

VARIABILIDAD INTRAESTACIONAL DE LA ACTIVIDAD FRONTAL EN INVIERNO Y SU IMPACTO EN LAS ANOMALÍAS DE PRECIPITACIÓN SOBRE SUDAMÉRICA Y OCEÁNOS ADYACENTES.

Josefina Blázquez^{1,2,3}, Silvina A. Solman^{1,2,3}
blazquez@cima.fcen.uba.ar

¹Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA-CONICET/FCEN-UBA)

²Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (FCEN-UBA)

³Instituto Franco Argentino del Clima y sus Impactos (UMI IFAECI/CNRS)

RESUMEN

En este trabajo se estudia la variabilidad intraestacional de la actividad frontal y su conexión con la variabilidad de la precipitación en el Hemisferio Sur para los meses de invierno, en el período 1979-2001. Para este estudio se utilizaron datos de reanálisis ERA40 y datos grillados de CPC-uni. La actividad frontal se define como el producto entre la vorticidad relativa y el gradiente de temperatura. Para retener la escala intraestacional se aplicó un filtro pasa banda y se realizó un análisis de funciones ortogonales empíricas para identificar los principales patrones de variabilidad de la actividad frontal.

Los dos primeros modos están en cuadratura y muestran centros de anomalías positivas y negativas localizados sobre el sur del Océano Pacífico y sobre los alrededores de Sudamérica.

La regresión desfasada temporalmente de la serie de tiempo de la actividad frontal (promediada arealmente sobre uno de los centros de acción) con el campo de anomalías de la actividad frontal muestra que los dos primeros modos se alternan cada 4 días y que las fases positivas y negativas de un mismo modo se repiten cada 8 días, sugiriendo un período de 17 días.

Por otra parte, también se calculó la regresión desfasada temporalmente de la serie de la actividad frontal y el campo de anomalías de precipitación. Esta regresión muestra un patrón dipolar entre el sudeste de Sudamérica y el sur de Chile, con anomalías de precipitación anti-correlacionadas como consecuencia de la variabilidad de la actividad frontal sobre el sudeste del Océano Pacífico.

ABSTRACT

The wintertime intraseasonal variability of the frontal activity and its connection with the variability of precipitation in the Southern Hemisphere is studied in the period 1979-2001. ERA40 reanalysis and CPC-uni gridded dataset were used. The frontal activity is defined as the relative vorticity times the local temperature gradient. A band-pass filter was applied to retain the intraseasonal timescales and an empirical orthogonal function analysis was calculated to identify the leading modes of the frontal activity.

The two main modes show positive and negative centers located mainly over the southern Pacific Ocean and South American sector and are in quadrature each other. The lagged regression of the time series of the frontal activity areally-averaged over one of the centers of action against the frontal activity anomaly field shows that the two main modes alternate each other every 4 days and the positive and negative phase of one mode is repeated every 8 days, suggesting a period of around 17days.

Moreover, lagged regression between times series of frontal activity and precipitation anomalies reveals a dipole pattern between southeastern South America and southern Chile, being precipitation anomalies over these two regions anti-correlated due to the frontal activity variability over the southeastern Pacific Ocean.

Palabras clave: actividad frontal, precipitación, variabilidad intraestacional.

1) INTRODUCCIÓN

La variabilidad de la precipitación en la escala intraestacional ha sido ampliamente documentada. En verano, la estructura de la variabilidad se caracteriza por un patrón dipolar que fue identificado por Nogués Paegle y Mo (1997). Recientemente, Álvarez et al. (2014) documentaron los dos principales modos de variabilidad de la radiación de onda larga saliente para el invierno. El primero muestra la señal principal sobre un área que abarca Bolivia, Paraguay, norte de Argentina y sur de Brasil y el segundo muestra un centro sobre el este de Uruguay y sur de Brasil y otro centro de signo opuesto sobre una región que se extiende desde el sur de Brasil hasta el Amazonas.

Por otro lado, es ampliamente conocido que la precipitación en latitudes altas y subtropicales del Hemisferio Sur (HS) está relacionada con la actividad frontal, especialmente en el invierno. Los frentes son el mecanismo dinámico que dispara la convección y la posterior precipitación (Bjerknes y Solberg 1922; Browning y Roberts 1994). Recientemente, Catto et al. (2012) encontraron que las latitudes medias del HS son las regiones donde la mayor parte de la precipitación puede asociarse a los frentes. Además, Solman y Orlanski (2014) documentaron que el corrimiento hacia el polo de la actividad frontal es consistente con el secamiento en latitudes medias y el humedecimiento en latitudes altas del HS, mostrando una fuerte relación entre los cambios en la actividad frontal y los cambios en la precipitación.

Por lo tanto, considerando que los frentes son el principal mecanismo que controla la precipitación en latitudes medias, los principales objetivos de este trabajo son: (1) identificar los principales modos de variabilidad de la actividad frontal en el HS durante los meses de invierno; (2) explorar cómo la variabilidad de los frentes afecta a las anomalías de precipitación sobre Sudamérica y alrededores.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

En este trabajo se utilizaron datos diarios de los reanálisis ERA40 (Uppala et al. 2005), pertenecientes al *European Centre Medium Range Weather Forecasts* (ECMWF), con una resolución horizontal de 2.5° para el período 1979-2001. Estos datos fueron utilizados para analizar la variabilidad de la precipitación y de la actividad frontal, esta última representada a través de un índice de frentes (FI, de ahora en adelante). El FI se calculó siguiendo a Solman y Orlanski (2010), como el producto entre la vorticidad relativa y el gradiente horizontal de temperatura en 850 hPa:

$$FI = |\nabla T_{850hPa}| \times \xi_{850hPa} \quad (1)$$

Solman y Orlanski (2014) mostraron que este índice es adecuado para representar los sistemas frontales del HS. Además, estos autores encontraron que el porcentaje de precipitación asociado a los frentes en latitudes extra-tropicales del HS oscila entre el 70% y el 80%, en acuerdo con lo planteado por Catto et al. (2012).

Para la precipitación también se utilizaron datos del *Climate Prediction Center unified gauge dataset* (CPC-uni) (Xie et al. 2007), con una resolución horizontal de 0.5° . La razón por la cual se utilizaron dos sets de datos diferentes para la precipitación es que no existen datos diarios de precipitación grillados que cubran tanto los océanos como los continentes para el período utilizado en este estudio. Por este motivo, los datos de reanálisis ERA40 fueron utilizados en los cálculos que involucraron tanto al continente como al océano, mientras que los datos de CPC-uni solo fueron utilizados cuando los cálculos involucraron solo datos sobre el continente. El estudio fue realizado durante el invierno, definido como: mayo, junio, julio y agosto (MJJA). Antes del cálculo de las anomalías de FI, los datos fueron multiplicados por -1, de manera tal que los valores ciclónicos corresponden a valores positivos. Las anomalías diarias (tanto de FI como de precipitación) fueron calculadas restando la media climatológica de cada mes a los datos crudos. En particular las anomalías de FI fueron computadas utilizando solo los valores mayores a cero (ciclónicos), por lo que valores positivos (negativos) de FI indican frentes más (menos) intensos que el promedio. Luego las anomalías fueron filtradas utilizando un filtro de Lanczos con 501 pesos (Duchon 1979), para aislar la variabilidad intraestacional, reteniendo los períodos 11 y 60 días.

La técnica de funciones ortogonales empíricas fue utilizada para detectar los principales modos de variabilidad de FI en parte del HS (70°S a 15°S). Para estudiar la relación entre los frentes y las anomalías de precipitación en la escala intraestacional, se calcularon regresiones y correlaciones desfasadas temporalmente. Para evaluar la significancia estadística de las correlaciones, se aplicó un test de Fisher, utilizando 500 grados de libertad y un nivel de confianza del 95%. Vale la pena aclarar que el número total de días de invierno (MJJA) durante los 21 años analizados es de 2829, sin embargo para evitar la dependencia de los datos diarios, el número total de días fue dividido por 5.

3) RESULTADOS

Como se mencionó anteriormente, uno de los objetivos de este trabajo es identificar los principales modos de variabilidad de la actividad frontal en la escala intraestacional (11-60 días). En consecuencia, la Figura 1 muestra la regresión entre las dos primeras componentes principales (PC) filtradas de FI y el campo de anomalías de FI sobre parte del HS. Los dos primeros modos explican el 12.77% de la varianza total. En la Figura 1a puede verse que la mayor parte de la señal del primer modo se encuentra en el sector sur del dominio, con tres centros de acción bien definidos, que alternan valores positivos y negativos de anomalías, estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%. Uno de los centros de acción está localizado sobre el sudeste del Pacífico (95°W - 65°S). Solman y Orlanski (2010) identificaron una anomalía positiva de presión cuasi-estacionaria sobre el sudeste del Océano Pacífico, esta alta presión inhibe la actividad frontal y a su vez coincide con la posición de la anomalía negativa de FI que se muestra en la mencionada Figura. Los frentes que crecen sobre el *storm-track* del Océano Pacífico se debilitan debido a la presencia de esta alta presión. De hecho, la regresión de la PC1 de FI con el campo de anomalías de la altura geopotencial de 500 hPa confirma este comportamiento (no mostrado). Se puede observar en la Figura 1b, que el segundo modo está en cuadratura con el primero, es decir ambos modos presentan estructuras similares, pero están desfasados. Esto podría sugerir que ambos modos están relacionados temporalmente. Para explorar este comportamiento se realizó la correlación desfasada en el tiempo de las series filtradas de las PC1 y PC2 de FI y se muestra en la Figura 2. Puede verse que efectivamente ambos modos de variabilidad están relacionados, encontrándose la máxima y la mínima correlación entre las dos PCs en los días 4 y -4, respectivamente. Esto sugiere una progresión hacia el este de las anomalías de la actividad frontal. De la Figura también puede inferirse que el período de cada modo es de aproximadamente 17 días. Este

comportamiento coincide con lo encontrado por Mo y Higgins (1998) (MH de ahora en adelante), pero para las PCs del campo de anomalías filtradas (en escala intraestacional) de la función corriente en 200

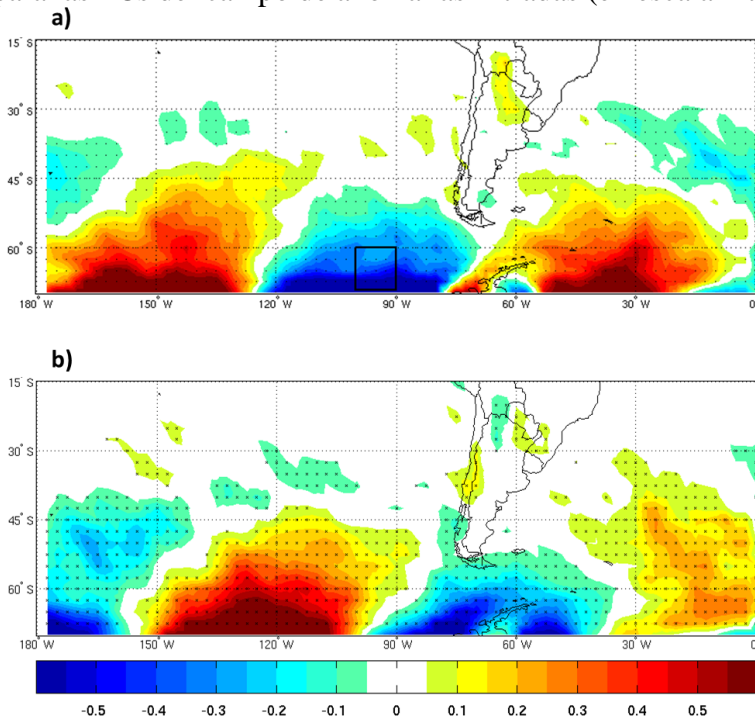


Figura 1: Regresión de la anomalía de FI con la primera PC (a) y la segunda PC (b) del FI calculado con las anomalías filtradas (11-60 días). Los puntos indican un nivel de confianza del 95%, de acuerdo a un test de Fisher. Las unidades son $1.e10 \text{ } ^\circ\text{C m}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

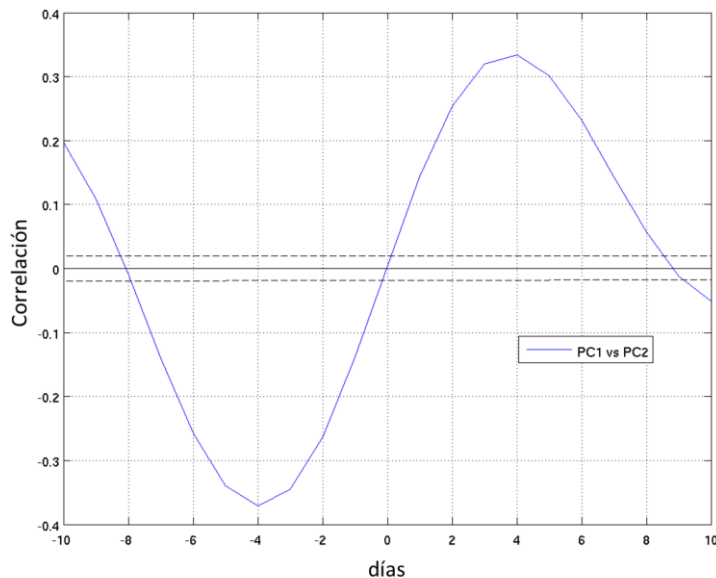


Figura 2: Correlación desfasada temporalmente entre PC1 y PC2 de FI. Las líneas con guiones indican un nivel de confianza del 95%, de acuerdo a un test de Fisher.

hPa (correspondientes a los patrones espaciales llamados *Pacific South American* -PSA- 1 y 2). Cabe aclarar que la actividad frontal está relacionada con la circulación atmosférica, por lo tanto la similitud encontrada con MH es esperable. Además, se realizó un espectro de potencia para las PCs de FI y se encontró un pico alrededor de los 17 días (no se muestra). Estos resultados coinciden de manera aproximada con los encontrados por MH y por Robertson y Mechoso (2003). El primero encontró un pico en el espectro de las anomalías filtradas (en la escala intraestacional) de la función corriente en 200 hPa en la banda 16-18 días y el segundo encontró un pico de 15 días, pero para las anomalías filtradas de la altura geopotencial de 700 hPa.

La progresión temporal de los dos principales modos de variabilidad de la actividad frontal se exhibe en la Figura 3. Dicha Figura muestra la regresión desfasada temporalmente de la anomalía de FI filtrada y promediada en una caja centrada en 65°S y 95°W , que se muestra en la Figura 1a (de ahora en adelante esta serie temporal será llamada FI95) y el campo de anomalías de FI. La serie temporal FI95 está ubicada en uno de los centros de acción que presenta el primer modo de FI, y es utilizada como representativa de la serie temporal de la PC1 (ya que utilizando dicha serie, los resultados eran más ruidosos). La regresión en el día 0 muestra un patrón similar al primer modo de variabilidad de la actividad frontal (Figura 1a), pero con signo opuesto. Esto sugiere que la serie de tiempo FI95 es una buena representación de la PC1. Los días -4 y 4 muestran una estructura parecida al segundo modo de variabilidad del FI,

mientras que los patrones espaciales de los días -8 y 8 son similares al primer modo. Además, entre los días -8 y 8 puede verse la progresión temporal de las anomalías de FI, donde el modo 1 y 2 se alternan aproximadamente cada 4 días y las fases positivas y negativas de cada uno de los modos se alternan con una frecuencia de alrededor de 8 días. Es interesante notar que los días -8 y 8 el patrón se repite, lo que indicaría que todo el ciclo se completa en aproximadamente 17 días. Este período coincide con el mencionado previamente (en la correlación entre las PCs de FI).

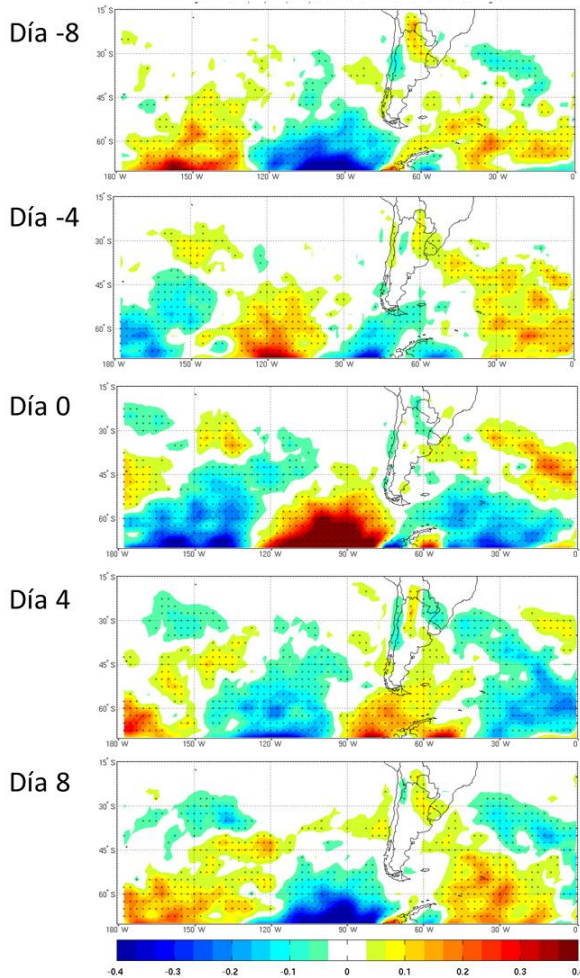


Figura 3: Regresión desfasada temporalmente de la anomalía de FI con la serie de tiempo filtrada (11-60 días) FI95. Los puntos indican un nivel de confianza del 95%, de acuerdo a un test de Fisher. Las unidades son $1.e10 \text{ } ^\circ\text{C m}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

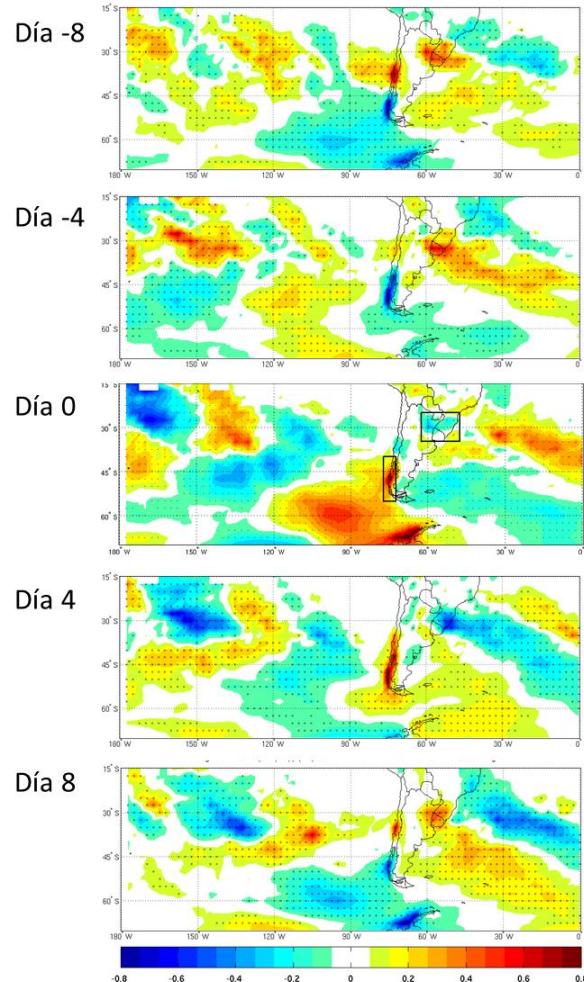


Figura 4: Igual a la Figura 3, pero para el campo de anomalías de precipitación. Los puntos indican un nivel de confianza del 95%, de acuerdo a un test de Fisher. Las unidades son mm día^{-1} .

Para explorar cómo las anomalías de precipitación sobre el HS son afectadas por la evolución temporal de la actividad frontal, se calculó la regresión desfasada temporalmente de la serie de tiempo filtrada FI95 y el campo de anomalías de precipitación (Figura 4). El día 0, se evidencia en las anomalías de precipitación un patrón del tipo onda de Rossby. Los días -8 y 8 la Figura muestra patrones similares de la anomalía de precipitación, especialmente en los alrededores de Sudamérica, sugiriendo una vez más un período de 17 días asociado a los frentes. Álvarez et al. (2014) también encontraron un período de 17 días para las anomalías de precipitación de invierno en el sudeste de Sudamérica, asociado a los principales modos de variabilidad en la escala intraestacional de la radiación de onda larga saliente.

Además, en la Figura 4 puede distinguirse entre los días -8 y 8 un patrón dipolar entre el sudeste de Sudamérica (SESA) y el sur de Chile (SOCH). Para explorar la conexión entre estas dos zonas, se calculó el promedio areal de la precipitación sobre estas regiones (en la Figura 4, día 0, se muestran las cajas en donde fueron realizados los promedios). En este caso, las anomalías de precipitación fueron calculadas utilizando la base de datos CPC-uni, debido a que las cajas fueron definidas sobre el continente.

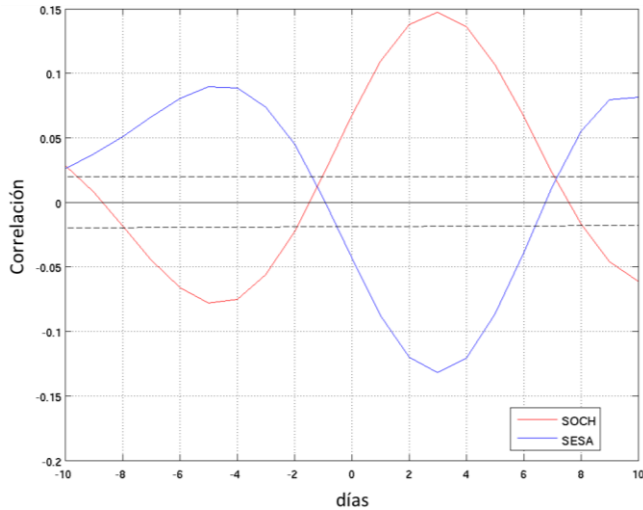


Figura 5: Correlación desfasada temporalmente entre la serie de tiempo FI95 filtrada (11-60 días) y la serie de precipitación filtrada sobre SESA (línea azul) y sobre SOCH (línea roja). Las líneas con guiones indican un nivel de confianza del 95%, de acuerdo a un test de Fisher.

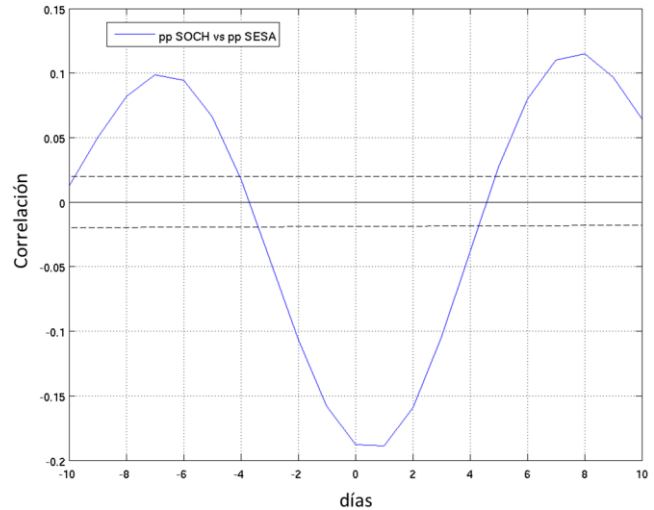


Figura 6: Correlación desfasada temporalmente entre la serie de tiempo de precipitación filtrada (11-60 días) en SOCH y la serie de tiempo de precipitación filtrada (11-60 días) en SESA. Las líneas con guiones indican un nivel de confianza del 95%, de acuerdo a un test de Fisher.

La Figura 5 muestra la correlación desfasada temporalmente entre las series de tiempo filtradas de FI95 y SESA y entre FI95 y SOCH. Se observa en la Figura que las anomalías de precipitación asociadas a la actividad frontal sobre el sudeste del Océano Pacífico están en fase opuesta, confirmando el patrón dipolar mostrado en la Figura 4. Cuando FI95 es positivo, la correlación con la anomalía de precipitación a los 3 días sobre SOCH (SESA) es máxima (mínima). Este comportamiento se revierte en el día 10, sugiriendo que las anomalías de precipitación sobre estas dos regiones son controladas por la progresión de las anomalías de la actividad frontal en la escala intraestacional. Para confirmar este comportamiento dipolar en las anomalías de precipitación de ambas regiones, se calcularon las funciones ortogonales empíricas para las anomalías de precipitación filtradas sobre el sur de Sudamérica. Los tres primeros modos (no mostrados) exhiben signos opuestos en estas regiones y explican el 19% de la varianza total.

Luego, se calculó la correlación desfasada temporalmente entre las anomalías de precipitación filtradas de SOCH y SESA (Figura 6). Este cálculo se realizó con el objetivo de analizar con más detalle la relación entre las anomalías de precipitación de ambas regiones. En el día 0 se encuentra la máxima correlación negativa, indicando que ambas regiones están en fase opuesta. Dada la evidencia discutida previamente, este comportamiento puede deberse a la actividad frontal. Además, vale la pena notar que cada 16-17 días las anomalías de precipitación en SESA y SOCH están correlacionadas positivamente, sugiriendo que sobre SESA las anomalías positivas ocurren 7 días antes y 8 días después de la ocurrencia de anomalías positivas de precipitación sobre SOCH. Este período concuerda con el

encontrado en la Figura 4, donde aproximadamente cada 17 días se repite el patrón de anomalías de precipitación influenciado por la actividad frontal sobre el sudeste del Océano Pacífico.

4) CONCLUSIONES

En este trabajo se estudió la variabilidad de la actividad frontal en la escala intraestacional (11-60 días) y su relación con las anomalías de la precipitación. El análisis se focaliza sobre el oeste del HS, en los meses de invierno, debido a que la precipitación en esta estación del año es mayormente debida a los frentes (Catto et al. 2012). La actividad frontal se representó por un índice de frentes (FI), introducido por Solman y Orlanski (2010).

Para identificar los principales patrones de variabilidad de la actividad frontal se realizó el cálculo de las funciones ortogonales empíricas de las anomalías de FI filtradas. Los dos primeros modos mostraron centros de anomalías positivas y negativas, ubicados en latitudes altas del HS, especialmente sobre el sur del Océano Pacífico y el sudoeste del Océano Atlántico. Además, se encontró que los dos primeros modos están en cuadratura y relacionados temporalmente. La regresión desfasada en el tiempo de las anomalías de FI muestra justamente este comportamiento. El primer modo y el segundo se alternan cada 4 días y las fases positivas y negativas de un mismo modo se alternan cada 8 días aproximadamente, sugiriendo un período de alrededor de 17 días. Además, la correlación entre las PCs de FI también confirma que ambos modos se relacionan temporalmente, en acuerdo con los resultados encontrados por MH, pero para las PCs del PSA1 y PSA2.

Las regresiones desfasadas temporalmente entre la serie temporal en FI95, filtrada en la escala intraestacional, (calculada como el promedio areal de FI sobre uno de los centros de acción) y las anomalías de precipitación, mostraron que sobre el HS el campo de anomalías de la precipitación también se repite cada 17 días aproximadamente (especialmente en los alrededores de Sudamérica). Este resultado concuerda con el encontrado por Álvarez et al. (2014), quienes identificaron un período de 17 días en el campo de anomalías de precipitación, pero regresionado con la radiación de onda larga saliente. Además, entre los días -8 y 8, se observa un patrón dipolar de las anomalías de precipitación sobre las regiones de SESA y SOCH. Dicha estructura también se evidencia en la correlación desfasada temporalmente entre las series filtradas de FI95 y SESA y entre FI95 y SOCH. Este resultado sugiere que las anomalías de precipitación sobre esta región están controladas por la progresión de la actividad frontal en el sudeste del Océano Pacífico. El cálculo de la correlación entre las anomalías filtradas de precipitación de SESA y SOCH confirma que la precipitación en estas dos regiones está anticorrelacionada. Además, como la correlación máxima entre estas dos regiones se repite cada 16-17 días, se podría inferir que la responsable de dicho comportamiento es la actividad frontal en la escala intraestacional.

En resumen, este trabajo sugiere que durante el invierno, la variabilidad intraestacional de la actividad frontal sobre el sector sur y oeste del HS modula las anomalías de precipitación en esta escala de tiempo, especialmente sobre las regiones SESA y SOCH. Además, el período de 16-17 días encontrado en este estudio, asociado con la evolución de la actividad frontal, podría utilizarse para el estudio de la predicción de anomalías de precipitación sobre esta región en la escala sub-estacional.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecen al Dr. Isidoro Orlanski por sus comentarios y sugerencias, que contribuyeron a mejorar este trabajo. Este estudio fue financiado por los siguientes Proyectos: FONCyT - PICT-2012-1972, PIP-CONICET N° 112-201101-00189 y UBACYT2014 N° 20020130200233BA.

REFERENCIAS

- Alvarez, M.S., Vera, C.S., Kiladis, G. N., Liebmann, B., 2014:** Intraseasonal variability in South America during the cold season. *Climate Dynamics* 42, 3253-3269. doi: 10.1007/s00382-013-1872-z.
- Bjerknes, J. y Solberg, H., 1922:** Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation. *Geophysisks Publikationer* 3, 1-18.
- Browning, K. A. y Roberts, N. M., 1994:** Structure of a frontal cyclone. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 120, 1535-1557. doi: 10.1002/qj.49712052006.
- Catto, J. L., Jakob, C., Berry, G., Nicholls, N., 2012:** Relating global precipitation to atmospheric fronts. *Geophysical Research Letters* 39, LI0805. doi: 10.1029/2012GL051736.
- Duchon, C. E., 1979:** Lanczos filtering in one and two dimensions. *Journal of Applied Meteorology* 18, 1016-1022. doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450\(1979\)018<1016:LFIOAT>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450(1979)018<1016:LFIOAT>2.0.CO;2)
- Mo, K. C. y Higgins, R. W., 1998:** The Pacific–South American Modes and Tropical convection during the Southern Hemisphere Winter. *Monthly Weather Review* 126, 1581–1596. doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1998\)126<1581:TPSAMA>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126<1581:TPSAMA>2.0.CO;2)
- Nogués-Paegle, J. y Mo, K. C., 1997:** Alternating wet and dry conditions over South America during summer. *Monthly Weather Review* 125: 279–291. doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1997\)125<0279:AWADCO>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1997)125<0279:AWADCO>2.0.CO;2)
- Robertson, A.W. y Mechoso, C. R., 2003:** Circulation Regimes and Low-Frequency Oscillations in the South Pacific Sector. *Monthly Weather Review* 131, 1566-1576. doi: <http://dx.doi.org/10.1175//2548.1>.
- Solman, A. S. y Orlanski, I., 2010:** Subpolar high anomaly preconditioning precipitation over South America. *Journal of Atmospheric Sciences* 67, 1526-1542. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2009JAS3309.1>
- Solman, A. S. y Orlanski, I., 2014:** Poleward shift and change of the frontal activity in the Southern Hemisphere over the last 40 years. *Journal of Atmospheric Sciences* 71: 539–552. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JAS-D-13-0105.1>
- Uppala, S. M. y coautores, 2005:** The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 131, 2961-3012. doi: 10.1256/qj.04.176.
- Xie, P., Chen, M., Yang, S., Yatagai, A., Hayasaka, T., Fukushima, Y., Liu, C., 2007:** A gauge-based analysis of daily precipitation over East Asia. *Journal of Hydrometeorology* 8, 607-626. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JHM583>.