

Caracterización de la circulación atmosférica y de la temperatura superficial del mar durante episodios “La Niña” en relación al aumento de la actividad de avalanchas de nieve en el sur de la Patagonia

Diego Araneo^{1,2}, Alejandro Casteller¹ y Ricardo Villalba¹

¹ Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales, CONICET, Mendoza, Argentina, daraneo@mendoza-conicet.gob.ar

² Instituto de Ciencias Básicas, UNCuyo, Mendoza, Argentina.

1. Introducción

Históricamente las avalanchas de nieve han causado, en forma reiterada, daños cuantiosos en infraestructura y pérdida de vidas humanas en ambientes montañosos de todo el mundo. Durante las últimas cuatro décadas, diversos métodos dendrocronológicos han sido utilizados para reconstruir los patrones espacio-temporales de las avalanchas (Luckman, 2010). Los primeros estudios se llevaron a cabo en América del Norte entre 1960 y 1980 (Potter, 1969; Butler, 1979) donde los autores (i) probaron la potencialidad de diferentes especies de árboles para reconstruir la historia de las avalanchas, (ii) analizaron la exactitud de varios indicadores de anillos de los árboles, y (iii) proporcionaron una base para futuras investigaciones.

En áreas donde las avalanchas están mayormente indocumentadas, como en los Andes, los métodos dendrocronológicos constituyen una herramienta valiosa para reconstruir los patrones espacio-temporales de las mismas. En los Andes patagónicos, sólo en los últimos años se han realizado investigaciones, mediante el análisis de anillos de árboles, de la actividad pasada de avalanchas (Mundo et al, 2007; Casteller et al, 2008, 2009).

Particularmente en Lago Desierto (Fig. 1 A), Patagonia Sur (Argentina), una extendida actividad de avalanchas fue encontrada para los años 1918, 1930, 1931, 1971, 1995 y 1998, mediante técnicas dendrocronológicas (Casteller et al., 2011). Los autores analizaron la aparición de cicatrices, cambios en la excentricidad del tallo, reacciones de la madera y cambios abruptos de crecimiento en 95 árboles de la especie *Nothofagus pumilio* (108 muestras), sobre nueve pistas de avalancha de una ladera orientada al oeste (Fig. 1 B). Posteriormente, sobre cada pista calcularon un índice de eventos para determinar los años con suficiente evidencia de episodios de avalancha, y un promedio de estos índices para definir los años con una importante actividad de avalanchas en toda la ladera (Fig. 1 C).

Por otra parte, específicamente los años 1971, 1995 y 1998, se caracterizaron por episodios La Niña que tuvieron lugar durante los meses de máxima precipitación nival en la región (ONI, CPC-NOAA, 2011).

El objetivo de este trabajo es determinar los patrones de circulación atmosférica para los años mencionados, en relación con la ocurrencia de gran actividad de avalanchas de nieve en la región de Lago del Desierto e identificar las principales características de los episodios La Niña que podrían originar a las mismas.

2. Datos y metodologías

A fin de determinar los patrones de circulación atmosférica asociados a los años estudiados, se utilizaron datos mensuales de altura geopotencial (HGP, en m/gp), vector viento (V, en m/s) y

tasa de precipitación (SPR, en mm/día) en los niveles de superficie, 850 y 250 hPa, sobre un reticulado regular de $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ de latitud-longitud; y de función corriente (Psi, en $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) y potencial de velocidad (Chi, en $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) en los niveles $\sigma = 0.8458$ y $\sigma = 0.2582$ sobre un enrejado global Gaussiano T62 (192 x 94), obtenidos del Reanalysis 1 de NCEP / NOAA (Kalnay et al., 1996). Adicionalmente, datos de la base reconstruida extendida de temperatura superficial del mar (TSM) de la NOAA (ERSST), con cobertura global regular de $2^\circ \times 2^\circ$ de latitud-longitud, fueron utilizados para determinar la configuración media de TSM de los episodios La Niña en comparación con los acontecidos en los años analizados. En ambos casos, el período estudiado de las bases de datos comprende los años 1958 a 2010.

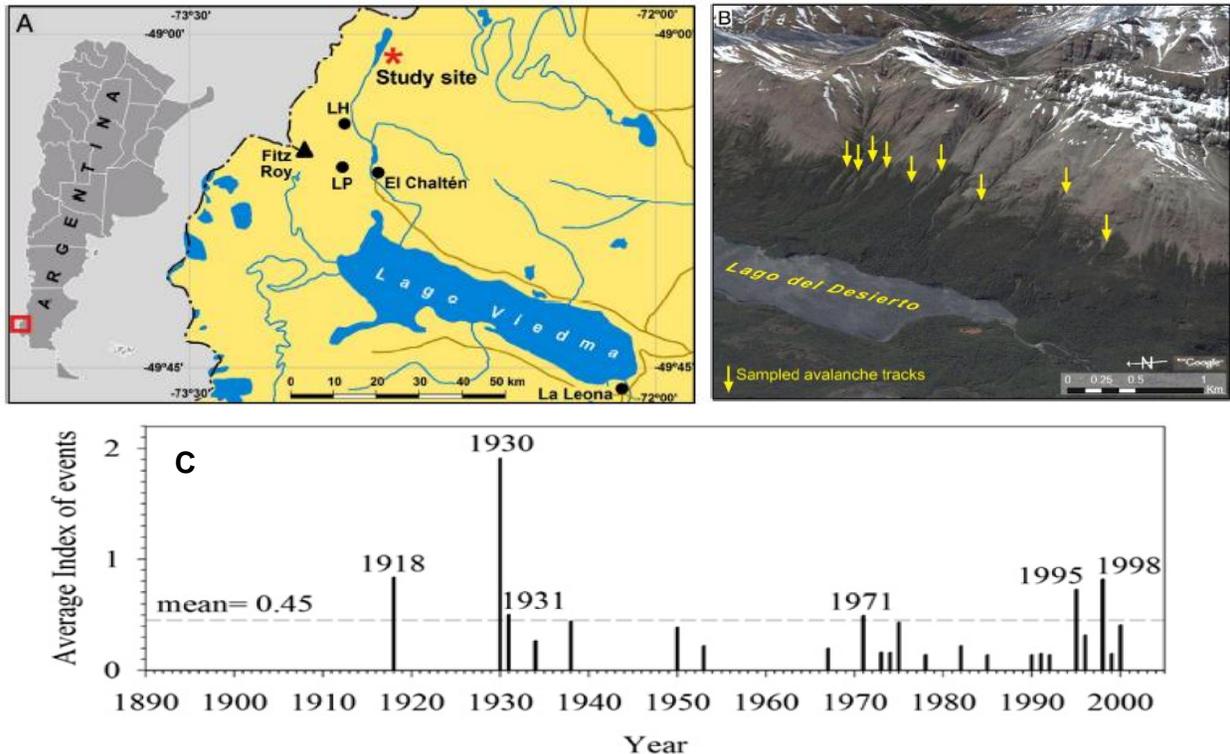


Fig. 1. (A) Ubicación del sitio de estudio en Lago del Desierto cerca de Estancia Los Huemules (LH) y Loma de las Pizarras (LP). Las pistas de avalanchas muestreadas se indican con flechas en (B). La línea de árboles está representada exclusivamente por *Nothofagus pumilio* y se encuentra a unos 1050 m. Fuente de imágenes satelitales Google Earth. (C) Índice medio de eventos teniendo en cuenta todas las pistas de avalanchas muestreadas en Lago del Desierto. Los años en que este índice supera el umbral fijado (calculado como la media de la serie) son 1918, 1930, 1931, 1971, 1995 y 1998, lo que indica la gran actividad de avalanchas en la ladera durante esos años. (Reproducido de Casteller et al., 2011).

Conjuntamente, datos de precipitación (período 1965-2004) de la estación meteorológica Lago Argentino del Servicio Meteorológico Nacional ($50^\circ 20' \text{ S}$, $72^\circ 14' \text{ W}$; 220 msnm), ubicada a 145 km del sitio analizado, se emplearon como control para determinar climatológicamente los meses de mayor precipitación en la región. Estos datos constituyen la serie de precipitación más larga y completa disponible en el punto más cercano al área de análisis. Otras variables climáticas que permitirían determinar desencadenantes específicos de avalanchas, tales como total de nieve caída, tasa de precipitación nívea y velocidad y dirección del viento, no han sido

registradas sistemáticamente cerca del área de estudio para el período de comparación con los datos dendrocronológicos.

Los campos de anomalías correspondientes a las variables meteorológicas y a las TSM (con respecto a los períodos climatológicos 1968-1996 y 1971-2000 respectivamente) fueron compuestos para la estación fría de los años con altos valores de índice de evento, comprendidos en el período de disponibilidad de datos meteorológicos (1971, 1995 y 1998) y la prueba de t-Student de diferencia de medias fue también calculada para testear la significancia de las anomalías. Adicionalmente se calcularon campos de diferencias de medias entre los correspondientes a los tres años analizados y demás años con evento La Niña (de acuerdo al índice ONI, CPC-NOAA, 2011), a fin de verificar la existencia de diferencias significativas e identificar sus características principales.

3. Resultados

De acuerdo al análisis climatológico de los datos de precipitación observada en la estación meteorológica de control, el periodo de máxima precipitación nivea sobre la región estudiada es la que comprende los meses de julio a octubre. Consecuentemente, dicho período es el que se toma en cuenta para el análisis en este trabajo.

La Figura 2 muestra los campos de anomalías compuestas para el período julio-octubre de los años con alto índice de evento de avalanchas (i.e. 1971, 1995 y 1998), correspondientes a altura geopotencial y viento (arriba), función corriente (centro) y potencial de velocidad (abajo), en niveles bajos (850 hPa y $\sigma = 0.8458$, izquierda) y altos (250 hPa y $\sigma = 0.2582$, derecha) de la troposfera.

A lo largo de todo el Pacífico Sur, tanto en bajos como en altos niveles, se observan anomalías negativas significativas de HGP extendiéndose alrededor de los 60° S, con un máximo de intensidad sobre el Pasaje de Drake; conjuntamente con anomalías significativas positivas que se extienden alrededor de los 35° S, asociadas tanto a una fuerte intensificación de los oestes, principalmente sobre el área de estudio, como a una fuerte profundización del Anticiclón del Pacífico.

Por su parte, los campos de anomalías de función corriente sobre el sector occidental del Pacífico ecuatorial, entre 120° E y 140° W, presentan centros significativos de circulación anticiclónica al sur y ciclónica al norte en niveles bajos y viceversa en niveles altos, lo cual representa una circulación anómala del este en niveles bajos y del oeste en niveles altos sobre la línea del Ecuador en este sector. Adicionalmente, las anomalías de potencial de velocidad revelan un centro de divergencia en niveles bajos y de convergencia en niveles altos sobre el Pacífico central (alrededor de los 140° W), asociados a un movimiento de subsidencia anómala sobre este sector. Lo contrario ocurre sobre la región occidental del océano, específicamente sobre el sector de las Filipinas, donde se observa un centro de convergencia en niveles bajos y uno de divergencia en niveles altos asociados al incremento anómalo de movimientos de ascenso y actividad convectiva en la zona. Estas configuraciones revelan un fortalecimiento anómalo de la circulación de Walker sobre el Pacífico ecuatorial, en el sector comprendido entre aproximadamente 110° E y 130° W.

El considerable incremento de la circulación de los oestes sobre el extremo sur del continente, especialmente sobre la región en estudio, y la profundización anómala del anticiclón del Pacífico, explican las anomalías observadas en la tasa de precipitación que se muestran en la Figura 3, las cuales exhiben valores negativos al norte de 45° S (con extremos superiores a 0.7

mm/día) y positivos al sur, con valores aproximadamente iguales o superiores a 0.8 mm/día sobre el área de Lago del Desierto.

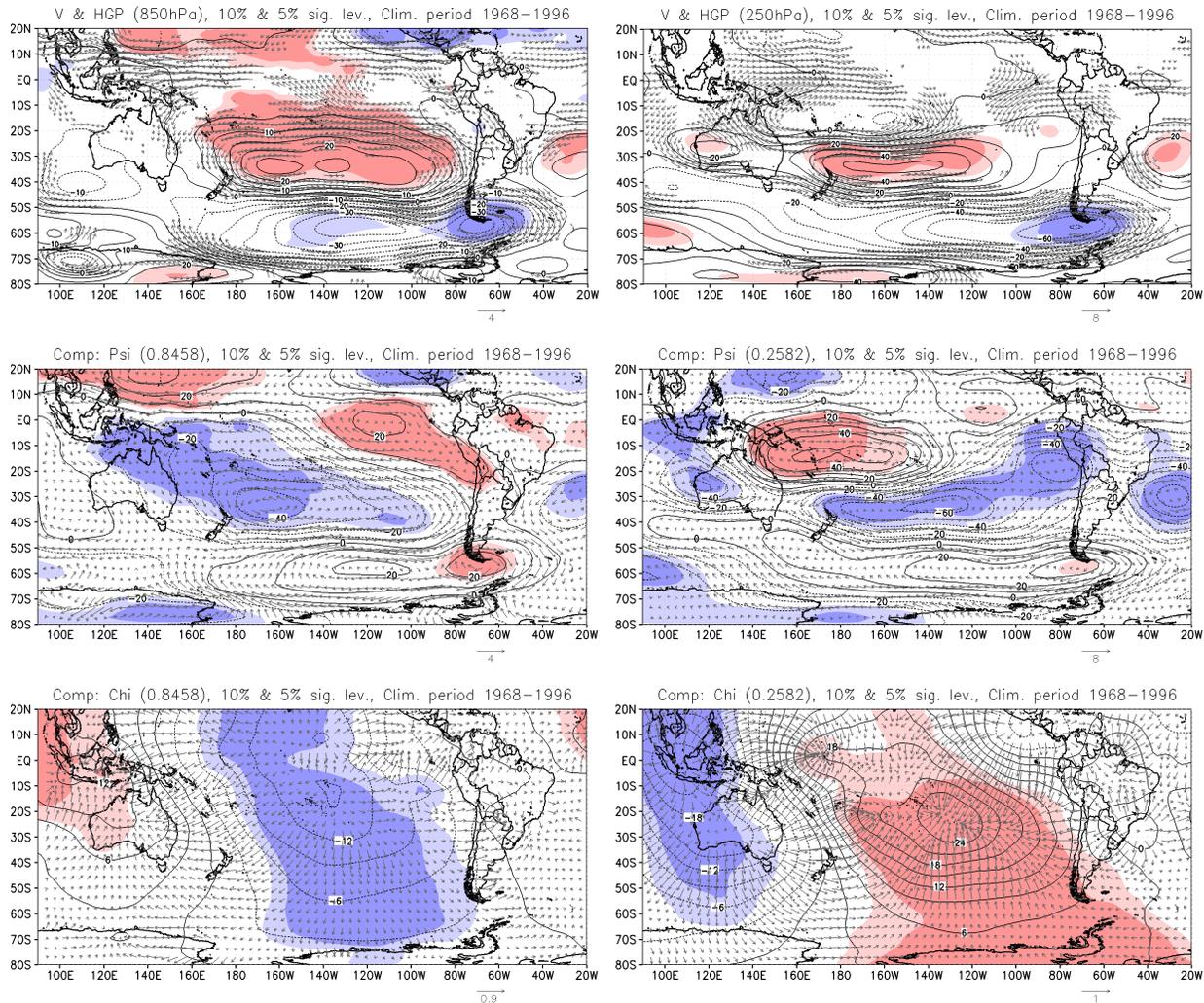


Figura 2: Campos de anomalías compuestas para el período julio-octubre de los años con alto índice de evento de avalanchas (i.e. 1971, 1995 y 1998), correspondientes a altura geopotencial y viento (HGP en m/gp y V en m/s) (arriba), función corriente (Psi en $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) (centro) y potencial de velocidad (Chi en $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) (abajo), en niveles bajos (850 hPa y $\sigma = 0.8458$, izquierda) y altos (250 hPa y $\sigma = 0.2582$, derecha) de la troposfera. Las áreas sombreadas indican valores significativos al 10% y 5% (positivos en rojo y negativos en azul). Sólo las anomalías de vector viento con al menos una componente (zonal o meridional) significativa al 5% se encuentran graficadas. Los vectores sobre los campos de anomalías de Psi y Chi representan las componentes asociadas rotacional y divergente del viento respectivamente.

Las características descritas hasta aquí, son típicas durante los eventos La Niña y, consecuentemente, absolutamente esperables teniendo en cuenta que para los años considerados (i.e. 1971, 1995 y 1998), el índice ONI muestra anomalías significativamente negativas de TSM para los meses promediados (i.e. julio-octubre). Sin embargo, cabe preguntarse si los años particularmente estudiados en este trabajo, y que exhiben un índice alto

de ocurrencia de avalanchas de nieve sobre la región de Lago del Desierto, presentan alguna característica distintiva respecto de los demás “años Niña”.

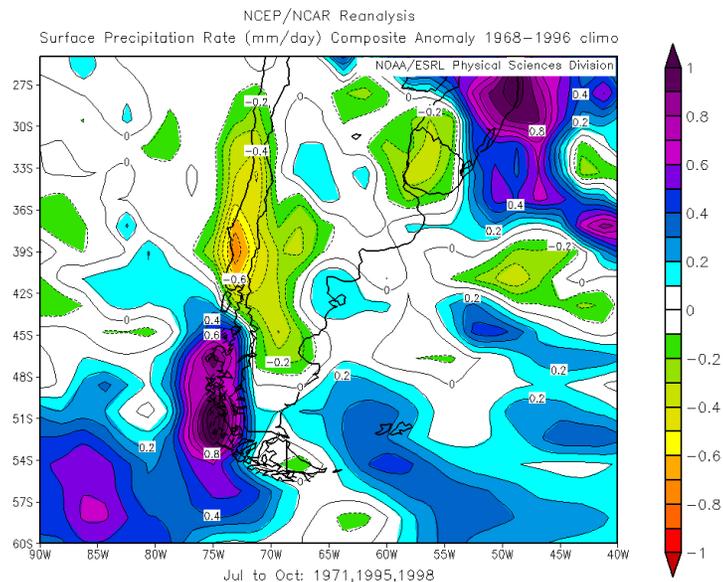


Figura 3: Campo de anomalías de la tasa de precipitación (en mm/día) correspondiente al período julio-octubre, compuestas para los años con alto índice de eventos de avalanchas (i.e. 1971, 1995 y 1998). Las anomalías se calculan respecto del período climatológico 1968-1996.

La Figura 4 muestra los campos de diferencias, para el período julio-octubre, entre los años con alto índice de evento de avalanchas (i.e. 1971, 1995 y 1998) y demás “años Niña” (i.e. años con valores significativamente negativos de ONI en esos meses), correspondientes a la función corriente (arriba) y potencial de velocidad (abajo), en niveles bajos ($\sigma = 0.8458$, izquierda) y altos ($\sigma = 0.2582$, derecha) de la troposfera.

La circulación ciclónica mostrada a lo largo de todo el Pacífico sur, tanto en niveles bajos como en altura, con la corriente del oeste exacerbada principalmente sobre la región estudiada, revela la fuerte intensificación de los oestes para los años con alto índice de episodios de avalanchas con respecto a los demás “años Niña”. Esto es, si bien la corriente de los oestes se intensifica en general para todos los años con anomalías negativas de TSM en la región Niño 3.4, para los años con alto índice de avalanchas en el extremo sur del continente, esta intensificación de los oestes es significativamente superior.

Por otra parte, otra característica distintiva se observa sobre el Pacífico ecuatorial. Las diferencias de potencial de velocidad muestran un centro de divergencia en $\sim 180^\circ$ E y dos de convergencia en $\sim 100^\circ$ E y 90° W, en niveles bajos; con correspondiente centros de signo opuesto en niveles altos sobre aproximadamente las mismas posiciones. Estas configuraciones revelan dos zonas de ascenso de aire sobre el Pacífico ecuatorial en los extremos occidental y oriental, y una zona de subsidencia sobre la porción central. Adicionalmente, sobre la mitad occidental, estas zonas de ascenso y descenso, se encuentran acompañadas por circulaciones del este en niveles bajos y del oeste en niveles altos reveladas por las diferencias de función corriente; mientras que sobre la mitad oriental estas características son inversas, con una corriente del oeste en niveles bajos y una, menos notoria, circulación del este en altura. Consecuentemente, estas particularidades ponen en evidencia una sobreintensificación de la circulación de Walker sobre la mitad occidental del Pacífico ecuatorial para los años con alto

índice de avalanchas con respecto a los demás “años Niña”; y un debilitamiento de esta característica sobre la mitad oriental. Esto es, si bien para todos los “eventos Niña” se espera una intensificación de la circulación de Walker sobre el Pacífico ecuatorial, para aquellos años con gran índice de avalanchas, esta intensificación se observa más fuerte y más retirada hacia la porción occidental que hacia la oriental del mismo.

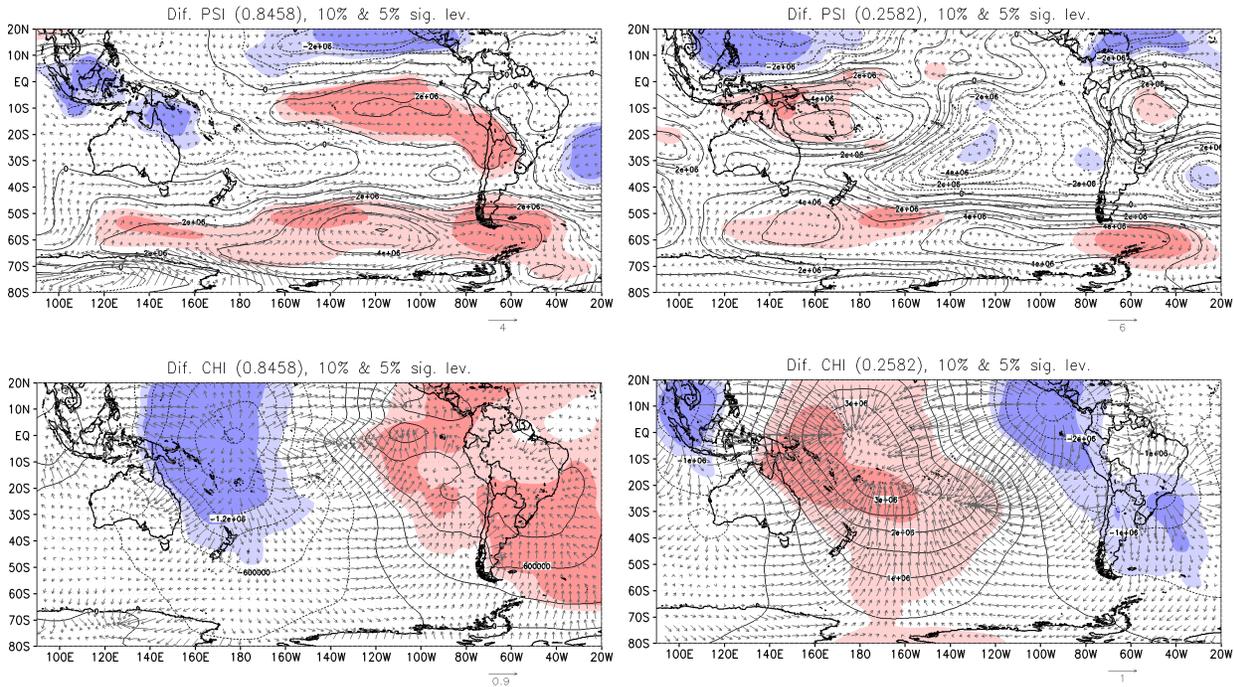


Figura 4: Campos de diferencias compuestas, para el período julio-octubre, entre los años con alto índice de evento de avalanchas (i.e. 1971, 1995 y 1998) y demás “años Niña” correspondientes a función corriente (Psi en $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) (arriba) y potencial de velocidad (Chi en $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) (abajo), en niveles bajos ($\sigma = 0.8458$, izquierda) y altos ($\sigma = 0.2582$, derecha) de la troposfera. Las áreas sombreadas indican valores de diferencias significativas al 10% y 5% (positivos en rojo y negativos en azul). Los vectores sobre los campos de diferencias de Psi y Chi representan las componentes asociadas rotacional y divergente del viento respectivamente.

De esta forma, las características “de Niña” presentadas por los tres años estudiados, resultan menos notorias, con respecto a los demás “años Niña”, sobre la región oriental del Pacífico. Las anomalías de TSM compuestas para los períodos julio-octubre de los años con gran índice de avalanchas (Fig. 5 A) y las diferencias compuestas de TSM para esos años y demás “años Niña” (Fig. 5 B), apoyan esta idea. Si bien los campos de anomalías de TSM para los años estudiados revelan un patrón típico de evento Niña, las diferencias de estos años con los demás años Niña presentan valores positivos de TSM (superiores a 1.2° C) sobre la porción oriental. De todos modos, cabe destacar que no se observan diferencias negativas de TSM, lo cual revela además que los años estudiados corresponden a eventos Niña en general no muy intensos desde el punto de vista esta variable.

4. Conclusiones

Los patrones de circulación atmosférica relacionada con años de gran actividad de avalanchas, durante los meses de precipitación intensa en la estación meteorológica de control, muestran las características principales observadas durante la fase fría del ciclo El Niño-Oscilación del

Sur (ENOS). Los resultados indican un aumento en la actividad de los oestes sobre el Pacífico Sur y el Sur de Sudamérica, lo cual sugiere no sólo un incremento de las precipitaciones sobre la región en estudio sino también un aumento en la intensidad del viento, lo cual podría favorecer los episodios de avalanchas de nieve. En concordancia con esto, Solman y Menéndez (2002) relacionaron la fase fría del ciclo de ENOS con un aumento de la inestabilidad baroclínica, y por consiguiente con la actividad de las tormentas, en una banda que se extiende en todo el Pacífico Sur sobre 50° S y alcanza a afectar la región en estudio, lo cual señalaría la ocurrencia de eventos La Niña como un forzante natural para el aumento en la actividad de las avalanchas de nieve sobre la zona.

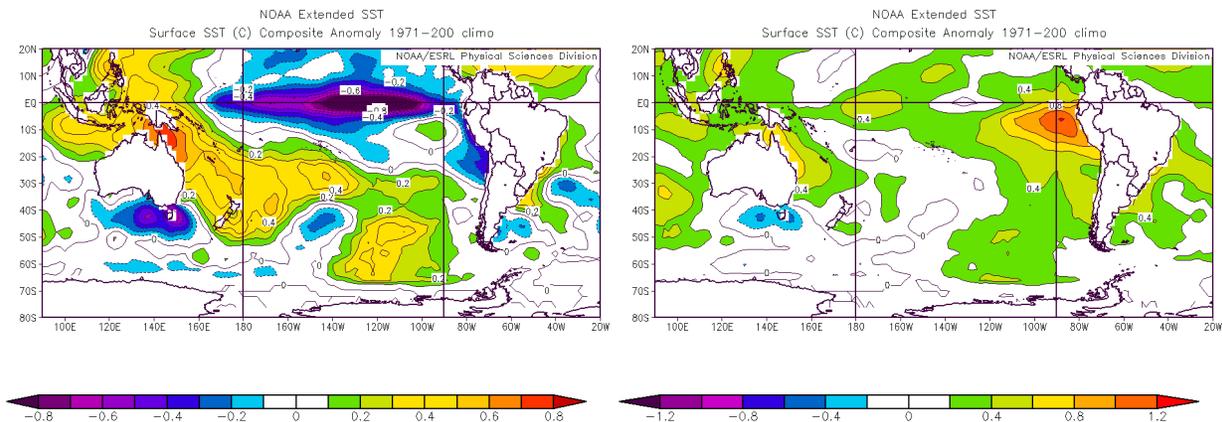


Figura 5. Campos de anomalías compuestas para el período julio-octubre de los años con alto índice de evento de avalanchas (i.e. 1971, 1995 y 1998) (izquierda), y diferencias entre estos y demás años Niña (derecha), correspondientes a la Temperatura Superficial del Mar. Las anomalías se calculan sobre el periodo climatológico 1971-2000.

Sin embargo, los resultados obtenidos en este trabajo, a partir de los campos de diferencias, sugieren que los episodios La Niña asociados al incremento de avalanchas en la región, con respecto a otros eventos La Niña, tienden a caracterizarse por un desplazamiento hacia el oeste de los centros de anomalías de TSM y potencial de velocidad (y consecuentemente de la componente divergente del viento) en capas altas y bajas de la troposfera sobre el Pacífico ecuatorial, concordante con un corrimiento hacia el oeste de las zonas de ascenso y descenso de aire, sumado al incremento de los oestes sobre la latitud de la región en estudio.

5. Referencias

- Butler, D.R., 1979. Snow avalanche path terrain and vegetation, Glacier National Park, Montana. *Arctic and Alpine Research* 11, 17–32.
- Casteller A., Villalba R., Araneo D.C., Stöckli V., 2011. Reconstructing temporal patterns of snow avalanches at Lago del Desierto, southern Patagonian Andes. *Cold Regions Science and Technology* 67, 68–78.
- Casteller, A., Christen, M., Villalba, R., Martínez, H., Stöckli, V., Leiva, J.C., Bartelt, P., 2008. Validating numerical simulations of snow avalanches using dendrochronology: the Cerro Ventana event in Northern Patagonia, Argentina. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 8, 433–443.

Casteller, A., Villalba, R., Mayer, A., Stöckli, V., 2009. Dendrochronological reconstruction of spatial and temporal patterns of snow avalanches in the Patagonian Andes. *Revista Chilena de Historia Natural* 82, 245–264.

ONI (Índice Oceánico del Niño), CPC - NOAA, 2011. Disponible en su página web: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml

Kalnay, E. y coautores, 1996. The NCEP / NCAR 40-year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-441.

Luckman, B.H., 2010. Dendrogeomorphology and Snow Avalanche Research. In: Stoffel, M., Bollschweiler, M., Butler, D.R., Luckman, B.H. (Eds.), *Tree Rings and Natural Hazards: A State-of-the-Art. : Advances in Global Change Research*, 41. Springer, Heidelberg, London, New York, p. 503.

Mundo, I.A., Barrera, M.D., Roig, F.A., 2007. Testing the utility of *Nothofagus pumilio* for dating a snow avalanche in Tierra del Fuego, Argentina. *Dendrochronologia* 25, 19–28.

Potter, N., 1969. Tree ring dating of snow avalanche tracks and the geomorphic activity of avalanches, Northern Absaroka Mountains, Wyoming. *Geological Society of America Bulletin* 123, 141–165.

Solman S.A. and Menéndez, C.G., 2002. ENSO–related variability of the Southern Hemisphere winter storm track over the eastern Pacific-Atlantic sector. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 59: 2128-2140.

Agradecimientos

Al Servicio Meteorológico Nacional por facilitar los datos de la estación Lago Argentino. Este trabajo contó con el apoyo de fondos provenientes del proyecto PIP 2009-439 de CONICET.