

IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS DE HOMOGENEIDAD ESTADÍSTICA PARA LOS CAUDALES DE RÍOS ANDINOS ARGENTINOS Y SU RELACIÓN CON LA CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA Y LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR

Rosa H. Compagnucci¹ y Diego C. Araneo

Departamento de Ciencias de Atmósfera y los Océanos
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires (FCEyN-UBA)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

(Manuscrito recibido el 9 de septiembre de 2005, en su versión final el 3 de julio de 2006)

RESUMEN

El presente trabajo se centra en localizar las distintas regiones a lo largo de la Cordillera de los Andes sobre las cuales el comportamiento de los caudales de los ríos involucrados muestran homogeneidades estadísticas, estudiando además su vinculación con las condiciones de Temperatura de la Superficie del Mar y Circulación Atmosférica.

Se define un índice lineal de correlación corregido, utilizado como medida de distancia en un Análisis de Componentes Principales. Las primeras dos Componentes permiten identificar dos regiones independientes que explican la mayor variabilidad.

Estas regiones abarcan: I) desde el río Neuquén hasta el río Senguer y II) desde el río Jachal hasta el río Colorado.

La región I presenta un régimen de doble máximo de caudal en invierno-primavera, mientras que la región II se caracteriza por un máximo en verano. Esta última estaría íntimamente ligada a los patrones del ciclo El Niño / Oscilación Sur. Las diferencias más relevantes de la circulación asociada a los extremos de caudal en la región I con respecto a la II serían: 1) el corrimiento de los sistemas de circulación hacia mayores latitudes, 2) la mayor relevancia de los sistemas de latitudes medias, 3) la menor importancia de los ubicados sobre el Pasaje de Drake y 4) la presencia en altura de un tren de ondas estacionarias de menor longitud que atraviesa el continente por latitudes subtropicales provenientes del Pacífico central en dirección NO-SE.

Palabras clave: Cuyo, Patagonia, Hidrología, Variabilidad Climática, ENOS, Circulación atmosférica.

IDENTIFICATION OF STATISTICAL HOMOGENEOUS AREAS FOR ARGENTINEAN ANDEAN RIVER FLOWS AND THEIR RELATIONSHIP WITH THE ATMOSPHERIC CIRCULATION AND SEA SURFACE TEMPERATURES

ABSTRACT

The purpose of this paper is to locate the different regions in Los Andes mountain range on which the behavior of the flows of the involved rivers shows statistical homogeneities, studying also their entailment with sea surface temperature and atmospheric circulation.

¹ Dirección electrónica: rhc@at.fcen.uba.ar

A corrected correlation linear index is defined and used as a distance measurement in a Principal Component Analysis. The first two Components identify two independent regions that explain the greater variability.

These regions include: I) the area from the Neuquén River to the Senguer River and II) the area from the Jachal River to the Colorado River.

Region I shows a double maximum regime of flow in winter-spring, whereas Region II is characterized by a maximum in summer. The last one would be closely related to the El Niño / Southern Oscillation patterns. The most relevant differences in the associated circulation to volume extremes of the Regions I and with respect to the Region II would be: 1) the displacement of the circulation systems towards higher latitudes, 2) the greater relevance of the middle latitude systems, 3) the smaller importance of the systems located on the Drake Passage and 4) the presence at 500 hPa of a smaller longitude stationary waves train that crosses the continent at subtropical latitudes coming from the central Pacific in NW–SE direction.

Key words: Cuyo, Patagonia, hydrology, climate variability, ENOS, atmospheric circulation.

1. INTRODUCCIÓN

Los ríos argentinos, cuyas nacientes se encuentran sobre la cordillera de los Andes, fluyen en forma casi paralela de noroeste a sudeste. Consecuentemente, el régimen de los caudales de estos ríos depende de diversos factores relacionados principalmente con las latitudes sobre las que descansa su cuenca. En el noroeste, donde se ubica el río Bermejo, los regímenes de caudal son de control pluvial y presentan una variabilidad estacional bien definida con grandes valores en la época lluviosa (hasta 85% del escurrimiento en el período estival). Por tal motivo, la variabilidad interanual de estos ríos depende de variaciones de la circulación atmosférica y de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) en verano.

En el sector central de la cordillera, los caudales de los ríos de Cuyo se encuentran altamente correlacionados entre sí (Menegazzo y Radicella, 1982) y, aunque casi la totalidad de su derrame anual se produce durante el período cálido; su volumen depende básicamente de la precipitación nívea de invierno sobre las altas cumbres y del posterior derretimiento de la nieve y el hielo en primavera-verano. Consecuentemente, la variación interanual de estos caudales dependerá primordialmente de las condiciones de la atmósfera durante el período frío. En la región patagónica, donde la altura de la cordillera es menor, pueden distinguirse dos subregiones en relación con las características generales de las marchas anuales medias de caudal de los ríos correspondientes. En

el sector norte su régimen de caudal mensual muestra dos máximos, uno en invierno —debido a las lluvias— y otro en primavera y comienzos de verano —como producto del derretimiento de nieve— (Quintela y Scarpati, 1993). En el sector sur de la Patagonia los dos procesos dan como resultado un único máximo que se extiende desde junio a noviembre.

De manera que tanto en Patagonia como en Cuyo la variabilidad interanual depende en rasgos generales de las condiciones de invierno. Hoffman (1969) mostró que la precipitación en la región central de Chile, la cual se produce casi totalmente en el semestre frío, se encuentra relacionada con la acumulación de nieve en las altas cumbres sobre las laderas orientales de los Andes, donde se localizan las nacientes de los ríos cuyanos. Su variabilidad interanual fue inicialmente relacionada con el Niño por Pittock (1980) y Quinn y Neal (1982) quienes notaron una tendencia a la ocurrencia de precipitaciones excepcionalmente abundantes en la región de Chile central durante los años El Niño. A su vez, para los meses de invierno, Aceituno (1988) encontró una tendencia a precipitaciones anormalmente abundantes en Chile central durante la fase negativa de la Oscilación-Sur (OS), relacionada con el debilitamiento y corrimiento hacia el norte del anticiclón subtropical del Pacífico Sur. Adicionalmente, Ruttlant (1987) y Ruttlant y Fuenzalida (1991) atribuyeron el incremento invernal de la precipitación en Chile central durante El Niño a la mayor frecuencia y persistencia de anticiclones de bloqueo que se

Identificación de áreas de homogeneidad...

interponen en el flujo de los oestes al sudoeste de América del Sur. Adicionalmente, las abundantes precipitaciones y los caudales sobre lo normal en los ríos andinos de Chile central fueron relacionados con anomalías positivas de la TSM del Pacífico ecuatorial (Aceituno y Vidal, 1990; Waylen y Caviedes, 1990). Por su parte, Escobar y Aceituno (1998) demostraron la influencia del ciclo de variabilidad de los extremos de la TSM —El Niño-Oscilación Sur (ENOS)— sobre la precipitación nívica en el sector andino de Chile, encontrando señales opuestas para los eventos El Niño y La Niña. Por ello, las fases cálida y fría del ENOS se relacionan con caudales sobre y bajo lo normal respectivamente en los ríos andinos chilenos afectando así su régimen fluviométrico (Aceituno y Garreaud, 1995).

Simultáneamente, Compagnucci y Vargas (1998) hallaron que la variabilidad de precipitación invernal en la región cordillerana comprendida entre 30° y 40° S, resulta homogénea y significativamente relacionada con los totales de invierno (Abril a Septiembre) en Santiago de Chile. Además, para el caso particular del río Mendoza, concluyeron que los caudales de verano que tienden a ubicarse por encima (por debajo) de lo normal durante la fase madura (i.e. período Noviembre-Marzo) de eventos El Niño —TSM cálidas— (La Niña —TSM frías—) dado que durante los inviernos previos a estos eventos tienden a producirse nevadas por sobre (bajo) lo normal en la Cordillera Central. También mostraron que la circulación atmosférica de invierno asociada a esos años presenta una mayor componente meridional (zonal) en latitudes medias. La relación entre la TSM y la variabilidad de los derrames de los ríos andinos es confirmada por Waylen et al. (2000), Compagnucci et al. (2000), Carril et al. (1997) y Berri y Flamenco (1999), entre otros.

Recientemente, Montecinos y Aceituno (2003) estudiaron las características de la circulación atmosférica asociadas a la variabilidad de la precipitación en Chile central, confirmando que el aumento de bloqueos sobre los mares de Amundsen-Bellingshausen durante eventos El Niño es clave en la determinación de condiciones húmedas durante el invierno. Estos episodios de bloqueo parecen formar parte de una estructura de onda estacionaria, particularmente intensa durante la primavera, caracterizada por una secuencia de

centros de anomalías positivas y negativas de altura geopotencial con estructura cuasi-barotrópica que se extiende desde el Ecuador hacia el sudeste del Pacífico y vuelve hacia el sudoeste del Atlántico. Por otra parte, condiciones anómalas secas durante el invierno y la primavera ocurren durante la Niña bajo la intensificación del anticiclón semipermanente del Pacífico junto con una migración hacia el sur de los “storm-track”.

La relación existente entre la variabilidad de las precipitaciones en Chile central y la acumulación de nieve en la porción occidental de la Cordillera, de la cual depende en gran parte el caudal estival de los ríos de Cuyo, permite inferir que las principales características de las variables climáticas y de la circulación atmosférica que determinan extremos de precipitación en el centro de Chile estén también relacionadas a la variabilidad interanual de los ríos de Cuyo. Sin embargo, no ha sido determinada hasta el momento en forma directa la relación existente entre la variabilidad de los caudales de los ríos cuyanos y las características de las principales variables climáticas involucradas. Además, para los ríos Patagónicos se desconoce aun la relación entre la variabilidad de los caudales y las características de los forzantes climáticos que los determinan.

Por lo tanto, para un análisis comparativo de la variabilidad de los caudales andinos que tienen como fuente las condiciones de invierno se requieren resultados comparables del análisis para los diferentes comportamientos del régimen de caudal con los principales forzantes involucrados en la variabilidad interanual de los mismos.

El objetivo del presente trabajo es determinar las regiones cuyos ríos muestran regímenes de caudal con comportamiento temporal homogéneo y establecer un río de referencia en cada una de ellas, determinando a su vez las características principales de sus regímenes y la relación existente entre éstos y las condiciones de TSM y circulación asociadas a su variabilidad. Dado que los caudales de los ríos con nacientes en el Noroeste de Argentina dependen de las precipitaciones estivales, los mismos no son tenidos en cuenta.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

Los datos de caudal corresponden a los promedios mensuales (en m³/s) provistos por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación.

Las estaciones de aforo pertenecientes a las provincias de Catamarca, La Rioja, San Juan, Mendoza, Neuquén, Río Negro, Chubut y Santa Cruz, conforman una base de 146 puntos de observación distribuidos sobre la región que va desde el río Ampajango (pcia. de Catamarca) hasta el río Penitentes (pcia. de Santa Cruz) y cuyos registros engloban distintos períodos desde 1903 (para la estación más antigua) a 2000. Las provincias de Salta y Jujuy no poseen actualmente estaciones en regiones de interés para este trabajo. De las 146 estaciones consideradas, 89 se encuentran actualmente activas y 57 han sido suspendidas dejando de funcionar definitivamente. Debido a que los períodos de medición son distintos para cada estación y que la mayoría de los registros presenta datos faltantes, se procedió a la eliminación de estaciones cuyos registros no poseen períodos comunes de medición. De esta forma el conjunto total de puntos de observación debió reducirse a 74 estaciones entre las que se cuentan activas y suspendidas.

Las estaciones consideradas se correlacionan entre sí tomando los períodos comunes de medición en cada caso y, dado que la cantidad de pares correlacionados es distinta para cada par de estaciones lo cual hace estadísticamente incomparables estas correlaciones, se define un índice lineal de correlación corregido (\tilde{r}), basándose en el coeficiente de correlación muestral calculado (r) y el coeficiente de correlación crítico al 5% de significancia correspondiente en cada caso (r_c), dado por la expresión:

$$\tilde{r} = \begin{cases} \delta(r) \frac{|r| - r_c}{1 - r_c} & \text{si } |r| > r_c \\ 0 & \text{si } |r| \leq r_c \end{cases}$$

donde la función $\delta(r)$ representa el signo de r . Si bien en teoría es siempre $|\tilde{r}| \leq |r|$, en la mayoría de los casos la diferencia entre ambos coeficientes no resulta de gran magnitud dado que, aún cuando la cantidad de datos faltantes es grande, el número de pares correlacionados resulta lo suficientemente grande como para obtener bajos coeficientes críticos. En consecuencia, los casos de mayores diferencias se deben a coeficientes de correlación (y por lo tanto coeficientes lineales) de pequeña magnitud.

Este índice se utiliza como medida de distancia en un Análisis de Componentes Principales (ACP) en modo-S no rotadas. Dado que las estaciones no se encuentran distribuidas en forma uniforme a lo largo de la región en estudio, las varianzas explicadas por las Componentes Principales (CPs) resultan sólo útiles como una referencia relativa (Araneo y Compagnucci, 2004). Por otra parte, ya que no se cuenta con períodos completos de medición, resulta imposible calcular las componentes de puntaje (i.e. patrones temporales obtenidos del ACP). Sin embargo, las componentes de carga posibilitan la determinación de las áreas de variabilidad temporal coherente, objetivo principal del presente estudio. De allí la ventaja del ACP frente a otros métodos de agrupamiento (clustering) de estadística multivariada que requieren necesariamente la entrada de un conjunto completo de datos. Mayor información sobre el ACP puede obtenerse en Cooley y Lohnes (1971) y su utilización a partir de un conjunto incompleto de datos puede leerse en Green (1978) que se emplea como referencia.

Dado que no pueden utilizarse las componentes de puntaje como series patrón para el análisis de la circulación y la TSM asociadas las fluctuaciones de caudal, se eligen las series de los ríos pertenecientes a los centros de mayores valores de componente de carga de las subregiones homogéneas como caudales de referencia y que presentan la base más completa de datos.

En el análisis de la circulación atmosférica se utilizan valores medios mensuales de altura geopotencial (HGP, en mgp) y vector viento (V, en m/s) del período 1948-2003. Ésta información proviene del Reanálisis 1 de NCEP provistos por el Centro de Diagnóstico Climático de NOAA-CIRES (Kalnay et al., 1996); con una cobertura global en un enrejado regular de 2.5° X 2.5° de latitud/longitud. Los datos medios mensuales de TSM corresponden a los Reconstruidos Extendidos de NOAA (Extended Reconstructed Sea Surface Temperature, ERSST) con una global sobre un enrejado de 2.0° X 2.0° de latitud-longitud. Estos datos fueron construidos usando el más reciente conjunto de datos de TSM del COADS (Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set) y mejorados mediante técnicas estadísticas que permiten una reconstrucción estable utilizando valores escasos. Este análisis mensual comienza en enero de 1854, pero debido a la escasez de datos la

Identificación de áreas de homogeneidad...

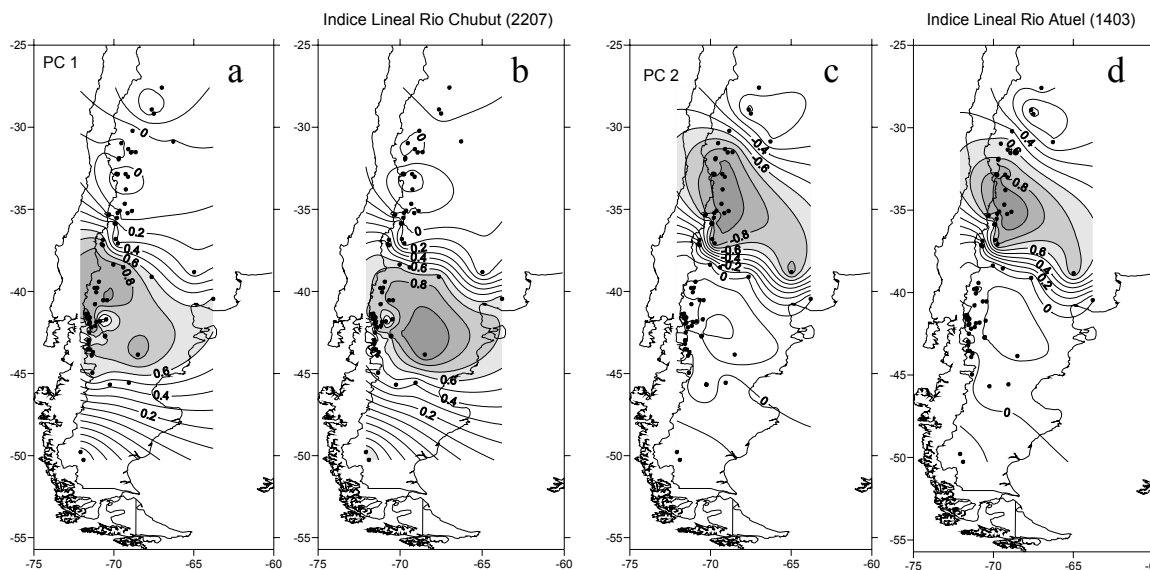


Figura 1: Análisis de Componentes Principales de las series de caudal en los aforos señalados por puntos en el mapa: Componentes de carga para la PC1 (a) y la PC2 (c). Índices de correlación lineal entre el río Chubut (b) y Atuel (d) con las restantes series de caudal en los aforos señalados.

señal analizada es amortiguada en exceso antes de 1880. Luego, la fuerza de la señal es más consistente en el tiempo (Smith and Reynolds, 2004)

Para cada uno de los ríos de referencia se calculan los campos de correlaciones entre las variables meteorológicas, desfasadas de cero a 12 meses, y el caudal medio estacional para el período de máxima acumulación. Las correlaciones con el vector viento se calculan por componentes analizando la distribución de los vectores correlación $r=(r_u;r_v)$, donde r_u y r_v son las correlaciones entre el caudal y las componentes zonal y meridional del viento respectivamente.

3. RESULTADOS

3.1. Regionalización de los caudales andinos

Las primeras dos CPs explican el 61.3% de la varianza (PC1: 34.2% y PC2: 27.1%) y las CPs restantes explican menos del 5% cada una, decreciendo la varianza a medida que aumenta el orden de la PC. Si bien estas varianzas pueden interpretarse sólo como aproximaciones a los valores verdaderos, dada la no uniformidad espacial de la distribución de los puntos de observación, a partir de la tercera (CP3) las varianzas se reducen en un orden de magnitud. Por

lo tanto, se considera que con las primeras dos CPs es suficiente para identificar las subregiones con mayor variabilidad en el área estudiada.

La primer componente (PC1, Figura 1 a) muestra un área de valores de carga superiores a 0.6 (sombreado) —en adelante denominada región I—, cuyo límite norte se ubica entre los cauces del río Colorado y el Negro. Los valores de carga disminuyen rápidamente hacia menores latitudes. El límite sur corresponde aproximadamente al río Senguer en la provincia de Chubut. En la segunda componente (PC2, Figura 1 c) la zona con valores de carga mayores que 0.6 (sombreado) —denominada en adelante región II—, se encuentra exactamente al norte de la región anterior, extendiéndose desde el río Colorado (pcia. de Mendoza) al río Jachal (pcia. de San Juan).

La abrupta caída de los valores de carga a través del límite entre estas dos regiones evidencia la independencia estadística en las características de la variabilidad temporal de los caudales observados sobre los ríos de estas áreas. Para la PC1 puede observarse que los valores de carga que se encuentran sobre la región II son no significativos y viceversa.

Las regiones que se encuentran al norte de 30°S y al sur de 45°S no han sido clasificadas ya que, debido a la pobre varianza explicada por las componentes representantes de las series

temporales de caudal allí observado y la reducida información disponible en estas regiones, sólo puede afirmarse su independencia de las regiones I y II anteriormente descritas.

Dado que no se cuenta con períodos completos de medición, resulta imposible calcular las componentes de puntaje del ACP, correspondientes a los patrones de las series temporales analizadas. Por consiguiente, se procedió a elegir una estación representativa en cada región definida, teniendo en cuenta la extensión de su serie de datos y su correlación con las restantes estaciones. Se eligió el río Chubut en la estación Los Altares (43° 51' 00''S; 68° 30' 00''O; 275 msnm; código 2207) —período 1943 a 2003— como representativa de la región I y el río Atuel en La Angostura, (35° 05' 57''S; 68° 52'

sólo ~10% de la variabilidad interanual de uno de ellos es explicada por el otro.

El hidrograma correspondiente al río Chubut (Figura 2 centro) indica que el régimen de caudales para la región I está caracterizado por un doble máximo que abarca de invierno a verano donde se combinan la precipitación líquida y el derretimiento estival de la precipitación nívea y de los hielos de los glaciares. En la Figura 3-a pueden verse los hidrogramas estandarizados de caudales correspondientes a algunos de los ríos más importantes de esta región (i.e. ríos Neuquen, Negro, Limay y Senguer). En el caso de ríos que poseen más de una estación de aforo, se eligió aquella que presenta un record de datos mayor y que se encuentra más próxima a la naciente del mismo. Estas estaciones se detallan en la Tabla 1,

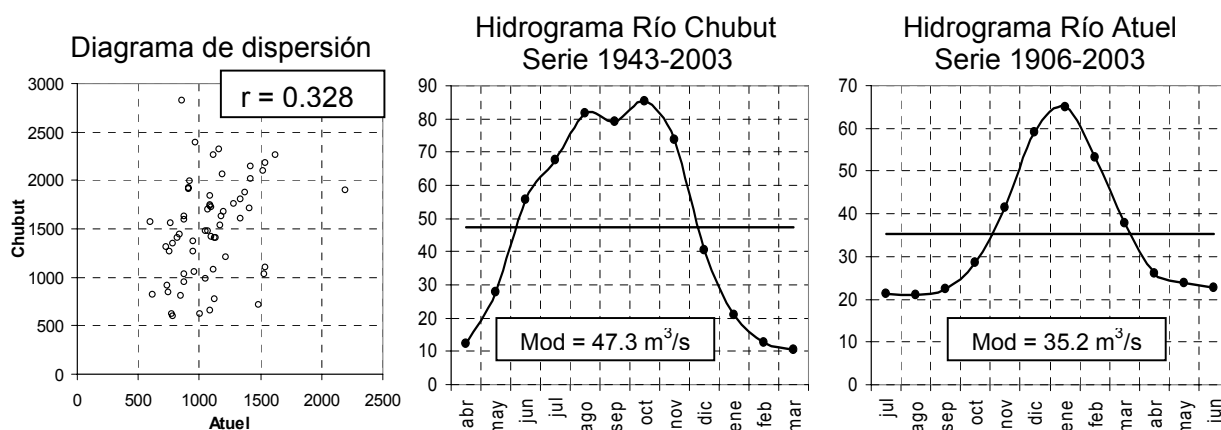


Figura 2: Diagrama de dispersión correspondiente a los derrames anuales (calculados sobre cada año hídrico correspondiente) entre el río Chubut y Atuel (izquierda) e hidrogramas respectivos (Chubut –centro– y Atuel –derecha–).

26''O; 1200 msnm; código 1403) —período 1906 a 2003— para la región II. Los coeficientes de correlación corregidos entre los caudales mensuales de los ríos del área en estudio y los correspondientes al Chubut (Figura 1 b) y el Atuel (Figura 1 d), muestran distribución espacial similar a la de las componentes de carga para la correspondiente PC. Este resultado confirma la representatividad que tiene cada uno de estos ríos respecto a la variabilidad temporal de los caudales para las regiones I y II respectivamente. El diagrama de dispersión y el coeficiente de correlación entre los derrames anuales de los ríos Chubut y Atuel (Figura 2 izquierda) indican el alto grado de independencia lineal que tienen, ya que

junto con los valores medios y desviaciones típicas anuales usados para estandarizar los hidrogramas de la Figura 3 a-b. Para los ríos de región I que se encuentran ubicados al norte del Chubut, por ejemplo el río Neuquén, la combinación de factores determinantes del caudal se agudiza y el hidrograma presenta dos máximos distinguibles, uno invernal y otro para el período estival, siendo mayor este último en el cual contribuyen al caudal tanto la lluvia de primavera-verano como el derretimiento de la nieve y el hielo (Figura 3 a). La región I pertenece a la zona de latitudes medias dominadas por el flujo de los oestes. La altura de la cordillera patagónica, menor a 2000 m, permite el paso de masas de aire húmedo del Pacífico que

Identificación de áreas de homogeneidad...

precipitan en las cumbres y también en el pie de monte a sotavento, aportando lluvia y nieve.

nívea. Los derrames son primordialmente debidos al derretimiento estival de la nieve acumulada

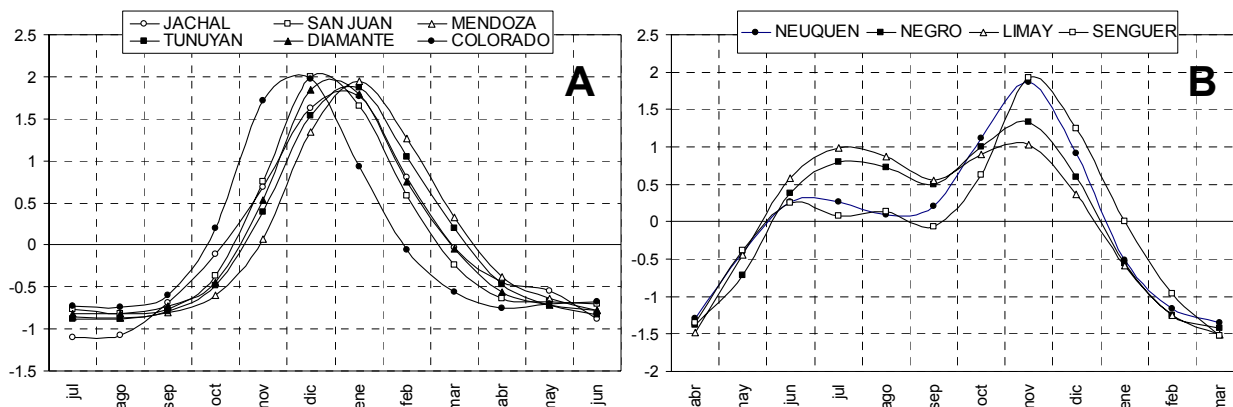


Figura 3: Hidrogramas estandarizados correspondientes a los ríos Neuquén, Negro, Limay y Senguer pertenecientes a la región I (a) y correspondientes a los ríos Jachal, San Juan, Mendoza, Tunuyán, Diamante y Colorado pertenecientes a la región II (b). Las estaciones de aforo consideradas, así como los períodos promediados, valores medios y desviaciones típicas se detallan en la Tabla 1.

En la región II, caracterizada por el río Atuel, los caudales se ubican sobre el promedio para el período Noviembre-Marzo con máximo en Enero (Figura 2 derecha). En esta región, la circulación atmosférica está dominada por la presencia de los anticiclones semipermanentes de los océanos Pacífico y Atlántico. Aquí, la cordillera central al norte de 40°S es considerablemente más alta e inhibe el acceso de humedad desde la fuente Pacífica. Las masas de aire al ascender precipitan sólo a barlovento y en las altas cumbres. Sobre el lado Argentino en invierno la precipitación es

durante el invierno y del aporte de los glaciares, siendo casi despreciable el aporte de precipitación líquida. Consecuentemente, los caudales medios máximos para los ríos ubicados sobre esta región —como los ríos Jachal, San Juan, Mendoza, Tunuyán, Diamante y Colorado— se obtienen en los meses de diciembre-enero (Figura 3 b). El año hídrico de los ríos pertenecientes a esta región comprende los meses entre abril y marzo; mientras que el correspondiente a los ríos de la región I comprende los meses entre julio y junio.

Las series de derrames anuales

RIO	LUGAR	PERÍODO	MEDIA ANUAL	DESVÍO ANUAL
Jachal	Pachimoco	1921-1990	10.17	3.38
San Juan	Km 47.3	1909-2000	64.91	32.10
Mendoza	Guido	1956-2000	44.54	27.99
Tunuyán	Valle De Uco	1954-2000	28.16	18.57
Diamante	La Jaula	1971-2000	33.68	19.57
Colorado	Buta Ranquil	1940-2000	146.27	88.61
Neuquén	Paso De Indios	1903-2000	307.21	159.64
Negro	Paso Córdoba	1922-2000	969.29	408.25
Limay	Paso Limay	1903-1990	734.06	303.87
Senguer	Nacimiento	1949-2000	33.75	12.50

Tabla 1: Ubicación de la estación de aforo considerada en el cálculo de los hidrogramas de los ríos mostrados en la figura 3 en conjunto con el período considerado, y el valor medio y desviación típicas consideradas en la estandarización.

estandarizados (Figura 4) para los ríos Atuel (barras grises) y Chubut (barras negras), muestran la existencia de años en que los valores de ambos ríos tienen signos opuestos. Por ejemplo, en 1986 el Atuel presenta anomalías positivas de derrame que exceden un desvío estándar (σ) mientras que para el Chubut el derrame anual es menor que $-\sigma$. El año 1987 es otro ejemplo en este sentido, aunque las anomalías de Chubut no excedan de $-\sigma$.

3.2. Relación de los caudales con la temperatura superficial del mar (TSM) y la circulación atmosférica

Las correlaciones entre el caudal medio correspondiente al período de máximos caudales del río Chubut (junio-noviembre) y las variables climáticas estudiadas, se maximizan con un desfase de alrededor de 1 mes (i.e. promedios del

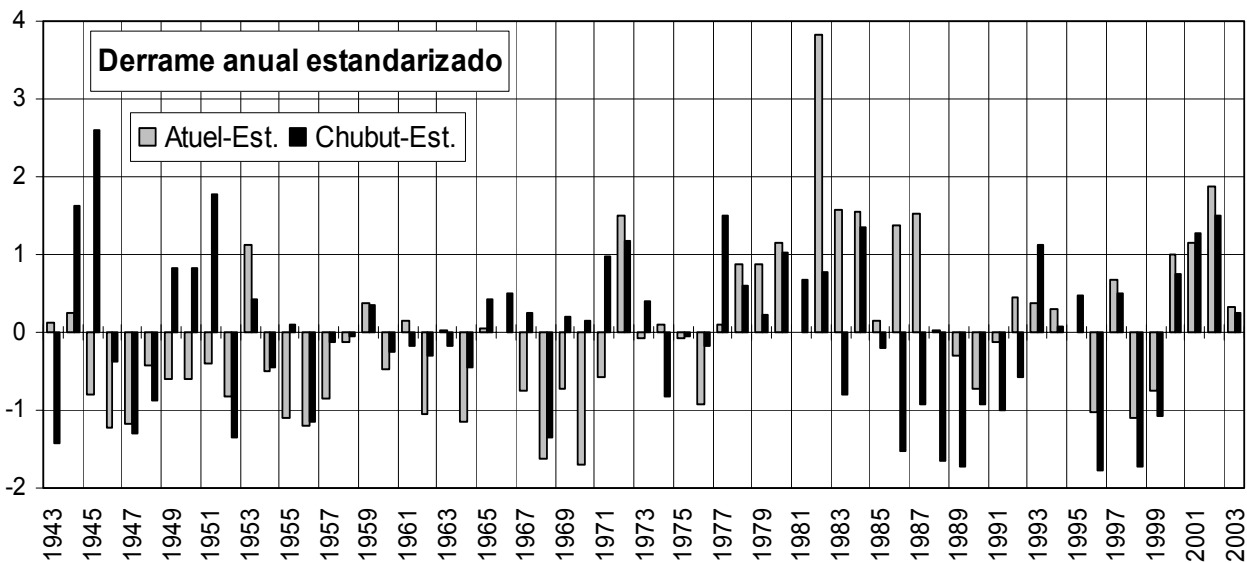


Figura 4: Derrames anuales estandarizados correspondientes a las series de caudal de los ríos Atuel (barras grises) y Chubut (barras negras). Los totales anuales se calculan para cada año hídrico (i.e. Julio-Junio para Atuel y Abril-Marzo para Chubut). Los años indicados corresponden a los del invierno de cada año hídrico.

Inversamente, los años 1945, '49, '50, '51 y '71 presentan anomalías positivas para Chubut y negativas para Atuel. Tales resultados confirman la independencia en el comportamiento de los caudales observados en las regiones definidas y la baja varianza interanual explicada por los ríos de una región para los de la otra. También es de notar la existencia de largos períodos en los cuales el derrame anual se mantiene en general por debajo de la media, por ejemplo en los períodos 1945-52 y 1954-71 para Atuel y 1985-92 para Chubut; o por encima, como en 1978-87 para Atuel y 1977-82 para Chubut. En general también estos períodos de déficit y superávit son distintos para los ríos elegidos.

período junio-noviembre para el caudal del Chubut con promedios del período mayo-octubre para las variables meteorológicas). Análogamente, el período de máximos caudales del río Atuel (noviembre-marzo) dichas correlaciones se maximizan con un desfase de alrededor de 6 meses (i.e. promedios del período noviembre-marzo para el caudal del Atuel con promedios del período mayo-septiembre anterior para las variables meteorológicas). Este resultado evidencia el predominio de las condiciones invernales del sistema atmósfera / océano. En consecuencia, las fluctuaciones en escala interanual a decádica de los caudales de ambas regiones serían reflejo de las variaciones de TSM y de la circulación atmosférica durante el período de invierno y principios de primavera, período en el que se centra nuestro presente estudio. Los valores de correlación

Identificación de áreas de homogeneidad...

superiores a 0.25 en módulo resultan significativos al 10% de confianza.

Las correlaciones entre la TSM y los caudales del Chubut y del Atuel (Figura 5) muestran, en ambos casos, valores positivos significativos en el área del Pacífico ecuatorial y negativos entre 30° y 60°S, sumado a valores positivos en el Atlántico sur.

la Patagonia. La alternancia de centros de correlación significativos negativos y positivos forma una transecta que va desde el noroeste ecuatorial, ubicado en las Filipinas al sudeste de Patagonia. Esta estructura indica que anomalías negativas (positivas) de TSM en el área de la corriente de Humbolt y en el área ecuatorial al norte de Australia en latitudes medias inducen

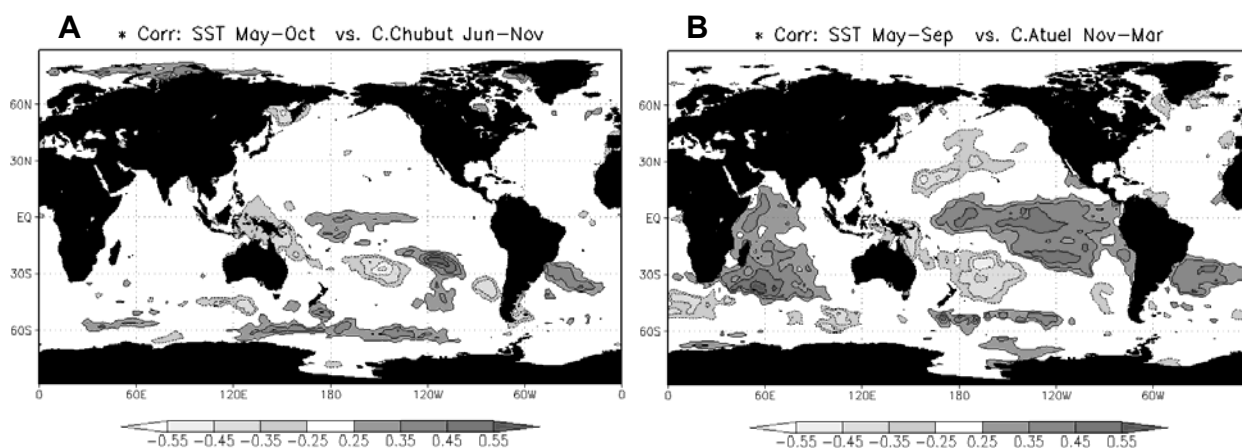


Figura 5: Campos de correlación correspondientes a la TSM media y los caudales medios calculados sobre: A) TSM media de Mayo-Octubre y caudal medio de Junio-Noviembre para Chubut y B) TSM media de Mayo-Septiembre y caudal medio de Noviembre-Marzo para Atuel.

Es de notar que los valores de correlación para el área ecuatorial / tropical, son menores para el río Chubut ($r > 0.35$) que para el Atuel ($r > 0.45$). En el caso de este último, el área de correlación significativa es mucho mayor y se encuentra claramente ubicada sobre la región de máximas anomalías de TSM durante los extremos del ciclo ENOS. Estas correlaciones son positivas sobre el Pacífico y el Índico y negativas al norte de Australia, acorde con el típico patrón El Niño / La Niña de anomalías de TSM. En el Chubut esta estructura está ausente sugiriendo escasa o baja relación con el ENOS. En cambio, presenta los mayores valores de correlación con la TSM en el área del Pacífico central en latitudes subtropicales y medias, correlaciones positivas (con máximo $r > 0.55$) entre 90° y 130°O y negativas (con mínimo $r < -0.55$) entre 170° y 130°O extendiéndose al norte de Australia sobre Filipinas, y otra región sobre el sector oriental adyacente a la costa de Chile con menores valores absolutos ($r < -0.35$) junto a correlaciones del mismo signo sobre el sector occidental del Atlántico sur adyacente a la costa de

precipitación sobre (bajo) lo normal que conlleva a mayores (menores) derrames en la región I.

La relación entre la circulación y los caudales se analiza mediante las correlaciones entre los períodos de máxima acumulación de caudal para cada río, con la altura geopotencial y el viento en 850, 500 y 200 hPa, para los períodos Mayo-Octubre en el caso de Chubut y Mayo-Septiembre en el caso de Atuel (Figura 6). En ambos casos en niveles bajos se observan correlaciones positivas sobre el Pasaje de Drake, aunque los valores son mayores y con su centro ubicado más al norte en el caso de Atuel. La correlación con los vectores viento exhiben una circulación asociada a un núcleo de alta presión en el centro antes mencionado. Este conjunto indicaría una alta correlación con vientos anómalos del Este o con una fuerte reducción del flujo de los Oestes en casos de exceso de caudal y viceversa en casos de déficit. Cabe destacar que esta reducción o inversión de los Oestes se encuentra al sur de 42°S en el caso de Atuel (dominando casi la totalidad de la Patagonia), mientras que sólo se restringe a la

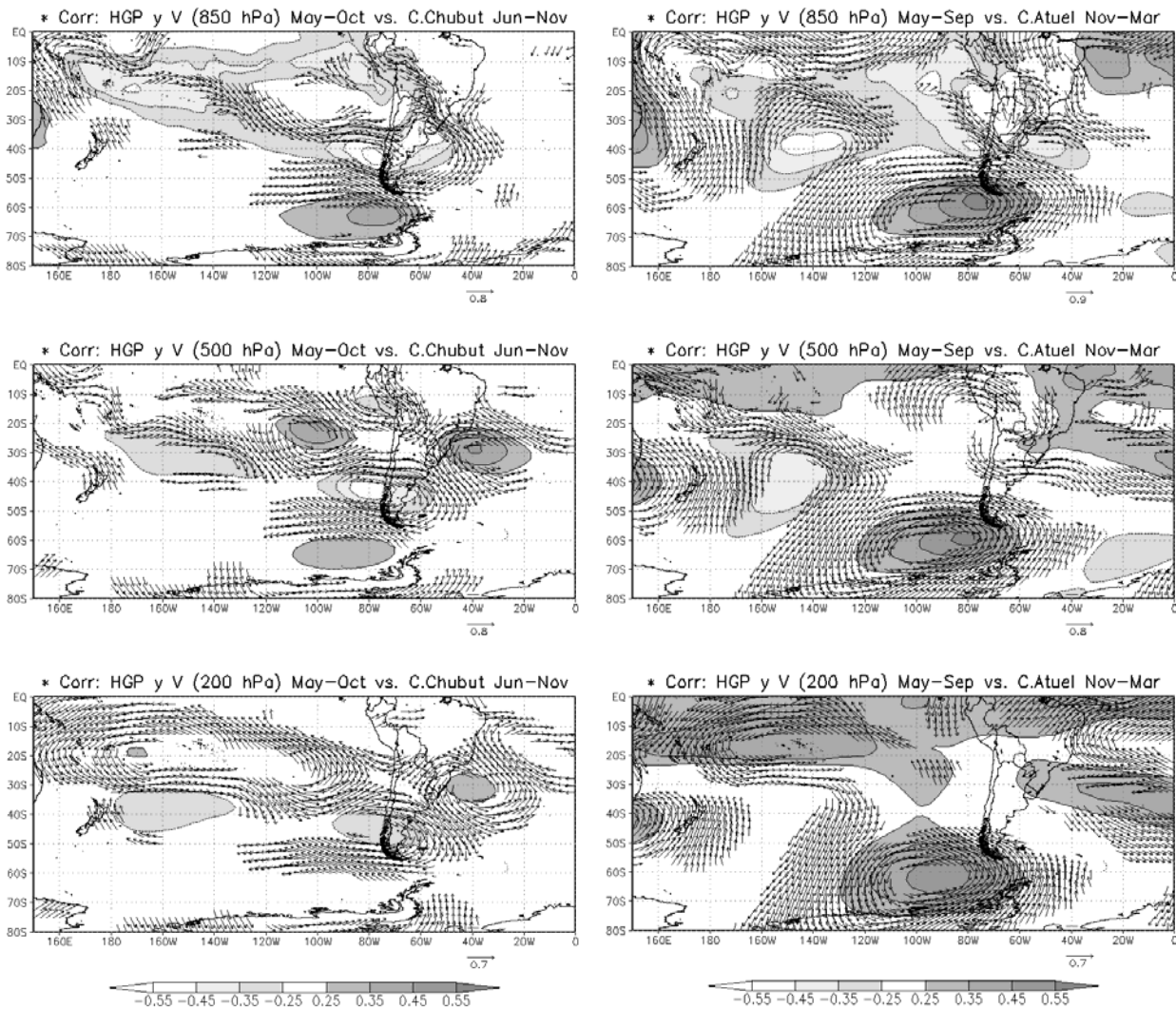


Figura 6: Correlación entre altura geopotencial y viento en 850 hPa (arriba), 500 hPa (centro) y 200 hPa (abajo) con los caudales calculados sobre la circulación del periodo mayo-octubre y los caudales del río Chubut para el periodo junio-noviembre (izquierda) y la circulación del periodo mayo-septiembre y los caudales del río Atuel para el periodo noviembre-marzo (derecha). Sólo se grafican valores de correlación significativos al 10%.

porción sur de la Patagonia (sur de 48°S) en el caso de Chubut. Al este del Pasaje de Drake se observa una fuerte correlación con flujo del Sur en el caso de Atuel, indicando advección de aire polar sobre la Patagonia en casos de exceso de caudal (viceversa en casos de déficit), que no existe para el Chubut. En altura, estas correlaciones sobre los mares de Amundsen-Bellingshausen se mantienen significativamente altas en el caso de Atuel (tomando valores mayores a 0.45 en 200 hPa) mientras que desaparecen en el caso de Chubut.

Cabe destacar que en el caso de Atuel, este centro positivo muestra cierto corrimiento hacia el oeste con la altura, aunque el desplazamiento es de sólo unos 5° de longitud entre los niveles de 500 y 1000 hPa. Por otra parte, para ambos ríos en niveles bajos, las correlaciones significativas negativas se ubican en latitudes medias atravesando el continente, las cuales indicarían una notoria relación entre excesos de caudal con el frecuente pasaje de sistemas de baja presión que cruzan la Cordillera provenientes del Pacífico y entre déficit

Identificación de áreas de homogeneidad...

de caudal con una profundización de los anticiclones semipermanentes del Pacífico y el Atlántico. Además las correlaciones negativas se extienden también en bastas regiones del Pacífico subtropical en ambos casos. Sin embargo, cerca del continente los valores de correlación muestran una mayor magnitud en el caso de Chubut con máximo ubicado en 45°S sobre la costa Chilena, mientras que para el caso de Atuel el máximo se encuentra más al norte (39°S) y de menor magnitud. En este último caso los núcleos se dividen en dos centros negativos ubicados a este y oeste del continente. En medio de estos máximos, sobre la región central de Argentina, se observa una circulación anticiclónica asociada a una alta presión relativa. Las correlaciones con el viento también exhiben una circulación ciclónica que se extiende desde el núcleo negativo ubicado sobre el Atlántico hacia Paraguay. En casos de déficit de caudal, estas circulaciones serían opuestas (circulación ciclónica asociada a una baja presión relativa sobre la región central de Argentina, con una circulación anticiclónica que se extiende desde el núcleo positivo ubicado sobre el Atlántico proveniente desde Paraguay hacia el sudoeste argentino) y podrían asociarse a la profundización de los anticiclones oceánicos y la baja del noroeste argentino. Sobre las nacientes del Atuel (alrededor de 70°O, 35°S) las correlaciones con la circulación indican un flujo del NO, proveniente del Pacífico subtropical, asociado a excesos de caudal (viceversa en casos de déficit). En el caso de Chubut el centro negativo se extiende desde la costa Chilena al sur de 40°S curvándose hacia el NE en dirección Uruguay. Esta configuración indicaría la asociación de máximos caudales en la región I con el pasaje de bajas presiones que atraviesan la cordillera de los Andes sin discontinuidad por latitudes donde ésta es más baja. Al llegar a la región del Río de la Plata, un centro negativo secundario con una circulación ciclónica asociada extendiéndose hacia el norte indicaría la vinculación entre máximos de caudal en Chubut con sistemas frontales sobre esta región similar a lo observado en el caso anterior. El flujo de aire sobre las nacientes del Chubut es del NO, al igual que el observado para Atuel, aunque proveniente de latitudes mayores. En los casos de déficit de caudal estas configuraciones de circulación serían inversas con altas presiones atravesando el continente por latitudes medias inhibiendo el pasaje de sistemas

frontales por las cuencas de los ríos estudiados y con Oestes exacerbados en la región patagónica. Sobre el Pacífico central se observan también patrones diferentes para ambos ríos. En el caso del Atuel, se observa una región de correlaciones negativas en 140°O–40°S, que no se observa en el caso del Chubut y que se extiende también en altura. Particularmente para Atuel en el nivel de 500 hPa este centro negativo, junto al mencionado centro positivo ubicado sobre el mar de Amundsen-Bellingshausen, un centro positivo ubicado sobre el sur de Australia y otro negativo sobre el Atlántico sur, forman un tren de ondas estacionario que atraviesa el Pacífico en sentido NO–SE. En América del Sur, si bien no se observan correlaciones significativas con el geopotencial, las correlaciones con el vector viento describen una vaguada (circulación ciclónica) cuya delantera se ubicaría en las nacientes del río favoreciendo el ascenso en los casos de superávit de caudal. Para el caso del Chubut en niveles bajos las correlaciones negativas alcanzan la región de la cuenca desde el sector tropical del Pacífico occidental pero no se observa el tren de ondas descrito en el caso anterior en 500 hPa. En su lugar se observa un tren de ondas de menor longitud y ubicado sobre latitudes menores, formado por la alternancia de centros de correlaciones negativas (uno en 160°O–30°S y otro sobre la Patagonia) y positivas (uno en 100°O–25°S y otro en 40°O–30°S). Ambos trenes de ondas pueden observarse aún hasta el nivel de 200 hPa (aunque más atenuados).

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

A partir de la definición de un índice lineal de correlación modificado definido a partir del coeficiente de correlación usual y el coeficiente de correlación crítico al 5% de significancia, utilizado como medida de distancia en un ACP no rotadas en modo-S, se han logrado identificar objetivamente las distintas regiones a lo largo de la Cordillera de los Andes, en las cuales el comportamiento de los caudales de los ríos cuyas nacientes se encuentran sobre las altas cumbres, muestran homogeneidades estadísticas, definiendo 2 zonas cuyas condiciones climáticas dan regímenes hídricos diferenciables.

Las regiones identificadas resultan: I) el área que se extiende desde el río Neuquén (pcia. de Neuquén) hasta el río Senguer (pcia. de Chubut) y II) el área que se extiende desde el río Jachal (pcia.

de San Juan) hasta el río Colorado (pcia. de Mendoza). El límite entre estas áreas se ubicaría entre los ríos Negro-Neuquén y Colorado. Cabe destacar la baja correlación existente entre los caudales de los ríos pertenecientes a una región con los pertenecientes a la otra, lo cual expresa la independencia estadística entre las mismas.

Las marchas de caudales medios mensuales de los ríos Chubut en Los Altares y Atuel en La Angostura, se encuentran bien correlacionadas con las correspondientes a los restantes ríos de las regiones I y II respectivamente. El análisis de los hidrogramas de estos dos ríos permite identificar las marchas anuales promedio de caudales para los ríos de ambas regiones, los cuales se caracterizarían por un máximo estival para la región II debido principalmente al derretimiento de nieve invernal y un doble máximo invernal-estival para la región I debido a la combinación de la precipitación líquida durante el invierno y el derretimiento de la precipitación nívea en primavera-verano. Si bien en principio podría pensarse que la independencia estadística entre las regiones I y II se debe al desfase temporal (de 3 meses) existente entre los períodos de máximo caudal de los ríos involucrados, la baja varianza interanual explicada entre los ríos Atuel y Chubut al correlacionar los derrames totales anuales tomando años hídricos correspondientes (ver Figura 2 panel izquierdo) objeta esta idea.

La relación entre los caudales observados en las regiones definidas en este trabajo y las TSM es significativa en amplias regiones del Pacífico central del Hemisferio Sur (HS). Sin embargo, mientras la región II parece estar íntimamente ligada a los patrones observados del ciclo ENOS (con fuertes señales en el Pacífico ecuatorial y tropical, y el Océano Indico), la región I presenta características distintas (con señales restringidas sólo al área del Pacífico central subtropical del HS).

Las diferencias más relevantes de la circulación asociada a los extremos de caudal en la región I con respecto a la II serían: 1) el corrimiento de los sistemas de circulación hacia mayores latitudes, 2) la mayor relevancia de los sistemas de latitudes medias, 3) la presencia en altura de un tren de ondas estacionarias de menor longitud que atraviesa el continente por latitudes subtropicales provenientes del Pacífico central en dirección NO-SE y 4) la menor importancia de los

ubicados sobre el Pasaje de Drake. Este último sistema, ubicado sobre el Pacífico sudoriental, fue asociado por Garreaud y Battisti (1999) con las anomalías de TSM en el Pacífico ecuatorial y la variabilidad decadal del tipo ENOS e implica anomalías de alta (baja) presión para situaciones El Niño (La Niña). La menor vinculación entre las TSM y los caudales registrados en la región I explicarían la menor dependencia de las precipitaciones en esta porción de la cordillera con las condiciones de circulación observadas en las cercanías del Estrecho de Drake. Sin embargo, de lo expuesto se deriva la importancia que las condiciones de circulación en latitudes altas del Pacífico Sur y las TSM en el Pacífico ecuatorial y subtropical tienen sobre la precipitación invernal en la porción cuyana de los Andes. En tal sentido las configuraciones de circulación encontradas para los caudales del Atuel pueden relacionarse con los patrones de anomalías regionales de circulación descritos entre otros por Rutllant y Fuenzalida (1991) para inviernos que coinciden con eventos El Niño y por Montecinos y Aceituno (2003) para inviernos anormalmente lluviosos.

Agradecimientos: A la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, al Centro de Diagnóstico Climático de NOAA-CIRES y a los fondos provenientes de los proyectos PIP 05/5006 de CONICET, UBACYT01X095 de UBA y PICTR 2002-00186 de SECYT.

REFERENCIAS

- Aceituno, P. y Garreaud, R., 1995. Impactos de los fenómenos El Niño y La Niña sobre regímenes fluviométricos andinos. *Rev. Soc. Chilena Ing. Hidráulica*, 10(2), 33-43.
- Aceituno, P. y Vidal, F. 1990. Variabilidad interanual en el caudal de ríos andinos en Chile Central en relación con la temperatura de la superficie del mar en el Pacífico Central. *Revista de la Sociedad Ingeniería Hidráulica* 5:1, n.p
- Aceituno, P., 1988. On the Functioning of the Southern Oscillation in the South American Sector, I: Surface Climate. *Mon. Weather Rev.* 116, 505-524.

Identificación de áreas de homogeneidad...

- Araneo, D. y Compagnucci, R., 2004a. Removal of Systematic Biases in S-Mode Principal Components arising from Unequal Grid Spacing. *Journal of Climate*, 17, 394-400.
- Berri, G. y Flamenco, E., 1999. Seasonal Volume Forecast Of The Diamante River, Argentina, Based On El Niño Observations And Predictions. *Water Resources Research*, 35, N° 12, 3803-3810.
- Carril, A., Doyle, M., Barros, V. y Núñez, M., 1997. Impacts of climate change on the oases of the Argentinean cordillera. *Climate Reserch*, 9, 121-129.
- Compagnucci, R., Blanco, S., Figliola, M. y Jacovkis, P., 2000. Variability in subtropical Andean Argentinean Atuel river: a wavelet approach. *ENVIRONMETRIC*, 11, 251-269.
- Cooley, W. W. y Lohnes, P. R., 1971. *Multivariate data analysis*. Hohn Wiley & Sons, Inc. EEUU. 363 pp.
- Escobar, F. y Aceituno, P., 1998. Influencia del fenómeno ENSO sobre la precipitación nival en el sector andino de Chile central durante el invierno. *Bull. Inst. fr. études andines*, 27(3), 753-759.
- Garreaud, R. D. y Battisti, D. S., 1999. Interannual (ENSO) and Interdecadal (ENSO-like) Variability en the Southern Hemisphere Tropospheric Circulation. *Journal of Climate*, 12, 2113-2123.
- Green, P. E., 1978. *Analyzing Multivariate Data*. The Dryden Press: Hinsdale, Illinois. 519 pp.
- Hoffman, J. A., 1969. Pronóstico del tiempo a largo plazo (2da. parte). *Primeras Jornadas de Nivo-Glaciología*, Fac. Cs. Pol. y Soc. UNC, Mendoza, Argentina.
- Kalnay, E. y coautores, 1996. The NCEP / NCAR 40-year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-441.
- Menegazzo de García, M. I. y Radicella, S., 1982. Variación climática-hidrológica en la región cordillerana andina. *Meteorológica*, 13, 49-62.
- Montecinos, A. y Aceituno, P., 2003. Seasonality of the ENSO related rainfall variability in central Chile and associated atmospheric circulation. *J. Climate*, 16, 281-296.
- Pittock, A. B., 1980. Patterns of climatic variation in Argentina and Chile. Part I: Precipitation, 1931–1960. *Mon. Wea. Rev.*, 108, 1347–1361.
- Quinn, W., y V. Neal, 1983: Long-term variations in the Southern Oscillation, El Niño and the Chilean subtropical rainfall. *Fish. Bull.*, 81, 363–374.
- Quintela, R. M. y Scarpati, O. E., 1993. Incidencia del Cambio Global sobre los Recursos Hídricos del Sur de la Patagonia (Argentina). *Geofísica*, 39, 61-84.
- Rutllant J. y Fuenzalida, H., 1991. Synoptic aspects of the central Chile rainfall variability associated with the Southern Oscillation. *Int. J. of Climatology*, 11, 63-76.
- Rutllant, J., 1987. Synoptic Aspects of the Increase in Rainfall in Central Chile Associated with Warm Events in the Central Equatorial Pacific. *Proc. Conference on Geophysical Fluid Dynamics with special emphasis on El Niño*. Sao Jose dos Campos, July 13-17, 1987: 329-342.
- Smith, T.M., y Reynolds, R. W., 2004. Improved Extended Reconstruction of TSM (1854-1997). *Journal of Climate*, 17, 2466-2477.
- Waylen, P. y Caviedes, C., 1990. Annual and seasonal fluctuations of precipitation and stream flow in the Aconcagua river basin, Chile. *Journal of Hydrology*, 120, 79-102.
- Waylen, P., Compagnucci, R. y Caffera, R., 2000. Interannual and Interdecadal Variability in Streamflow from the Argentine Andes. *Physical Geography*, 21, N° 5, 452-465.