

# VARIACIÓN TEMPORAL DE LAS PRECIPITACIONES Y CAUDALES EN LA CUENCA DEL MAIPO, Y LA POTENCIAL INFLUENCIA GLACIAR EN LA PRODUCCIÓN DE AGUA (1963-2006)

• Roberto Pizarro-Tapia • Cynthia Cabrera-Jofre •  
• Carolina Morales-Calderón •  
*Universidad de Talca, Chile*

• Juan Pablo Flores-Villanelo •  
*Centro de Información de Recursos Naturales, Chile*

## Resumen

El presente trabajo pretende inferir en la tendencia del comportamiento de las variables precipitación y caudal en las últimas cuatro décadas para dos subcuencas del río Maipú: El Colorado (1 710 km<sup>2</sup>) y la del Maipo Alto (3 521 52 km<sup>2</sup>). Las dos subcuencas están ubicadas en la Región Metropolitana de Chile y poseen un régimen marcadamente nival. Se consideraron cinco estaciones pluviométricas con registros mensuales y anuales (mm) para el periodo 1963-2006, donde luego de completar los datos faltantes en cada estación, se estimaron las precipitaciones medias areales mediante el método de polígonos de Thiessen. Por su parte, los caudales medios mensuales y anuales fueron extraídos de los registros de dos estaciones pluviométricas. El análisis del comportamiento temporal de las variables precipitación y caudal se llevó a cabo mediante el ajuste de la función de distribución de probabilidad de Gumbel, el cálculo de promedios móviles y el coeficiente PP/E (el cual expresa la proporcionalidad existente entre la precipitación y la escorrentía superficial). Así fue posible determinar que en la cuenca del río Maipo se observa en las últimas cuatro décadas una tendencia al aumento de las precipitaciones invernales, una disminución de las precipitaciones en verano y otoño, y el incremento de los caudales en periodos estivales, por lo que se puede inferir que el crecimiento de tales caudales está influenciado por el derretimiento glaciar.

**Palabras clave:** glaciares, cambio climático, Chile Central, precipitación y escorrentía.

## Introducción

Conocer el comportamiento hidrológico en Chile Central de las cuencas con presencia de glaciares en términos espaciales y temporales, así como el retroceso y avance de los glaciares, es de suma importancia para determinar la disponibilidad de agua superficial en la temporada estival de deshielo, ello con fines de regadío, hidroelectricidad y otras actividades productivas, lo que es especialmente importante en las zonas en que

las reservas nivales son la principal fuente de abastecimiento en los periodos secos (Rignot *et al.*, 2003). Paralelamente, la mayor parte de los glaciares en Chile Central ha mostrado importantes retrocesos en las décadas recientes, teóricamente en respuesta al cambio climático (Fuenzalida *et al.*, 1989), haciendo cada vez más importante el estudio de la potencial influencia glaciar en las diferentes cuencas del país y particularmente en la producción de agua (Rivera *et al.*, 2002). Así, las últimas investigaciones científicas han demostrado que

la velocidad del derretimiento de los glaciares se ha incrementado en las últimas décadas. Asimismo, el retroceso glaciar generalizado se debe aparentemente a un balance de masa negativo, controlado principalmente por el aumento de las temperaturas, y en segundo lugar, por la distribución espacial y temporal de las precipitaciones, entre otras causas (Villalba, 1994).

En Chile Central, el número y la superficie de glaciares (Marangunic, 1979; Casassa, 1995; Aniya *et al.*, 1996; Rivera *et al.*, 2007) es superior al de la zona sur, debido a las mayores precipitaciones y alturas de la cordillera de los Andes, que superan los 6 000 m. En el centro del país, entre las cuencas de los ríos Aconcagua y Petrohué, existe una mayor superficie cubierta por hielo, destacando la cuenca del Maipú, donde hay más de 420 km<sup>2</sup> en 647 glaciares (39.1%). El derretimiento de estos glaciares ha sido de vital importancia para la mantención de los caudales en periodos secos de verano, lo que se ejemplifica en que el caudal del río Maipo ha sido alimentado por el aporte glaciar entre un tercio y dos tercios de dicho caudal en los meses de sequía, tal como ocurrió en las temporadas 1968/69 y 1981/82 (Peña y Nazarala, 1987).

Las tendencias del calentamiento global de la atmósfera, verificadas en numerosas estaciones del país, permiten estimar para los últimos cien años un aumento de las temperaturas que varía entre 1.3 y 2.0 °C, mientras que para las últimas tres décadas el calentamiento sería el doble de la secuencia secular (Rivera *et al.*, 2000). También han incidido significativamente en las variaciones de los glaciares los ciclos interanuales con anomalías pluviométricas extremas y la tendencia de algunas estaciones que han experimentado un descenso de los montos totales anuales de precipitación. Finalmente, la mayor frecuencia de los eventos del fenómeno El Niño/Oscilación del Sur ha tenido un rol significativo en la variabilidad interanual de las precipitaciones y temperaturas, generando respuestas distintas en el ámbito regional.

### *Estudios realizados en cuencas de Chile Central con presencia de glaciares*

Diversas investigaciones se han realizado en cuencas de la zona central de Chile con presencia de glaciares (Escobar *et al.*, 1995; Rivera *et al.*, 2000; Bown *et al.*, 2008). En este marco, Ribstein y Francou (1991), en un estudio que analizó una serie de veinte años de escurrimiento glaciar, observaron que los escurrimientos más fuertes se asocian con la corriente de El Niño, hecho que se verificó principalmente en los años 1982, 1987 y 1991, tendiendo a vincular fuertemente el retroceso glaciar con la presencia de esta corriente.

Por otra parte, Rivera *et al.* (2002; 2006) confirman la tendencia de retroceso, adelgazamiento y variación de la distribución espacial de los glaciares de los Andes Secos Centrales, como producto de las mediciones realizadas a cinco glaciares ubicados dentro de la zona de estudio, que se muestran en el cuadro 1. Asimismo, Valck *et al.* (2006) aplicaron a esta misma zona (cuenca del río Maipo), un modelo espacialmente distribuido para la simulación continua del manto de nieve mediante ecuaciones de balance de energía y masa, como una forma de determinar la disponibilidad hídrica superficial para el periodo de deshielo. El modelo utilizó como información de entrada datos (para una duración de 24 horas) que provienen de un modelo meteorológico de meso-escala, conocido como MM5/DGF.

Finalmente, la aplicación de este modelo a la cuenca del río Maipo permitió validar el procedimiento a través del uso de imágenes de satélite y caudales de deshielo medidos en distintos puntos de control dentro de la cuenca, observándose errores de estimación del 24% en la cobertura nival y en el volumen acumulado al final de la temporada de acumulación. Dicho volumen muestra un valor 11% inferior con respecto al volumen registrado en periodos de deshielo en las subcuencas evaluadas, lo que muestra la potencialidad del modelo de simulación para fines de pronósticos en cuencas pequeñas sin control fluviométrico.

Cuadro 1. Variaciones de los glaciares en la zona de estudio.

Glaciar	Localización		Exposición general	Periodo de registro	Cambio de distancia frontal (m)	Variación promedio anual (m/a)	Cambios de área (km <sup>2</sup> )	Variación promedio anual (km <sup>2</sup> /a)
	Latitud sur	Longitud oeste						
Risopatrón	33°08'	70°05'	W	1955-1997	-530	-13	-0.53	-0.01
G30	33°08'	70°08'	S	1955-1997	-517	-12	-0.4	-0.01
G32	33°08'	70°07'	S	1955-1997	-527	-13	-0.72	-0.02
Olivares Beta	33°08'	70°11'	SW	1955-1997	-898	-21	-1.2	-0.054
Olivares Gamma	33°08'	70°10'	SW	1955-1997	-623	-15	-0.4	-0.03

Fuente: Rivera *et al.*, 2000.

Corripio *et al.* (2007) investigaron la zona de los Andes Secos Centrales, los cuales se ubican en una barrera de alta montaña que divide Chile y Argentina entre los 31° y 35° de latitud sur. En esta zona se investigó la importancia de las aguas generadas por la fusión, porque la precipitación es muy baja en los meses del verano. Como uno de los resultados, se muestra que la precipitación en el mes de diciembre es de 1 mm, mientras que lo generado por fusión es de 42 m<sup>3</sup>/s en el mismo mes.

Esto beneficia las actividades humanas en la región en el tiempo de mayor calor y demanda de agua, ya que se logró comprobar que en ese periodo el sistema aporta una disponibilidad máxima. Actualmente se está evaluando si esta manera de generar el recurso es sostenible a largo plazo o si deberá existir una relación entre la acumulación de la nieve y la ablación.

Un estudio reciente de Bown *et al.* (2008) indicó que la cuenca del río Aconcagua (38° latitud sur) poseía una gran superficie de glaciares en Chile Central, con 121 km<sup>2</sup> de hielo registrados hasta el año 2003. Usando la información de uno de los inventarios más actuales, el cual se desarrolló con base en fotografías aéreas del año 1955, se obtuvo un área total de 151 km<sup>2</sup>, lo que implica una reducción en el área glaciar de un 20%, en los 48 años considerados. Asimismo, la aplicación de técnicas de teledetección sobre la información proporcionada por el uso de sensores remotos en uno de los glaciares de esta cuenca permitió estimar una reducción del 14% entre 1955 y 2006.

### Mediciones y modelación de la hidrología glaciar

Los modelos utilizados en la actualidad en Chile para realizar los pronósticos hidrológicos de cuencas con glaciares son en general modelos estadísticos que utilizan como variables los registros fluviométricos y de precipitación, medidos en una o varias estaciones, y sus equivalentes en agua, registrados en las escasas rutas de nieve disponibles en Chile. Estos modelos extrapolan una situación puntual hacia todo el manto de nieve estudiado, pudiendo sólo ser válidos en grandes cuencas, ya que para pequeñas cuencas se imposibilita la simulación de subcuencas y son incapaces de realizar una simulación continua del comportamiento del manto nival (Valck *et al.*, 2006). Lo aconsejable es realizar mediciones directas de masa; sin embargo, el alto costo económico involucrado en las campañas de medición directa de acumulación y ablación de nieve y hielo lo hacen restrictivo.

Actualmente se está modelando el balance de masa en un gran número de glaciares de Chile Central mediante métodos indirectos, como el método geodésico (basado en la comparación temporal de la topografía superficial del hielo con respecto a una superficie sin cambios). Sin embargo, cuando se cuenta con dicha información solamente para algunos puntos del glaciar se puede modelar el balance de masa mediante el uso de la ecuación de continuidad o de conservación

de masa. Esto requiere pocos parámetros, entre los que destaca el espesor del hielo como uno de los más críticos en términos de la incidencia en los márgenes de error. En otras partes de Chile, la medición de los glaciares y del espesor de hielo se lleva a cabo empleando diversos sistemas, destacando por su eficiencia el sistema de radio eco sondaje, RES (Rivera y Casassa, 2001).

En este contexto, el presente estudio pretende establecer si el retroceso glaciar ha influido en los caudales de las últimas cuatro décadas, esto mediante un análisis del comportamiento temporal de las relaciones precipitación-escorrentía en dos subcuencas del río Maipo (El Colorado y Maipo Alto), ubicadas al sureste de la Región Metropolitana de Chile. Ello se realiza a través del análisis de las variables caudal y precipitación, bajo criterios estadísticos y matemáticos.

## Área de estudio

La zona de estudio que aborda este trabajo se ubica en la Región Metropolitana de Santiago, específicamente en la parte alta de la cuenca del río Maipo (figura 1). Dicha cuenca tiene sus orígenes en la cordillera de los Andes. El río Maipo recibe en la cordillera tres grandes tributarios: los ríos Volcán, Colorado y Yeso. El estudio se lleva a cabo en dos subcuencas del río Maipú: El Colorado y Maipo Alto, de régimen marcadamente nival. Su periodo de acumulación comprende desde mediados de abril hasta septiembre. Presentan varios glaciares, entre los que se puede mencionar El Marmolejo y el Olivares.

El clima de dicha región es templado cálido, del tipo continental. Esta última característica se acentúa porque la cordillera costera actúa como biombo climático, impidiendo que la influencia marina actúe como moderadora

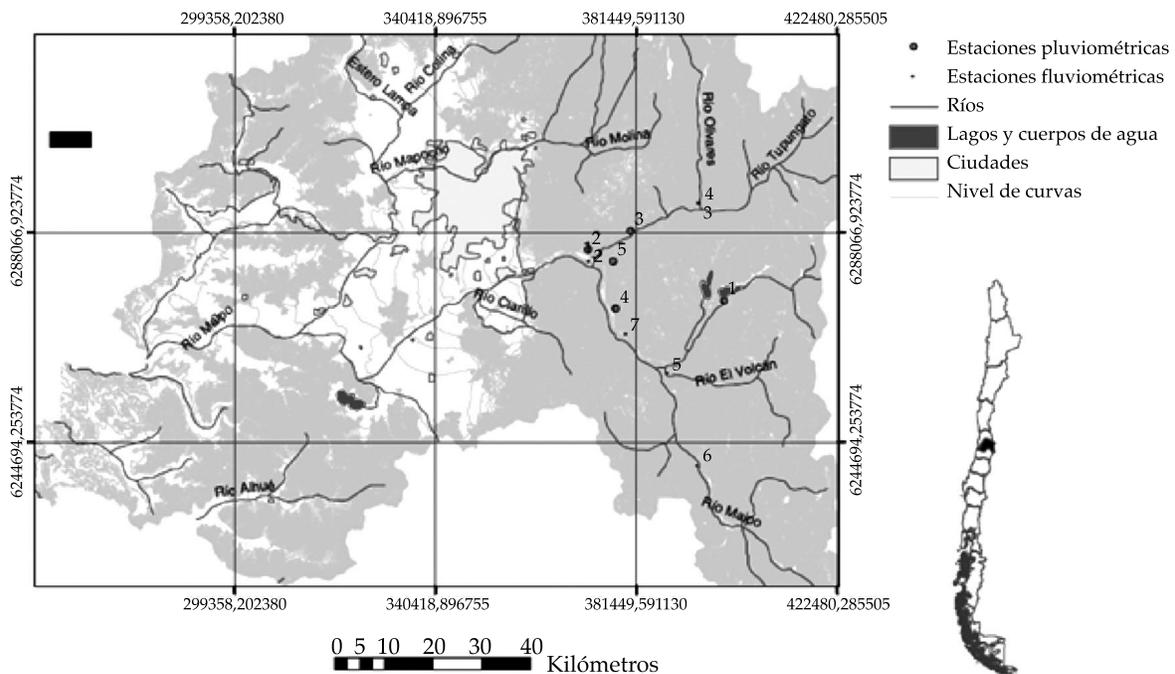


Figura 1. Mapa de ubicación de las estaciones pluviométricas y fluviométricas utilizadas (Región Metropolitana, Chile).

climática. Presenta un verano seco, con temperaturas que en ocasiones sobrepasan los 30 °C. Cabe destacar que el régimen de las precipitaciones en esta zona ocurre en un 90% durante el periodo mayo-septiembre, con un promedio anual de 384 mm y está principalmente asociado con los frentes fríos que ocasionalmente alcanzan esta región, cuando el anticiclón subtropical del pacífico suboriental es anormalmente débil (Garreaud y Rutllant, 2006).

Así, esta zona se caracteriza por una extrema variabilidad de las precipitaciones entre un año y otro, observándose ciclos alternos que se descomponen en periodos muy lluviosos y periodos con precipitaciones por debajo de lo normal, y que en parte está relacionada con la Oscilación del Sur de El Niño (ENSO) (Montecinos y Aceituno, 2003), mientras que el comportamiento inter-décadas se asocia con la oscilación por década del Pacífico (PDO) (Montecinos et al., 2003).

## Metodología

Para inferir la tendencia del comportamiento de las variables precipitación y caudal en las últimas cuatro décadas en la parte alta de la cuenca del río Maipo se analizaron dos subcuencas: El Colorado y la del Maipo Alto. Para ello se consideraron datos de precipitaciones medias y caudales medios mensuales (periodo 1963-2006) aportados por la Dirección General de Aguas de Chile. Los datos de precipitaciones anuales y mensuales se obtuvieron de las siguientes estaciones pluviométricas: San Gabriel, San José de Maipo Retén, El Yeso Embalse, Maitenes Bocatoma y La Obra Recinto EMOS. Los datos de caudales mensuales y anuales se tuvieron de las estaciones fluviométricas Río Colorado, antes Junta Río Maipo, y Río Maipo en el Manzano.

Además, se utilizó la información de las estaciones fluviométricas Río Maipo en San Alfonso; Río Colorado, antes Junta Río Olivares; Río Maipo en las Hualtatas; Río Olivares, antes Junta Río Colorado, y Río Volcán en

Queltehues, para el análisis del comportamiento de los caudales en ambas cuencas.

El trabajo de la delimitación de subcuencas y polígonos de Thiessen se llevó a cabo con las extensiones *Basin* y *Xtools* de *Arcview*, respectivamente, para lo cual se utilizó la carta topográfica digital (escala 1:50 000) de la zona del Cajón del Maipo, ubicada en la Región Metropolitana de Chile. Las superficies abarcadas a través de polígonos de Thiessen para las dos subcuencas de estudio fueron las que se presentan en el cuadro 2.

## Integración de datos faltantes

Los datos proporcionados por la Dirección General de Aguas (DGA, 2004) con frecuencia presentan discontinuidades, lo que se traduce en datos faltantes, ya sea de precipitaciones o caudales. Por ello fue necesario completar datos faltantes, proceso que se realizó con los métodos propuestos por UNESCO para el Balance Hídrico de América del Sur (UNESCO, 1982) y los alcances hechos por Ausensi (2005).

En ambas variables se probaron regresiones simples y múltiples, optando por aquella que presentaba el menor error estándar de estimación. Las estaciones Río Colorado, antes Junta Río Maipo, y Río Maipo en El Manzano se tomaron como estaciones patrón en el caso de los caudales por ser las estaciones más largas y completas en sus registros. La integración de los datos se realizó con un error estándar de estimación promedio de 8.84 m<sup>3</sup>/s. El porcentaje de datos que se debió completar fue del 24.9%.

Por su parte, al completar los datos faltantes de las estaciones pluviométricas, se consideró a las estaciones El Yeso Embalse, San José de Maipo Retén, San Gabriel, Maitenes Bocatoma y la Obra Recinto EMOS. La estación patrón es El Yeso Embalse, por ser la más larga y completa en sus registros. La integración de todos los datos se realizó mediante regresión lineal simple y múltiple, con un error estándar de estimación promedio

Cuadro 2. Superficies de las subcuencas El Colorado y Maipo Alto.

Subcuenca	Estaciones	Superficie (km <sup>2</sup> )
Subcuenca El Colorado	La Obra (Recinto EMOS)	0.49
	San José de Maipo Retén	30.87
	Maitenes Bocatoma	1 678.64
<b>Superficie total subcuenca</b>		<b>1 710</b>
Subcuenca del Maipo Alto	San José de Maipo Retén	170.46
	El Yeso Embalse	816.54
	San Gabriel	2 264.52
<b>Superficie total subcuenca</b>		<b>3 251.52</b>

de 11 mm. El porcentaje para completar los datos fue de 37%.

#### Estimación de precipitaciones areales medias

A través de la cartografía digital y aplicando el método de Thiessen con la extensión *Areal Rain* de *Arcview*, se estimaron las precipitaciones medias areales para el área de influencia definida para cada estación pluviométrica. La expresión matemática que definió la precipitación media por medio de los polígonos de Thiessen está dada por:

$$\bar{P} = \sum_{i=1}^n \left( P_i * \frac{A_i}{A} \right)$$

Siendo  $P$  la precipitación media sobre la cuenca;  $P_i$ , la precipitación observada en la estación  $i$ ;  $A_i$ , el área del polígono correspondiente a la estación  $i$ ;  $A$ , el área total de la cuenca;  $n$ , el número de estaciones pluviométricas y/o pluviográficas con influencia en la cuenca.

#### Ajuste de la función de distribución de probabilidad para la información pluviométrica y pluviométrica

Para el análisis del comportamiento de las variables en estudio y a partir de la información obtenida, los datos de precipitación y

caudal se ajustaron en un nivel mensual y anual, con una función de distribución de probabilidad, en este caso, Gumbel, dado que ha sido empleada con buenos resultados en numerosos estudios de eventos meteorológicos de valores máximos, con una alta calidad de ajuste en los datos (Gumbel, 1958; Koutsoyiannis y Baloutsos, 2000; Koutsoyiannis, 2004), y porque en Chile ha demostrado ajustar con una gran eficiencia los datos hidrológicos de caudal y precipitación (Varas y Bois, 1998; Pizarro et al., 2008). En el mismo sentido, cabe señalar que el ajuste de la función de los datos de precipitación y caudal fueron agrupados en periodos de tiempo, partiendo por el periodo 1963-1976; a esta serie se le fueron sumando periodos de diez en diez años, hasta el año 2006, completando cuatro periodos a ajustar. Ello, con el fin de observar las tendencias experimentadas por los datos en función del tiempo. Los periodos definidos para las precipitaciones y los caudales fueron los siguientes:

Periodo 1: 1963-1976

Periodo 2: 1963-1986

Periodo 3: 1963-1996

Periodo 4: 1963-2006

Además, estos valores se asociaron con tres periodos de retorno (20, 50 y 75 años), manifestando así el comportamiento de los datos en el tiempo.

### Relaciones entre precipitación y caudal

Para ambas cuencas se analizó el comportamiento de las variables precipitación y caudal por medio del coeficiente PP/E, que permitió analizar el comportamiento de éste en función del tiempo y de la precipitación. Asimismo, se utilizaron los promedios móviles para inferir las tendencias de las variables en estudio. En este caso, también se agruparon los datos tanto de precipitación como de caudal en los mismos periodos de tiempo que el ajuste a la función de Gumbel, con el fin de hacer comparable la información resultante.

### Resultados y discusión

Completar los datos mensuales de caudales y precipitaciones mediante regresiones simples y múltiples permitió generar modelos con valores aceptables de  $R^2$  (sobre 0.75); valores bajos para el error estándar de estimación, que fluctuó para los caudales entre 4 y 16 m<sup>3</sup>/s, y para las precipitaciones mensuales entre 12 y 18 mm, lo cual se considera válido para estudios de este tipo, en donde existe una alta variación en la información base (cuadro 3). Asimismo, la proporción entre el error estándar y la media de los datos observados no superó el 40% en los caudales y el 32% en las precipitaciones. Se apreció que para ambas subcuencas, los valores asociados con los caudales son más altos que

los valores de las precipitaciones en un nivel anual, por lo que se podría deducir que existen aportaciones provenientes del deshielo de los glaciares ubicados aguas arriba de la cuenca, o bien que las estimaciones de precipitación subestiman la precipitación total de la cuenca, como suele ocurrir en áreas montañosas.

En cuanto a la comparación interperiodos de valores mensuales, los resultados presentados en la figura 2a muestran que en los meses de mayo y junio existieron fuertes incrementos en los montos precipitados en la subcuenca El Colorado en relación con el primer periodo (1963-1976). En abril y agosto se observa un incremento menor.

Destaca asimismo que los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero muestran un descenso de las precipitaciones, en comparación con el primer periodo. De igual forma, la figura 2b muestra en los primeros cuatro meses de inicio del año hidrológico un aumento en las precipitaciones en la subcuenca del Maipo Alto, aunque en el último periodo (1963-2006), ese aumento es menor que el producido en la subcuenca El Colorado. En los meses estivales se manifestó claramente un decremento en las precipitaciones a lo largo de los tres periodos evaluados.

Por otra parte, en los resultados para caudales, definidos por las figuras 2c y 2d, se puede ver una tendencia al incremento del

Cuadro 3. Bondad de ajuste de los modelos para completar las series fluviométricas y pluviométricas.

Tipo de estaciones		Modelo	EEE	R <sup>2</sup>	EEE/μ
Fluviométricas	San Alfonso	-6.45311+0.190853*Colorado+0.690321*Manzano	16.73	0.9	0.17
	Colorado-Olivares	-5.6111+0.0688059*Colorado+0.132786*Manzano	8.01	0.72	0.3
	Hualtatas	-5.61762+0.41977*Colorado+0.200467*Manzano	9.83	0.86	0.18
	Olivares	-3.39616+0.16794*Colorado+0.0347003*Manzano	5.85	0.75	0.39
	Volcán	-5.40073+0.176422*Colorado+0.0727266*Manzano	3.81	0.86	0.4
Pluviométricas	San José	6.03184+0.728153*El Yeso	15.15	0.86	0.32
	San Gabriel	2.78902+0.413166*El Yeso+0.641038*San José	17.86	0.92	0.32
	Maitenes	1.1444+0.02729*El Yeso+0.8360934*San José	12.1	0.97	0.23
	La Obra	4.0696+0.0612683*El Yeso+1.19385*San José	11.98	0.95	0.19

EEE: error estándar de estimación; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinación; μ: media poblacional.

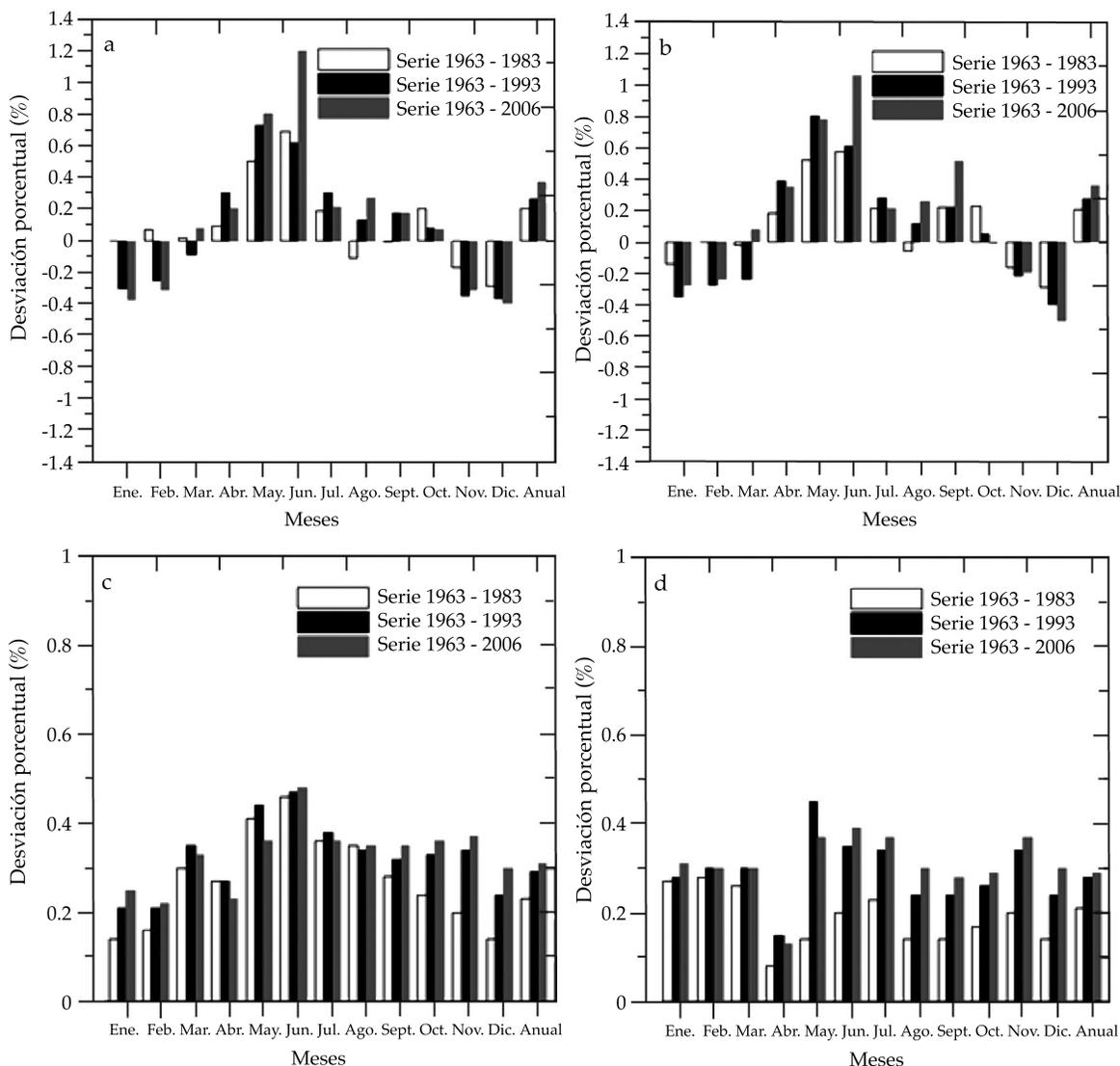


Figura 2. Comparación interperiodos de valores medios mensuales de las precipitaciones y caudales en las subcuencas El Colorado (a y c) y Maipo Alto (b y d).

caudal en ambas subcuencas en casi todos sus meses y en todos los periodos analizados.

Una vez analizados los datos en términos promedio, se realizó el análisis probabilístico con base en la función de Gumbel. Así, los ajustes a esta función resultaron ser de alta calidad, dado que todos aprobaron en forma amplia la prueba de Kolmogorov Smirnov y los coeficientes de determinación presentan, en casi su totalidad, valores superiores al 90%, lo cual corrobora lo expuesto. De esta forma,

los ajustes hechos para ambas variables y los diversos periodos considerados permitieron inferir que la probabilidad de encontrar precipitaciones de mayor monto asociadas con un determinado periodo de retorno es más alta cuando se incorpora la información correspondiente a los periodos más recientes y en los meses húmedos (abril-septiembre). Sin embargo, esta situación es diferente en cuanto a los meses secos (octubre-marzo), donde ha disminuido la probabilidad.

Al considerar que las precipitaciones anuales han aumentado en general, se desprende que las lluvias están tendiendo a concentrarse en los meses invernales. Esta situación se repite en el estudio de Quintana y Aceituno (2006), precisando que es un comportamiento climático observado en latitudes inferiores a 33°, ya que la evolución del régimen pluviométrico en la región centro-sur y austral del país ha sido marcadamente diferente a la observada en la región subtropical, con una significativa tendencia positiva dominante en esta región hasta mediados de los años setenta, para dar paso en las décadas más recientes a una tendencia decreciente, que se ha mantenido hasta ahora (CONAMA, 2006).

A continuación se presentan las precipitaciones areales de las dos subcuencas en estudio (cuadro 4), ajustadas a la función de distribución de Gumbel por mes y por año; sin embargo, se muestran sólo las probabilidades para el periodo de retorno  $T = 50$  años.

Por otra parte, los caudales denotan el mayor incremento en los valores de probabilidad cuando se incorpora la información más reciente, o sea la de los últimos diez años, resultados concordantes con Rivera y Casassa.

Estos autores señalan que el incremento de caudales es particularmente relevante en los meses estivales, donde se establece un aporte adicional a los caudales existentes en zonas de alta cordillera andina por efecto de un mayor derretimiento glaciar.

La tendencia manifestada por los datos para cada subcuenca en estudio muestra que tanto los caudales como las precipitaciones poseen tendencias positivas en el tiempo en un año, lo cual señala que en los periodos recientes ambas variables se han incrementado, lo que contrasta con lo que se señala en estudios palinológicos (Heusser *et al.*, 1981; D'Antoni, 1983), dendrocronológicos (La Marche, 1978; Le Quesne *et al.*, 2006) y registros instrumentales para la región central de Chile (Lloyd, 1973), en cuanto a qué lluvias estarían siendo más exiguas. Sin embargo, el aumento de la frecuencia de inviernos relativamente lluviosos en las décadas posteriores a los años setenta contribuyó a revertir la tendencia decreciente en esta región, estableciéndose una tendencia positiva, que alcanzó su mayor intensidad en el periodo 1955-1985; asimismo, los registros pluviométricos obtenidos de las dos subcuencas en estudio revelan que existe una enorme

Cuadro 4. Precipitaciones areales de las dos subcuencas en estudio, ajustadas a la Función de Distribución de Gumbel por mes y año ( $T = 50$ ).

Meses	Monto de precipitación (mm) subcuenca El Colorado				Monto de precipitación (mm) subcuenca Maipo Alto			
	1963-1976	1963-1986	1963-1996	1963-2006	1963-1976	1963-1986	1963-1996	1963-2006
Abril	78.26	97.27	112.15	101.98	148.17	159.59	157.43	150.58
Mayo	110.3	188.97	206.34	214.99	84.42	103.87	206.69	184.25
Junio	141.6	383.4	340.19	446.92	72.77	101.96	116.81	116.94
Julio	200.7	235.39	309.93	299.4	78.66	126.34	127.4	123.29
Agosto	205.61	177.64	235.46	242.97	85.29	105.08	104.78	115.29
Septiembre	84.85	105.92	122.01	110.88	98.37	129.38	128.66	133.01
Octubre	50.84	81.64	76.48	72.58	133.31	176.89	175.17	178.36
Noviembre	72.48	68.09	58.01	51.51	266.4	300.83	292.41	297.62
Diciembre	61.48	49.76	51.1	47.92	343.32	495.71	455.56	468
Enero	25.83	31.34	26.2	27.22	394.45	541.61	497.22	500.3
Febrero	13.05	23.88	20.1	18.63	237.01	384.58	357.2	345.29
Marzo	20.25	28.67	28.07	30.78	142.89	231.99	218.36	213.9
<b>Anual</b>	<b>735.17</b>	<b>926.6</b>	<b>948.9</b>	<b>1 058.88</b>	<b>1 895.89</b>	<b>2 665.27</b>	<b>2 561.79</b>	<b>2 554.97</b>

variabilidad interanual y que la precipitación asociada con un periodo de retorno,  $T = 25$ , 50 y 75 años, se incrementa si se considera el periodo 1963-2006 en relación con el periodo 1963-1976.

Se puede pensar que esto es producto de lo ocurrido en el último tiempo (diez años), pero los periodos intermedios denotan el mismo comportamiento prácticamente para todos los meses.

La aplicación de promedios móviles a las series temporales que suavizaron los datos y eliminaron el efecto de la variación aleatoria, transformando la serie original en una nueva, sujeta a menos oscilaciones rápidas, indican una situación estacionaria para el periodo de 1960 a 2005. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Quintana (2004), mediante el análisis de la serie temporal 1930-2000 por promedios móviles (treinta años).

Luego, con respecto a las comparaciones realizadas entre los distintos periodos y para la totalidad de los meses, se puede señalar que sólo se evidenció una tendencia negativa en las precipitaciones en los meses de estiaje, aunque en el año la tendencia es anómala, pero creciente. En tanto, para los caudales se evidenció una tendencia positiva en función del tiempo.

Anualmente, el comportamiento de las precipitaciones y los caudales en las últimas décadas se presenta en la figura 3. Se aprecia (figura 3, izquierda) que los caudales son mayores que las precipitaciones. No obstante, las gráficas dan cuenta de una tendencia incremental en sus montos anuales en las precipitaciones y en los caudales en la subcuenca del Colorado, en donde la derivada de la tendencia alcanza un valor de 7.9 para las precipitaciones, y de 5.18 para los caudales, lo que señala el marco incremental de dichas tendencias y para ambas variables. Así, en los últimos veinte años se ve una tendencia a aumentar de las variables por año, pero con una alta variabilidad de los montos observados. En el caso de la subcuenca del Maipo Alto (figura 3, derecha), las precipitaciones presentan un

aumento a lo largo de los años, lo que también se aprecia en el caso de la variable caudal.

En este tipo de análisis de variables hidrológicas se hace necesario también estudiar cómo se da la relación entre las variables. Así, se realizó un análisis del coeficiente  $PP/E$ , el cual indica cuántas veces la precipitación supera al caudal, expresado como escorrentía superficial. Los comportamientos anuales del coeficiente muestran una alta variabilidad, lo cual se debe a las anomalías de las precipitaciones estivales y de invierno, el predominio del deshielo en verano, o situaciones de una alta cantidad de precipitaciones en forma líquida, pero también y muy importante en forma sólida, especialmente en las zonas altas de la cuenca, lo cual genera escenarios que no permiten diferenciarse anualmente. Por ello, para ambas subcuencas se realizó un estudio del coeficiente  $PP/E$  para tres meses de estiaje y tres meses de invierno, a fin de intentar inferir algunos comportamientos hidrológicos.

El coeficiente  $PP/E$  para los meses húmedos de mayo, junio y julio, tanto para la subcuenca del Colorado (figura 4, izquierda) como para la subcuenca del Maipo Alto (figura 4, derecha) presenta valores que generalmente denotan montos superiores a 1, lo que se traduce en que las precipitaciones fueron mayores que los caudales y ello es diferente a lo que se observa anualmente. También se observan valores que no sobrepasaron el valor 1, lo que se podría asociar con años secos. El punto más alto en el gráfico se produce en el invierno de 1997, año con clara influencia del fenómeno El Niño, con presencia de lluvias muy por sobre lo normal, mientras que 1998 denotó un valor muy bajo y ello porque es sabido que ese año hubo una sequía que fue evaluada como de las peores del siglo XX. Por tanto, en esos periodos el deshielo aumenta exageradamente los caudales, lo que contrasta con precipitaciones escasas. Por otra parte, en los meses secos se aprecia que los valores del coeficiente en ningún caso superan el valor 1, de lo cual se infiere que las precipitaciones no han superado el valor de los caudales (figura

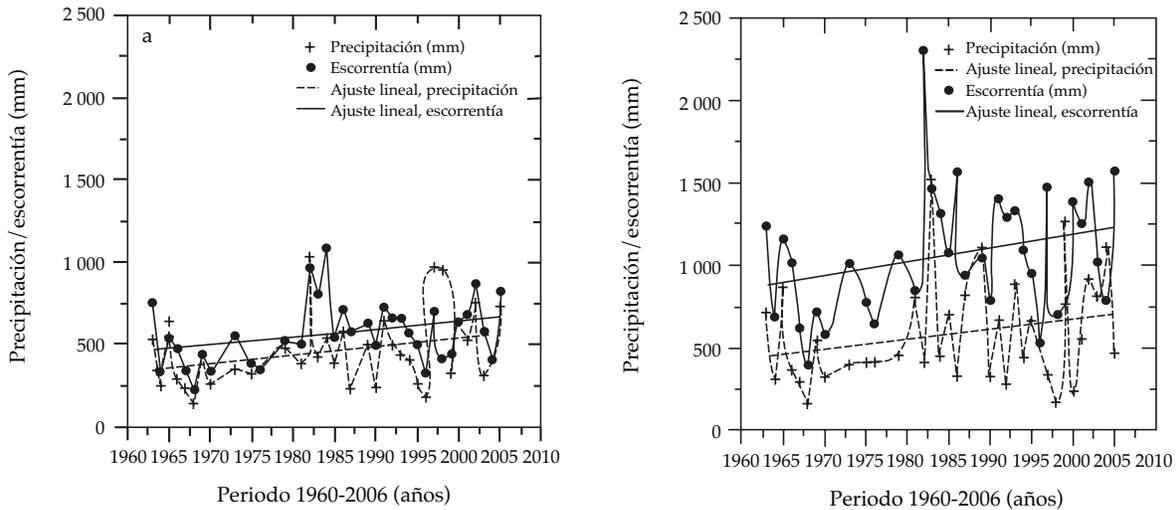


Figura 3. Gráfica de la variación temporal de las precipitaciones y caudales anuales subcuencas: (a) El Colorado (b) Maipo Alto, en las últimas cuatro décadas.

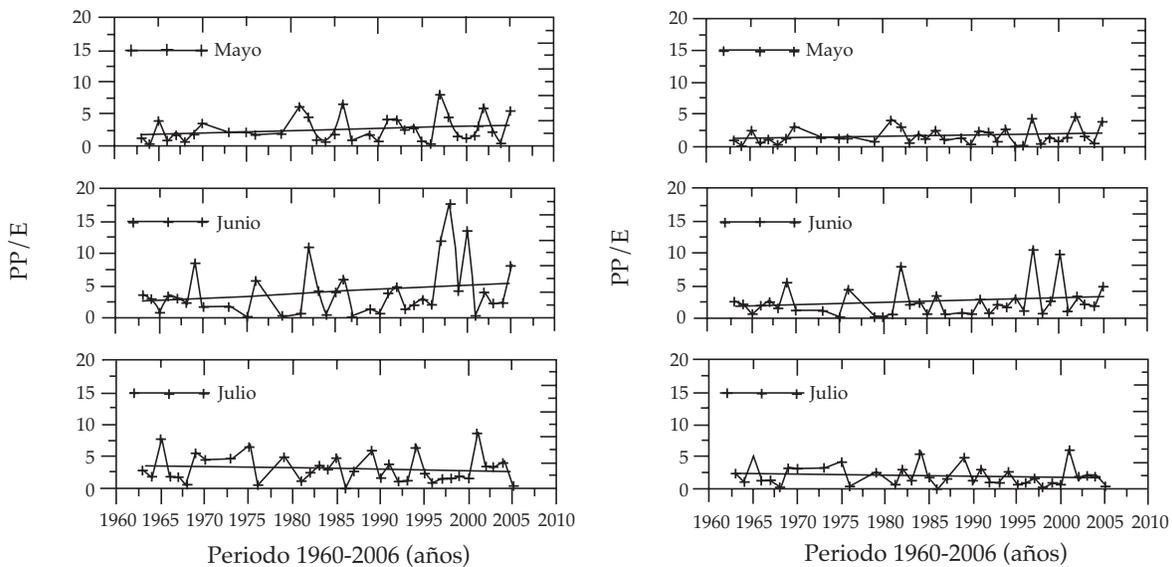


Figura 4. Comportamiento de PP/E, correspondiente a los meses de mayo, junio y julio; (a) subcuenca del Colorado, (b) subcuenca Maipo Alto, para las últimas cuatro décadas.

5). Asimismo, es importante destacar la tendencia en los meses de estiaje de la relación PP/E, que es evidentemente negativa en el tiempo, lo que indicaría que los caudales han

tendido a crecer más que las precipitaciones, pudiendo atribuirse a un cambio en las temperaturas y una mayor incidencia de éstas en el proceso de derretimiento glaciar.

También se debe considerar que en esta región la isoterma de 0 °C ha sufrido un alza de altura por el proceso de calentamiento global y por ende las crecidas invernales de los ríos de las subcuencas andinas del Maipo se han visto incrementadas por el consiguiente aumento de los aportes hídricos, lo que también implica una clara incidencia negativa en los niveles de las reservas hídricas en forma de nieves y hielos.

En términos globales se puede señalar que existen marcadas diferencias entre el comportamiento de los meses estivales y los meses de invierno, ya que en los meses estivales parecen expresarse en el último tiempo caudales circulantes superiores a los normales, producto del aumento en las temperaturas, y la disminución de las precipitaciones en verano y otoño de la ladera occidental de las cumbres andinas. Todo ello desencadenaría una aceleración del proceso de derretimiento glaciar, proceso que aporta mayores volúmenes de agua a las dos subcuencas en estudio.

## Conclusiones

En general, entre las subcuencas del Maipo Alto y El Colorado existe una gran diferencia en superficie, lo que se ve reflejado en las magnitudes que presentan las variables precipitación y caudal, y los respectivos coeficientes estudiados, hecho que es también notorio en la aplicación de las funciones de distribución de probabilidad y lo resultados alcanzados.

A partir del presente estudio y de la función de distribución de probabilidad, se puede señalar que anualmente sería posible que las precipitaciones estivales sigan aumentando a través del tiempo, producto de la variabilidad climática observada en esta zona. Estos resultados son contradictorios a simulaciones futuras (p.e. Modelo PRECIS, citado por CONAMA, 2006) y al análisis de registros pluviométricos (cien años) de estaciones pertenecientes a la Dirección Meteorológica de Chile en la zona central de Chile. Por su parte,

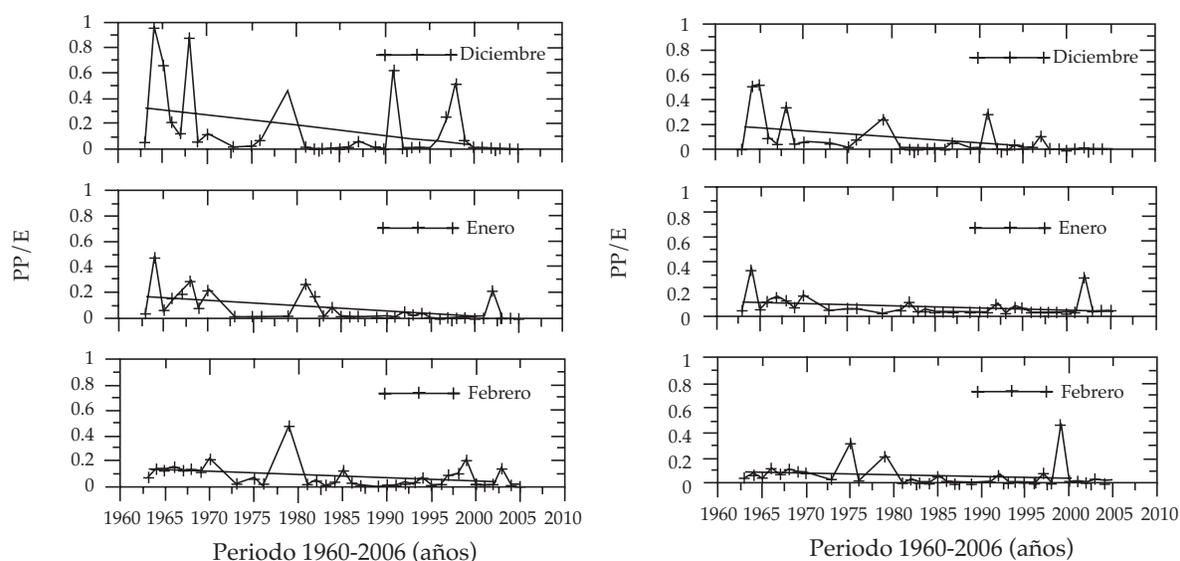


Figura 5. Comportamiento de PP/E, correspondiente a los meses de diciembre, enero y febrero para las subcuencas El Colorado (izquierda) y la subcuenca Maipo Alto (derecha), para las últimas cuatro décadas.

los caudales tienen una tendencia incremental en el periodo 1963-2006, incluso más de lo históricamente conocido.

Mensualmente existe un claro incremento de las precipitaciones en los meses húmedos, que superan a los caudales incluso con estaciones ubicadas en la zona baja; en tanto, en los meses secos se evidencia un incremento notorio de los caudales en relación con las precipitaciones, lo cual es sólo atribuible a un mayor derretimiento glaciar, como aporte de agua a los cauces.

Por otra parte, si bien los fenómenos de El Niño agudizan la presencia de lluvias, no es este fenómeno el responsable de algún cambio de tendencia. Esto es así porque el análisis fue hecho en función de incrementos de información por década, y en cada década se ha verificado la presencia de años Niño, por lo que su efecto se diluye en el conjunto de datos y no logra marcar alguna tendencia.

Finalmente, cabe señalar que producto del comportamiento en los meses estivales por separado que entregan las precipitaciones y los caudales, y de los valores que arrojan para los distintos periodos analizados las funciones de distribución de probabilidad, análisis hecho para las subcuencas de Colorado y Maipo Alto, se concluye que en los periodos secos existe un mayor aporte de aguas a la escorrentía de los cauces. Esto no es producto de las precipitaciones, ya que éstas han declinado en sus magnitudes en las últimas décadas en los periodos estivales, sino que son atribuibles sin ninguna duda a un mayor derretimiento glaciar y, por ende, a un mayor aporte de agua de escorrentía en los periodos ya señalados.

### Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Dirección General de Aguas (Gobierno de Chile), institución que facilitó los datos requeridos para llevar a cabo esta investigación. También desean expresar su reconocimiento a los evaluadores anónimos por sus atinadas observaciones, pues ellas han contribuido de forma significativa al enriquecimiento y claridad de la propuesta metodológica presentada en el artículo.

Recibido: 12/03/09  
Aprobado: 06/10/10

### Referencias

- ANIYA, M., SATO, H., NARUSE, R., SKVARCA, P., and CASASSA, G. The Use of Satellite and Airborne Imagery to Inventory Outlet Glacier of the Southern Patagonia Icefield, South America. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol. 62, 1996, pp. 1361-1369.
- AUSENSI, P. Evaluación de métodos hidrológicos para la completación de datos faltantes. Talca, Chile: Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Talca, 2005, 111 pp.
- BOWN, F., RIVERA, A., and ACUÑA, C. Recent glaciers variations at the Aconcagua basin, central Chilean Andes. *Annals of Glaciology*. Vol. 48, 2008, pp. 43-48.
- CASASSA, G. Glacier inventory in Chile: Current status and recent glacier variations. *Annals of Glaciology*. Vol. 21, 1995, pp. 317-322.
- CONAMA. *Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI. Informe final*. Santiago de Chile: Comisión Nacional del Medio Ambiente, Gobierno de Chile, 2006, 71 pp.
- CORRIPIO, J., PURVES, R., and RIVERA, A. Modeling climate-change impacts on mountain glaciers and water resources in the Central Dry Andes. *Darkening Peaks: Glacier Retreat, Science and Society*. Berkeley, USA: University of California Press, 2007, pp. 126-135.
- D'ANTONI, H. Pollen analysis of Gruta del Indio. *Quaternary of South America & Antarctic Peninsula*. Vol. 1, 1983, pp. 83-104.
- DGA. *Diagnóstico y clasificación de los cursos de agua según objetivos de calidad, Cuenca del río Mataquito*. Santiago, Chile: Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas de Chile, 2004.
- ESCOBAR, F., CASASSA, G. y POZO, V. Variaciones de un glaciar de montaña en los Andes de Chile Central en las últimas dos décadas. *Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andines*. Vol. 24, No. 3, 1995, pp. 683-695.
- FUENZALIDA, H., VILLAGRÁN, C., BERNAL, P., FUENTES, E., SANTIBÁÑEZ, F., PEÑA, H., MONTECINO, V., HAJEK, E. y RUTLLANT, J. Cambio climático global y eventuales efectos en Chile. *Amb. y Des*. Vol. 2, 1989, pp. 37-42.
- GARREAUD, R. y RUTLLANT, J. Variabilidad atmosférica de alta frecuencia en el borde oriental del anticiclón del Pacífico Sureste. *Cienc. Tecnol.* Vol. 29, núm. 1, 2006, pp. 5-13.
- GUMBEL, E.J. *Statistics of Extremes*. New York: Columbia University Press, 1958.
- HEUSSER, C.J., STREETER, S.S., and STUIVER, M. Temperature and precipitation record in Southern Chile extend to 43 000 yr. ago. *Nature*. Vol. 294, 1981, pp. 65-67.

- KOUTSOYIANNIS, D. and BALOUTSOS, G. Analysis of a Long Record of Annual Maximum Rainfall in Athens, Greece, and Design Rainfall Inferences. *Natural Hazards*. Vol. 22, No. 1. 2000, pp. 29-48.
- KOUTSOYIANNIS, D. Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: 1. Theoretical investigation. *Hydrological Sciences Journal*. Vol. 49, No. 4, 2004, pp. 575-590.
- LA MARCHE, V. Three-ring evidence of past climate variability. *Nature, Climatology Supplement*. Vol. 276. No. 5686, November, 1978, pp. 334-338.
- LE QUESNE, C., STAHL, D., CLEVELAND, M., THERRELL, M., ARAVENA, J., and BARICHIVICH, J. Ancient Austrocedrus tree-ring chronologies used to reconstruct central Chile precipitation variability from A.D. 1200-2000. *Journal of Climate*. Vol. 19, 2006, pp. 5731-5744.
- LLOYD, J. Climatic variation North-Central Chile from 1866-1970. *Journal of hydrology*. Vol. 19, 1973, pp. 53-70.
- MARANGUNIC, C. *Inventario de glaciares. Hoya del río Maipo*. Santiago, Chile: Dirección General de Aguas, Publicación G-2, 1979.
- MONTECINOS, A. and ACEITUNO, P. Seasonality of the ENSO-related rainfall variability in central Chile and associated circulation anomalies. *Journal of Climate*. Vol. 16, 2003, pp. 281-296.
- MONTECINOS, A., PURCA, S. y PIZARRO, O. Interannual-to-interdecadal sea surface temperature variability along the western coast of South America. *Geophysical Research Letters*. Vol. 30, No. 11, 2003, pp. 1570.
- PEÑA, H. and NAZARALA, N. Snowmelt-runoff Simulation Model of a Central Chile Andean Basin with Relevant Orographic Effects. In: *Large Scale Effects of Seasonal Snow Cover* (Proceedings of the Vancouver Symposium). Vol. 166, IAHS Publ., 1987, pp. 161-172.
- PIZARRO, R., CORNEJO, F., GONZÁLEZ, C., MACAYA, K. y MORALES, C. Análisis del comportamiento y agresividad de las precipitaciones en la zona central de Chile. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XXIII, núm. 2, abril-junio de 2008, pp. 91-109.
- QUINTANA, J. *Estudio de los factores que explican la variabilidad de la precipitación en Chile en escalas de tiempo interdecadal*. Tesis de Magister en Geofísica. Santiago de Chile: Universidad de Chile, 2004.
- QUINTANA, J. and ACEITUNO, P. Trends and interdecadal variability of rainfall in Chile. Proceedings of 8 ICSHMO. Foz do Iguaçu, Brazil, April 24-28, 2006, INPE, pp. 371-372.
- RIBSTEIN, P. y FRANCOU, B. *Glaciología e hidrología de glaciares en la Cordillera Real de Bolivia* [en línea]. Consultado el 25 de mayo de 2007. Disponible en World Wide Web: [http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/lb/ciencias\\_veterinarias\\_y\\_pecuarias/simposio1993/02areaclimayrecurso/21.html](http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/lb/ciencias_veterinarias_y_pecuarias/simposio1993/02areaclimayrecurso/21.html). 1991.
- RIVERA, A., ACUÑA, C., CASASSA, G., and BOWN, F. Use of remote sensing and field data to estimate the contribution of Chilean glaciers to the sea level rise. *Annals of Glaciology*. Vol. 34, 2002, pp. 367-372.
- RIVERA, A., BENHAM, T., CASASSA, G., BAMBER, J., and DOWDESWELL, J. Ice elevation and areal changes of glaciers from the Northern Patagonia icefield, Chile. *Global and Planetary Change*. Vol. 58. doi:10.1016/j.gloplacha, 2007, 11.037.
- RIVERA, A., BOWN, F., WENDT, J., CASASSA, G., ACUÑA, C., RIGNOT, E., CLAVERO, J., and BROCK, B. Ice volumetric changes on active volcanoes in southern Chile. *Annals of Glaciology*. Vol. 43, 2006, pp. 111-122.
- RIVERA, A., CASASSA, G. y LANGE, H. Variaciones recientes de glaciares en Chile. *Revista de Investigaciones Geográficas*. Vol. 34, núm. 1, 2000, pp. 29-60.
- RIGNOT, E., RIVERA, A., and CASASSA, G. Contribution of the Patagonia Icefields of South America to Global Sea Level Rise. *Science*. Vol. 302, 2003, pp. 434-437.
- ROSENBLUTH, B., FUENZALIDA, H., and ACEITUNO, P. Recent temperature variations in southern South America. *International Journal of Climatology*. Vol. 17, 1997, pp. 67-85.
- RUTTLAND, J. and FUENZALIDA, H. Synoptic aspects of the central Chile rainfall variability associated with the Southern Oscillation. *International Journal of Climatology*. Vol. 11, 1991, pp. 63-76.
- UNESCO. *Guía para la elaboración del balance hídrico de América del Sur*. Montevideo: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, Chile. Oficina Regional de Ciencia y Tecnología para América Latina y el Caribe, Rostlac, 1982, 130 pp.
- VARAS, E. y BOIS, P. *Hidrología Probabilística*. Santiago, Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile, 1998, 156 pp.
- VILLALBA, R. Tree-rings and glacial evidence for the medieval warm epoch and the little ice in Southern South America. *Climate Change*. Vol. 26, 1994, pp. 183-197.

## Abstract

PIZARRO-TAPIA, R., CABRERA-JOFRE, C., MORALES-CALDERÓN, C., & FLORES-VILLANELO, J.P. *Temporal variations of rainfall and flows in the Maipo River Basin, central Chile, and the influence of glacier melting on water yield (1963-2006)*. Water Technology and Sciences, formerly Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. II, No. 3, July-September, 2011, pp. 5-19.

*In this paper, precipitation and runoff trends over the past 40 years are inferred for two sub-basins of the Maipú River: El Colorado (1 710 km<sup>2</sup>) and the Alto del Maipo (3521.52 km<sup>2</sup>). The two sub-basins are located in the metropolitan region of Chile and have markedly snowy regimes. Five rain gauge stations with monthly and annual records (mm) were analyzed for the period 1963-2006. After completing the missing information for each station, mean areal precipitation was calculated using the Thiessen Polygons Method. Monthly and annual mean flow data were extracted from two flow gauging stations. The analysis of temporal behavior for rainfall and runoff variables was performed by adjusting the Type-1 Gumbel distribution function and calculating moving averages and the rainfall/runoff coefficient (existing ratio of rainfall to surface runoff; PP/E, abbreviation in Spanish). Thus, it was possible to determine that, over the last 40 years, the Maipo River basin showed increased winter rainfall, decreased summer and autumn rainfall and increased runoff during summer periods. Therefore, it can be inferred that the increase in this runoff is influenced by glacier melting.*

**Keywords:** glaciers, climate change, Chile, rainfall, runoff.

## Dirección institucional de los autores

Dr. Roberto Pizarro-Tapia  
Ing. Cynthia Cabrera-Jofre  
Ing. Carolina Morales-Calderón

Universidad de Talca  
Facultad de Ciencias Forestales  
Departamento de Gestión forestal y Ambiental  
Avenida Licray sin número, Casilla 721  
Talca, CHILE  
Teléfonos: +56 (71) 200 375, 200 440 y 200 442  
Fax: +56 (71) 200 428 y 200 455  
rpizarro@utalca.cl  
camorales@utalca.cl

Ing. Juan Pablo Flores-Villanelo  
Director Proyecto Erosión Nacional  
Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN)  
Avenida Manuel Montt 1164, Providencia  
Santiago de Chile, CHILE  
Teléfono: +56 (2) 2008 967  
Fax: +56 (2) 2008 913  
jflores@ciren.cl