

# PRINCIPALES MODOS DE VARIABILIDAD INTRAESTACIONAL DE CAUDALES DEL RÍO ATUEL Y CONDICIONES ATMOSFÉRICAS ASOCIADAS

Diego C. Araneo<sup>1,2</sup>, Juan A. Rivera<sup>1</sup> y Ricardo Villalba<sup>1</sup>  
daraneo@mendoza-conicet.gob.ar

<sup>1</sup> Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales, CONICET, CCT-Mendoza, Argentina

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UNCuyo, Mendoza, Argentina

## RESUMEN

En este trabajo se estudian los principales modos de variabilidad intra-estacional de escurrimientos superficiales del Río Atuel, provincia de Mendoza, mediante el análisis de componentes principales aplicado a su ciclo hidrológico anual; y su relación con la variabilidad local de la precipitación y la temperatura en la región de la cuenca y la circulación atmosférica asociada a nivel hemisférico.

La tercera componente principal (PC 3) representa la alternancia de anomalías de caudal entre los meses de oct-nov, diciembre, enero y febrero; y explica el 9.7% de la varianza total. Por su parte, la PC 4 representa la alternancia de caudales anómalos entre los meses de noviembre, enero y febrero; explicando el 7.5% de la varianza total. Estas componentes explican más de la mitad (58%) de la variabilidad intra-estacional de caudales del río, y el 17.2% del total.

Ambos patrones se encuentran vinculados a la variabilidad intra-estacional de anomalías de temperatura sobre la región de la cuenca, las cuales actúan propiciando o inhibiendo la fusión de nieve invernal y el consecuente aumento o disminución anómala de caudales del río, respectivamente. A su vez, estas anomalías de temperatura se asocian a anomalías de presión en altura y/o superficie, en gran parte vinculadas a trenes de onda de Rossby que se extienden a lo largo del Pacífico sur y Sudamérica.

## ABSTRACT

By means of the principal component analysis applied to the Río Atuel hydrological annual cycle, the main modes of intra-seasonal variability of the river surface runoff are studied. Also the relationships between PCs and the local variability of precipitation and temperature in the basin, and the associated global atmospheric circulation are analyzed.

The third principal component (PC 3) represents the alternation of streamflow anomalies between the months of October to November, December, January and February; and it accounts for 9.7% of the total variance. On the other hand, the PC 4 represents the alternation of anomalous runoffs between the months of November, January and February; accounting for 7.5% of the total variance. These components account for more than half (58%) of the intra-seasonal variability of the river streamflows, and for the 17.2% of the total.

Both PC 3 and 4 patterns are linked to the intra-seasonal variation of temperature anomalies over the basin region, which act variability promoting or inhibiting the melting winter snow and consequent abnormal increase or decrease in river flows, respectively. In turn, these temperature anomalies are associated with pressure anomalies in height and/or low levels, largely related to Rossby wave trains extending along the South Pacific and South America.

**Palabras clave:** Río Atuel, variabilidad intra-estacional, circulación atmosférica.

## 1) INTRODUCCIÓN

Los cambios inducidos por el clima en el régimen anual de los ríos alimentados por la nieve tienen serias implicaciones para la gestión de los recursos hídricos. En los Andes Centrales (AC) de Argentina-Chile (28°-36°S), la nieve acumulada en invierno sobre las montañas de gran altitud es el componente dominante de los caudales de los ríos de la región durante la temporada de fusión de primavera-verano (Masiokas et al., 2006). Aunque la topografía introduce complejidad en las respuestas de la capa de nieve al ciclo anual de temperatura, la existencia de series de caudales de más de un siglo de longitud hace que los AC sean particularmente adecuados para la identificación de cambios hidrológicos a largo plazo.

Araneo y Villalba (2014) estudiaron la variabilidad interanual a interestacional de caudales del Río Atuel mediante la técnica del Análisis de Componentes Principales (PCs) aplicada a los ciclos hidrológicos anuales entre 1906 y 2012, logrando discriminar entre componentes relacionadas con la precipitación y la temperatura, respectivamente asociadas a variaciones en la acumulación de nieve / total anual de caudal (PC1, con 49% de varianza explicada) y adelantamientos / retrasos de la fusión de nieve / pico anual de caudales (PC2, con 21% de la varianza explicada).

Caudales superiores (inferiores) a la media en relación con abundantes (escasas) nevadas en los AC (PC1), se asocian a desplazamientos de los stormtracks hacia el norte (sur), remotamente inducidos por temperaturas superiores (inferiores) a la media en la superficie del Pacífico ecuatorial —evento El Niño (La Niña)— (Quinn y Neal, 1983; Ruttlant y Fuenzalida, 1991; Montecinos y Aceituno, 2003; Araneo y Villalba, 2014). Adicionalmente, estudios recientes de Masiokas et al. (2010) y Villalba et al. (2012) también han identificado posibles influencias de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y el Modo Anular del Sur (SAM; Thompson y Wallace, 2000) en los modos de baja frecuencia de la variabilidad de los caudales en los AC y el norte de la Patagonia de Argentina y Chile.

Por otro lado, el adelantamiento (atraso) de los picos de caudal hacia noviembre-diciembre (enero-febrero) (PC2), son concurrentes con temperaturas superiores (inferiores) a la media en toda la cuenca del Atuel durante finales de primavera, inducidas por un aumento (disminución) de la circulación meridional de los trópicos debido al fortalecimiento (debilitamiento) del anticiclón del Atlántico Sur (Araneo y Villalba, 2014). Estas anomalías de circulación están vinculadas a la fase positiva (negativa) persistente del SAM. Además, años con caudales reducidos (aumentados) en enero, y consecuentemente un relativo adelanto (retraso) del máximo caudal hacia noviembre-diciembre (enero-febrero), también están asociados con un enfriamiento (calentamiento) anómalo en los niveles altos de la atmósfera durante enero, inducido por centros de baja (alta) presión sobre la región como parte de un tren de ondas estacionarias de Rossby casi zonal que se extiende desde Australia hasta el Atlántico Sur.

En este trabajo se estudian los principales modos de variabilidad intra-estacional de caudales del Río Atuel, provincia de Mendoza, mediante el análisis de las PCs 3 y 4, siguiendo la metodología descrita en Araneo y Villalba (2014), y su relación con la variabilidad local de la precipitación y la temperatura en la región de la cuenca y la circulación atmosférica asociada a nivel hemisférico.

## 2) DATOS Y METODOLOGÍA

Los registros de caudales medios mensuales del Río Atuel en la estación de aforo de La Angostura (35°05'57"S, 68°52'26"W; 1.200 m), de julio 1906 a junio 2012, fueron proporcionados por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (<http://www.hidricosargentina.gov.ar/index.php>). El área de la cuenca aguas arriba de esta estación de aforo es de 3.800 km<sup>2</sup>, y no hay actividades humanas en el área que alteren la escorrentía natural. Dado que Río Atuel muestra los caudales máximos y mínimos en verano e invierno, respectivamente, definimos el ciclo hidrológico anual de julio a junio. Con el fin de determinar las principales características de la variabilidad intra-estacional en el ciclo hidrológico anual, se aplicó el análisis de componentes principales (PCA) a

los 106 ciclos completos en el registro de datos, de acuerdo a los procedimientos descritos en Araneo y Villalba (2014).

Con el fin de determinar las relaciones entre la variabilidad intra-estacional del ciclo de caudales y las características climáticas locales y globales, se calcularon campos de correlación para cada mes durante el período 1958-2011, entre las componentes de peso (PC loadings, PCL) y las siguientes variables meteorológicas: altura geopotencial (HGP, en m) y vector de viento ( $V$ , en  $m\ s^{-1}$ ) en los niveles de 1000 y 500 hPa; precipitación (PPP, en mm) y temperatura del aire en 2 m ( $T$ , en  $^{\circ}C$ ). Las correlaciones con el vector del viento se calcularon separadamente para las componentes zonal ( $r_u$ ) y meridional ( $r_v$ ), analizando luego el vector de correlación conjunta  $\vec{r} = r_u \hat{i} + r_v \hat{j}$ . Se determinaron los coeficientes de correlación significativos al 90, 95, 99 y 99,5% de confianza de acuerdo al test t de Student. Los vectores  $\vec{r}$  se consideraron significativos cuando al menos uno de sus componentes ( $r_u$  o  $r_v$ ) resultó mayor que el valor crítico al nivel de significancia del 95%.

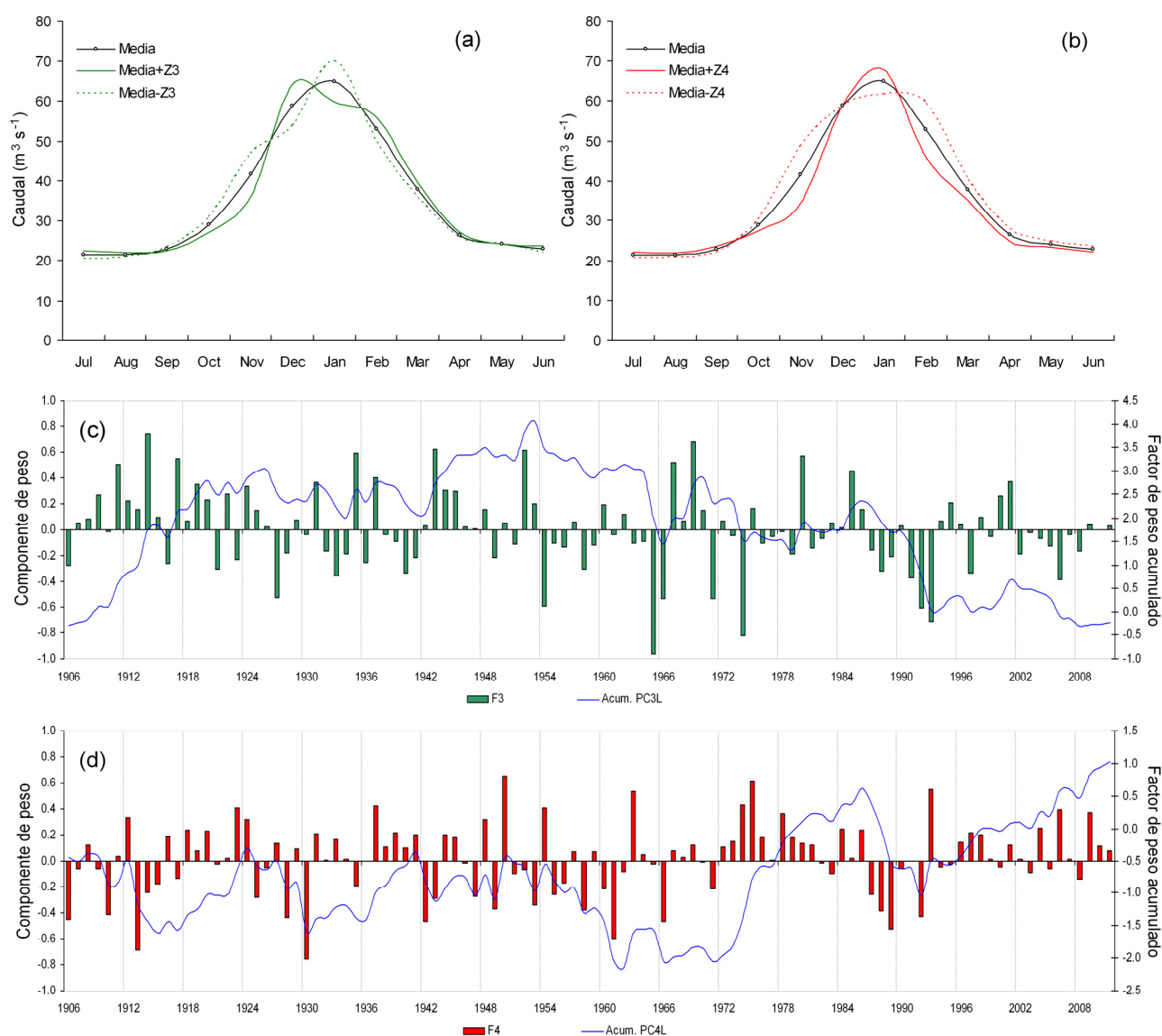


Figura 1. Paneles superiores: Patrones principales números 3 (a) y 4 (b) de variabilidad del ciclo hidrológico anual del Río Atuel. En ambos paneles, la línea continua negra con puntos representa el ciclo medio y las líneas punteadas representan los modos inversos de cada patrón. Paneles inferiores: Series de tiempo de factores de peso asociados a las PCs 3 (c) y 4 (d) (barras verticales). En ambos casos, las líneas azules representan las series correspondientes de factores de peso acumulados.

Los datos de altura geopotencial y viento, con cobertura global en cuadrícula regular de  $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$  de latitud y longitud, se obtuvieron del Reanálisis 1 de NCEP (período 1948-2012; ver Kalnay et

al., 1996); mientras los de precipitación y temperatura de superficie se adquirieron del registro interpolado de la Universidad de Delaware (v3.01, período 1901-2010, con una cobertura continental en cuadrícula de  $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$  de latitud y longitud); todos proporcionados por el sitio web del PSD NOAA en <http://www.esrl.noaa.gov/psd>.

### 3) RESULTADOS

Mientras las PC 1 y 2 del ciclo anual de caudales del Atuel representan el exceso/déficit de volumen total anual asociado a la variabilidad interanual de precipitaciones niveas de invierno, y los adelantamientos/retrasos del pico anual de caudales asociados a la variabilidad de las condiciones térmicas de primavera-verano, respectivamente, explicando un 70.4% de la variabilidad total (Araneo y Villalba, 2014); las restantes componentes representan variaciones intra-estacionales del régimen de caudales, de las cuales, las PC 3 y 4 acumulan más de la mitad de la varianza remanente (17.2% del total).

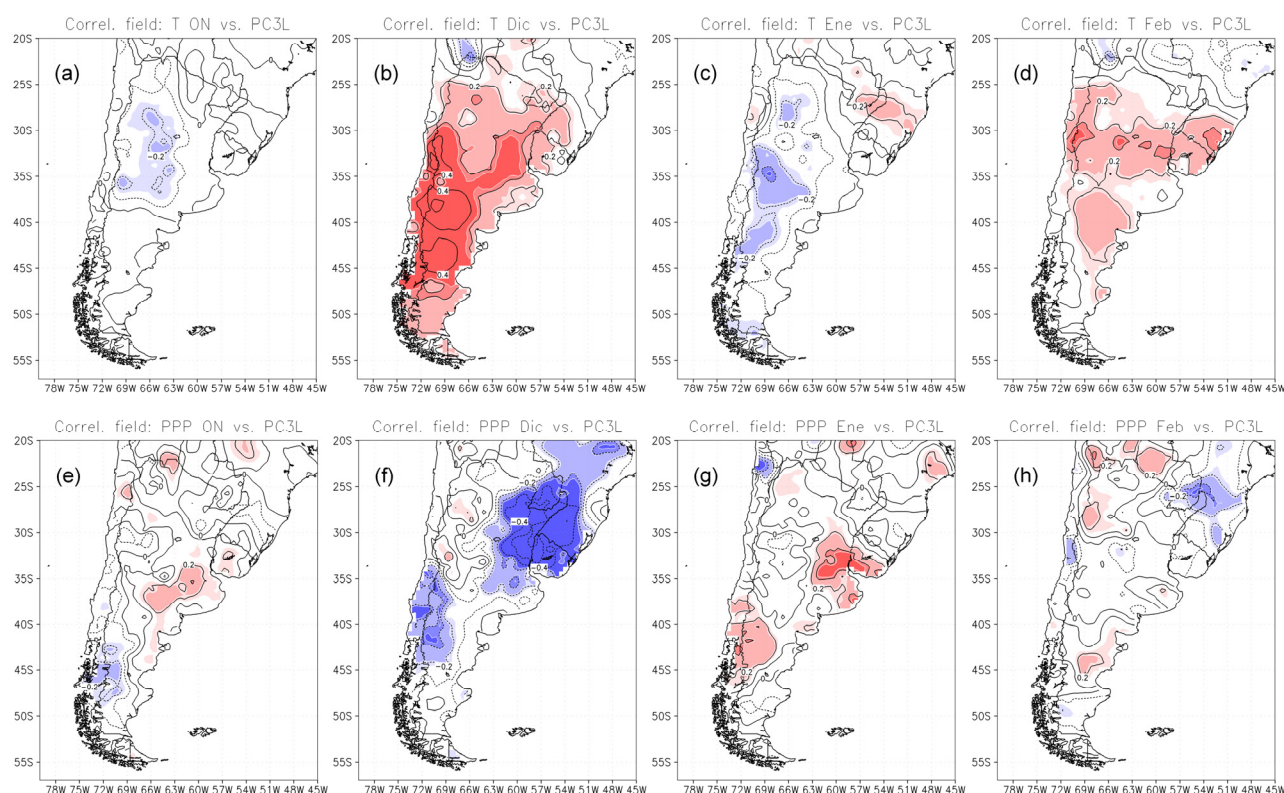


Figura 2. Campos de correlaciones entre la serie de pesos asociada a la PC 3 (Fig. 1c) y la temperatura de superficie (paneles superiores) y la precipitación (paneles inferiores), para los períodos/meses (de izquierda a derecha): oct-nov, diciembre, enero y febrero. Los valores sombreados (de claro a oscuro) corresponden a correlaciones significativas al 90, 95, 99 y 99.5% de confianza (positivos en rojo, negativos en azul).

La PC 3 explica el 9.7% del total de varianza y, en modo directo, representa un régimen de caudales con valores inferiores a la media en octubre-noviembre y enero, y superiores en diciembre y febrero (viceversa en modo inverso) (Fig. 1a). La serie de factores de peso asociados (PC3L) (Fig. 1c) revela períodos con valores predominantemente positivos (serie de pesos acumulados creciente) durante los primeros años del siglo pasado (1906 a 1925), y negativos (acumulados decreciente) desde mitad del siglo pasado hasta la actualidad (1954 a 2008), evidenciando un ligero cambio de tendencia en la influencia de esta componente, de su modo directo (a principios de siglo XX) a su modo inverso (en los últimos 60 años).

Los campos de correlaciones entre la PC3L y la temperatura (Fig. 2a-d), muestra valores significativos negativos sobre los AC de Argentina para oct-nov y enero; y positivos para diciembre y febrero; implicando la presencia de anomalías negativas (positivas) de temperatura para los meses

de caudales inferiores (superiores) a lo normal. Adicionalmente, los campos de correlaciones análogos a estos pero para precipitación, no exhiben valores significativos sobre la cuenca del Atuel, con excepción del mes de diciembre que muestra valores negativos sobre las nacientes de río. Sin embargo, las asociables anomalías negativas (positivas) de precipitación sobre la cuenca, no explicarían las anomalías positivas (negativas) de caudal observadas para este mes en el caso del modo directo (inverso) de la PC 3. En consecuencia, la inhibición o promoción de la fusión de nieve acumulada en los meses fríos debido a la alternancia de anomalías negativas y positivas de temperatura sobre la cuenca durante estos meses, explicaría la sucesión de anomalías negativas y positivas de caudal, respectivamente, representada por esta componente de variabilidad intraestacional de escurrimientos del río.

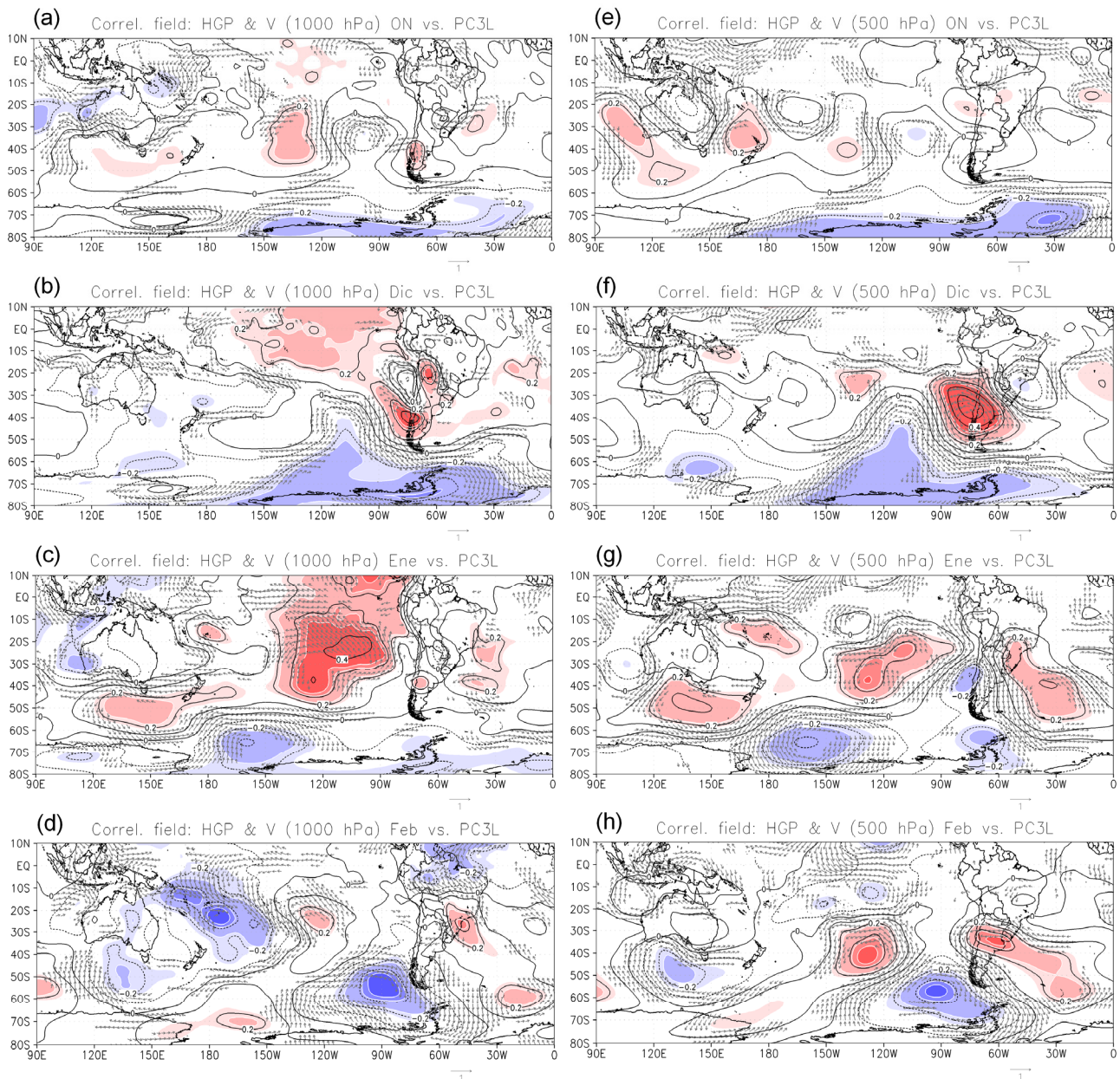


Figura 3. Campos de correlaciones entre la serie de pesos asociada a la PC 3 (Fig. 1c) y la altura geopotencial (contornos) y el viento (vectores) en 1000 hPa (izquierda) y 500 hPa (derecha), para los períodos/meses (de arriba hacia abajo): oct-nov, diciembre, enero y febrero. Los valores sombreados (de claro a oscuro) corresponden a correlaciones significativas al 90, 95, 99 y 99.5% de confianza (positivos en rojo, negativos en azul). Sólo se muestran los vectores con al menos una componente,  $r_u$  o  $r_v$ , significativa al 95% de confianza.

La Figura 3 muestra los campos de correlaciones entre la PC3L y la altura geopotencial y el viento en los niveles de 1000 y 500 hPa para los mismos períodos de la figura anterior. En oct-nov se

observan correlaciones positivas en 1000 hPa sobre el norte patagónico que induce una circulación sobre los AC proveniente desde el sur. Esta circulación implicaría una advección negativa de temperaturas que explicaría las anomalías negativas de temperatura sobre la cuenca del Atuel durante este período, con la consecuente inhibición de la fusión de nieve y caudales por debajo de lo normal (PC3 modo directo). En niveles altos no se observan correlaciones significativas sobre la región. En el mes de diciembre se muestran correlaciones positivas en 500 hPa sobre los AC, acompañada de una circulación ciclónica en 1000 hPa que advectaría aire desde el norte sobre la cuenca. Las consecuentes anomalías positivas de HGP en altura y circulación ciclónica en superficie, implicarían un aumento de los espesores de la capa 1000-500 hPa sobre la región, con inhibición de la nubosidad y advección positiva de temperatura sobre la cuenca. Esta configuración explicaría el aumento anómalo de temperaturas sobre el Atuel, con fuerte aumento de la fusión nieve y aumento de caudales observado en el caso del modo directo de la PC3 en este mes. Por el contrario, durante enero las correlaciones en altura cambian de signo observándose un centro con valores negativos centrado sobre las costas de Chile central que afectan la región de la cuenca. Este centro se encuentra acompañado por otro de signos contrarios en superficie que induce una circulación anómala desde el sur sobre la región. Las consecuentes anomalías de HGP negativas en altura y positivas en superficie involucrarían una disminución de los espesores que implicaría un enfriamiento anómalo de la capa, reforzado con advección fría en niveles bajos. Esta configuración explicaría las anomalías negativas de T observadas sobre los AC en enero con la consecuente disminución de caudales por inhibición de la fusión nieve (PC3 en modo directo). Finalmente en febrero, la región de los AC se ve afectada por un centro de correlaciones positivas de HGP en 500 hPa que, al igual que en diciembre, implicaría una expansión de los espesores en la capa más baja, lo cual explicaría el retorno de las anomalías positivas de T para este mes y el consecuente aumento de caudales para el caso modo directo.

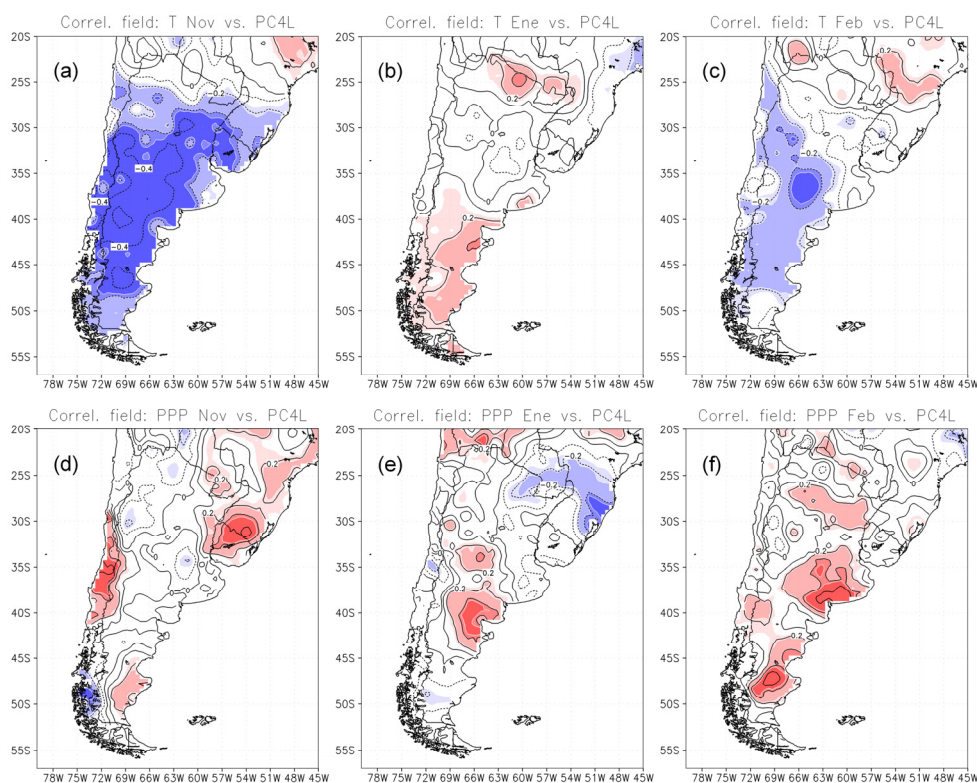


Figura 4. Idem Fig. 2 pero para la serie de pesos asociada a la PC 4 (Fig. 1d) y los meses: noviembre, enero y febrero.

Las configuraciones de altura descritas anteriormente para los meses de verano (Fig. 3f-g) formarían parte de cortos trenes de ondas de Rossby que se extienden sobre la región desde el

Pacífico central, más claramente visibles en los meses de enero y febrero. Adicionalmente, signos y circulaciones contrarios a los descritos en el párrafo anterior, explicarían las variaciones de caudal representadas por la PC3 en modo inverso.

La PC 4 explica el 7.5% del total de varianza y, en modo directo, representa un régimen de caudales con valores inferiores a la media en noviembre y febrero, y levemente superiores en enero (viceversa en modo inverso) (Fig. 1b). La serie de factores de peso asociados (PC4L) (Fig. 1d) muestra coeficientes mayormente positivos desde 1972 a 2011, a excepción del período 1987-1992 (serie de factores acumulados creciente en 1972-1986 y 1993-2011, y decreciente en 1987-1992); implicando una tendencia en la influencia de esta componente en su modo directo durante las últimas cuatro décadas.

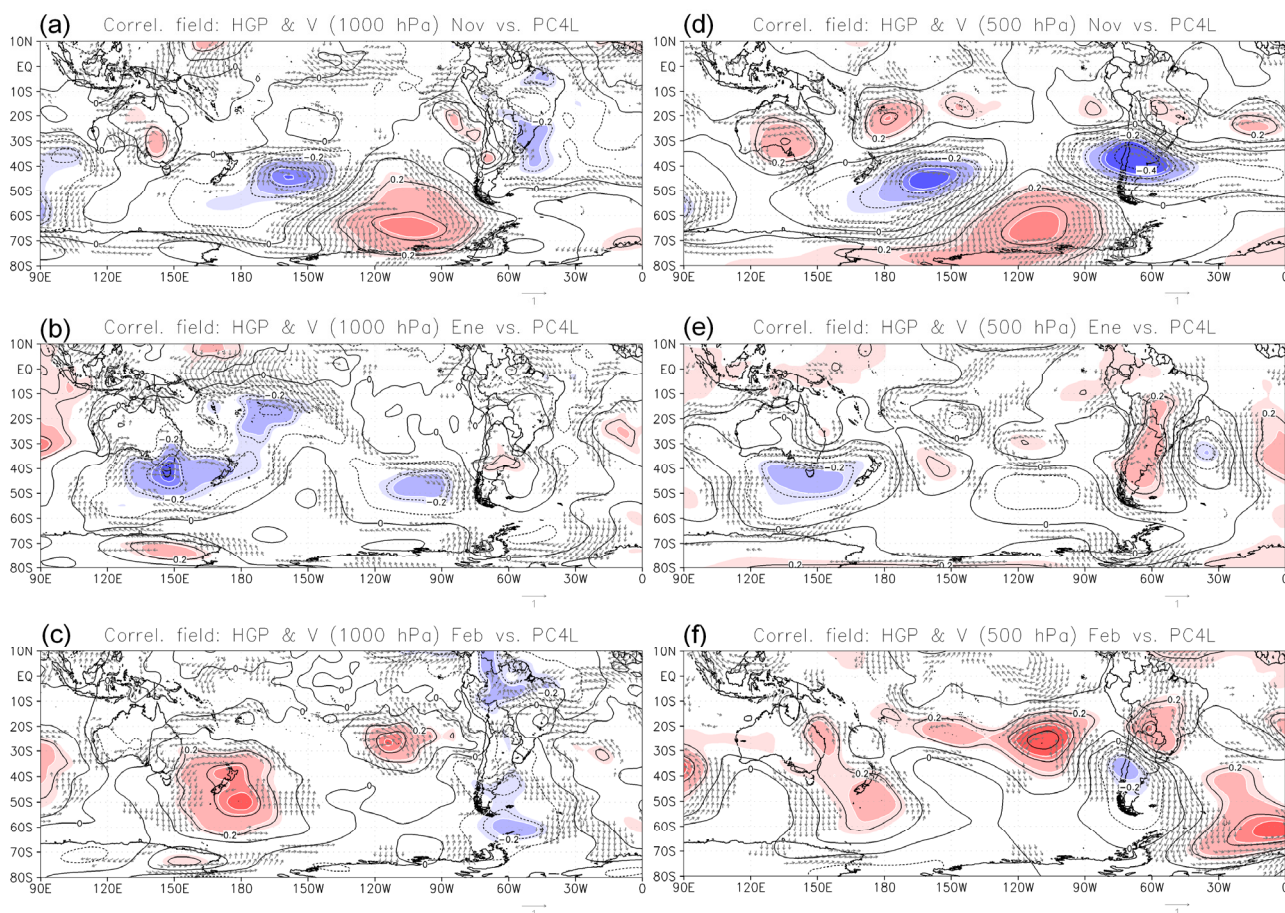


Figura 5. Idem Fig. 3 pero para la serie de pesos asociada a la PC 4 (Fig. 1d) y los meses: noviembre, enero y febrero.

Los campos de correlaciones entre la PC4L y la temperatura (Fig. 4a-c), muestra valores significativos negativos sobre los AC para noviembre y febrero, y positivos para enero (aunque significativos sólo para la región patagónica); implicando la presencia de anomalías negativas (positivas) de temperatura para los meses de caudales inferiores (superiores) a lo normal. Adicionalmente, los campos de correlaciones análogos a estos pero para precipitación, exhiben valores significativos sobre las nacientes del Atuel en los meses de noviembre —con signo positivo— y enero —con signo negativo, y signos positivos sólo hacia el este de Cuyo y el norte patagónico—. Sin embargo, las asociables anomalías de precipitación con esos mismos signos (con signos contrarios) sobre el oeste de la cuenca, no explicarían las anomalías de caudal observadas para este mes en el caso del modo directo (inverso) de la PC 4. En consecuencia, al igual que lo descrito para la PC 3, la alternancia de anomalías negativas y positivas de caudal representada por la PC 4 también sería consecuencia de las variaciones térmicas (anomalías de T) sobre la cuenca.

La Figura 5 muestra los campos de correlaciones entre la PC4L y la HGP y el V en los niveles de 1000 y 500 hPa para los mismos períodos de la figura anterior. Para noviembre se observa un centro de correlaciones negativas de HGP en 500 hPa y positivas en 1000 hPa sobre el centro de Argentina, lo cual implica una contracción anómala de los espesores de la capa inferior y la consecuente disminución de las temperaturas sobre la cuenca del Atuel observada en la figura anterior, y asociada la reducción anómala de caudales para este mes en el modo directo de la PC 4 (Fig. 1 b). Las asociadas anomalías de HGP en altura, formarían parte de un tren de ondas que se observa extendiéndose desde el oeste del Pacífico sur hacia el mar de Amundsen y luego virando hacia Sudamérica. Por el contrario, en enero se observan correlaciones (/anomalías) positivas de HGP en altura ocupando la totalidad de Argentina, lo cual estaría vinculado a una expansión de los espesores de la capa más baja y consecuentes anomalías positivas de T (Fig. 4b) y aumento de caudales por incremento de la fusión nival para este mes, mostrado en la PC 4 modo directo. Durante febrero, las correlaciones/anomalías de HGP en 500 hPa vuelven a afectar los AC, provocando una disminución anómala de espesores/T sobre la cuenca, y la consecuente inhibición de fusión nival y caudales mostrado por la PC 4 en modo directo para este mes. Las configuraciones con signos contrarios a los descritos en este párrafo, explicarían las variaciones de caudal representadas por la PC 4 en modo inverso.

#### 4) CONCLUSIONES

Mediante el análisis de PCs aplicado al ciclo hidrológico anual de caudales del Río Atuel, se ha logrado determinar los principales patrones de variabilidad de escala intra-estacional de los escurrimientos superficiales de este río, y su relación con las condiciones atmosféricas locales y circulación de escala sinóptica a global.

La PC 3 representa la alternancia de anomalías de caudal entre los meses de oct-nov, diciembre, enero y febrero; y explica el 9.7% de la varianza total. Por su parte, la PC 4 representa la alternancia de caudales anómalos entre los meses de noviembre, enero y febrero; explicando el 7.5% de la varianza total. Estas componentes explican más de la mitad (58%) de la variabilidad intra-estacional de caudales de este río, y el 17.2% del total.

Ambos patrones se encuentran vinculados a la variabilidad intra-estacional de anomalías de temperatura sobre la región de la cuenca, las cuales actúan propiciando o inhibiendo la fusión de nieve invernal y el consecuente aumento o disminución anómala de caudales del río, respectivamente. A su vez, estas anomalías de temperatura se asocian a anomalías de presión en altura y/o superficie, en gran parte vinculadas a trenes de onda de Rossby que se extienden a lo largo del Pacífico sur y Sudamérica.

**AGRADECIMIENTOS:** Este trabajo ha contado con el aporte de los fondos provenientes de los proyectos PIP 2010-439 de CONICET y PICT 2013-0043 de la ANCyT. Se agradece además a la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación y al NCEP/NCAR por el aporte de los datos empleados.

#### REFERENCIAS

- Araneo D. y Villalba R., 2014:** Variability in the annual cycle of the Río Atuel streamflows and its relationship with tropospheric circulation. *Int. J. Climatol*, DOI: 10.1002/joc.4185
- Kalnay E. et al., 1996:** The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 77, 437–470.
- Masiokas M.H., Luckman B.H., Villalba R., Delgado S., Rabassa J., 2010:** Little Ice Age fluctuations of Glaciar Río Manso in the north Patagonian Andes of Argentina. *Quaternary Res.*, 73, 96–106.



**Masiokas M.H., Villalba R., Luckman B.H., Le Quesne C., Aravena J.C., 2006:** Snowpack variations in the central Andes of Argentina and Chile, 1951–2005: large-scale atmospheric influences and implications for water resources in the Region. *J. Clim.*, 19, 6334–6352.

**Montecinos A., Aceituno P., 2003:** Seasonality of the ENSO related rainfall variability in central Chile and associated atmospheric circulation. *J. Clim.*, 16, 281–296.

**Quinn W., Neal V., 1983:** Long-term variations in the Southern Oscillation, El Niño and the Chilean subtropical rainfall. *Fish. Bull.*, 81, 363–374.

**Rutllant J., Fuenzalida H., 1991:** Synoptic aspects of the central Chile rainfall variability associated with the Southern Oscillation. *Int. J. Climatol.*, 11, 63–76.

**Thompson D.W.J., Wallace J.M., 2000:** Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. *J. Clim.*, 13, 1000–1016.

**Villalba R., Lara A., Masiokas M.H., Urrutia R., Luckman B.H., Marshall G.J., Mundo I.A., Christie D.A., Cook E.R., Neukom R., Allen K., Fenwick P., Boninsegna J.A., Srur A.M., Morales M.S., Araneo D., Palmer J.G., Cuq E., Aravena J.C., Holz A., Le Quesne C., 2012:** Unusual Southern Hemisphere tree growth patterns induced by changes in the Southern Annular Mode. *Nat. Geosci.*, 5, 11, 793–798, DOI: 10.1038/ngeo1613.