

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**ELEMENTOS DE ANÁLISIS PARA EVALUAR LA NECESIDAD DE
ACTUALIZACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO. VARIABILIDAD DE LA
PRECIPITACIÓN ANUAL EN CHILE.**

VICTOR CRUZ ¹
RICARDO GONZÁLEZ V. ²
CRISTIAN HADAD W. ³
RODRIGO MEZA ⁴

RESUMEN:

En el presente trabajo se recopilan y analizan estadísticas de precipitaciones anuales en distintas zonas de Chile, comprendidas entre las III y XII Región, con la finalidad de detectar posibles cambios de tendencia en las series de precipitaciones anuales y entregar elementos concretos para analizar la necesidad de actualizar el balance hídrico de Chile.

Se seleccionaron 29 estaciones a lo largo de todo Chile, de la DGA (Dirección General de Aguas) y la DMC (Dirección Meteorológica de Chile) con una longitud de registro promedio cercano a 85 años. Los criterios de selección considerados fueron los siguientes: cubrir distintas condiciones climáticas (latitudes entre 27° y 53° S y altitudes comprendidas entre los 5 y los 1.290 msnm) y que la estación, en lo posible, hubiese sido utilizada en el Balance Hídrico de Chile (1987).

A continuación, se realizaron análisis estadísticos del comportamiento de dichas series. Complementariamente, se efectuó el cálculo de los promedios móviles y se utilizó el test de Mann – Kendall para detectar posibles cambios de tendencia en las estaciones analizadas. Finalmente, en función de los resultados obtenidos, se presentan comentarios y/o recomendaciones de los autores de este trabajo.

¹Ingeniero Civil, Sociedad del Canal de Maipo, victor.cruzv@gmail.com

²Ingeniero Civil, Endesa, Chile, rjgv@endesa.cl

³Ingeniero Civil, Endesa, Chile, chw@endesa.cl

⁴Ingeniero Civil, MSc, Eridanus Ltda, Chile, romeza@eridanus.cl

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como principal objetivo analizar cambios de tendencia en las series de precipitaciones anuales producto de la variabilidad propia de este tipo de datos y que podrían ser acentuadas por efecto del cambio climático global. Lo anterior, se aplica directamente a analizar la necesidad de actualizar el balance hídrico de Chile. Cabe señalar que el presente trabajo se enmarca dentro del desarrollo de los temas que han sido señalados y comentados en las reuniones de trabajo de la Comisión SOCHID “Gestión de cuencas y recursos hídricos”.

Para abordar el problema, se busca detectar si el fenómeno señalado en el párrafo anterior está presente en los registros recopilados en las estadísticas pluviométricas de distintas zonas de Chile mediante el uso de los registros de amplia extensión (longitud promedio igual a 85 años).

Relacionado con lo anterior, es importante mencionar que los resultados obtenidos por el modelo PRECIS – DGF (DGF, 2006) mostrarían, dependiendo del escenario, disminuciones de las precipitaciones en la zona del norte chico (latitud Sur: 26° - 31°) y zona centro – sur (latitud Sur: 31° - 44°) de Chile que oscilarían entre un 25% y 40%. Tendencias decrecientes de la precipitación anual, en la zona comprendida entre latitudes 30° y 40° S, han sido reportadas, entre otros, por Aceituno (1993) y Garreud (2008).

El análisis realizado consideró la recopilación, análisis e interpretación de los registros pluviométricos (series de precipitaciones anuales) de 29 estaciones ubicadas en distintas zonas de Chile, con registros de medición de más de 38 años. Para cada serie, se consideró la realización de análisis de los principales parámetros estadísticos de interés, considerando lo siguiente: 1) períodos estadísticos de 30 años cada uno, 2) cálculo de promedios móviles, 3) realización del test de tendencia de Mann-Kendall y 4) comparación de la precipitación anual obtenida del balance hídrico y la del período estadístico más reciente.

Lo anterior busca detectar un posible aumento y/o disminución de las precipitaciones anuales en el último período de tiempo y apoyarlo sobre la base de análisis relacionados. Se destaca la importancia de estos valores, considerando la intrínseca relación existente con los recursos hídricos disponibles.

2. INFORMACIÓN UTILIZADA

La información utilizada en el presente estudio consistió en la recopilación de series de precipitaciones anuales de 29 estaciones pertenecientes a la Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas de Chile y a la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). La ubicación geográfica de las estaciones consideradas en el análisis varía entre la III y la XII Región del país

Tal y como se observa en la Tabla 1, las 29 estaciones utilizadas cuentan con registros de longitud de 38 a 146 años, siendo las estaciones de mayor longitud las pertenecientes a la Dirección Meteorológica de Chile. La longitud media de las estadísticas utilizadas es de 84,9 años, con una desviación estándar de 30,1 años. La precipitación media anual de las estadísticas analizadas es de 792 mm/año, con un valor mínimo de 20 mm/año en la estación Copiapó (latitud Sur: 27° 18’) y un máximo de 2.462 mm/año en la estación Armerillo (latitud Sur: 35° 42’).

Tabla 1.- Características Estadísticas de precipitaciones anuales utilizadas.

Estación	Institución	Región	Latitud	Longitud	Altitud	Inicio	N° Años
Copiapó	DMC / DGA	III	27° 18'	70° 25'	291	1888	124
La Serena	DMC	IV	29° 54'	71° 12'	142	1869	143
La Serena (Esc. Agrícola)	DGA	IV	29° 54'	71° 15'	15	1971	41
Ovalle	DGA	IV	30° 36'	71° 12'	220	1971	41
Pabellón	DGA	IV	30° 24'	70° 34'	2020	1968	44
Cogotí 18	DGA	IV	31° 05'	70° 57'	905	1943	69
Cogotí Emb.	DGA	IV	31° 00'	71° 05'	650	1943	69
Las Ramadas	DGA	IV	31° 01'	70° 34'	1350	1943	69
Tascadero	DGA	IV	31° 01'	70° 37'	1230	1961	51
Recoleta Emb.	DGA	IV	30° 30'	71° 06'	400	1943	69
Illapel	DGA	IV	31° 38'	71° 11'	290	1974	38
La Ligua	DMC	V	32° 27'	71° 16'	58	1912	100
Riecillos	DGA	V	32° 55'	70° 21'	1290	1930	82
Valparaíso	DMC	V	33° 01'	71° 38'	41	1899	113
Quinta Normal	DMC	RM	33° 26'	70° 41'	520	1866	146
Rapel	DGA	VI	33° 56'	71° 44'	16	1940	72
Rancagua	ENDESA / DGA(*)	VI	34° 10'	70° 45'	500	1910	102
La Rufina	DGA	VI	34° 44'	70° 44'	735	1930	82
Armerillo	ENDESA / DGA(*)	VII	35° 42'	71° 04'	530	1917	95
Linares	ENDESA / DGA(*)	VII	35° 50'	71° 35'	157	1930	82
Bullileo Emb.	DGA	VII	36° 17'	71° 24'	600	1930	82
Concepción	DMC	VIII	36° 46'	73° 03'	12	1876 (1892)	120
Fundo Atacalco	DGA	VIII	36° 54'	71° 34'	730	1931	81
Lumaco	DGA	IX	38° 09'	72° 54'	60	1948	64
Lago Ranco	DGA	X	40° 19'	72° 29'	100	1958	54
Valdivia	DMC	X	39° 48'	73° 14'	5	1853 (1900)	112
San Pablo	DMC	X	40° 25'	73° 00'	60	1921	91
Pto. Montt	DMC	X	41° 25'	73° 05'	85	1861 (1909)	103
Punta Arenas	DMC	XII	53° 00'	70° 51'	37	1888	124

(*): En el trabajo de D'Arcangeli (2007) se consideró información proporcionada por ENDESA.

Una buena parte de los datos utilizados en el presente trabajo fueron obtenidos del trabajo de título de D'Arcangeli (1997) y González y Dussaubat (2010). En el trabajo de D' Arcangeli se encuentran datos de precipitaciones hasta el año hidrológico 1991/92 (inicio año hidrológico en Abril), a partir de dicho año en adelante dichos datos fueron complementados con los disponibles en los “anuarios meteorológicos” de la DMC disponibles hasta el año 2012. En el trabajo señalado en segundo término se actualizaron varias series de precipitaciones anuales hasta el año 2006/07. Finalmente, el set de datos base fue complementado con los registros de las estaciones La Serena (esc. Agrícola), Ovalle, Pabellón, Cogotí 18, Cogotí embalse, Las Ramadas, Tascadero, Recoleta Embalse, Illapel, Riecillos, Rancagua, Armerillo, Linares, Embalse Bullileo, Fundo Atacalco, Lumaco y lago Ranco, los cuales fueron obtenidos del Centro de Información de Recursos Hídricos (CIRH) de la DGA

Los datos de precipitaciones disponibles, en el período comprendido entre los años 1992/93 a 2011/12, fueron procesados y verificados en su consistencia de acuerdo a los supuestos y consideraciones establecidas en el trabajo de D'Arcangeli (1997). Como criterio general, se puede señalar que se establecieron patrones regionales para revisar la consistencia de los datos disponibles y corregir los registros en caso de que fuese necesario. A modo de ejemplo, para las regiones III y IV se chequeó la consistencia considerando un patrón regional compuesto por las estaciones La Serena, Cogotí y Las Ramadas, el cual permitió validar los registros disponibles para dicha zona.

3. METODOLOGÍA ADOPTADA

3.1 ANÁLISIS DE LA PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL UTILIZANDO PERÍODOS DE 30 AÑOS

Para analizar la variación de la precipitación media anual en función de distintos períodos temporales de 30 años de duración, se definieron los siguientes períodos de análisis: 1862/63 - 1891/92, 1892/93 - 1921/22, 1922/23 - 1951/52, 1952/53 - 1981/82 y 1982/83 - 2011/12. Para cada uno de los períodos indicados se calculó la media y la desviación estándar correspondiente a cada muestra.

3.2 ANÁLISIS DE TENDENCIA UTILIZANDO PROMEDIOS MÓVILES

Para efectuar el análisis de las tendencias de las precipitaciones anuales en función del tiempo, se calcularon los promedios móviles asociados a períodos de 30 años de extensión, los cuales permiten reducir el posible efecto de variaciones puntuales de las mediciones y por tanto analizar de mejor forma la variabilidad del fenómeno.

3.4 ANÁLISIS DE TENDENCIA UTILIZANDO EL TEST DE MANN - KENDALL

El test de Mann - Kendall se basa en el cálculo del estadístico S (ecuación 1), el cual mide la dependencia monotónica de y (variable en análisis) con respecto a x (tiempo). Este test se calcula como se indica a continuación:

$$S = P - M \quad [1]$$

Donde:

P = "número de aumentos", es el número de veces que y se incrementa cuando x se incrementa o el número de pares tal que $y_i < y_j$ para todo $i < j$,

M = "número de disminuciones," es el número de veces que y decrece cuando x decrece, o el número de pares tal que $y_i > y_j$ para todo $i < j$.

En las expresiones anteriores, se tiene $i = 1, \dots, (n - 1)$ y $j = (i + 1), \dots, n$.

Si el número de datos disponibles es mayor a 10, el test puede ser modificado para que se ajuste a una distribución normal mediante la definición del parámetro Z_s (ecuación 2), que se define a continuación:

$$Z_s = \begin{cases} \frac{S-1}{\sigma_s} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S-1}{\sigma_s} & S < 0 \end{cases} \quad [2], \text{ donde } \sigma_s = \sqrt{\frac{n}{18} \cdot (n-1) \cdot (2 \cdot n + 5)} \quad [3]$$

La hipótesis nula (H_0), de que no hay tendencia, se rechaza con un nivel de significancia α , si $|Z_s| < Z_{crit}$, donde Z_{crit} es el valor de la distribución normal estándar asociada a una probabilidad de excedencia de $\alpha/2$.

3.5 ANÁLISIS DE LA NECESIDAD DE ACTUALIZACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO DE CHILE

En función de la información de precipitaciones recopiladas y procesadas se efectuó un análisis de la variación porcentual de la precipitación media anual entre el período de datos que fueron utilizados para preparar el balance hídrico: años 1951 a 1980 y en el período más reciente comprendido entre los años 1982 –2011.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

4.1. ANÁLISIS DE LA PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL UTILIZANDO PERÍODOS DE 30 AÑOS

Tal y como fue presentado en el acápite 3, las series estadísticas de precipitaciones anuales fueron analizadas considerando distintos períodos de 30 años de duración.

En la Tabla 2 se presenta la precipitación media anual obtenida para los distintos períodos temporales considerados y la variación porcentual de dichos valores con respecto a la precipitación media anual histórica de cada estación analizada.

De los resultados mostrados en la Tabla 2 se puede apreciar que la variación de las precipitaciones anuales no presenta un comportamiento homogéneo en el tiempo para todas las estaciones. Sin embargo, es interesante señalar que en el período comprendido entre los años 1952/53 a 1981/82 se apreció en las estadísticas una tendencia general a la disminución de las precipitaciones anuales, fenómeno que ha sido parcialmente revertido en el siguiente período, comprendido entre los años 1982/83 a 2011/12, donde se han registrado aumentos (Riecillos, Quinta Normal, Rancagua, La Rufina) y disminuciones de la precipitación anual (Copiapó, La Serena, Valdivia y Puerto Montt) en relación a la media histórica.

Para las estaciones Copiapó y La Serena en los últimos 60 años se ha presentado una tendencia a la disminución de la precipitación media anual con respecto a la media histórica registrada, siendo más suave dicho comportamiento en los últimos treinta años. Cabe señalar que dicho período (1982/83 – 2011/12) fue precedido por uno en donde se obtuvieron precipitaciones medias anuales superiores a la media anual histórica.

Para las estaciones pertenecientes a las regiones V, RM, VI (excepto para la estación Riecillos) se ha observado una disminución en los últimos 60 años, la tasa de precipitación media anual se ha reducido a una tasa menor en el último período (1982/83 a 2011/12), dicho comportamiento se presenta gráficamente en la Figura 1. Entre Armerillo y Concepción se

aprecia una mayor diferencia negativa respecto a la media, en los últimos 30 años, respecto al período 1952/53-1981/82, situación que se mantiene con algunas excepciones (Lumaco y San Pablo) hasta Puerto Montt.

Es interesante señalar que para las estaciones de la VII Región, también se detecta una disminución en los últimos 60 años, la cual se ha intensificado levemente en el último período (ver Figura 2).

**Tabla 2.- Variación Módulo Pluviométrico (mm).
Distintos Períodos de 30 años de Extensión.**

Período Temporal	Copiapo (*)	Copiapo (DGA)	La Serena (DMC)	La Serena (Esc. Agrícola)	Ovalle	Pabellón	COGOTI 18	COGOTI EMB.	Las Ramadas	Tascadero	Recoleta Embalse	Illapel	La Ligua	Rieccillos	Valparaíso
1862 / 63 - 1891 / 92			152												
1892 / 93 - 1921 / 22	21		129												542
1922 / 23 - 1951 / 52	32		112										360	567	478
1952 / 53 - 1981 / 82	10		86	79			189	173	247	228	112		311	467	384
1982 / 83 - 2011 / 12	18	21	89	96	110	160	186	178	327	293	112	180	315	560	418
Media Historica	20	18	112	89	111	144	188	173	277	266	111	172	327	528	450
Diferencia Porcentual con respecto a la Media Historica															
1862 / 63 - 1891 / 92			36%												
1892 / 93 - 1921 / 22	2%		15%												20%
1922 / 23 - 1951 / 52	56%		0%										10%	7%	6%
1952 / 53 - 1981 / 82	-50%		-23%	-10%			1%	0%	-11%	-14%	0%		-5%	-12%	-15%
1982 / 83 - 2011 / 12	-12%	17%	-20%	8%	-1%	11%	-1%	3%	18%	10%	0%	5%	-4%	6%	-7%
Período Temporal	Quinta Normal	Rapel	Rancagua	La Rufina	Armerillo	Linares	Embalse Bullileo	Concepción	F. Atacalco	Lumaco	Lago Ranco	Valdivia	San Pablo	Pto. Montt	Punta Arenas
1862 / 63 - 1891 / 92	350														
1892 / 93 - 1921 / 22	369							1348				2663		2053	434
1922 / 23 - 1951 / 52	349		489	1063	2660	982	2274	1352				2506	1401	1976	422
1952 / 53 - 1981 / 82	298	531	441	1064	2430	910	2133	1190	2445	975	1969	2436	1421	1908	382
1982 / 83 - 2011 / 12	337	566	541	1102	2226	881	2082	1074	2321	1036	1921	1938	1416	1604	399
Media Historica	340	549	483	1078	2462	919	2152	1236	2405	1006	1943	2431	1411	1942	409
Diferencia Porcentual con respecto a la Media Historica															
1862 / 63 - 1891 / 92	3%														
1892 / 93 - 1921 / 22	8%							9%				10%		6%	6%
1922 / 23 - 1951 / 52	3%		1%	-1%	8%	7%	6%	9%				3%	-1%	2%	3%
1952 / 53 - 1981 / 82	-12%	-3%	-9%	-1%	-1%	-1%	-1%	-4%	2%	-3%	1%	0%	1%	-2%	-6%
1982 / 83 - 2011 / 12	-1%	3%	12%	2%	-10%	-4%	-3%	-13%	-3%	3%	-1%	-20%	0%	-17%	-2%

Por otra parte, en las estaciones ubicadas en la VIII Región se ha observado una tendencia a la disminución de la precipitación media anual. En tanto que en la X región, en las estaciones Valdivia y Puerto Montt, en los últimos 30 años se ha presentado una marcada tendencia a la disminución de la precipitación anual, la cual es cercana al 20% aprox.

Finalmente, en la estación Punta Arenas (XII Región) se aprecia una leve tendencia a la disminución de la precipitación media anual durante los últimos 30 años.

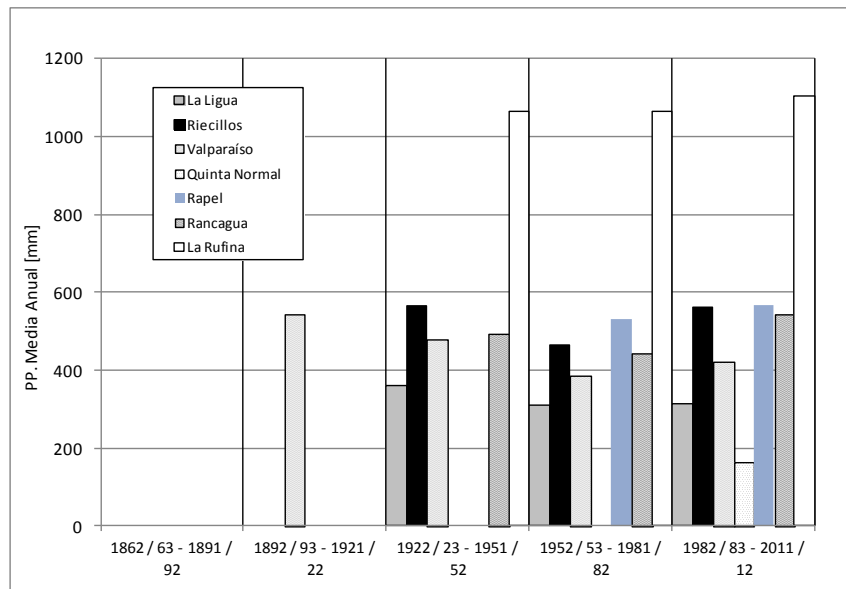


Figura 1.- Precipitación Media Anual (mm/año). Estaciones La Ligua, Riecillos, Valparaíso (V Región), Quinta Normal (Región Metropolitana), Rapel, Rancagua y La Rufina (VI Región).

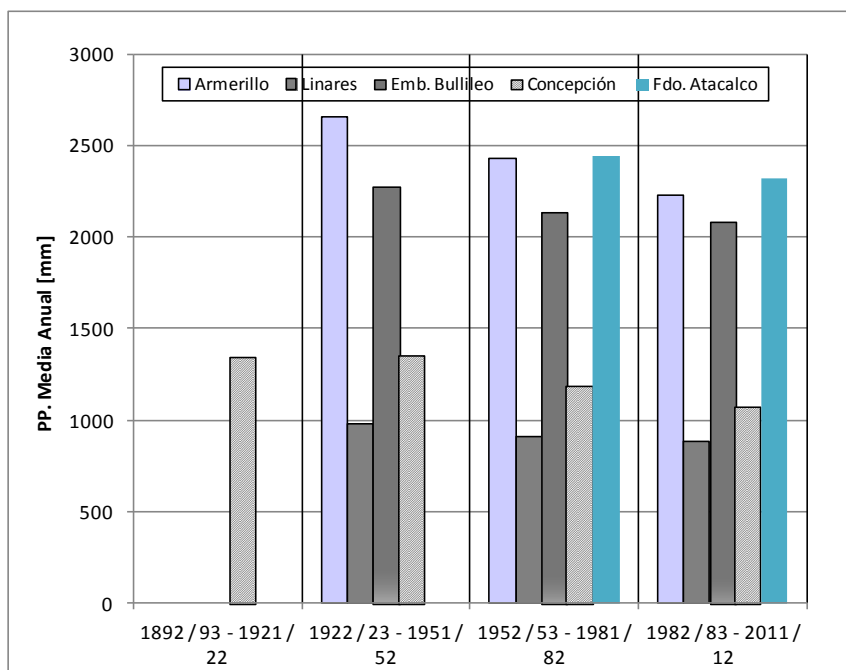


Figura 2.- Precipitación Media Anual (mm/año). Estaciones Armerillo, Linares (VII región) y Emb. Bullileo, Concepción y Fdo. Atacalco (VIII Región).

4.2 ANÁLISIS DE TENDENCIA UTILIZANDO PROMEDIOS MÓVILES

Para el estudio de promedios móviles se utilizó la totalidad de los registros disponibles. Los resultados obtenidos se presentan gráficamente en las Figuras 3 a 6.

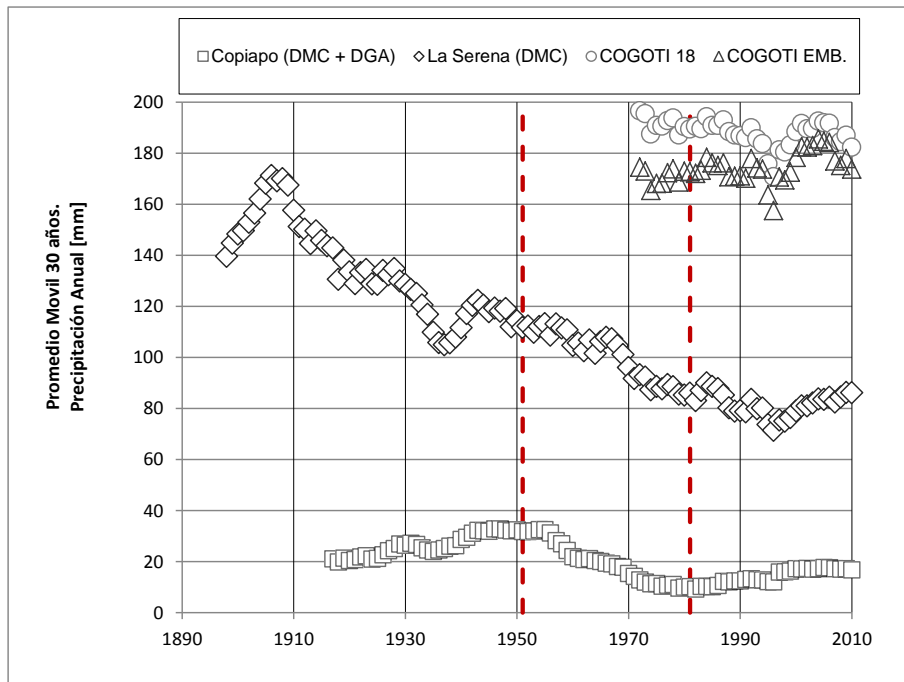


Figura 3.- Promedios móviles de 30 años. Zona norte (III y IV región). En línea punteada se indica el período estadístico considerado en el balance hídrico.

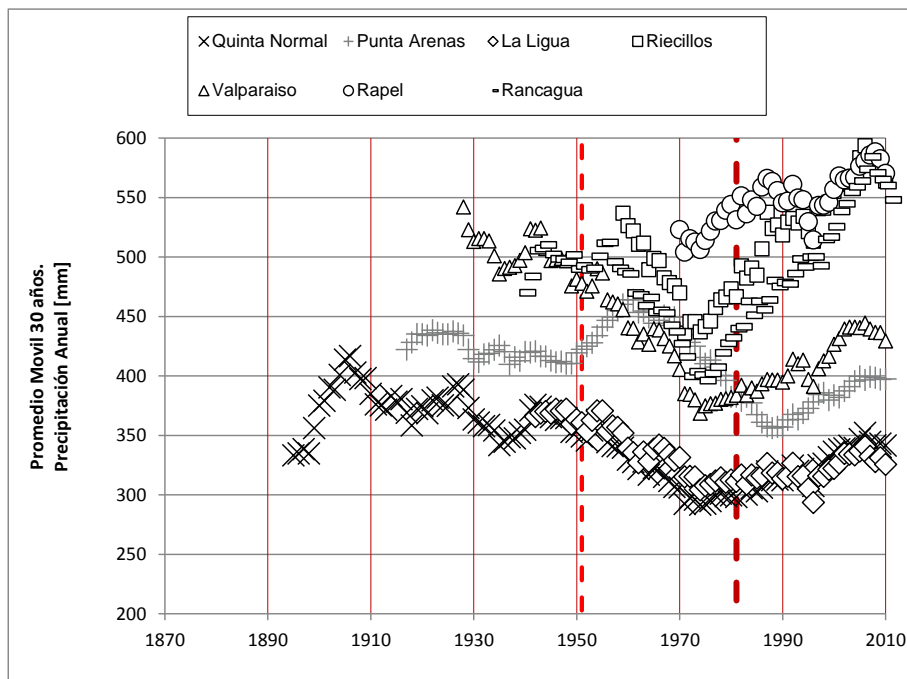


Figura 4.- Promedios móviles de 30 años. Zona centro (V, RM y VI región). En línea punteada se indica el período estadístico considerado en el balance hídrico.

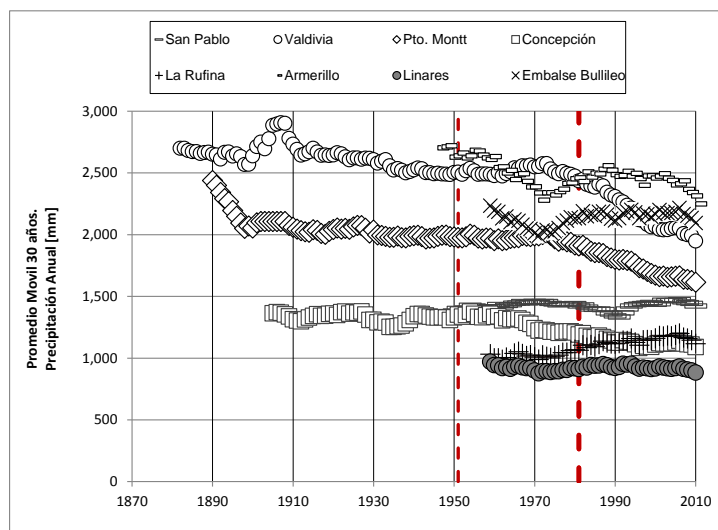
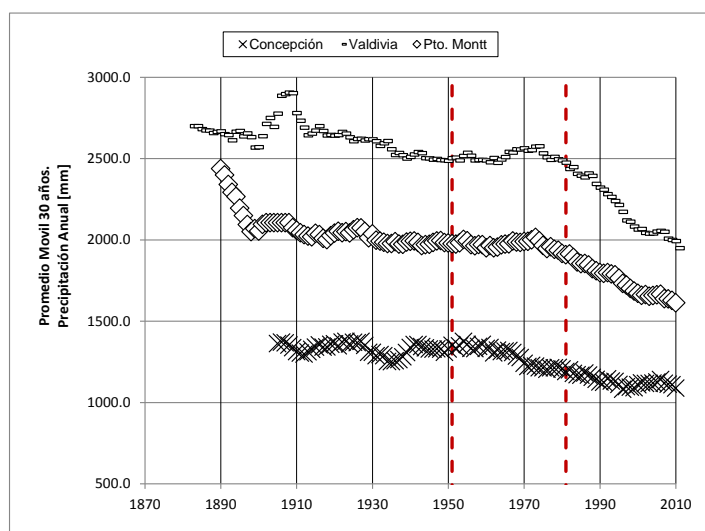


Figura 5.- Promedios móviles de 30 años. Zona centro – sur (VII, VIII y X región). En línea punteada se indica el período estadístico considerado en el balance hídrico.

En la Figura 3 se han agrupado las estaciones de la zona norte (III y IV región). Las estaciones Copiapó y la Serena muestran una clara tendencia a la baja en el período comprendido en el balance hídrico, la cual se revertiría en los últimos 30 años. La estación Cogotí no muestra una tendencia clara y la longitud del registro no es suficiente para concluir diferencias con respecto a lo incluido en el balance.

En la Figura 4 se incluyen las estaciones de la zona centro, y además la estación Punta Arenas. La mayoría de ellas muestra una tendencia a la baja en el período comprendido en el balance, mientras que en los últimos 20 años dicha tendencia claramente se ha revertido.

Finalmente, en la Figura 5 se muestran las estaciones de la zona centro – sur. Estas estaciones muestran una tendencia más bien estable, sin embargo destacan notoriamente las estaciones Valdivia y Puerto Montt las cuales presentan una tendencia a la baja en toda la longitud de su registro. Por otra parte, en la Figura 6 se presentan los promedios móviles para aquellas estaciones con registros de longitud del orden de 100 años o más.



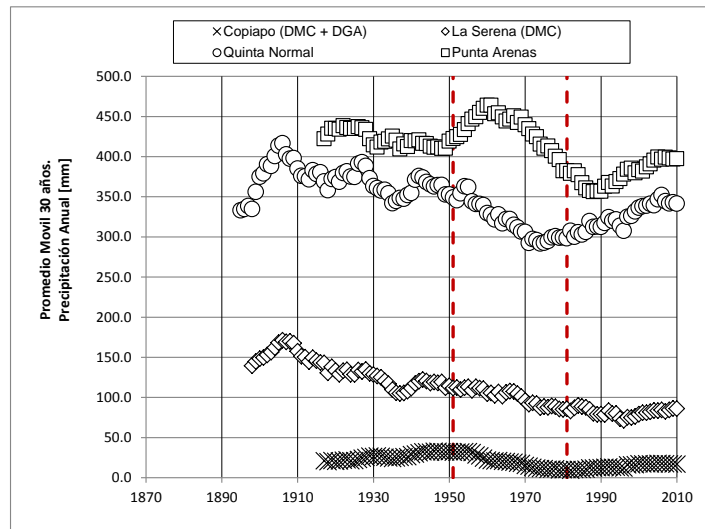


Figura 6.- Promedios móviles de 30 años. Zona sur y resto del país. Estaciones con estadísticas de longitud cercana a 100 años o más. En línea punteada se indica el período estadístico considerado en el balance hídrico.

Las estaciones con registros extensos se han agrupado en zona sur, y resto del país. La zona sur muestra una clara tendencia a la baja, la cual se ve incrementada en el período más reciente que queda fuera del balance hídrico. En las estaciones del resto del país, es importante destacar la estación Punta Arenas, la cual en el período comprendido en el balance hídrico presenta una variabilidad importante, la cual es muy diferente al período posterior. Para los últimos 30 años, la estación Quinta normal muestra una clara tendencia al alza, mientras que Copiapo y la Serena muestran un comportamiento similar, aunque en un menor grado.

4.3 ANÁLISIS DE TENDENCIA UTILIZANDO EL TEST DE MANN - KENDALL

El análisis de precipitaciones anuales permite estudiar si existen tendencias significativas de aumento o disminución en los registros pluviométricos, sirviendo así de indicador de la existencia o no de cambios climáticos a partir de datos observados. Uno de los análisis empleados en este estudio corresponde al test de Mann-Kendall, el cual se ha aplicado a tres períodos o intervalos de tiempo: 1) histórico (ver Tabla 1), 2) 1951/52 - 1980/81 (30 años, coincidente con el período estadístico considerado en el balance hídrico) y 1982/83 - 2011/12 (últimos 30 años). En la Tabla 3 se presentan, para niveles de significancia del 5% y 10%, los resultados obtenidos al aplicar el test de Mann – Kendall.

Tabla 3.- Resultados Test de Mann – Kendall.

Niveles de Significancia 5% y 10%.

Región	Estación	Histórico	5%	10%	1951/52 - 1980/81	5%	10%	1982/83 - 2011/12	5%	10%
		Tendencia	Rechazo Ho (Existe Tendencia)		Tendencia	Rechazo Ho (Existe Tendencia)		Tendencia	Rechazo Ho (Existe Tendencia)	
IV	Copiapo	-	Si	Si	-	-	-	-	-	-
	La Serena (DMC)	-	Si	Si	-	-	-	+	-	-
	La Serena (E. Agr.)	+	-	-				+	-	-
	Ovalle	-	-	-				+	-	-
	Pabellón	+	-	Si				-	-	-
	Cagotí 18	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Cogotí Embalse	-	-	-	-	-	-	+	-	-
	Las Ramadas	+	-	-	+	-	-	-	-	-
	Tascadero	+	-	-				-	-	-
	Recoleta Embalse	-	-	-	-	-	-	+	-	-
V	Illapel	+	-	-				-	-	-
	La Ligua	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Riecillos	-	-	-	+	-	-	-	-	-
RM	Valparaiso	-	Si	Si	-	-	-	-	-	Si
	Quinta Normal	-	-	-	-	-	-	-	-	-
VI	Rapel	+	-	-	+	-	-	-	-	-
	Rancagua	+	-	-	+	-	-	-	-	-
	La Rufina	+	-	-	+	-	-	-	-	-
VII	Armerillo	-	Si	Si	+	-	-	-	-	-
	Linares	-	-	-	+	-	-	-	-	-
	Embalse Bullileo	-	-	-	+	-	-	-	-	-
VIII	Concepción	-	Si	Si	-	-	-	-	-	-
	F. Atacalco	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IX	Lumaco	+	-	-				+	-	-
X	Lago Ranco	+	-	-				+	-	-
	Valdivia	-	Si	Si	-	-	-	-	-	-
	San Pablo	+	-	-	+	-	-	+	-	-
	Pto. Montt	-	Si	Si	-	-	-	-	-	-
XII	Punta Arenas	-	-	-	-	-	-	+	-	Si
		N° Estaciones	7	8					0	2
		% Estaciones	24%	28%					0%	7%

Se seleccionaron 29 estaciones a lo largo de todo Chile, con un promedio total de 85 años, donde el mínimo número de registros corresponde a Illapel (38 años) y el máximo a Quinta Normal (146 años). El criterio de selección fue cubrir distintas condiciones climáticas, tanto latitudinalmente (entre 27° y 53° de latitud sur) como en relación a la altura (entre los 5 y los 1.290 msnm). Otro criterio fue verificar que, en lo posible, la estación hubiese sido utilizada en el Balance Hídrico de Chile (1987), que utilizó datos entre los años 1951 y 1980.

El análisis del período histórico muestra que aproximadamente un 30% de las estaciones (con nivel de significancia del 10%) poseen una tendencia significativa desde el punto de vista estadístico, presentando en conjunto un promedio de 107 años de registros. Del total de estaciones analizadas, el 24% (7 estaciones) muestran una tendencia negativa, mientras que un 3.5% (1 estación) muestra tendencia positiva. Espacialmente, las estaciones con tendencia significativa se distribuyen a lo largo de todo Chile, concentrándose principalmente en bajas altitudes, con un máximo de 530 msnm en Armerillo y un mínimo de 5 msnm en Valdivia.

El test de Mann-Kendall muestra que, en el período correlativo a la ventana de tiempo en la cual se basó el Balance Hídrico de Chile (1951-1980), no existen tendencias significativas en ninguna de las estaciones revisadas. Por otra parte, en el período 1982-2012 un 7% de las estaciones presenta una tendencia negativa significativa. Considerando solo las estaciones con registro completo en los períodos de interés (1951-2012) y que presentan tendencia negativa significativa (7 estaciones), se tiene que el 14% (1 estación) presenta tendencia negativa significativa en los últimos 30 años. Punta Arenas, que no posee tendencia histórica, también presenta una tendencia negativa significativa en los últimos 30 años.

4.4. ANÁLISIS DE LA NECESIDAD DE ACTUALIZACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO DE CHILE

Según lo expuesto en el acápite 3.5 y en función de la información de precipitaciones anuales se efectuó la comparación de la diferencia porcentual que se obtiene entre el período estadístico considerado en el balance hídrico (años 1951 a 1980) y en el último período (1982 a 2011). Los resultados obtenidos se presentan en forma resumida en la Tabla 4.

Tabla 4. Comparación precipitaciones medias anuales. Período estadístico considerado en el balance hídrico de Chile (1987) y período más reciente (1982-2011).

Estación	Región	Altitud	P anual (mm) Per. 1: 1951-1980	P anual (mm) Per. 2: 1982-2011	Dif. Porcentual (Per. 2 - Per. 1) / Per. 1
Copiapo	III	291	10	18	80%
La Serena	IV	142	85	89	5%
Cogoti 18	IV	905	194	186	-4%
Cogoti Emb.	IV	650	187	178	-5%
Las Ramadas	IV	1350	257	327	27%
Tascadero	IV	1230	224	293	31%
Recoleta Emb.	IV	400	93	112	20%
La Ligua	V	58	313	315	0%
Riecillos	V	1290	467	560	20%
Valparaíso	V	41	389	418	8%
Quinta Normal	RM	520	300	337	12%
Rapel	VI	16	638	566	-11%
Rancagua	VI	500	544	541	-1%
La Rufina	VI	735	1058	1102	4%
Armerillo	VII	530	2428	2226	-8%

Estación	Región	Altitud	P anual (mm) Per. 1: 1951-1980	P anual (mm) Per. 2: 1982-2011	Dif. Porcentual (Per. 2 - Per. 1) / Per. 1
Linares	VII	157	895	881	-2%
Bullileo Emb.	VII	600	2368	2082	-12%
Concepción	VIII	12	1206	1074	-11%
Fundo Atacalco	VIII	730	2359	2321	-2%
Lumaco	IX	60	970	1036	7%
Lago Ranco	X	100	1947	1921	-1%
Valdivia	X	5	2475	1938	-22%
San Pablo	X	60	1440	1416	-2%
Pto. Montt	X	85	1917	1604	-16%
Punta Arenas	XII	37	382	399	4%

Nota: No se han considerado en el presente análisis aquellas estaciones que tengan un número de datos inferior a 50 años. Sombreado en color rosado se muestran las disminuciones de precipitación

Para analizar los resultados que se presentan en la Tabla 5, se han agrupado en dos zonas: 1) la zona comprendida entre las regiones IV y V – RM aproximadamente y 2) la zona comprendida entre las regiones VI y X (Los Lagos y Los Ríos).

Para la zona señalada en primer término se aprecia en general, salvo excepciones, que en el período más reciente se tienen precipitaciones anuales superiores a las obtenidas en el período considerado en el balance hídrico. Dichas diferencias fluctúan entre el 5% y algo más del 20% en algunos casos. Por otra parte, para la zona comprendida entre las regiones VI y X se aprecia en la mayor parte de las estaciones disminuciones de la variable en análisis que fluctúan entre -2% (sin significancia estadística) y del orden del -20% (Valdivia y Puerto Montt). En esta zona, las únicas excepciones corresponden a las estaciones La Rufina y Lumaco.

5. CONCLUSIONES

Al analizar los resultados obtenidos mediante la comparación de la variabilidad de la precipitación media anual considerando períodos estadísticos de 30 años, se puede señalar que en el período comprendido entre los años 1952/53 a 1981/82 se aprecia en las estadísticas una tendencia general a la disminución de las precipitaciones anuales, fenómeno que ha sido parcialmente revertido en el siguiente período, comprendido entre los años 1982/83 a 2011/12, donde se han registrado aumentos (Riecillos, Quinta Normal, Rancagua, La Rufina) y disminuciones de la precipitación anual (Copiapó, La Serena, Valdivia y Puerto Montt) en relación a la media histórica. Por ejemplo, en las estaciones Copiapo y La Serena han presentado disminuciones significativas de la precipitación durante los últimos 60 años, sin embargo, en el último período estas han aumentado sin alcanzar los valores históricos. Por otra parte, en las estaciones pertenecientes a las regiones V, RM, VI, VII (excepto para la estación Riecillos) se ha observado una disminución en los últimos 60 años, la tasa de precipitación media anual se ha reducido a una tasa menor en el último período (1982/83 a 2011/12). El comportamiento recién señalado, es aún más intenso en las estaciones ubicadas en las regiones VIII y X, especialmente en aquellas estaciones cercanas al mar (Concepción, Valdivia y Puerto Montt).

Del análisis de los promedios móviles, se observan importantes diferencias en las tendencias respecto al período comprendido en el balance hídrico, lo que deja en evidencia la necesidad de complementar y reeditar dicha publicación para analizar qué ocurre con el resto de las variables de interés. Casos críticos se presentan en las estaciones como Copiapó, Quinta

Normal, Concepción, Valdivia, Puerto Montt y Punta Arenas lo que deja en evidencia que es un fenómeno presente en todo el país.

El análisis del test de Mann-Kendall al período histórico muestra que aproximadamente un 30% de las estaciones (con nivel de significancia del 10%) poseen una tendencia significativa desde el punto de vista estadístico, dicho valor disminuye al 24% si se considera un nivel de significancia del 5%. En los períodos restringidos, es decir, 1951/52-1980/81 (balance hídrico) y 1982/83-2011/12 (período más reciente), el test de Mann-Kendall indica que las precipitaciones anuales no presentarían tendencia, salvo estaciones puntuales. Desde el punto de vista del período elegido para aplicar el test de Mann-Kendall, es posible tener diferentes resultados dependiendo de la ventana de tiempo elegida. Mientras el análisis histórico permite reconocer tendencias totales, la selección de distintas ventanas de tiempo permite estudiar cuándo se producen cambios significativos. La inclusión de un conjunto mayor de estaciones permitiría ampliar el análisis a la distribución espacial de dichas tendencias y comprobar si los modelos climáticos representan adecuadamente la realidad del país.

En el caso de la comparación directa de las precipitaciones registradas en el período estadístico utilizado en el balance hídrico (1951 – 1980) y el período más reciente (1982-2011) es posible señalar que en la zona comprendida entre las regiones IV y V- RM se ha presentado, en general, un aumento de las precipitaciones anuales, si se comparan los valores de ambos períodos. Por el contrario, en las estaciones ubicadas entre las regiones VI a X (Los Lagos y Los Ríos) se ha detectado una marcada disminución si se contrastan ambos períodos analizados.

En atención a los resultados obtenidos, se puede concluir a modo general que, con una mirada de largo plazo, las precipitaciones anuales en los últimos 60 años han disminuido si se comparan con la media histórica, lo cual se ha revertido parcialmente en los últimos 30 años del registro. Dicho comportamiento, si bien se puede aceptar como general, en algunos casos no se ha cumplido y se ha registrado un incremento de las precipitaciones (Riecillos, Rapel, Rancagua). Ambos comportamientos, disminuciones y aumentos, pueden ser apreciados también en los análisis de media móvil. A lo anterior, se debe agregar que el test de Mann-Kendall indica que aproximadamente un 30% de las estaciones analizadas presenta tendencia si se considera el período total de registro.

Lo expuesto en el párrafo anterior (aumentos, disminuciones, tendencias detectadas) y los resultados obtenidos al comparar el período estadístico considerado en el balance hídrico (1951-1980) con el más reciente (1982-2011) muestra la conveniencia y la necesidad de actualizar el citado balance. Respecto a este tema, se debe tener presente que el Balance Hídrico de Chile (1987), desde su publicación, ha sido material de consulta obligado en Chile para una gran cantidad de estudios, ya que su uso permite visualizar a escala regional el comportamiento y distribución de la precipitación y otras variables hidrometeorológicas, aportando además información a escala local (cuencas) y puntual (estaciones) para diseños a nivel de ingeniería conceptual y de prefactibilidad.

Relacionado con lo anterior, en los últimos años se han realizado varios estudios en Chile y el mundo, tendientes a analizar potenciales cambios climáticos que alteren, por ejemplo, la distribución y cantidad de agua precipitada. Dichos estudios se basan mayormente en modelos meteorológicos de escala global que son aplicados a escala local (cuencas), ya sea escalando directamente desde el modelo global hacia estaciones meteorológicas ubicadas en la zona de interés o a través de modelos regionales, también calibrados a escala local, en especial cuando

se desea conocer cuánto de esa precipitación estará disponible en forma de caudales y aguas subterráneas.

La ventaja de utilizar modelos globales y regionales, es que permite analizar los potenciales cambios climáticos a lo largo de todo Chile a un costo menor que el que implicaría analizar la estadística de todas las estaciones existentes en el país. Sin embargo, esa reducción de costo tiene implicancias en la resolución espacial en la cual son válidos los cambios de tendencia climática modelados. En este sentido, la calibración a escala local es fundamental para validar los resultados, los cuales no pueden ser extrapolados directamente a otras cuencas. En particular, las zonas cordilleranas son pobremente representadas por los modelos climáticos aplicados en Chile, lo cual se ve agravado por el reducido conjunto de estaciones observado en zona altas de la Cordillera de Los Andes, durante la selección de estaciones para este estudio.

Considerando los antecedentes y resultados presentados, el presente análisis permite fundamentar la importancia de actualizar periódicamente el Balance Hídrico de Chile y de mantener una red hidrometeorológica operativa, mejor distribuida y con registros completos, pues son la base para validar modelos cuyos pronósticos implicarían impactos futuros significativos para la economía del país.

REFERENCIAS

Aceituno, P, Fuenzalida, H. Rosenbluth, B. 1993. Climate along the Extratropical West Coast of South America. Earth System Response to Global Change. Contrasts between North and South America. Academic Press, Inc.

Chow, V.T. 1994. Hidrología Aplicada. Editorial Mc Graw – Hill Interamericana S.A.

D’Arcangeli, Verona. 1997. Variación Temporal de Algunos Factores Meteorológicos en Chile. Memoria para optar al Título de Ing. Civil. Universidad de Chile.

Dirección General de Aguas. 1987. Balance Hídrico de Chile.

Dirección General de Aguas. 2012. Banco Nacional de Aguas, series de precipitaciones máximas diarias anuales para distintas estaciones.

Dirección Meteorológica de Chile. 2012. Anuarios Meteorológicos, Varios Tomos.

Garreaud, R. 2008. Aspectos Regionales del Cambio Climático Global. X Jornadas Francisco Javier Domínguez. Universidad de Chile.

Gonzalez, R, Dussaubat, S. 2009. Variabilidad de las Precipitaciones Máximas Diarias en Función de la Longitud del registro. XIX Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica. Viña del Mar. Chile.

Gonzalez, R, Dussaubat, S. 2010. Análisis de la Variabilidad de las Precipitaciones Anuales en Chile en Función de la Longitud del registro. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Punta del Este, Uruguay.

Onoz, B., Bayazit, M. 2003. Power of the Statistical Tests for Trend Detection, Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, Vol.27, p. 247-251.

Sadri, S., H. Madsen², P. S. Mikkelsen³, D. H. Burn¹. 2009. Analysis of Extreme Rainfall Trends in Denmark. 33rd International Association of Hydraulic Engineering & Research (IAHR) Biennial Congress. Vancouver. Canada.

United States Geological Service. 2002. D.R. Helsel and R.M. Hirsch. Statistical Methods in Water Resources.