

TENDENCIAS DE LA PRECIPITACIÓN EN EL NORTE GRANDE DE CHILE Y SU RELACIÓN CON LAS PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO

PRECIPITATION TRENDS IN THE CHILEAN NORTE GRANDE AND ITS RELATIONSHIP WITH CLIMATE CHANGE PROJECTIONS

Pablo Sarricolea*, Óliver Meseguer Ruiz**, Hugo Romero Aravena***

Se analizan las tendencias de la precipitación en el Norte Grande de Chile mediante el test no paramétrico de Mann-Kendall y el test de Sen, lo que permite detectar, para las sesenta estaciones meteorológicas disponibles, la posibilidad de cambios decadales de la precipitación con significancia estadística ($p < 0,1$). Los resultados muestran que es el Altiplano la región donde se aprecia una reducción significativa de la precipitación anual entre 1972 y 2013. La zona de precordillera posee tendencias de incremento para Poroma y San Pedro de Atacama. El desierto costero no muestra tendencias significativas, lo que implica la mantención de las condiciones hiperáridas. Estos resultados son comparables con las proyecciones de cambio climático a fines del siglo XXI. Se concluye la importancia de seguir monitoreando las tendencias, aumentar la densidad de estaciones a la vez que se mantienen las ya existentes.

Palabras clave: Altiplano, Chile, Mann-Kendall, Norte Grande, precipitación.

The precipitation trends in the Norte Grande region in Chile are analysed using the Mann-Kendall non-parametric test and the Sen's trend test, to detect, for 60 available meteorological stations, possible statistically significant ($p < 0,01$) decadal precipitation changes. Results show that the Altiplano is the region where a significant reduction of annual precipitation between 1972 and 2013 could be observed. The Precordillera region records increase trends for Poroma and San Pedro de Atacama. No significant trends were found in the coastal desert region, where hyper arid conditions are maintained. Those results may be compared to the climate change projections to the end of the 21st century. As a conclusion, it's important to keep trends monitoring, increase density of meteorological stations and maintain those already existing.

Key words: Altiplano, Chile, Mann-Kendall, Norte Grande, precipitation.

Introducción

El Norte Grande de Chile corresponde a una de las áreas más áridas del mundo, con mayor radiación solar y gradiente altitudinal (Sarricolea y Romero 2015). El clima es uno de los componentes ambientales más característicos y significativos de las regiones del Norte Grande de Chile. En el Desierto de Atacama casi nunca llueve, e incluso en las zonas costeras las estaciones meteorológicas situadas en Arica (18 °S), Iquique (19 °S) y Antofagasta (23 °S) poseen registros anuales de precipitación menores a 3 mm (Romero y Kampf 2003). Sin embargo, en las cordilleras y altiplanos andinos las lluvias aumentan considerablemente, ofertando los recursos hídricos que se requieren

para el desarrollo de las ciudades, yacimientos mineros y limitada producción agrícola y ganadera. Sin duda, se trata de un área de contrastados paisajes (desierto costero y Altiplano andino), lo que se puede expresar en precipitación menor a 10 milímetros anuales (invernal y de origen sobre el océano Pacífico), bajo los 2000 metros de altitud, y más de 300 milímetros anuales en el Altiplano (de verano y de origen oriental y amazónico). Durante el Holoceno, esta región planetaria no ha estado ajena a una intensa variabilidad climática, la que se puede resumir en períodos más húmedos y secos que el actual. Entre los 17500 y 9500 años antes del presente, diversos autores coinciden en condiciones ambientales más húmedas (Santoro *et al.* 2011), y luego un silencio arqueológico

* Universidad de Chile, Departamento de Geografía. Santiago, Chile. Universidad de Barcelona, Grupo de Climatología Barcelona, España. Correo electrónico: psarricolea@uchilefau.cl

** Universidad de Tarapacá, Departamento de Ciencias Históricas y Geográficas. Arica, Chile. Universidad de Barcelona, Grupo de Climatología. Barcelona, España. Correo electrónico: omeseguer@uta.cl

*** Universidad de Chile, Departamento de Geografía. Laboratorio de medio ambiente y territorio. Santiago, Chile. Correo electrónico: hromero@uchilefau.cl

asociado a sequías, de 9500 a 4500 años antes del presente (Núñez *et al.* 2002). Trenberth (2011) señala que se han observado, a mayor escala temporal, cambios de clima desértico a semiárido y viceversa en latitudes subtropicales, y cambios en los regímenes de humedad en latitudes altas.

Estudiar la precipitación en el Norte Grande es un desafío, pues el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC 2013) lo clasifica como una región de alta incertidumbre. Ello se debe a que la variabilidad de la precipitación expresada en desviaciones típicas supera a los valores de tendencia central (medias anuales), hecho que queda reflejado en la mayoría de las estaciones meteorológicas del desierto. En dicho sentido, Schulz *et al.* (2011) señalan que cambios en la precipitación en el desierto costero han pasado inadvertidos, y pocos estudios han examinado algunos aspectos de su evolución en las últimas décadas (Houston 2006). No obstante, en el Altiplano andino las causas de dicha incertidumbre parecen tener más relación con los cambios en la circulación atmosférica y la deforestación amazónica.

Pese a la incertidumbre a la que se alude respecto de la precipitación en el Norte Grande (IPCC 2013), el estudio de sus tendencias históricas observadas proporciona potenciales indicadores para la modelación de los patrones futuros del cambio climático y, por tanto, ofrece una contribución importante al debate científico acerca de este. Así lo señalan Souvignet *et al.* (2012), destacando la importancia de los climas locales a este respecto.

Los cortos y escasos registros de estaciones meteorológicas de los que se dispone en el Norte Grande dificultan el establecimiento de tendencias claras durante el siglo XX, referidas a aumentos o disminuciones interanuales de las temperaturas y de las precipitaciones. Estas últimas reflejan una alta irregularidad con alzas y disminuciones asociadas a patrones de teleconexiones (la más influyente, el ENSO). No obstante, al decir de Sarricolea y Romero (2015), los modelos climáticos globales (GCM) y regionales (RCM) construidos bajo los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero y variabilidad natural, señalan tendencias de aumentos significativos de las temperaturas, y escasos niveles de confianza sobre las tendencias de las precipitaciones de fines del siglo XXI (Fuenzalida *et al.*, 2007), pese a que en Minvielle y Garreaud (2011) se menciona un debilitamiento de los flujos desde la cuenca amazónica, y por tanto, una disminución de la precipitación altiplánica, lo

que es consistente con los resultados publicados por el Quinto Informe de Evaluación (AR5) del IPCC (2013: 1264).

Estudios recientes efectuados en el Norte Grande, aplicando el peor escenario de emisiones del AR5 del IPCC (2013), señalan un incremento de las temperaturas entre 2 °C y 5 °C, y una reducción de las precipitaciones de más de 30%, a excepción de una franja desértica del interior, entre la costa y la precordillera (Sarricolea y Romero 2015).

Por lo anteriormente mencionado, la presente investigación tiene como objetivo establecer en qué medida las tendencias observadas de la precipitación en el Norte Grande se corresponden con las variaciones propuestas por el AR5 en su peor escenario (Sarricolea y Romero 2015) y en el informe de cambio climático del Ministerio de Medio Ambiente del Gobierno de Chile (Santibáñez *et al.* 2016). La hipótesis de trabajo señala que pocas estaciones poseen tendencias estadísticas significativas, y que ellas corresponden principalmente al Altiplano andino, así como lo encontrado en Bennett *et al.* (2016). Para ello el trabajo consistió en la recopilación de la información tanto de estaciones meteorológicas como respecto de su proyección futura, y la detección de sus tendencias de cambio. Los resultados obtenidos fueron contrastados con la literatura científica disponible.

Metodología y datos utilizados

El Norte Grande de Chile se ubica en los Andes Centrales, región que comprende a la zona andina de Perú, Bolivia, Argentina y Chile. Se sitúa entre las latitudes ~18°S y ~27°S. Se caracteriza según Latorre *et al.* (2005) por la existencia de un desierto costero (0-900 metros de altitud), la Depresión Intermedia (900-2200 metros de altitud), la precordillera (2200-3500 metros de altitud) y las mesetas semiáridas sobre los 3500 m de altitud, que en su conjunto forman lo que se denomina “Puna” o “Altiplano” (Jaksic *et al.* 1997). Administrativamente, corresponde a las regiones XV de Arica y Parinacota, I de Tarapacá y II de Antofagasta (Figura 1).

Se utilizan para este estudio los datos pluviométricos de sesenta estaciones meteorológicas, pertenecientes, en su mayoría (54 estaciones), a la Dirección General de Aguas (DGA), y seis que corresponden a la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) (Tabla 1). Los datos mensuales fueron obtenidos desde el repositorio del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia ((CR)2) de la Universidad

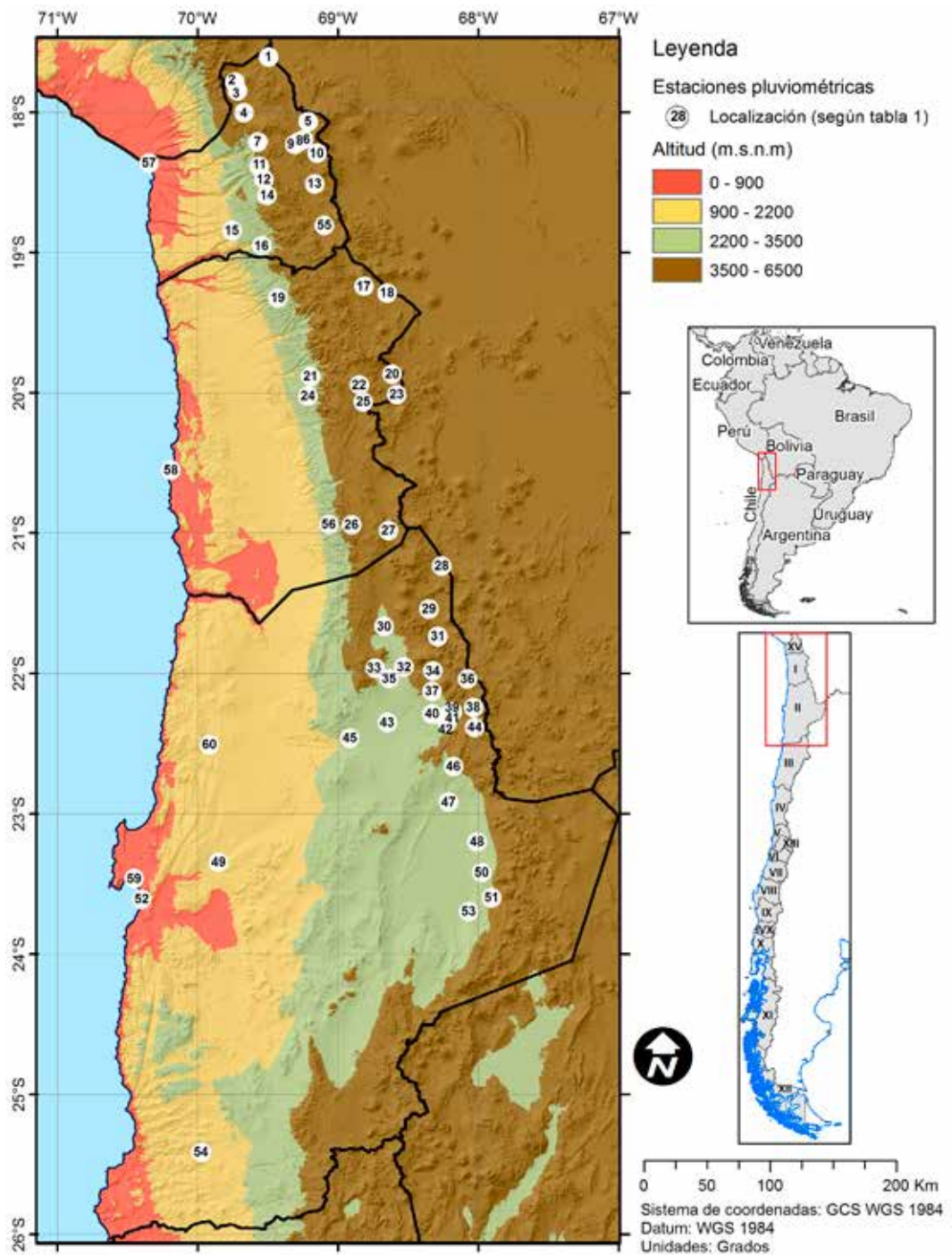


Figura 1: Área de estudio y estaciones meteorológicas utilizadas.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1: Estaciones meteorológicas utilizadas.

ID	Nombre estación	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (m)	Período	Número de años
1	Visviri	-17,60	-69,48	4080	1969-2015	47
2	Villa Industrial (Tacora)	-17,77	-69,72	4080	1975-2015	41
3	Humapalca	-17,84	-69,70	3980	1972-2015	44
4	Alcérreca	-17,99	-69,66	3990	1971-2015	45
5	Caquena	-18,05	-69,20	4400	1970-2015	45
6	Cotacotani	-18,18	-69,23	4550	1963-2008	46
7	Putre	-18,20	-69,56	3545	1978-2008	31
8	Parinacota Conaf Dga	-18,20	-69,27	4420	1933-2015	74
9	Chucuyo Retén	-18,22	-69,30	4400	1961-2015	55
10	Chungara Retén	-18,28	-69,14	4570	1963-2015	50
11	Central Chapiquia	-18,37	-69,55	3350	1963-2015	53
12	Belén	-18,47	-69,52	3240	1968-2015	48
13	Guallatire	-18,50	-69,15	4240	1969-2015	47
14	Tignamar	-18,58	-69,49	3230	1975-2015	41
15	Codpa	-18,83	-69,74	1870	1969-2015	47
16	Esquia	-18,94	-69,53	2170	1976-2014	39
17	Enquelca (Ex-Caraguano)	-19,23	-68,80	3900	1985-2015	27
18	Colchane (T. Isluga)	-19,28	-68,64	3700	1976-2015	39
19	Camia	-19,31	-69,42	2500	1971-2015	42
20	Cancosa	-19,86	-68,60	3930	1977-2011	34
21	Poroma	-19,87	-69,18	2880	1975-2015	41
22	Lagunillas (Pampa Lirima)	-19,93	-68,84	4020	1983-2014	31
23	Huaytani	-20,00	-68,57	3950	1983-2015	31
24	Parca	-20,01	-69,20	2650	1978-2015	38
25	Coyacagua	-20,05	-68,81	4013	1962-2015	54
26	Copaquire	-20,93	-68,89	3540	1978-2010	29
27	Ujina	-20,97	-68,63	4300	1974-2015	36
28	Ollagüe	-21,22	-68,25	3700	1972-2014	31
29	Cebollar	-21,53	-68,34	3730	1976-2006	27
30	Lequena	-21,66	-68,66	3320	1984-2014	31
31	Ascotan	-21,73	-68,28	3970	1975-2014	37
32	Parshall N 2	-21,94	-68,52	3318	1970-2012	43
33	Conchi Viejo	-21,95	-68,72	3491	1974-2014	38
34	Ojos San Pedro	-21,97	-68,31	3800	1979-2014	36
35	Conchi Embalse	-22,03	-68,62	3010	1976-2014	39
36	Inacaliri	-22,03	-68,07	4040	1970-2014	45
37	Cupo	-22,11	-68,32	3370	1979-2014	36
38	Linzor	-22,23	-68,02	4100	1974-2014	41
39	Toconce	-22,26	-68,17	3310	1973-2014	42
40	Ayquina	-22,28	-68,32	3031	1968-2014	47
41	Salado Embalse	-22,29	-68,20	3200	1976-2015	40
42	Caspana	-22,34	-68,21	3260	1972-2007	36
43	Chiu-Chiu	-22,34	-68,64	2524	1975-2014	40
44	El Tatio	-22,37	-68,01	4370	1978-2015	37
45	Calama	-22,45	-68,90	2300	1967-2015	46
46	Río Grande	-22,65	-68,17	3250	1978-2014	37
47	San Pedro de Atacama	-22,91	-68,20	2450	1961-1989	29
48	Toconao Experimental	-23,19	-68,00	2500	1976-2007	32
49	Baquedano	-23,33	-69,84	1032	1976-2015	36
50	Camari	-23,41	-67,96	2700	1980-2014	35
51	Socaire	-23,59	-67,89	3251	1975-2014	40
52	Antofagasta	-23,60	-70,39	50	1979-2015	37
53	Peine	-23,68	-68,06	2460	1975-2014	40
54	Aguas Verdes	-25,40	-69,96	1560	1988-2014	27
55	Chilcaya Retén	-18,79	-69,08	4279	1980-2008	26
56	Huatacondo	-20,93	-69,05	2299	1979-2006	28
57	Chacalluta Arica Ap.	-18,35	-70,34	63	1958-2015	58
58	Diego Aracena Iquique Ap.	-20,54	-70,18	52	1981-2015	35
59	Cerro Moreno Antofagasta Ap.	-23,45	-70,44	113	1950-2015	66
60	El Loa Calama Ad.	-22,50	-69,90	2293	1967-2015	48

Fuente: Elaboración propia basada en DGA y DMC.

de Chile, siendo revisados para evitar problemas relativos a la existencia de lagunas y respecto de su continuidad temporal. La longitud media de las series es de cuarenta años, cuyo período de registro de mayor continuidad abarca desde 1972 a 2013.

No se cuenta con una base de metadatos de las estaciones meteorológicas, por lo que, así como ocurre en el estudio de Bennett *et al.* (2016), se asume que todas las series son homogéneas. Para analizar las tendencias se aplicó el test de Mann-Kendall (Mann 1945; Kendall 1975), el que permite la detección de las tendencias estadísticamente significativas. Para estimar la magnitud de la tendencia se utilizó el método de la pendiente de Sen (Sen 1968). El test de Mann-Kendall es un test no paramétrico que evalúa el comportamiento monótono de una serie de datos, y es muy adecuado para el estudio de la precipitación, pues no requiere normalidad ni linealidad. En este artículo se consideran tendencias significativas aquellas que alcancen el primer nivel de confianza, 90% ($p < 0,1$). La pendiente de Sen es un método no paramétrico robusto que evalúa tendencias, con la ventaja de permitir la existencia de lagunas de datos.

Posteriormente se compararon los resultados de las tendencias observadas con el peor escenario, el RCP8.5 (*Representative Concentration Pathways* en inglés) del IPCC para el período 2061-2080 (Sarricolea y Romero 2015). Se obtuvieron simulaciones del clima del IPCC para el mismo período de análisis de la tendencia (1972-2013) y se analizó si las señales detectadas de las estaciones meteorológicas coinciden en alguna medida con el ensamble de simulaciones de IPCC. Para las simulaciones se recurrió al uso de *Climate Explorer* (www.climexp.knmi.nl) que es una aplicación para la investigación climática administrada por el Real Instituto Meteorológico de los Países Bajos (KNMI). Contiene una colección completa de conjuntos de datos climáticos y herramientas de análisis del CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*). Se descargó el promedio de la precipitación en mm/día para 39 simulaciones, históricas y proyectadas del RCP8.5, correspondientes al cuadrante del Norte Grande (17°S, 25°S, 68°W, 71°W).

Resultados

Análisis de la precipitación y sus tendencias

Como se ha señalado anteriormente, la precipitación anual media fluctúa considerablemente

en el área de estudio, variando entre 0,59 mm en Iquique (costa) y 394,79 mm en Cotacotani (altiplano andino; Tabla 2). Destaca la alta correlación entre la cantidad de lluvias medias anuales y su distribución zonal y altitudinal, con valores de Pearson de -0,71 y +0,71 ($p < 0,01$) en ambos casos. El Coeficiente de Variación y la altitud se relacionan mejor ($r = 0,87$), diferenciando la costa (alta variabilidad) del Altiplano (moderada variabilidad), lo que se aprecia en la Figura 2.

Respecto de las tendencias, se observa que, de las sesenta estaciones meteorológicas analizadas, solo en trece resultan significativas al 90%, y, de ellas, solo siete al 95% (Tabla 2). La magnitud de los cambios señala tendencias a la reducción de las precipitaciones en once de estas trece estaciones meteorológicas, con valores entre -44,0 y -7,95 mm/década. Dos estaciones ubicadas en el área de estudio, Poroma y San Pedro de Atacama, presentan tendencias significativas al alza de las precipitaciones, con 9,15 y 7,18 mm/década, respectivamente.

Geográficamente, la Figura 3 muestra que estaciones meteorológicas costeras y localizadas en la Depresión intermedia no manifiestan ninguna tendencia de cambio, mientras que las de precordillera y Altiplano exhiben tendencias generales a la reducción de la precipitación, con la excepción de Parinacota, en el Altiplano de Arica. Considerando las tendencias significativas, en el Altiplano se registran descensos de la precipitación, y aumentos para la precordillera de Tarapacá y Antofagasta.

Comparación con las proyecciones del AR5

La aplicación del método de anomalías y la evaluación de los cambios en la variabilidad de las precipitaciones en el período 2061-2080 coincide con las proyecciones del último informe del IPCC (2013) que prevé considerables descensos de la precipitación en el Altiplano (Sarricolea y Romero 2015), sobre todo en el extremo norte y sur de las regiones de Arica-Parinacota y Tarapacá. La situación no difiere de lo señalado en la región de Antofagasta por Santibáñez *et al.* (2016) para mediados del siglo XXI. No obstante, al confrontar la serie de las estaciones con las simulaciones de todos los modelos RCP8.5 se aprecia que en el período de registro común no se advierten coincidencias, e incluso se observan comportamientos contradictorios, lo que implica una alta incertidumbre, incluso en el período histórico (Figura 4), para la interpretación

Tabla 2: Estaciones meteorológicas analizadas. La tendencia aparece en mm/década.

ID	Nombre estación	Período	Test Z	Q década	Sig.	P	Desv. P	CV
1	Visviri	1969-2015	-1,52	-28,13	no sig.	277,68	142,60	0,51
2	Villa Industrial (Tacora)	1975-2015	-2,19	-44,00	95	283,17	164,76	0,58
3	Humapalca	1972-2015	-0,84	-13,28	no sig.	289,64	151,87	0,52
4	Alcérrecá	1971-2015	-1,91	-25,00	90	204,87	102,29	0,50
5	Caquena	1970-2015	0,36	8,88	no sig.	369,19	183,15	0,50
6	Cotacotani	1963-2008	0,23	4,26	no sig.	394,79	141,64	0,36
7	Putre	1978-2008	0,61	15,38	no sig.	197,58	108,25	0,55
8	Parinacota Conaf Dga	1933-2015	-0,70	-5,52	no sig.	313,25	131,10	0,42
9	Chucuyo Retén	1961-2015	0,30	3,47	no sig.	314,42	139,12	0,44
10	Chungara Retén	1963-2015	-1,17	-11,61	no sig.	282,66	122,12	0,43
11	Central Chapiquia	1963-2015	1,07	9,22	no sig.	140,64	106,21	0,76
12	Belén	1968-2015	-0,89	-7,50	no sig.	147,87	114,48	0,77
13	Guallatire	1969-2015	-1,93	-25,63	90	258,02	137,13	0,53
14	Tignamar	1975-2015	1,09	11,10	no sig.	120,30	97,19	0,81
15	Codpa	1969-2015	0,54	0,77	no sig.	17,04	15,45	0,91
16	Esquia	1976-2014	0,31	2,27	no sig.	42,76	39,56	0,93
17	Enquelca (Ex-Caraguano)	1985-2015	-0,71	-11,94	no sig.	113,18	69,35	0,61
18	Colchane (T. Isluga)	1976-2015	-0,35	-2,89	no sig.	121,03	80,42	0,66
19	Camia	1971-2015	1,60	3,50	no sig.	34,31	47,56	1,39
20	Cancosa	1977-2011	-0,27	-7,00	no sig.	150,25	114,45	0,76
21	Poroma	1975-2015	2,34	9,15	95	44,33	35,86	0,81
22	Lagunillas (Pampa Lirima)	1983-2014	-0,02	-0,18	no sig.	132,27	71,61	0,54
23	Huaytani	1983-2015	-0,03	-1,36	no sig.	139,22	111,63	0,80
24	Parca	1978-2015	1,01	2,82	no sig.	28,12	31,42	1,12
25	Coyacagua	1962-2015	0,27	1,62	no sig.	135,28	79,02	0,58
26	Copaquire	1978-2010	0,73	5,73	no sig.	79,94	110,61	1,38
27	Ujina	1974-2015	-1,54	-18,85	no sig.	153,63	104,58	0,68
28	Ollagüe	1972-2014	-4,03	-28,67	99	62,13	59,22	0,95
29	Enbollar	1976-2006	0,13	0,97	no sig.	55,30	38,63	0,70
30	Lequena	1984-2014	-1,05	-7,14	no sig.	87,35	122,90	1,41
31	Ascotan	1975-2014	-2,43	-12,52	95	65,67	45,42	0,69
32	Parshall N 2	1970-2012	0,26	0,48	no sig.	29,65	25,50	0,86
33	Conchi Viejo	1974-2014	0,04	0,06	no sig.	37,31	38,71	1,04
34	Ojos San Pedro	1979-2014	-3,08	-18,39	97	53,78	42,42	0,79
35	Conchi Embalse	1976-2014	-0,38	-0,63	no sig.	18,17	16,97	0,93
36	Inacaliri	1970-2014	-1,16	-10,44	no sig.	119,27	88,65	0,74
37	Cupo	1979-2014	0,75	4,23	no sig.	70,00	74,16	1,06
38	Linzor	1974-2014	-1,94	-25,64	90	151,41	108,27	0,72
39	Toconce	1973-2014	-1,81	-15,36	90	94,10	77,30	0,82
40	Ayquina	1968-2014	-0,68	-1,79	no sig.	38,54	42,65	1,11
41	Salado Embalse	1976-2015	-0,97	-6,03	no sig.	66,76	68,41	1,02
42	Caspana	1972-2007	-1,89	-17,09	90	85,00	82,85	0,97
43	Chiu-Chiu	1975-2014	-0,60	-0,26	no sig.	5,27	5,42	1,03
44	El Tatío	1978-2015	-1,54	-17,52	no sig.	133,33	101,62	0,76
45	Calama	1967-2015	0,44	0,00	no sig.	4,05	4,79	1,18
46	Río Grande	1978-2014	-0,59	-3,70	no sig.	68,63	57,17	0,83
47	San Pedro de Atacama	1961-1989	1,65	7,18	90	28,00	27,89	1,00
48	Toconao Experimental	1976-2007	-2,00	-7,95	95	32,78	31,09	0,95
49	Baquesano	1976-2015	-0,03	0,00	no sig.	1,83	3,86	2,11
50	Camar	1980-2014	-1,56	-7,08	no sig.	34,12	31,88	0,93
51	Socaire	1975-2014	-2,03	-9,34	95	38,96	38,36	0,98
52	Antofagasta	1979-2015	-0,70	0,00	no sig.	4,76	9,38	1,97
53	Peine	1975-2014	-1,14	-2,38	no sig.	19,56	18,82	0,96
54	Aguas Verdes	1988-2014	1,36	0,00	no sig.	6,13	9,99	1,63
55	Chilcaya Retén	1980-2008	-0,62	-27,75	no sig.	263,87	137,42	0,52
56	Huatacondo	1979-2006	0,67	1,23	no sig.	13,39	15,06	1,12
57	Chacalluta Arica Ap.	1958-2015	0,34	0,00	no sig.	1,63	2,89	1,78
58	Diego Aracena Iquique Ap.	1981-2015	-0,84	0,00	no sig.	0,59	1,83	3,09
59	Cerro Moreno Antofagasta Ap.	1950-2015	-0,21	0,00	no sig.	3,55	6,10	1,72
60	El Loa Calama Ad.	1967-2015	1,11	0,17	no sig.	6,19	9,43	1,52

Fuente: Elaboración propia.

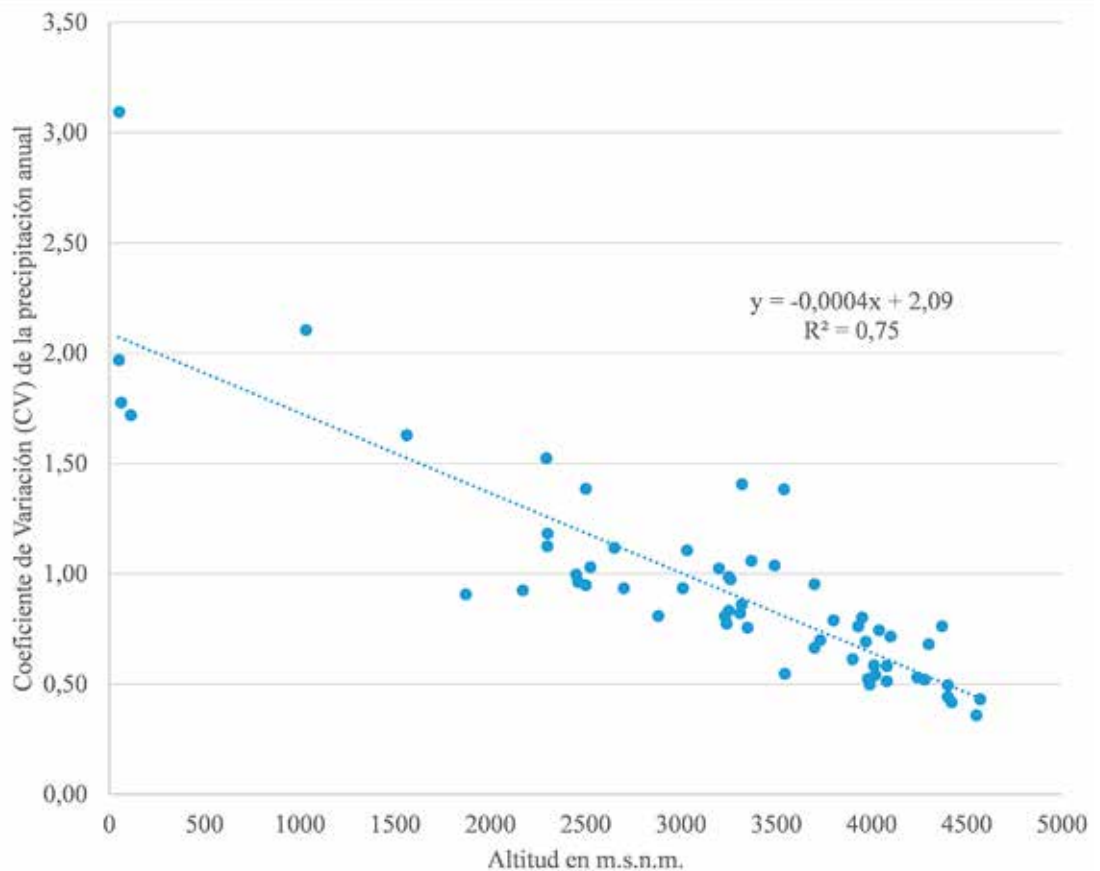


Figura 2: Correlación entre la altitud y el Coeficiente de Variación.

de los cambios en las precipitaciones de esta región chilena. Esto grafica las complicaciones de establecer relaciones entre las tendencias del clima regional y la actuación posible de forzantes radiativos en las zonas áridas.

Discusión y conclusiones

Tratándose de paisajes complejos debido a las condiciones topográficas (altitud y exposición), en el Norte de Chile se manifiestan variabilidades espaciales y temporales de los climas, que caracterizan condiciones topoclimáticas que complementan o modifican las estimaciones de escala global, como lo anuncian las diferencias encontradas entre las zonas precordilleranas y altiplánicas. De mantenerse las tendencias de reducción de la precipitación encontradas en este estudio a escala regional, y señaladas por Bennett *et al.* (2016), es de esperar un aumento de la escasez de agua de origen pluvial y con ello

la generación de problemas crecientes de disponibilidad del recurso para enfrentar las demandas, representadas en estas regiones, principalmente por la minería, urbanización y conservación de la naturaleza.

La región más afectada es y será el Altiplano andino (Sarricolea y Romero 2015), que constituye la única fuente de recarga moderna de las cuencas. De alcanzar las reducciones de precipitación, que aquí se advierten, se podrían materializar condiciones desérticas en estos paisajes a fines del siglo XXI.

La precordillera y parte de la Depresión Intermedia manifiestan, en dos estaciones, aumentos significativos de la precipitación. Ello es muy similar a lo proyectado por el AR5 (Sarricolea y Romero (2015).

Aún permanece la incertidumbre respecto de si se mantendrán las tendencias, e incluso cómo se comportarán otras fuentes de recursos hídricos,

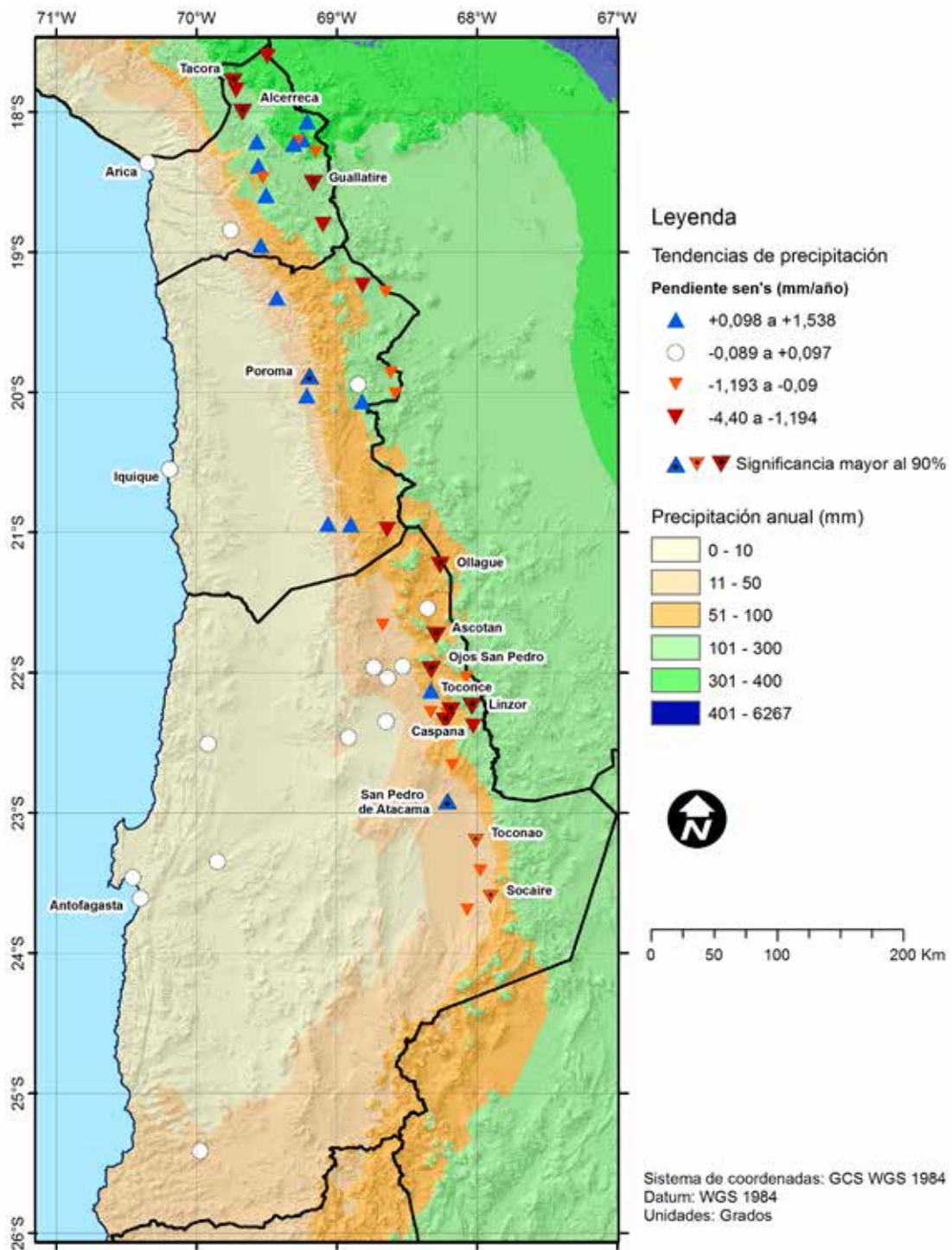


Figura 3: Mapa de tendencias de la precipitación del Norte Grande de Chile.

Fuente: Elaboración propia.

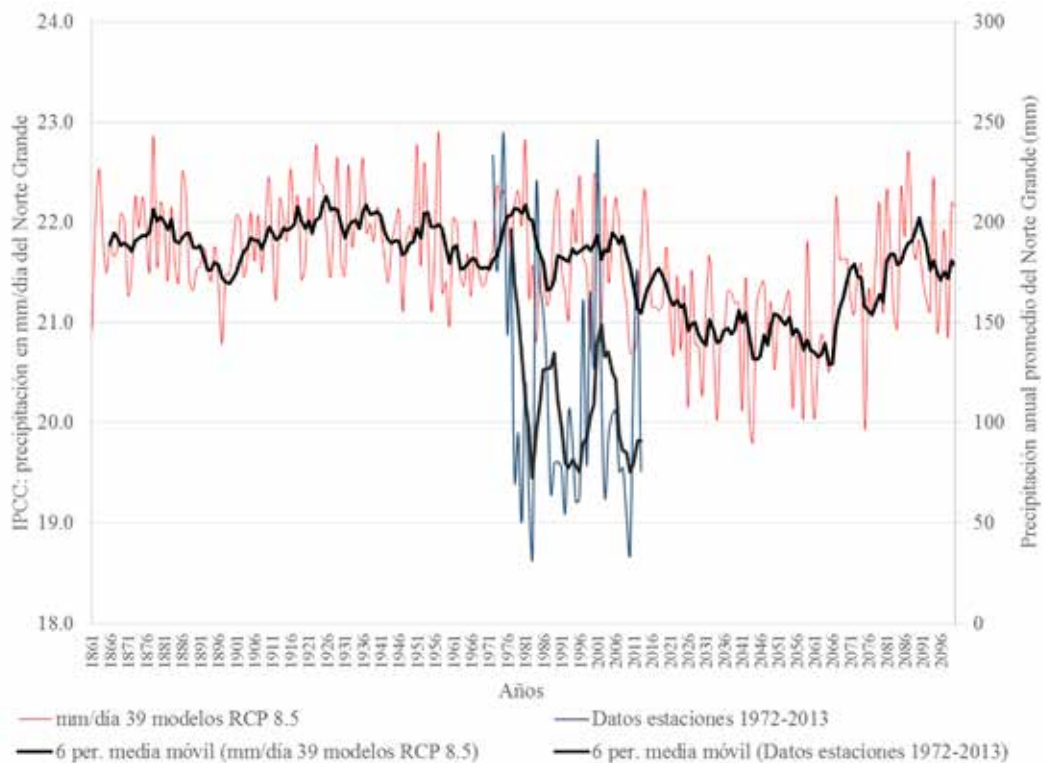


Figura 4: Precipitación histórica y proyectada (1861-2100) por el IPCC (CMIP5) para el área de estudio y el promedio observado por las estaciones meteorológicas usadas (1972-2013).

Fuente: Elaboración propia.

como las camanchacas o neblinas costeras. En este sentido, se debe considerar que este trabajo comparó cómo las tendencias en la precipitación se asemejan a alguno de los más de treinta modelos proyectados de cambio climático, lo que constituye un ejercicio metodológico que ayuda a entender la existencia de trayectorias observadas en las tendencias, y que se podrían agudizar en el futuro. No obstante, la incertidumbre es tan grande que no es posible asegurar que los cambios proyectados, más aún a fines de siglo XXI, sean totalmente atribuibles al cambio climático, y diferenciar la fracción que puede ser parte de la variabilidad natural del sistema. Las proyecciones del IPCC son ensambles que solo sugieren probabilidades de la dirección o trayectoria de cambio (Curry y Webster, 2011), pero en general no consideran comportamientos locales como los registrados por estaciones meteorológicas ubicadas en sitios de topografía compleja. De cualquier modo y debido al predominio de la variabilidad temporal y espacial de los climas en esta sección de Chile,

es recomendable adoptar medidas precautorias y gestionar los ambientes y territorios en términos de incrementar sus niveles de resiliencia y capacidad adaptativa.

Es necesario mantener y aumentar la red de estaciones meteorológicas en el Norte Grande, y con ello mejorar las posibilidades de observar tendencias y ciclos que permitan mejorar las proyecciones de cambio climático.

Agradecimientos: Los autores quieren agradecer a la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) y a la Dirección General de Aguas (DGA) por la cesión de los datos. También el apoyo institucional del Convenio de Desempeño UTA-MINEDUC, del proyecto UTA-Mayor 5744-16, de los proyectos FONDECYT 11130629, 1150701 y 11160059, y del Grupo de Climatología (2014SGR300, Generalitat de Catalunya). Asimismo, también se agradece a los evaluadores del presente artículo por sus observaciones.

Referencias Citadas

- Bennett, M., New, M., Marino, J. & Sillero-Zubiri C.
2016 Climate complexity in the Central Andes: A study case on empirically-based local variations in the dry Puna. *Journal of Arid Environments* 128:40-49.
- Curry, J. A., & Webster, P. J.
2011 Climate science and the uncertainty monster. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(12):1667-1682.
- Fuenzalida, H., Aceituno, P., Falvey, M., Garreaud, R.D., Rojas, M. & Sánchez, P.
2007 Study on climate variability for Chile during the 21st century. *Technical Report prepared for the National Environmental Committee*. Santiago de Chile.
- Houston, J.
2006 Variability of precipitation in the Atacama Desert: its causes and hydrological impact. *International Journal of Climatology*, 26(15): 2181-2198.
- IPCC
2013 Climatic Change 2013: *The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, New York.
- Jaksic, F. M., Marquet, P. A., & González, H.
1997 Una perspectiva ecológica sobre el uso del agua en el Norte Grande. *Estudios públicos*, 68: 171-195.
- Kendall, M.G.
1975 Rank correlation methods. London: Charles Griffin.
- Latorre, C., Betancourt, J. L., Rech, J. A., Quade, J., Holmgren, C., Placzek, C., Maldonado, A., Vuille, M. & Rylander, K.
2005 *Late Quaternary history of the Atacama Desert. 23 S: the archaeology and environmental history of the southern deserts*, 73-90.
- Mann, H.B.
1945 Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 13:245-259.
- Minvielle, M., & Garreaud, R. D.
2011 Projecting rainfall changes over the South American Altiplano. *Journal of Climate*, 24(17): 4577-4583.
- Núñez, L., Grosjean, M., & Cartajena, I.
2002 Human occupations and climate change in the Puna de Atacama, Chile. *Science*, 298(5594): 821-824.
- Romero, H., & Kampf, S.
2003 Impacts of Climate Fluctuations and Climate Changes on the Sustainable Development of the Arid Norte Grande in Chile. In *Climate and Water*, 83-115. Springer Netherlands.
- Santibáñez, F., Santibáñez, P. & González, P.
2016 Elaboración de una base digital del clima comunal de Chile: línea base (1980-2010) y proyección al año 2050. Estudio encargado por el Ministerio del Medio Ambiente Departamento de Cambio Climático, Chile.
- Santoro, C. M., Osorio, D., Standen, V. G., Ugalde, P. C., Herrera, K., Gayó, E. M., Rothhammer, F. & Latorre, C.,
2011 Ocupaciones humanas tempranas y condiciones paleoambientales en el Desierto de Atacama durante la transición Pleistoceno-Holoceno. *Boletín de arqueología PUCP*, 15: 295-314.
- Sarricolea, P., & Romero, H.
2015 Variabilidad y cambios climáticos observados y esperados en el Altiplano del norte de Chile. *Revista de geografía Norte Grande*, 62: 169-183.
- Sen, P.K.
1968 Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63:1379-1389.
- Schulz, N., Bosier, J.P. & Aceituno, P.
2011 Climate change along the arid coast of northern Chile. *International Journal of Climatology* 32(12):1803-1814.
- Souvignet, M., Oyarzún, R., Verbist, K. M., Gaese, H., & Heinrich, J.
2012 Hydro-meteorological trends in semi-arid north-central Chile (29-32 S): water resources implications for a fragile Andean region. *Hydrological Sciences Journal*, 57(3): 479-495.
- Trenberth, K. E.
2011 Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47(1-2): 123-138.