	-0.052			
				L24	↓	-0.033		
				L25	↓	-0.131		
				L26	↓	-0.002		

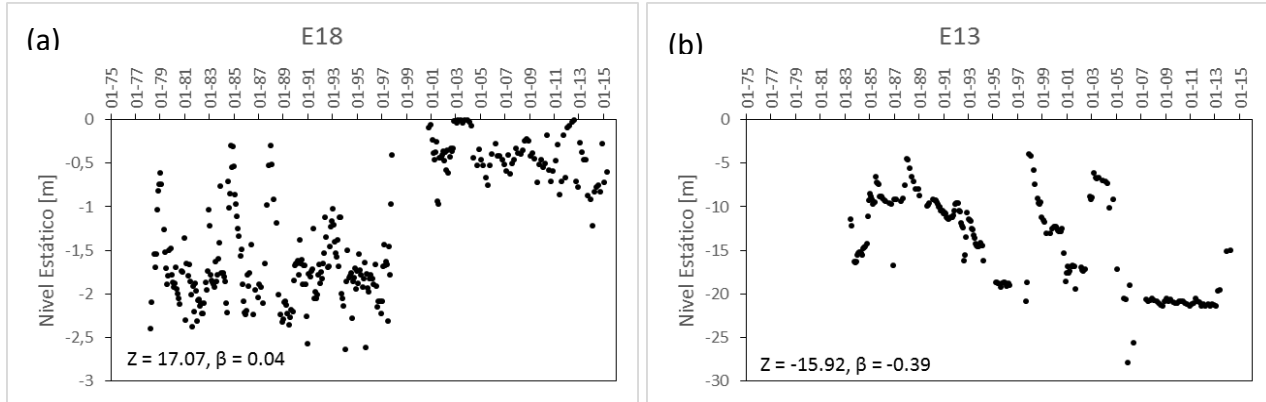


Figura 3. (a) Gráfico de serie temporal del nivel freático del pozo E18 en el periodo 1975-2015
 (b) Gráfico de serie temporal del nivel freático del pozo E13 en el periodo 1975-2015.

Resulta de interés señalar que en las series temporales de los diferentes pozos en estudio es en general común de encontrar una marcada disminución de los niveles freáticos a partir del año 2010 aproximadamente. Precisamente dicho año coincide con el inicio del ya descrito período de “megasequía”, en el cual se ha experimentado una disminución casi ininterrumpida en las precipitaciones, y como consecuencia de ello, en los caudales de los ríos (Garreaud et al, 2017). A modo de ejemplo, la Figura 4 presenta el comportamiento descrito para pozos seleccionados de las dos cuencas.

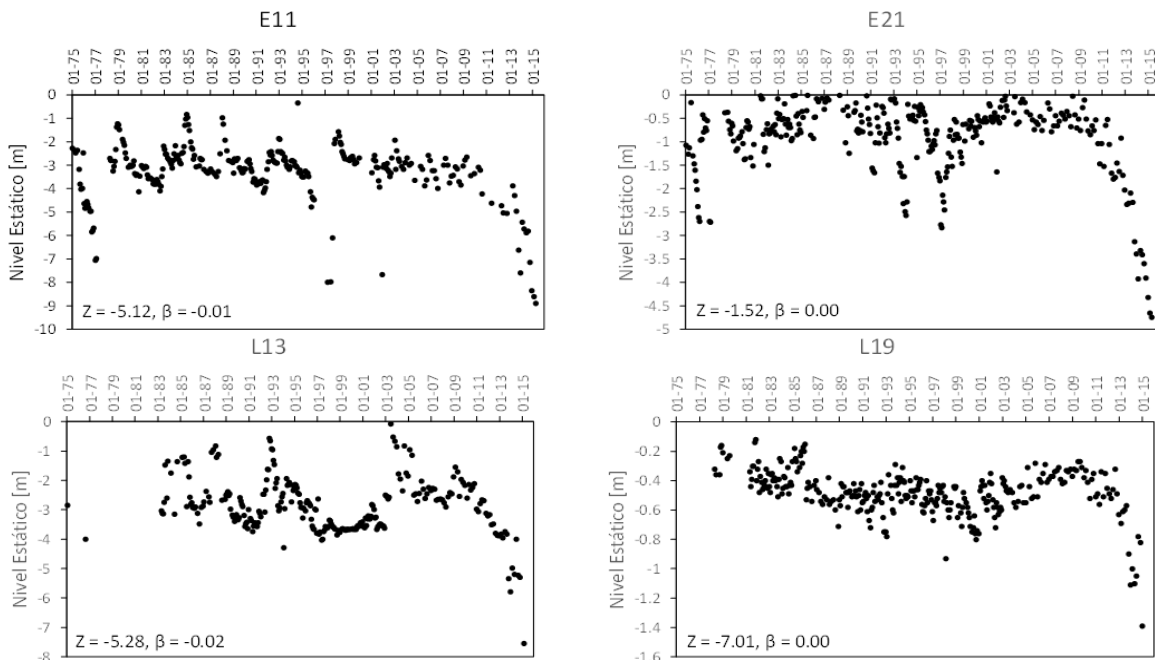


Figura 4. Series de tiempo seleccionadas que ilustran el efecto de la megasequía 2010-2015 en el área de estudio.

De esta forma, es posible advertir que el más reciente e importante déficit hídrico se ha propagado con relativa rapidez al sistema acuífero de la zona de estudio. Incluso en el caso de pozos que no mostraron tendencia decreciente estadísticamente significativa, como es el caso de L6, es posible

advertir cualitativamente un cambio en el comportamiento a partir del 2010. Estos resultados son consistentes con aquellos descritos por Salas et al. (2016) para la cuenca del río Huasco, inmediatamente al Norte de la de Elqui.

Análisis de correlación

Los resultados de los coeficientes de correlación de Spearman se presentan en la Tabla 4. Para efectos de análisis, se determinó la correlación entre las precipitaciones y los niveles freáticos de un mismo año, así como considerando un desfase (lag) de 1 y 2 años entre dichas variables.

En el análisis de correlación con desfase de un año se encontró que la totalidad de los coeficientes resultaron positivos en las dos cuencas, es decir, mientras mayor es la precipitación mayor es el nivel de aguas subterráneas del año siguiente. Al correlacionar sin desfase o con un desfase de dos años resultaron algunos coeficientes negativos, pero ninguno de ellos fue significativo estadísticamente. De los resultados mostrados en la Tabla 4 se advierte que por lejos las relaciones estadísticamente significativas se dan entre las precipitaciones de un año y los niveles freáticos del año siguiente. En efecto, de un total de 29 correlaciones realizadas en Elqui, el 55% resultó significativa con un año de desfase, mientras que con dos años de desfase, solamente el 17% fue significativo y en la cuenca del Limarí, de un total de 34 correlaciones, el 47% resultó significativa con un año de desfase, mientras que para dos años de desfase resultó significativo el 15% de los casos evaluados.

El contraste en la significancia de estos resultados indica una asociación entre las precipitaciones acumuladas en un año y el nivel de las aguas subterráneas del año siguiente, lo que se explica por la importancia de la nieve como parte de las precipitaciones y, por lo tanto, su efecto moderador (caída-acumulación-derretimiento-infiltración vs. esocorrentía superficial) de los regímenes hidrológicos, en las cuencas en estudio. Sin embargo, a pesar de haber detectado una asociación entre el nivel de agua subterránea y la precipitación, se debe reconocer que pueden existir otros factores climáticos y de gestión hídrica, no explícitamente considerados en este estudio, que también pueden influir sobre los niveles. Solo a modo de ejemplo, Tabari et al. (2012) en un estudio realizado en la Provincia de Mazandarán, al norte de Irán, identificaron que los niveles de agua subterránea se correlacionaban en forma estadísticamente significativa con la humedad relativa (más que con la precipitación o las temperaturas).

Por otro lado, en general existe acuerdo que los retornos de los excesos de riego pueden representar un componente importante del balance hidrogeológico en Chile Centro-norte (Salas et al., 2016). A pesar de lo anterior, los resultados presentados son en sí mismos relevantes en términos de resaltar la importancia de las precipitaciones en los sistemas hidrogeológicos estudiados y, por lo tanto, vislumbrar con un adecuado nivel de confianza el probable desarrollo de una situación crítica a mediando (o incluso corto) plazo, de extenderse la actual situación de déficit de precipitaciones (o confirmarse el cambio de régimen al que apunta el trabajo de Garreaud et al. 2017) que se ha evidenciado en la última década.

Tabla 4. Coeficientes de correlación (Rho) de Spearman para las cuencas del Elqui y Limarí aguas arriba (u) y aguas abajo (d) de los principales embalses de cada cuenca.

Cuenca	Pozo	Estación Pluviométrica	No lag	1 año lag	2 año lag	Cuenca	Pozo	Estación Pluviométrica	No lag	1 año lag	2 año lag		
Elqui (u)	E1	P1	-0.05	0.41	0.07	Limarí (u)	L1	P9	0.20	0.36	-0.02		
	E2	P3	-0.07	0.30	0.12		L2	P15	-	0.17	0.09	0.10	
	E3	P3	0.02	0.42	0.14		L3	P18	-	0.12	0.11	0.17	
	E4	P3	-0.09	0.26	-0.12		L3	P15	-	0.03	0.30	0.28	
		P6	-0.06	0.31	0.13		L3	P18	0.04	0.40		0.26	
	E5	P7	-0.07	0.34	0.34		L4	P15	0.10	0.25	0.22		
		P8	-0.06	0.36	0.32		L5	P15	0.02	0.50	0.21		
	E6	P3	-0.25	0.30	0.02		L6	P14	0.07	0.31	0.02		
		P6	-0.15	0.36	0.17		L6	P15	0.05	0.32	0.11		
	E7	P3	-0.01	0.56	0.27		L7	P19	0.21	0.42	0.07		
		P6	-0.08	0.56	0.20		L7	P20	0.23	0.44	0.08		
	E8	P3	0.03	0.47	0.22		L8	P21	0.32	0.55	0.07		
	E9	P3	-0.05	0.47	0.29		Limarí (d)	L9	P16	0.10	0.47	0.08	
	E10	P5	-0.17	0.34	0.39			L9	P19	0.15	0.52	0.10	
	E11	P5	-0.15	0.37	0.36			L10	P16	0.05	0.67	0.21	
	E12	P5	-0.20	0.31	0.29			L10	P19	0.12	0.63	0.19	
	E13	P3	-0.01	0.25	0.17			L11	P14	-	0.10	0.15	0.14
E14	P5	-0.16	0.34	0.43	L12	P13		0.08	0.35	0.13			
E15	P5	-0.05	0.20	0.04	L12	P14		0.08	0.32	0.08			
E16	P5	-0.01	0.31	0.14	L13	P10		-	0.03	0.40	0.15		
E17	P5	-0.09	0.53	0.33	L14	P11		0.09	0.47	0.14			
Elqui (d)	E18	P4	0.23	0.42	0.16	L15		P11	-	0.02	0.32	0.15	
	E19	P4	-0.10	0.05	-0.05	L16	P11	-	0.21	-	0.05		
		P2	0.00	0.28	0.12	L17	P10	-	0.12	0.09	0.16		
	E20	P4	0.02	0.34	0.05	L18	P10	0.08	0.28	0.21			
	E21	P2	0.01	0.12	0.16	L18	P11	0.06	0.26	0.15			
	E22	P4	-0.07	0.19	0.41	L19	P12	-	0.25	0.06	0.04		
		P2	-0.10	0.08	-0.04	L20	P12	0.11	-	0.11	0.07		
	E23	P4	-0.13	0.04	0.00	L21	P12	-	0.03	0.07	-0.10		
						L22	P12	0.10	0.34	0.08			
						L23	P17	0.12	0.52	0.34			
					L24	P17	0.07	0.15	0.24				
					L25	P17	-	0.08	0.21	0.05			
					L26	P17	0.15	0.43	0.13				

Conclusiones

Se estableció una base de datos constituida por 49 pozos en las cuencas de Elqui y Limarí (Centro-Norte de Chile) con registros mensuales para el período 1975-2015. A través del uso de análisis estadísticos no paramétricos (Mann-Kendall test y el estimador de la pendiente de Sen) se estudió la variación a largo plazo de los niveles de agua subterránea. Además se llevó a cabo un análisis simple de correlación entre los niveles freáticos y precipitaciones anuales

Los resultados del análisis preliminar o exploratorio de datos mostraron grandes fluctuaciones en los niveles freáticos, especialmente en la parte alta de la cuenca del Elqui, donde se registraron variaciones cercanas a los 40 m de profundidad. Por otro lado, más al sur, en Limarí, en la mayoría de los pozos se registraron niveles someros, aproximadamente entre 1 y 15 m de profundidad promedio, y con menores variabilidades en los registros de niveles freáticos.

A partir de los resultados obtenidos en la aplicación de las pruebas de M-K y la pendiente de Sen se pudo concluir que cerca del 88% de los pozos mostraron tendencias decrecientes significativas. Las mayores pendientes (Sen) fueron encontradas en la cuenca del Elqui, con una disminución promedio de 0.08 m/año y en el Limarí, la disminución promedio de los niveles freáticos fue de 0.04 m/año. Sólo un pozo, ubicado inmediatamente aguas abajo del embalse Puclaro en la cuenca de Elqui, exhibió una tendencia creciente (0.04 m/año), que se puede atribuir a la recarga del acuífero en forma directa desde el embalse.

Además, fue posible advertir una marcada y generalizada disminución de los niveles freáticos a partir del año 2010 aproximadamente, año que coincide con el inicio del período de “megasequía”. De esta forma, se evidencia que el déficit hídrico se ha propagado con rapidez al sistema acuífero de la zona de estudio.

Finalmente, se evidenció una importante correlación entre las precipitaciones de un año y los niveles freáticos del año siguiente. Sumado a lo anterior, este resultado no hace más que apuntar muy probablemente hacia una situación crítica a mediando (o incluso corto) plazo, de extenderse la actual situación de déficit de precipitaciones que ya se mantiene casi por una década y que podría agravarse en el contexto de las proyecciones de cambio climático. En este sentido, resultados como los descritos en este trabajo debieran ser considerados al momento de definir estrategias de gestión integrada de cuencas en Chile, especialmente en la zona centro-norte.

Agradecimientos

Este trabajo fue desarrollado en el marco del Programa de Recursos Hídricos y Medio Ambiente (PRHIMA) del Departamento de Ingeniería de Minas de la Universidad de La Serena, y el Centro Conicyt / Fondap / 15130015 CRHIAM.

Referencias

- Du Bui, D., Kawamura, A., Ngoc Tong, T., Amaguchi, H. y Nakagawa, N. 2012. Spatio-temporal analysis of recent groundwater-level trends in the Red River Delta, Vietnam. *Hydrogeology Journal*. 20, 1635-1650.
- Fiebig-Wittmaak, M., Lazo, E., Pérez, C. 2008. Aspectos climáticos del Valle del Elqui. En: J. Cepeda, ed. *Los Sistemas Naturales de la Cuenca del Río Elqui*. La Serena, Chile: Ediciones Universidad de La Serena. pp. 41-62.

- Garreaud, R., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J.P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., Zambrano-Bigiarini, M. 2017. The 2010-2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences*. 21, 6307-6327.
- Kendall, M.G. 1975. *Rank Correlation Measures*, Charles Griffin, London.
- Mann, H.B. 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*. 13, 245–259.
- Núñez, J., Garreaud, R., Verbist, K. 2018. Chile. In: Núñez, J. Verbist, K. *Atlas de Sequía de America Latina y el Caribe*. UNESCO-CAZALAC, 55-70
- Ribeiro, L., Kretschmer, N., Nascimento, J., Buxo, A., Rötting, T., Soto, G., Señoret, M., Oyarzún, J., Maturana, H., Oyarzún, R. 2015. Evaluating piezometric trends using the Mann-Kendall test on the alluvial aquifers of the Elqui River basin, Chile. *Hydrological science of journal*
- Salas, I., Herrera, C., Luque, J.A., Delgado, J., Urrutia, J., Jordan, T. 2016. Recent climatic events controlling the hydrological and the aquifer dynamics at arid areas: The case of Huasco River watershed, northern Chile. *Science of the Total Environment* 571, 178-194.
- Sen, P.K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *Journal American Statistical Association*. 63, 1379-1389.
- Siebert, S., Burke, J., Faures, J.M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Döll, P., Portmann, F.T. 2010. Groundwater use for irrigation-a global inventory. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14, 1863-1880.
- Tabari, H., Nikbakht, J., Shifteh Some'e, B. 2012. Investigation of groundwater level fluctuations in the north of Iran. *Environmental Earth Sciences*. 66, 231-243
- Spearman, C. 1904. The Proof and Measurement of Association between Two Things. *The American Journal of Psychology*. 15, 72-101.
- Taylor, R.G., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M. 2013. Ground water and climate recharge. *Nature Climate Change*, 3, 322-328