

## CONDICIONES MEDIAS DE INVIERNO Y ONDAS CUASI-ESTACIONARIAS DE ROSSBY ASOCIADAS A LA FRECUENCIA INVERNAL DE NOCHES FRIAS Y CÁLIDAS EN ARGENTINA SUBTROPICAL

Eduardo A. Agosta<sup>1,2</sup> y Mariana G. Barrucand<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> Equipo Interdisciplinario para el Estudio de Procesos Atmosféricos en el Cambio Global (PEPACG), Pontificia Universidad Católica Argentina (UCA), Buenos Aires, Argentina

<sup>2</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

<sup>3</sup> Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEyN, UBA

[eduardo.agosta@conicet.gov.ar](mailto:eduardo.agosta@conicet.gov.ar) ; [barrucand@at.fcen.uba.ar](mailto:barrucand@at.fcen.uba.ar)

### RESUMEN

El estudio busca definir las condiciones medias de la circulación troposférica y posibles forzantes asociados a la frecuencia de ocurrencia de noches frías (TN10) y noches cálidas (TN90) durante el invierno austral (JJA) sobre Argentina subtropical, al norte de 40°S y adyacencias (ASA) a partir de datos de estaciones meteorológicas y de reanálisis (NCEP/DOE AMIP-II y ECMWF ERA-interim). Se encuentra que la frecuencia de noches cálidas (Tmin superiores al percentil 90, TN90) está modulada interanualmente por la propagación de ondas cuasi-estacionarias (OCE) de Rossby inducidas por anomalías de convección en el Índico y el Pacífico. La alta frecuencia de noches cálidas está asociada a calentamiento anómalo del Pacífico central ecuatorial (fase positiva del El Niño-Oscilación del Sur, ENOS). La baja frecuencia de noches cálidas está relacionada con convección anómala sobre el área monzónica de la India y el Índico sur tropical occidental. Esto favorece la propagación de actividad de OCE de Rossby sobre el Índico, el Pacífico y el sur de Sudamérica. Tal teleconexión a su vez favorece la alta frecuencia de noches frías (Tmin inferiores al percentil 10, TN10). En cambio la baja frecuencia de noches frías está vinculada a variabilidad de baja frecuencia del modo de variabilidad de altas latitudes del hemisferio sur (el MAS). Se encuentra que el fortalecimiento (debilitamiento) del jet subtropical sobre Sudamérica y océanos adyacentes caracteriza los inviernos con alta (baja) frecuencia de noches frías (cálidas) en ASA. Los forzantes remotos encontrados involucran procesos atmosféricos/oceánicos que se interconectan interestacionalmente, lo cual podría permitir desarrollar el pronóstico estadístico-dinámico para invierno de alta o baja frecuencia de noches frías o cálidas en invierno.

**Palabras claves:** extremos, noches cálidas, noches frías, teleconexiones, ondas cuasi-estacionarias de Rossby, Argentina subtropical

## MEAN WINTER CONDITIONS AND QUASI-STATIONARY ROSSBY WAVES ASSOCIATED WITH THE WINTER FREQUENCY OF WARM AND COLD NIGHTS IN SUBTROPICAL ARGENTINA

### ABSTRACT

The study aims to examine the mean conditions of the tropospheric circulation and possible forcing associated with the occurrence frequency of cold nights (TN10) and warm nights (TN90) during winter (JJA) over subtropical Argentina, to the north of 40°S and surrounding areas (ASA) from meteorological stations and (NCEP/DOE AMIP-II and ECMWF ERA-interim) reanalysis data. It is found that the frequency of warm nights (Tmin over percentile 90, TN90) is modulated at interannual scales by quasi-stationary wave propagation induced by convection anomalies in the Indic and Pacific. The high frequency of warm nights is associated with anomalous warming over the central equatorial Pacific (positive phase of El Niño-Southern Oscillation, ENSO). The low frequency of warm nights is linked to anomalous convection over the monsoon Indian area and the western tropical southern Indic. Hence quasi-stationary Rossby wave activity propagation is favored over the Indic, Pacific and southern South America.

Such a teleconnection favors in turn the high frequency of cold nights ( $T_{min}$  below percentile 10, TN10). Instead, the low frequency of cold nights is linked to the low-frequency variability of the Southern Hemisphere high-latitude mode (SAM). It is found that winters with high (low) frequency of cold (warm) nights are characterized by a strengthening (weakening) of the subtropical jet over southern South America and adjacent areas. The current remote forcings are related with atmospheric/oceanic processes that are interconnected at seasonal-interseasonal scales, which could allow us to develop statistical-dynamical forecasts for the higher or lower occurrence of warm or cold nights in winter.

**Keywords:** extremes, warm nights, cold nights, quasi-stationary Rossby waves, subtropical Argentina

## INTRODUCCIÓN

Los eventos extremos de temperatura influyen indudablemente en la vida de todos los seres vivos, impactando en la salud de la población humana y de animales, y en el desarrollo de las plantas. También tienen un fuerte impacto socioeconómico al afectar la demanda de energía para calefacción o refrigeración y el diseño de estrategias de manejo energético. Es por ello que ha habido un creciente interés por estudiar estas condiciones térmicas extremas, su variabilidad espacio-temporal y las condiciones físicas de la atmósfera conducentes a estos eventos.

Los estudios previos que analizan la variabilidad de las condiciones térmicas extremas en Sudamérica, y en Argentina en particular, muestran que la temperatura mínima del aire a 2 metros es la que ha registrado una mayor variación en los últimos años, con una tendencia hacia condiciones más cálidas (Rusticucci y Barrucand, 2004, Vincent et al. 2005), especialmente durante la estación cálida. La temperatura máxima, por el contrario, no muestra una tendencia definida.

Los estudios de variabilidad temporal de la temperatura del aire sobre la región no se limitan ciertamente al análisis de tendencias. El espectro de la ocurrencia de eventos extremos de temperatura presenta cuasi-ciclos significativos en escalas multianuales a decadales, lo cual indica la posible modulación por forzantes del sistema climático (Rusticucci et al. 2003, Barrucand et. al, 2008). Estas modulaciones en baja frecuencia presentan diferencias en amplitud y fase a lo largo del ciclo anual, por lo que es indispensable profundizar el análisis de la variabilidad de la temperatura del aire considerando las estaciones del año (Barrucand et. al, 2008).

Los estudios que analizan la dinámica troposférica responsable de extremos de temperatura se han centrado mayormente en la ocurrencia de los eventos extremos fríos de invierno asociados a heladas, de indudable importancia para la agricultura intensamente desarrollada en la región. En este sentido Garreaud (1999) examinó la estructura media de las irrupciones de aire frío sobre Sudamérica subtropical y su dinámica asociada en escala sinóptica para los meses de junio a agosto. Por su parte, Vera y Vighiarolo (2000) realizaron un diagnóstico de la estructura y de los procesos dinámicos de las olas de frío sobre la región en seis inviernos. Asimismo Pezza y Ambrizi (2005) analizaron las irrupciones de aire frío sobre Sudamérica tropical, y Escobar et al. (2004) estudiaron las secuencias de patrones sinópticos de la circulación troposférica en capas medias y bajas asociadas a irrupciones de aire frío en el centro de Argentina durante los meses de mayo a septiembre. Estudios específicos sobre heladas pueden encontrarse en Müller (2007, 2010) y Müller y Berri (2007, 2012), los cuales describen los procesos dinámicos regionales y las condiciones medias de la circulación general asociados a las heladas generalizadas y parciales en la Pampa Húmeda.

Una compilación detallada de estudios relacionados con la ocurrencia de extremos de temperatura en Sudamérica puede encontrarse en el trabajo de revisión realizado por Rusticucci (2012). Según el trabajo las irrupciones de aire cálido en Argentina son menos frecuentes y menos intensas que las observadas en el Hemisferio Norte razón por la cual han sido menos estudiadas que los eventos fríos. Rusticucci y Vargas (1995) estudiaron la circulación de la atmósfera relacionada con situaciones extremas cálidas en verano e invierno desde un punto de vista climático-sinóptico, determinando los patrones de circulación que favorecen su ocurrencia. Más recientemente Cerne y Vera (2010) muestran la importancia de la actividad de la Zona de Convergencia Sudamericana (SACZ en inglés) para el desarrollo de anomalías de circulación conducentes a olas de calor en latitudes subtropicales.

Entre los forzantes internos del sistema climático, el fenómeno atmosférico-oceánico conocido como El Niño-Oscilación del sur (ENOS) es un claro modulador del clima en escala planetaria (Ebbesmeyer et al. 1991, Mantua et al. 1997, Solomon et al. 2007, Barreiro 2010). Su influencia en la precipitación y la temperatura sobre Sudamérica ha sido bastante estudiada (Barros et al. 1996, 2008; Robertson y Mechoso 1998, Rusticucci y Penalba 2000, Agosta y Compagnucci 2008, Renom et al. 2010). En particular sobre Argentina, el ENOS modula la temperatura del aire haciendo que las secuencias de días cálidos en invierno sean más intensas y persistentes (Rusticucci y Vargas 2001) en concordancia con la reducción en el número de heladas en la región Pampa Húmeda (Müller et al. 2000). Barros et al (2002) destacan que la asociación de condiciones cálidas (frías) con la fase positiva (negativa) del ENOS se observa en forma consistente solamente durante el invierno en la región subtropical de Argentina.

Las regiones tropicales pueden afectar los subtrópicos y las latitudes medias mediante dos mecanismos conocidos. Uno es a través de anomalías de la circulación troposférica simétricas respecto del ecuador que se

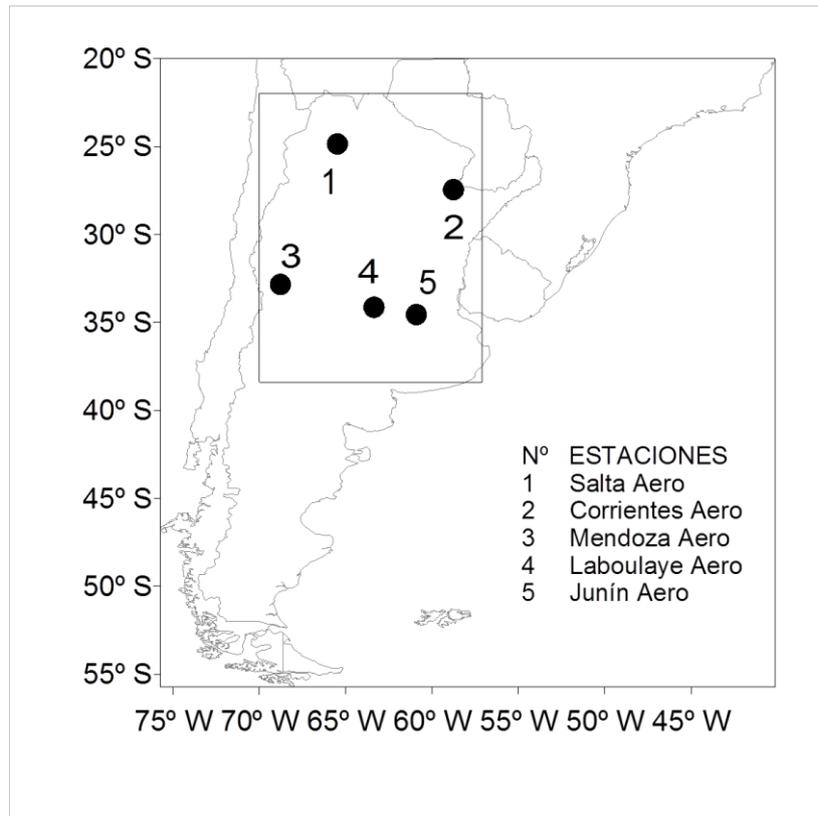
extienden meridionalmente hacia los polos (Bjerknes, 1966, 1969, Lau y Nath 1996). La simetría tiene origen en anomalías de la temperatura superficial del mar (TSM) ecuatorial que fuerzan anomalías de la circulación troposférica fortaleciendo las corrientes en chorro subtropicales del lado ecuatorial. Este tipo de influencia se conoce como la circulación meridional inducida por anomalías en la circulación de celda de Hadley y está típicamente asociada a variaciones interanuales del fenómeno ENOS (Rasmusson y Carpenter 1982, Seager et al. 2005) y a cambios de muy baja frecuencia como lo es la transición climática de 1976/77 (Gill 1980, Rasmusson y Carpenter 1982, Garreaud y Battisti 1999, Seager et al. 2005). La otra manera de influencia es a través de la propagación de ondas de Rossby, especialmente si las áreas de convección anómalas están ligeramente desplazadas del ecuador. Trabajos reciente muestran la existencia de teleconexiones o propagación en baja frecuencia de ondas de Rossby que conectan los trópicos de las cuencas oceánicas del Indico y del Pacífico modulando la variabilidad de la precipitación y la temperatura en Sudamérica (Chan et al. 2008, Taschetto y Ambrizzi 2011, Agosta y Compagnucci 2012, Costa y Agosta 2012).

De lo dicho anteriormente, resulta importante avanzar en el conocimiento de los procesos troposféricos en baja frecuencia que pueden estar asociados a los extremos de temperatura mínima considerando las distintas épocas del año. Por tal motivo, el objetivo del trabajo es analizar la variabilidad interanual de la frecuencia de ocurrencia de noches frías (extremo inferior de temperatura mínima) y de noches cálidas (extremo superior de temperatura mínima) sobre el sudeste de Sudamérica, particularmente la zona de Argentina subtropical, al norte de 40°S y adyacencias (ASA, Fig.1) durante el invierno austral (junio a agosto, JJA), y determinar las condiciones dinámicas medias de la circulación troposférica hemisférica asociada. El trabajo se organiza de la siguiente manera: en la sección segunda se presentan los datos utilizados, la metodología empleada para regionalizar los índices térmicos de la frecuencia de ocurrencia de noches frías y noches cálidas en la época invernal sobre ASA, y los índices calculados. En la sección tercera se muestran los resultados obtenidos sobre las condiciones medias de invierno asociadas a estos índices térmicos regionales y la propagación de actividad de ondas troposféricas cuasi-estacionarias de baja frecuencia junto a una discusión sobre los posibles forzantes remotos oceánicos. Finalmente en conclusiones se describe sucintamente los principales hallazgos y los futuros avances en la investigación.

## **DATOS Y METODOLOGÍA**

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) a través de la comisión de climatología y el programa mundial de investigación meteorológica sobre variabilidad y predictabilidad climática (CLIVAR) establecieron un equipo (llamado en inglés "The Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices", ETCCDMI) con el objetivo de desarrollar una lista de índices climáticos útiles para el monitoreo regional y global basados en datos observados de estaciones meteorológicas. Estos índices climáticos han sido utilizados en todo el mundo (Frich et al., 2002, Alexander et al., 2006). En este trabajo se consideran dos de los índices propuestos, que involucran extremos de temperaturas mínimas: TN10 y TN90. Estos representan el porcentaje de días del mes (o algún otro período) con temperaturas mínimas inferiores al percentil 10 y superiores al percentil 90 respectivamente. Comúnmente se hace referencia a estos índices como "noches frías" y "noches cálidas".

Estos índices se calcularon para cada una de las 5 estaciones climatológicas de referencia en la región de estudio (SAL, CTE, LAB, MZA y JUN, siguiendo a Barrucand et al. 2008) a partir de datos de temperaturas mínimas diarias sobre el período 1979-2008 (Fig. 1). La homogeneidad espacial de los índices se analizó mediante la función estructura de los mismos, evidenciada por la correlación convencional (primer momento de Pearson), para los distintos meses del año. Cabe destacar que solamente los meses de invierno (junio, julio y agosto, JJA) muestran coherencia en los índices tanto temporal, es decir dentro de la estación fría, como espacial, es decir entre las estaciones meteorológicas (estructura regional). Lo anterior permite la elaboración de un índice representativo de la región para invierno, tanto para noches frías (TN10INV) como para noches cálidas (TN90INV). Así, sendos índices se estiman como el resultado del promedio JJA de los valores TN10 y TN90 de cada mes promediado para todas las estaciones meteorológicas. En la Tabla 1 se muestran las correlaciones encontradas entre los índices de invierno TN10 y TN90 para cada estación meteorológica y los respectivos índices regionales TN10INV y TN90INV. La covariabilidad interanual es robusta permitiendo utilizar estos índices regionales como indicadores de la variabilidad interanual de la frecuencia invernal de ocurrencia de temperaturas mínimas diarias extremas en Argentina subtropical. En adelante nos referiremos a estos índices regionales de invierno simplemente como TN10 y TN90.



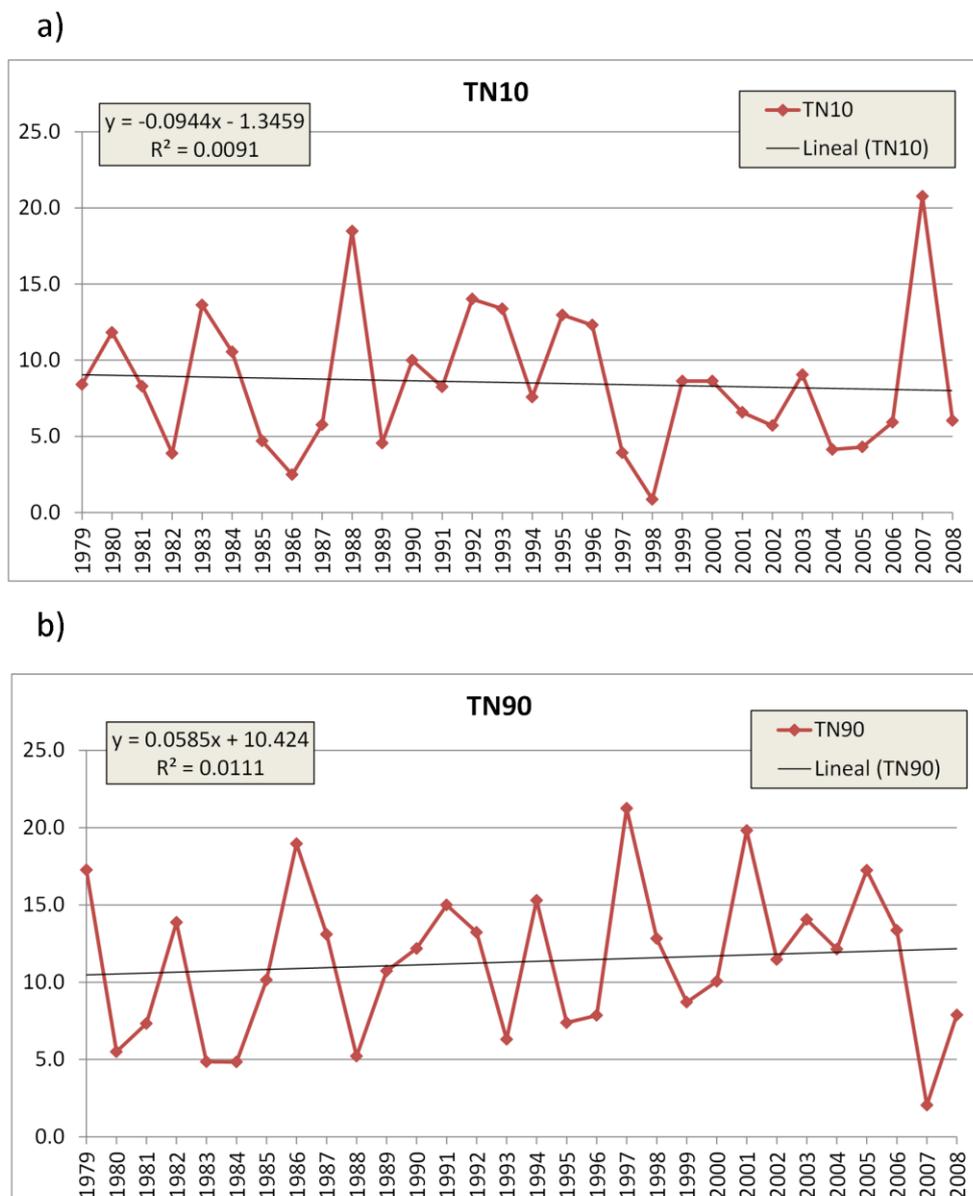
**Figura 1:** Zona de estudio en Argentina subtropical y adyacencias (ASA) y estaciones meteorológicas utilizadas para el cálculo del índice regional de ocurrencia extrema de temperatura mínima

**Figure 1:** Area of study in subtropical Argentina and adjacent areas (ASA) and meteorological stations used for estimating the regional index of extreme minima temperature occurrence.

	TN10INV	TN90INV
MZA	0.89	0.76
JUN	0.88	0.87
SAL	0.80	0.77
CTE	0.81	0.78
LAB	0.88	0.83
<i>q1</i>	4.95	7.50
<i>q2</i>	11.51	14.01

**Tabla 1:** Correlación entre los índices invernales TN10 y TN90 para cada estación y el obtenido como promedio regional TN10INV y TN90INV. N=30. Y valores del primer cuartil (*q1*) y del tercer cuartil (*q3*) de los índices TN10INV y TN90INV.

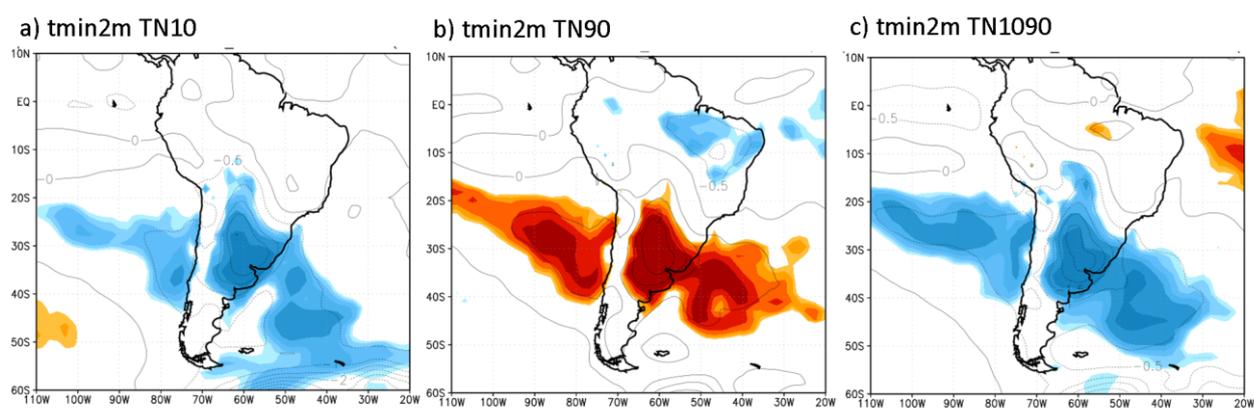
En la figura 2 se muestran las marchas interanuales de los índices TN10 y TN90. La tendencia es negativa para TN10 ( $\approx -1\text{día}/30\text{ años}$ ) y positiva para TN90 ( $\approx +1.76\text{día}/30\text{ años}$ ). Si bien las pendientes no son significativas sobre el período escogido, los signos son consistentes con resultados previos (Rusticucci 2012). Por otra parte la correlación entre TN10 y TN90 es  $r = -0.67$ , significativamente distinta de cero para el 95% de confianza. Esto implica que las variaciones interanuales de la frecuencia de ocurrencia de noches frías y de noches cálidas a lo largo del invierno son en parte excluyentes. Por esta razón y como complemento de los índices TN10 y TN90 se construye el índice diferencia TN1090 = TN10 - TN90, lo cual enfatiza los aspectos diferenciales entre ambos. Estos tres índices (TN10INV, TN90INV Y TN1090INV) se utilizarán para analizar la respuesta de la circulación troposférica del Hemisferio Sur para inviernos considerando valores extremos, alto y bajo, de los índices. Los valores altos y bajos de los índices regionales son obtenidos mediante el criterio de cuartiles: Valores de los índices por debajo del primer cuartil son considerados bajos (extremos bajos) y por encima del tercer cuartil son considerados altos (extremos altos). Asimismo para examinar la variabilidad temporal de la amplitud y la fase de las series temporales se emplea el análisis de potencia de wavelet (Torrence y Compo 1998).



**Figura 2:** Marchas interanuales del índice regional TN10 (a) y TN90 (b) de invierno (JJA) para la región ASA. Se indica la curva y la ecuación respectiva para la tendencia lineal y el valor de la varianza explicada por la tendencia ( $R^2$ ).

**Figure 2:** Interannual time series of the regional indices TN10 (a) and TN90 (b) during Winter (JJA) for ASA. Linear trend equation and curve are indicated together with the explained variance ( $R^2$ ).

Para determinar el área de representatividad de los índices TN10, TN90 y TN1090 se utilizan datos de la temperatura mínima a 2m de superficie ( $T_{min2m}$ , K) del reanálisis 2 del NCEP/NCAR con enrejado gaussiano T62 (aproximadamente  $1.89^\circ$  latitud y de longitud para latitudes subtropicales) y se calculan los campos de la diferencia compuesta (temporadas con valores de índice alto menos temporadas con valores de índice bajo) para ellos. La Figura 3 muestra la diferencia compuesta de  $T_{min2m}$  para TN10 (Fig.3a), TN90 (Fig. 3b) y TND1090 (Fig. 3c). La escala de sombreado indica la significancia de la anomalía compuesta siempre por encima de 90% de confianza, cuanto más intenso el color, mayor es la significancia (ver pie de figura). Claramente se observa que el índice TN10 describe la ocurrencia de noches frías sobre ASA, es decir hay predominio de anomalías compuestas negativas de temperatura mínima media de invierno a 2 m de altura sobre el todo el subtrópico del sudeste de Sudamérica, desde Argentina, sur de Brasil y Uruguay, extendiéndose la señal hacia las cuencas marinas del Atlántico y del Pacífico. Una estructura similar se halla para el campo de diferencia compuesta asociado a TN90, solamente que con anomalías significativas positivas dado que representa la frecuencia de ocurrencia de noches cálidas. Finalmente, el campo anómalo de la diferencia compuesta de  $T_{min2m}$  para TND1090 refleja una estructura espacial muy similar a los dos anteriores y con igual signo a TN10 (como era de esperarse). Por tanto el estudio de la troposfera a partir de estos índices describirá el comportamiento de la temperatura mínima de invierno sobre ASA que se refleja en la Figura 3.



**Figura 3:** Diferencia de composiciones de campos de temperatura mínima diaria a 2m ( $t_{min2m}$ ) de invierno, calculados según:  $t_{min2m}$  de años con valores altos menos  $t_{min2m}$  de años con valores bajos de los índices a) TN10 b) TN90 y c) TN1090. Sombreados indican intervalos de confianza al 90, 95, 97.5 y 99% o más, para anomalías negativas (gama azul) y anomalías positivas (gama roja). La extensión de la señal significativa en el campo de  $t_{min2m}$  determina la región ASA. Los datos corresponden a los reanálisis 2 (DOE NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis).

**Figure 3:** Composite difference for the 2-meters daily winter minimum temperature ( $t_{min2m}$ ) field, estimated as:  $t_{min2m}$  during years of high minus low index for a) TN10, b) TN90 and c) TN1090. Shaded areas indicates confidence intervals at 90, 95, 97.5, 99% and over, for the negative anomalies (blue colors) and positive anomalies (red colors). The spatial extension of the significant signal in the  $t_{min2m}$  field determines the region ASA. Anomalies based on DOE NCEP/DOE AMIP-II reanalysis datasets.

La circulación troposférica hemisférica de invierno se analiza mediante datos mensuales de las medias diarias del reanálisis 2 (NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis disponibles en <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>.) con una resolución de  $2.5^\circ$  de latitud y de longitud. Las variables usadas son altura geopotencial (AGP en mgp), las componentes zonales ( $v$ ) y meridionales ( $u$ ) del viento (en  $m \cdot s^{-1}$ ) y de temperatura del aire ( $T$  en K) para diversos niveles de presión. Con las componentes  $u$  y  $v$  se derivan las componentes rotacional e irrotacional del flujo horizontal de masa y sus respectivos potenciales (función corriente, PSI, y potencial de velocidad, CHI, respectivamente) en troposfera baja y alta. Para examinar los resultados con más detalles en escala regional se emplean los datos de reanálisis del ERA-interim de alta resolución ( $0.79^\circ$  de latitud y de longitud) para temperatura del aire a 2m ( $T_{2m}$ ) y las componentes  $u$  y  $v$ , datos provistos por el European Center for Medium Forecast (ECMF) European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF, en <http://www.ecmwf.int>).

La existencia de teleconexiones se estudia mediante el cálculo de asimetrías zonales de la función corriente y de anomalías temporales del geopotencial, derivados sobre campos compuestos para situaciones de valores altos y bajos de los índices TN10, TN90 y TN1090, y para la diferencia de índices, alto menos bajo, para cada uno de ellos. La composición permite obtener perturbaciones anómalas (Karoly et al. 1989) que pueden llegar a ser ondas cuasi-estacionarias (OCE) de Rossby si hay propagación de actividad de onda bajo ciertas condiciones. Por ello la propagación de actividad de OCE se analiza utilizando las componentes conservativas horizontales del flujo de actividad de onda desarrollado por Plumb (1985). El flujo de actividad de onda es un vector que es paralelo a la velocidad de grupo de la onda por tanto indicador del sentido y dirección de la propagación.

Para la identificación de los forzantes remotos inducidos por anomalías de la TSM se utilizaron datos reconstruidos e interpolados por el Hadley Center versión 2.01 en una resolución de 1° de latitud y longitud y de radiación de onda larga saliente interpolada (OLR, en watt/segundo) de la NOAA. También se emplean índices de la TSM en la región de Niño3 y Niño3.4 como indicadores del ENOS, provistos por NOAA (disponibles en <http://www.esrl.noaa.gov/data/climateindices>) y el índice calculado a partir de observaciones del Modo Anular del Sur (IMAS) calculado por Marshall (2003). Asimismo se complementa el estudio con el cálculo de fuentes de Rossby extratropicales estacionales (FRE) asociadas a convección profunda siguiendo a Rasmusson y Mo (1993). En los subtropicos una FRE está vinculada con el producto de la divergencia y la vorticidad planetaria y la componente divergente del viento en troposfera alta en el balance anómalo estacional de la vorticidad de la siguiente manera:

$$FREa \approx f * Da + \beta * V_{\chi} a$$

Donde  $f$  es la vorticidad planetaria,  $Da$  es la divergencia anómala,  $\beta$  es el gradiente meridional de la vorticidad planetaria, y  $V_{\chi} a$  es el viento divergente anómalo. El subíndice  $a$  indica apartamiento estacional respecto de la climatología.

Como condición necesaria de la significancia de los campos obtenidos, las anomalías se testearon mediante el test modificado de t-Student para varianzas desiguales, el cual es un test más robusto y restrictivo que el test t-Student convencional (Moser 1992).

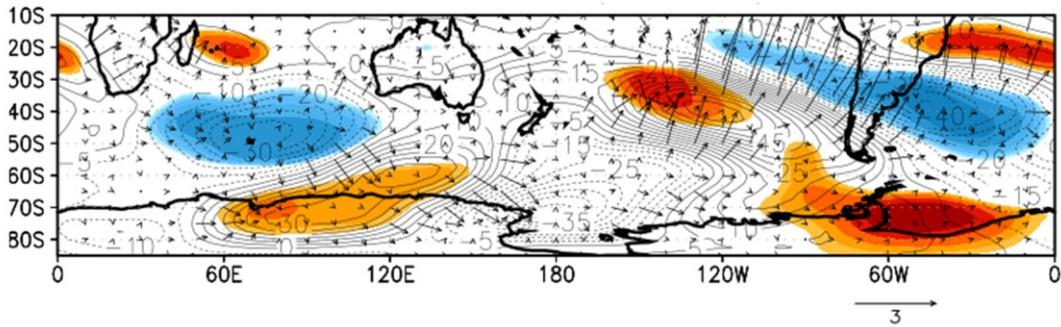
## RESULTADOS

En la sección 2 hemos visto que la ocurrencia extrema de noches frías y de noches cálidas en un invierno dado son, en parte, eventos excluyentes. Por tal razón el análisis lo iniciamos buscando identificar cuáles son los aspectos diferenciales de la circulación troposférica global asociados a estos casos, empleando el índice TN1090. Por ser TN1090 un índice diferencia entre TN10 y TN90, la relación directa de las anomalías compuestas referirán a la fase positiva de TN10 (noches frías extremas más frecuentes) y a la fase negativa de TN90 (noches cálidas extremas menos frecuentes). Cabe destacar que al componer valores altos de TN10 y valores bajos de TN90 por separado los resultados son muy similares a los que se muestran a continuación para TN1090, y por tal motivo, aquellos no se muestran.

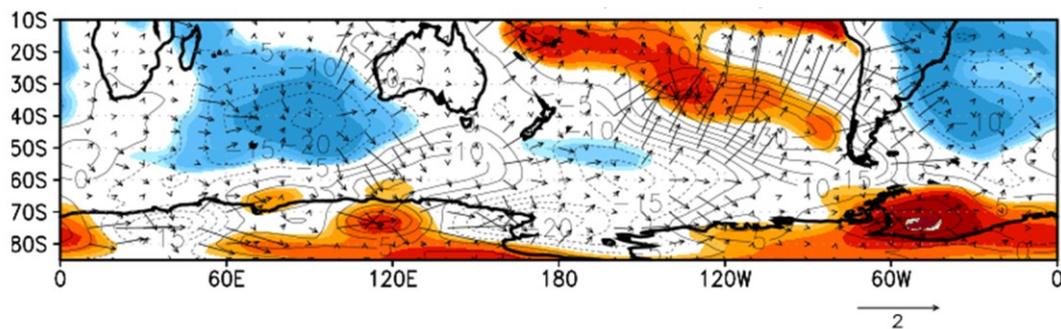
La Figura 4 muestra el campo de anomalías zonalmente asimétricas de AGP en 300 y 850 hPa y los respectivos flujos de actividad de onda estacionaria de Plumb (vectores  $F_s$ ) para la diferencia compuesta de valores altos menos bajos del índice TN1090. Las áreas significativas para la diferencia compuesta de la asimetría zonal anómala de AGP muestra una estructura del tipo onda barotrópica equivalente, es decir, hay concordancia de fase entre las anomalías de circulación en niveles bajos y altos con aumento en altura de las amplitudes. Los flujos de actividad de onda de Rossby, en toda la tropósfera, evidencian una propagación meridional hacia el polo sobre el sector occidental tropical de Índico sur que se curva hacia el este en latitudes medias-subpolares, y se dirige hacia el Pacífico sur. En el sector subtropical central del Pacífico sur se evidencia un fortalecimiento de los flujos de actividad de onda, los cuales se dirigen hacia el este y noreste, en latitudes más hacia el ecuador del Pacífico sur, y hacia Sudamérica. Estos resultados muestran claramente que entre el Índico, el Pacífico y Sudamérica se establece una teleconexión troposférica mediante propagación del flujo de actividad de onda de Rossby cuasi-estacionaria embebido en el flujo básico en asociación con variaciones en la ocurrencia de extremos térmicos en Argentina subtropical. Varios autores han reportado la existencia de teleconexiones similares de baja frecuencia intraestacional en escalas interanuales (Drumond y Ambrizzi 2008, Chan et al. 2008, Taschetto y Ambrizzi 2011). Por su parte, sobre ASA las anomalías temporales de la circulación troposférica impuestas por la onda cuasi-estacionaria proveen un flujo anómalo de viento a 10 metros de altura sobre la superficie con componente predominante del sur en una amplia área del cono sur de Sudamérica, especialmente al norte de ASA. Esta componente anómala del viento meridional genera anomalías negativas de temperatura a 2m de altura que son significativas en toda la región (Fig. 5) durante valores altos de TN1090, esto es, para valores altos de TN10 (alta frecuencia de noches frías) y para valores bajos de TN90 (baja frecuencia de noches cálidas).

La existencia de anomalías significativas de TSM sobre el Pacífico central ecuatorial (Fig. 6a) parece indicar que la teleconexión estaría vinculada a anomalías del fenómeno ENOS. En este sentido la Figura 7 muestra la potencia espectral wavelet (Fig. 7a) que permite descomponer las señales cíclicas dominantes en fase (años) y amplitud (varianzas) y el espectro wavelet global (Fig. 7b), para la serie temporal de TN1090. La wavelet evidencia la existencia de un cuasi-ciclo dominante de 3-4 años significativo a más del 95%, el cual es una señal característica del ENOS. Una potencia wavelet de similares característica se encuentra tanto para la serie temporal de TN10 como de TN90 (figuras no mostradas). Asimismo la correlación entre el índice TN1090 e indicadores del fenómeno ENOS como ser el índice Niño3 y Niño3.4, muestra una relación lineal inversa moderada ( $r=-0.48$  y  $r=-0.46$ , respectivamente) y significativa. Es decir que la teleconexión troposférica asociada al

a) AGP en 300hPa & flujo Fs (JJA), alto-bajo TN1090



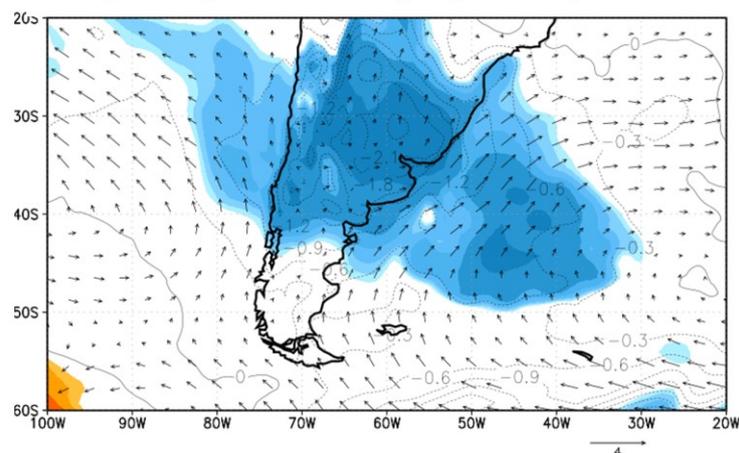
b) AGP en 850hPa & flujo Fs (JJA), alto-bajo TN1090



**Figura 4:** Anomalías asimétricas zonales de altura geopotencial (AGP) en 300hPa (a) y 850hPa (b) y los vectores indican flujos horizontales de actividad de ondas estacionarias de Plumb ( $F_s$ ,  $m^2 \cdot s^{-2}$ ). Sombreados indican intervalos de confianza al 90, 95, 97.5 y 99% o más, para anomalías negativas (gama azul) y anomalías positivas (gama roja).

**Figure 4:** Zonally asymmetric anomalies of geopotential (AGP) at 300hPa (a) and 850hPa (b). Arrows indicate Plumb's horizontal stationary wave activity flux ( $F_s$ ,  $m^2 \cdot s^{-2}$ ). Shaded areas indicates confidence intervals at 90, 95, 97.5, 99% and over, for the negative anomalies (blue colors) and positive anomalies (red colors).

T2m y V10m, ERA-interim (JJA), alto-bajo TN1090

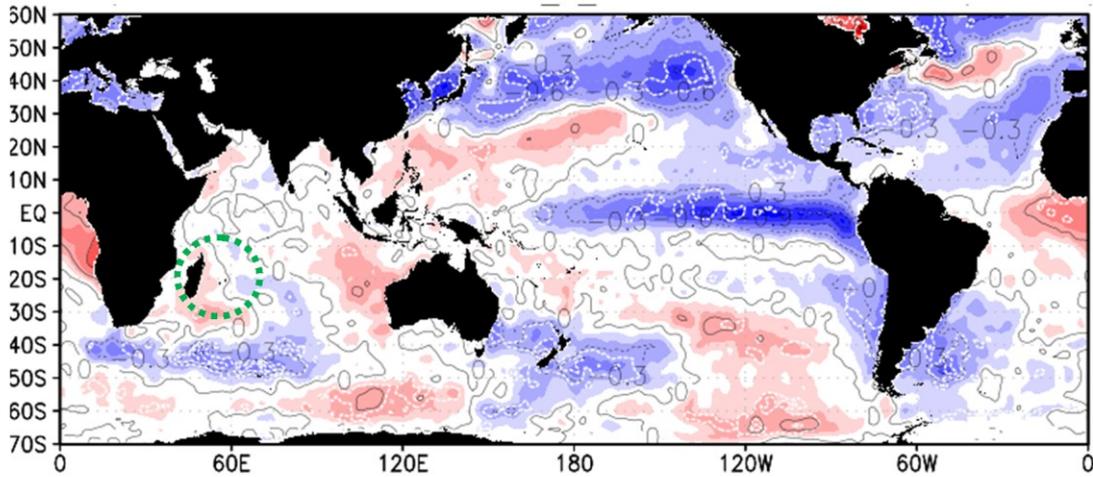


**Figura 5:** Diferencia compuesta para valores altos menos bajos de TN1090 para la temperatura del aire a 2 m (T2m) y componentes u y v del viento a 10 metros de altura (V10m). Sombreados indican intervalos de confianza al 90, 95, 97.5 y 99% o más, para anomalías negativas (gama azul) y anomalías positivas (gama roja).

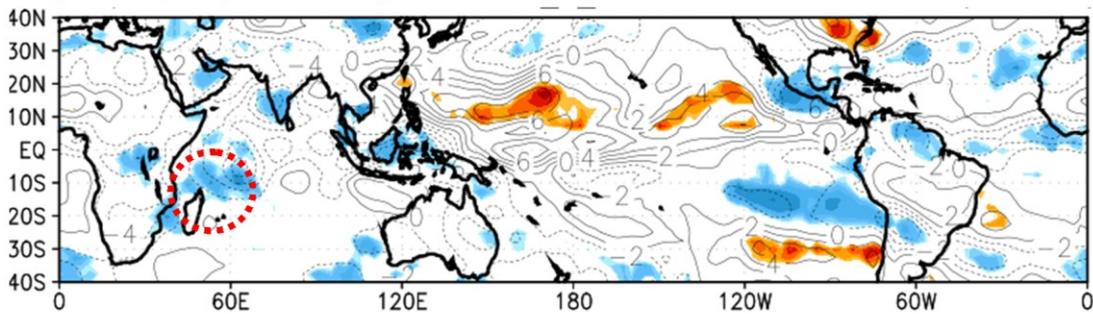
**Figure 5:** Composite difference for high and low values of TN1090 for 2-meters air temperature (T2m) and 10-meters wind components, zonal u and meridional v (V10m). Shaded areas indicates confidence intervals at 90, 95, 97.5, 99% and over, for the negative anomalies (blue colors) and positive anomalies (red colors).

índice TN1090, tiene relación inversa con indicadores del ENOS. Como se verá más adelante, esta relación responde más a la variabilidad de TN90 que a la de TN10.

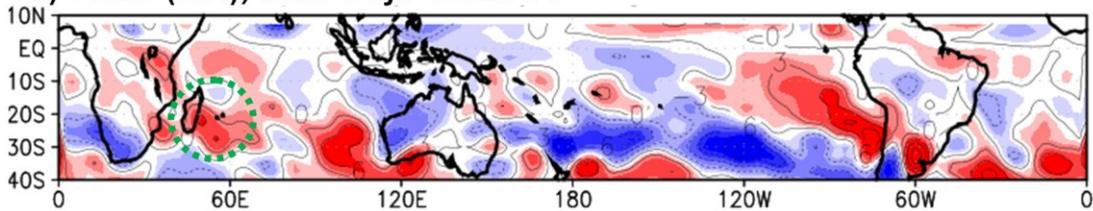
a) TSM (JJA), alto-bajo TN1090



b) OLR (JJA), alto-bajo TN1090

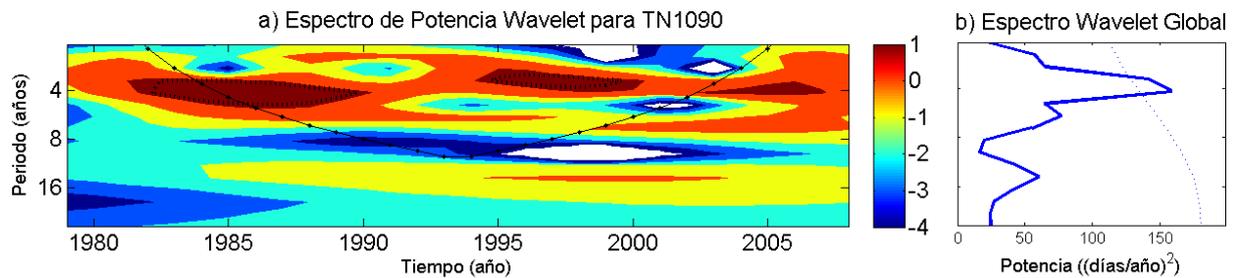


c) FREa (JJA), alto-bajo TN1090



**Figura 6:** Diferencia compuesta para valores altos menos bajos de TN1090 para para la temperatura superficial del mar (TSM, °C, panel a), para la radiación de onda larga saliente (OLR, watt.m<sup>-2</sup>, panel b) y para anomalías de fuentes de ondas estacionarias de Rossby (FREa, 10<sup>11</sup>s<sup>-2</sup>, contornos cada 3.10<sup>11</sup>s<sup>-2</sup>, panel c). En panel (a) gama de azul indica anomalías negativas desde -0.2°C, la gama de rojo, anomalías positivas desde +0.2°C, línea a trazos, significancias superiores al 90% de confianza. En panel (b) sombreados indican intervalos de confianza al 90, 95, 97.5 y 99% o más, para anomalías negativas (gama azul) y anomalías positivas (gama roja). En panel (c) la gama de azul indica anomalías negativas desde - 2.10<sup>11</sup>s<sup>-2</sup>, y gama de rojo indica anomalías positivas desde +2.10<sup>11</sup>s<sup>-2</sup>.

**Figure 6:** Composite difference for high minus low values of TN1090 for sea surface temperature (TSM, °D, panel a), outgoing long wave radiation (OLR, watt.m<sup>-2</sup>, panel b) and stationary Robby's wave source anomalies (FREa, 10<sup>11</sup>s<sup>-2</sup>, contours every 3.10<sup>11</sup>s<sup>-2</sup>, panel c). In panel (a) blue colored areas indicate negative anomalies below -0.2°C, red colored areas indicate positive anomalies over +0.2°C, dashed line indicates confidence levels over 90%. In panel (b) shaded areas indicates confidence intervals at 90, 95, 97.5, 99% and over, for the negative anomalies (blue colors) and positive anomalies (red colors). In panel (c) blue shaded areas indicate negative anomalies below -2.10<sup>11</sup>s<sup>-2</sup> and red colored areas indicate positive anomalies over +2.10<sup>11</sup>s<sup>-2</sup>.

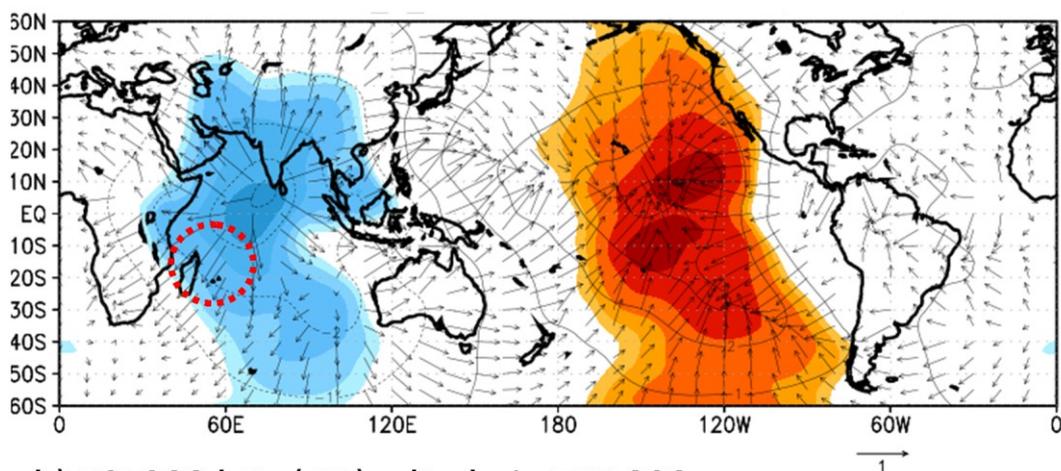


**Figure 7:** Wavelet power (a) and global wavelet power (b) for TN1090. Black dots enclose significant regions with a confidence level over 95% according to a white noise null ( $r_1=0.16$ , not significantly different from zero).

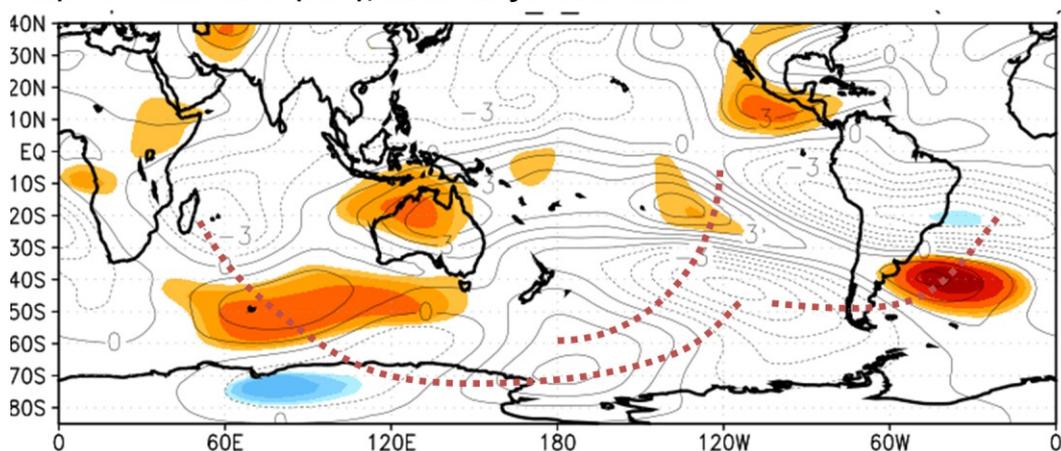
**Figura 7:** Potencia wavelet para TN1090 (a) y potencia wavelet global respectiva (b). Las líneas negras punteadas encierran regiones significativas con un nivel de confianza mayor al 95% según un proceso de "ruido blanco" ( $r_1=0.16$  no significativamente distinto de cero).

Sobre la cuenca del Índico tropical predominan anomalías positivas significativas de TSM tanto en el Índico sur tropical occidental como oriental (Fig. 6a). En esta cuenca oceánica se observan anomalías negativas significativas de OLR (Fig. 6b) en las proximidades de Madagascar, sobre el sector occidental del Índico sur tropical, y sobre la India; esta última posiblemente asociada a comportamiento anómalo del monzón indiano que está en su máxima actividad en esta época del año (JJA). La Figura 8a pone de relieve que para la fase directa (composición en valores altos) de TN1090, la actividad convectiva tropical global inducida por las anomalías de la TSM está localizada en la cuenca del Índico (Fig. 6a-b), la cual se ve favorecida por condiciones de enfriamiento en el Pacífico ecuatorial central (Shabbar y Yu 2009). La intensa anomalía de la divergencia del flujo de masa de aire en tropósfera alta (Fig. 8a) contribuye a que en los subtrópicos del Índico sur próximo a la zona de Madagascar predominen anomalías de fuente de ondas estacionarias de Rossby (FREa, Fig. 6c) que generan la propagación de un tren de ondas estacionario (Fig. 8b). Puede apreciarse que este tren de ondas sobre la región ASA genera en troposfera superior una intensificación (debilitamiento) del jet subtropical durante inviernos con alto (bajo) TN1090, es decir, durante inviernos con alta (baja) frecuencia de noches frías (cálidas). Las anomalías de fuentes de ondas de Rossby ubicada más hacia latitudes medias al oeste y sudoeste de Australia (Fig. 6c) parece tener origen en las anomalías del flujo divergente de masa de aire en tropósfera superior (Fig. 8a). El centro de anomalía de la circulación troposférica asociado al tren de ondas estacionario sobre este área induce, por tanto, la prolongación hacia mayores latitudes del área global de convección anómala tropical, como puede observarse de las anomalías negativas de OLR sobre el área oeste de Australia (ver Fig. 6b). Asimismo la fuente de onda de Rossby secundaria sobre el Pacífico al este de Nueva Zelanda podría estar vinculada a procesos asociados a perturbaciones transientes que generan fuentes de ondas estacionarias de Rossby indirectamente por la divergencia anómala de flujos de calor y de vorticidad a lo largo de los stormtracks de latitudes medias o directamente por calentamiento diabático (liberación de calor latente) asociado a convección anómala (Fig. 6c). Ambos procesos están incrementados por la propia onda estacionaria que intercepta el recorrido de las perturbaciones, reforzando y manteniendo la teleconexión (Plumb 1985). Asimismo, Orlanski y Solman (2010) han demostrado que una circulación anómala estacionaria en latitudes subpolares, generada previamente por un tren de ondas de origen tropical, puede fortalecer y/o generar propagación de ondas de Rossby por forzante térmico debido a la advección anómala inducida de calor y de humedad en niveles bajos debido al contraste térmico océano-Antártida. Este mecanismo puede dar cuenta de los altos valores de FRE observados en las vecindades de la Antártida (Fig. 6c) y la subsecuente generación/intensificación de la propagación de ondas hacia Sudamérica evidenciada por los flujos divergentes de actividad de ondas sobre el sudeste del Pacífico sur (Fig. 4).

a) CHI y Viento Divergente 200hPa (JJA), alto-bajo TN1090



b) PSI 200 hPa (JJA), alto-bajo TN1090

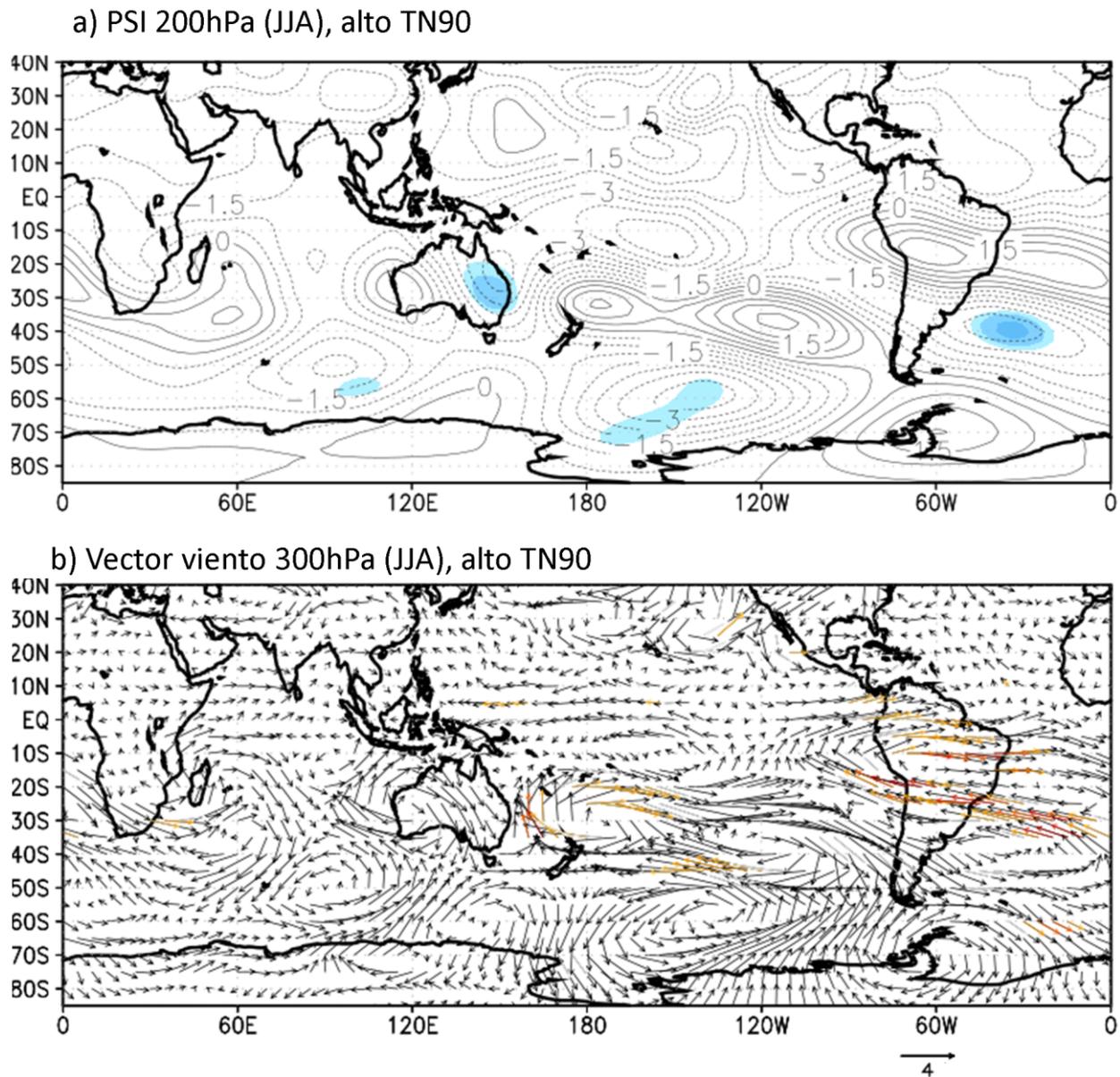


**Figura 8:** Diferencia compuesta para valores altos menos bajos de TN1090 para el potencial de velocidad (CHI,  $1.10^6 \text{ s}^{-2}$ ) y su campo derivado (vector de viento divergente,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) en 200hPa (panel a) y para la función corriente (PSI,  $\text{s}^{-2}$ ) en 200 hPa (panel b). Sombreados indican intervalos de confianza al 90, 95, 97.5 y 99% o más, para anomalías negativas (gama azul) y anomalías positivas (gama roja). Curva a trazos en rojo, trayectoria de teleconexión.

**Figure 8:** Composite difference for high minus low values of TN1090 for the potential velocity (CHI,  $1.10^6 \text{ s}^{-2}$ ) and the divergent wind ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) at 200hPa (panel a) and for streamfunction (PSI,  $\text{s}^{-2}$ ) at 200hPa (panel b). Shaded areas indicates confidence intervals at 90, 95, 97.5, 99% and over, for the negative anomalies (blue colors) and positive anomalies (red colors). Red dashed line traces the possible teleconnection trajectory.

De lo anterior se deduce que condiciones generales de enfriamiento anómalo sobre el Pacífico ecuatorial central (en parte relacionado con la fase negativa del ENOS, o posible la Niña), durante el invierno austral junto con convección tropical global localizada sobre la cuenca del Índico, provee condiciones medias de propagación de OCE desde el Índico sur tropical occidental hacia el Pacífico sur y Sudamérica generando condiciones de circulación regional sobre ASA que favorecen una mayor ocurrencia de noches frías (valores altos de TN10) y una baja frecuencia de noches cálidas (valores bajos de TN90). Este resultado es consistente con el mecanismo de propagación de ondas propuesto por Müller y Ambrizzi (2007) mediante simulaciones numéricas realizadas con un modelo baroclínico, y que puede asociarse con convección tropical activada (Müller et al. 2008). Estos trabajos demuestran que, bajo condiciones troposféricas medias de invierno asociada a alta frecuencia de heladas generalizadas en la región argentina "Pampa Húmeda" (incluida en ASA), la existencia conjunta de un forzante térmico en la región de Madagascar ( $30^{\circ}\text{S}$  y  $40^{\circ}\text{E}$ ) y de enfriamiento anómalo en el Pacífico central es generadora de ondas transientes de Rossby que propagan a lo largo de los jets polar y subtropical y alcanzan Sudamérica. De este modo, nuestros resultados reflejan sintéticamente las condiciones medias invernales de propagación de OCE de Rossby y sus forzantes que teleconectan regiones remotas del Índico y Sudamérica.

Para valores altos de TN90 (alta frecuencia de noches cálidas en ASA) el campo compuesto de las asimetrías zonales para AGP en tropósfera y los flujos asociados de actividad de onda presenta anomalías poco intensas y

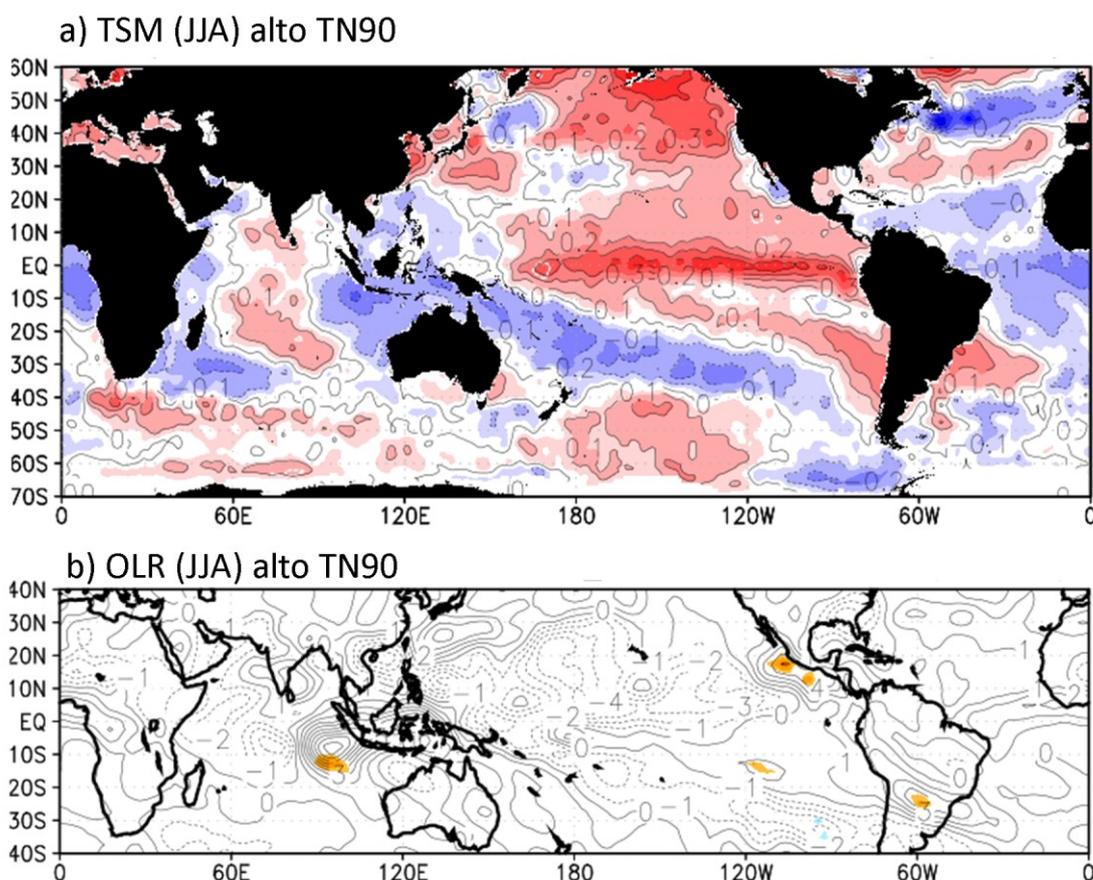


**Figura 9:** Anomalía compuesta para valores altos de TN90 para función corriente (PSI,  $s^{-2}$ ) en 200 hPa (panel a) y para el vector viento horizontal ( $V$ ,  $m \cdot s^{-1}$ ) en 300 hPa (panel b). Sombreados en color indican intervalos de confianza al 90, 95, 97.5 y 99% o más, para anomalías negativas (gama azul) y anomalías positivas (gama roja). El color de los vectores sigue la significancia de la gama roja.

**Figure 9:** Composite anomalies for high values of TN90 for 200hPa streamfunction (PSI,  $s^{-2}$ , panel a) and 300hPa horizontal vector wind ( $V$ ,  $m \cdot s^{-1}$ , panel b). Shaded areas indicates confidence intervals at 90, 95, 97.5, 99% and over, for the negative anomalies (blue colors) and positive anomalies (red colors). Vector colors follow the significance of red colors.

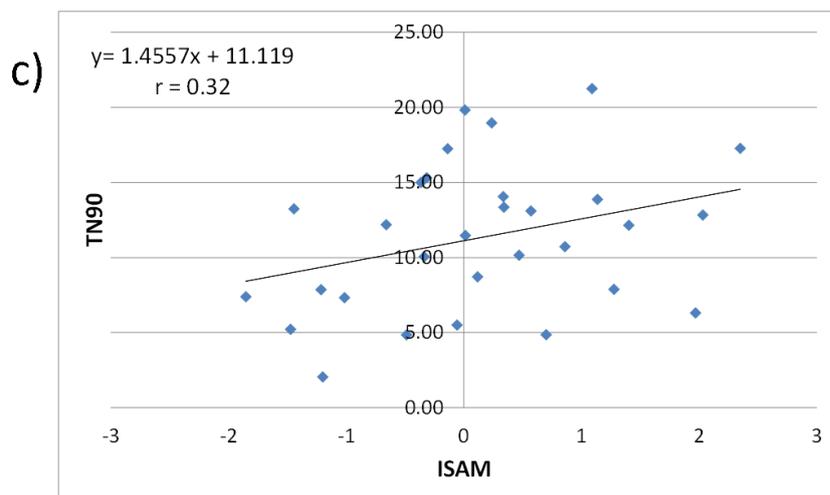
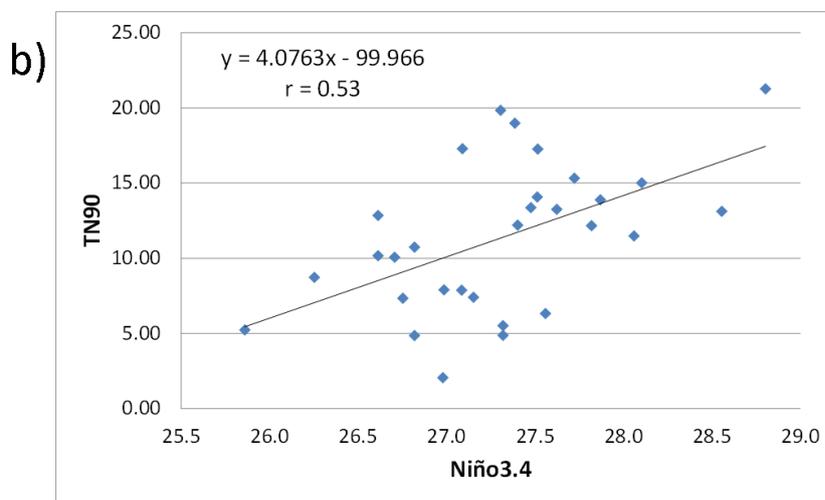
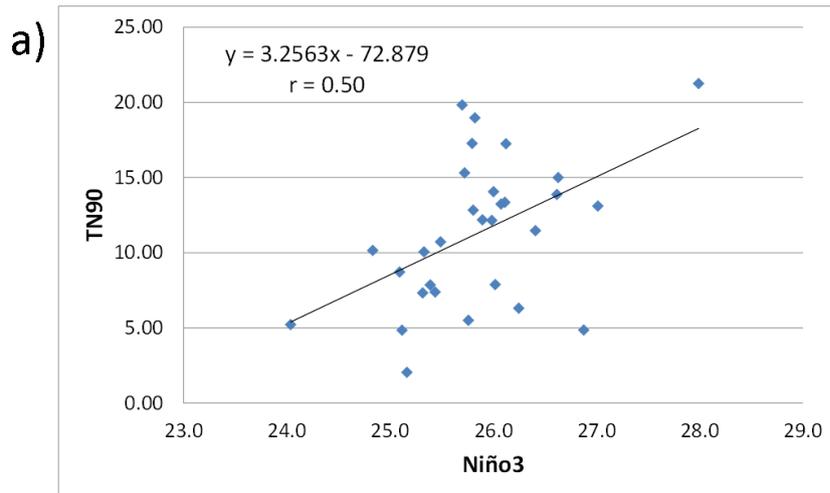
de baja significancia (figuras no mostradas), no obstante, prevalece la propagación de actividad de onda cuasi-estacionaria en latitudes medias del Índico y desde el Pacífico sur. Esta propagación de ondas estacionaria queda evidenciada a través del viento anómalo en tropósfera superior y de las anomalías de función corriente (Fig. 9), que muestran sobre ASA un significativo debilitamiento del jet subtropical. Por su parte, la convección global tropical está más localizada en la región ecuatorial central y oriental de la cuenca del Pacífico norte (Fig. 10b), en buena correlación con el gradiente meridional de las anomalías positivas de TSM sobre la región (Fig. 10a). Sobre el Índico tropical central y occidental hay anomalías de convección intensificadas que puede estar relacionado con

la propagación de ondas y con las anomalías positivas de TSM en el Índico sur central (Fig. 10). Asimismo una banda de anomalías negativas de OLR se extiende de Noroeste a sudeste desde el Continente Marítimo hacia los subtropicos del Pacífico Sur con nubosidad anómala y enfriamiento anómalo de las TSM. Como era previsible debido a que el campo compuesto de la divergencia del viento en tropósfera superior se ubica sobre el Pacífico, las anomalías de fuente de onda de Rossby son más intensas en los subtropicos de la cuenca del Pacífico sur (figuras no mostradas). De lo anterior puede decirse que un invierno con alta frecuencia de noches cálidas estaría en parte vinculado con actividad convectiva en la cuenca del Pacífico asociado a la fase positiva del ENOS (El Niño) en su estadio inicial (JJA), interactuando con condiciones de propagación desde el Índico.



**Figura 10:** Ídem Fig. 6, pero para anomalía compuesta de valores altos de TN90.  
**Figure 10:** As in Fig. 6, but for the composite anomalies for high values of TN90.

Para el caso de valores bajos de TN10, esto es, de baja frecuencia de noches frías sobre la región ASA, las anomalías compuestas de la circulación troposférica compuesta no son opuestas respecto al caso de valores altos de TN10. De esta manera para estos inviernos no aparece una estructura de propagación de ondas estacionarias de Rossby ni tampoco propagación meridional relevante hacia el polo de anomalías simétricas respecto del ecuador. Es más, las anomalías de TSM si bien reflejan la fase positiva del ENOS (El Niño), presentan poca extensión longitudinal y no llegan a ser significativa (figuras no mostradas). En cambio, las anomalías temporales de la circulación troposférica, significativas a para  $\alpha \leq 0.10$ , se encuentran en las latitudes medias y altas (Fig. 12a-b). En latitudes medias predominan anomalías positivas significativas de geopotencial zonalmente simétricas (alongadas longitudinalmente) con amplitudes máximas conforme a un número de onda  $k=3$  de estructura barotrópica equivalente, y anomalías negativas significativas de geopotencial en latitudes polares. Hacia el sudeste de Sudamérica sobre el sur del Atlántico sur prevalecen anomalías anticiclónicas significativas en toda la tropósfera que tienen influencia directa sobre la circulación de aire sobre ASA, inducen anomalías de viento con componente prevalente del este y noreste en capas bajas y debilitan significativamente el jet subtropical en tropósfera superior (Fig. 13a-b). La ausencia de propagación de actividad de OCE durante inviernos de baja frecuencia de noches frías es consistente con resultados de Müller y Ambrizzi (2007).

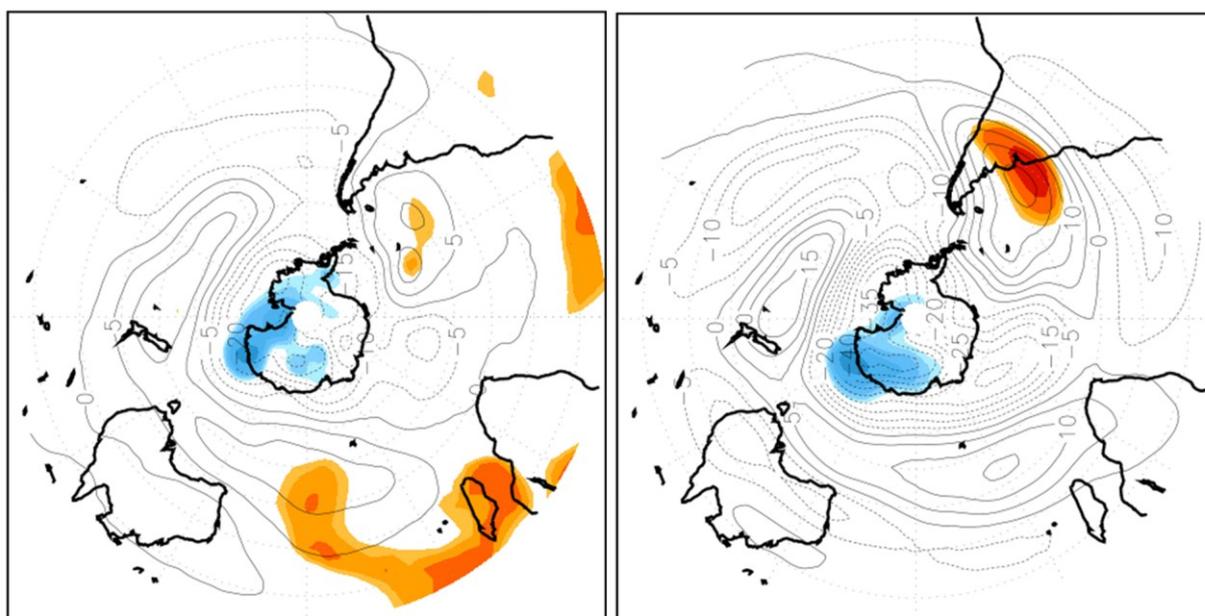


**Figura 11:** Diagramas de dispersión y correlación lineal entre los índices TN90 y Niño3 (panel a), Niño3.4 (panel b) e ISAM (panel c). Ecuación lineal respectiva (y) y valores de la correlación (r).

**Figure 11:** Dispersion diagrams and linear correlation between the indices TN90 and Nino3 (panel a), Nino3.4 (panel b) and ISAM (panel c). Linear equation (y) and correlation coefficient (r).

Los autores encuentran propagación de ondas transientes de Rossby con amplitudes poco intensas y poca extensión zonal al realizar simulaciones numéricas bajo condiciones medias troposféricas de invierno asociadas a baja frecuencia de heladas en la región "Pampa Húmeda". En general, las anomalías observadas de la circulación troposférica superior inducen el debilitamiento del jet subtropical sobre la mayor parte del Índico, el Pacífico sur occidental, el sur de Sudamérica y la cuenca del Atlántico sur. En latitudes altas y subpolares, por el contrario, los oestes aparecen mayormente intensificados (Fig. 13a). Por tanto, el campo de anomalías se asemeja bastante a la fase positiva (o directa) del modo anular de variabilidad de la circulación troposférica en el hemisferio sur (MAS, Fig. 12). En este sentido la correlación entre el índice IMAS y TN10 muestra una moderada correlación inversa de -0.57 significativa a más del 95% de confianza, que se ve especialmente favorecida por valores bajos de TN10 (Fig. 14). Se destaca además que el modo de variabilidad del sur, medido mediante el IMAS, para el invierno no presenta una tendencia significativa sobre el período 1979-2008, como sí existe en otras estaciones del año (Marshall 2007). Tampoco la correlación entre IMAS y Niño3 y Niño3.4 es significativa (valores de  $r < 0.25$ ). Por su parte el índice TN10 presenta valores de correlación negativos y significativos con Niño3 y Niño3.4, de -0.39 y -0.32, respectivamente.

a) AGP 850hPa (JJA) bajo TN10      b) AGP 300hPa (JJA) bajo TN10

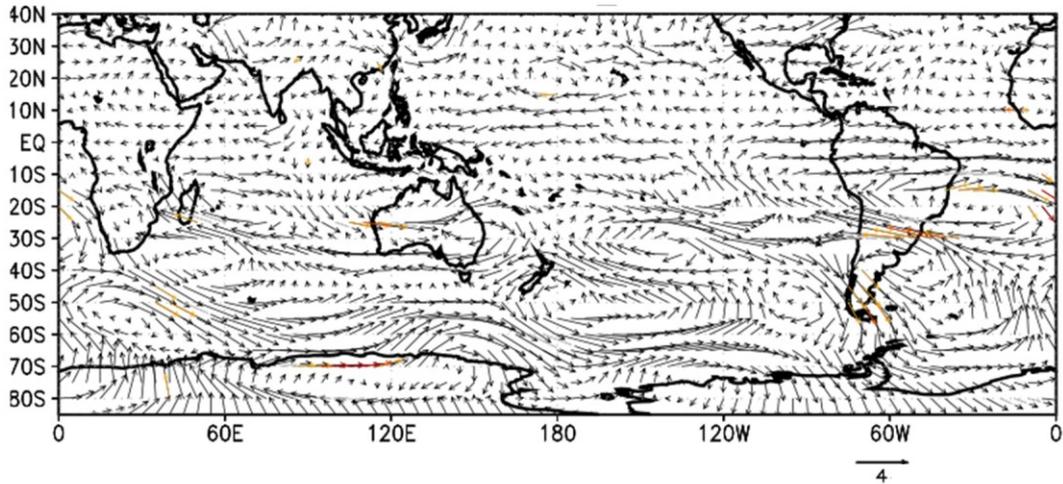


**Figura 12:** Anomalías compuestas (temporales) de Altura geopotencial (AGP) en 300 hPa (panel a) y 850hPa (panel b) para valores bajos de TN10. Sombreados en color indican intervalos de confianza al 90, 95, 97.5 y 99% o más, para anomalías negativas (gama azul) y anomalías positivas (gama roja).

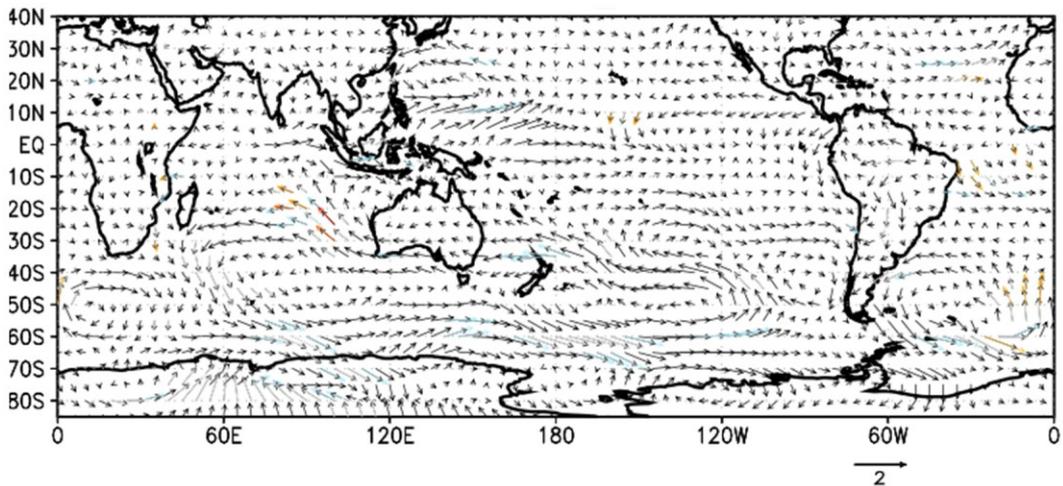
**Figure 12:** Temporal composite anomalies of geopotential height (AGP) at 300hPa (panel a) and 850hPa (panel b) for low values of TN10. Shaded areas indicates confidence intervals at 90, 95, 97.5, 99% and over, for the negative anomalies (blue colors) and positive anomalies (red colors).

Se destaca por tanto que el debilitamiento del jet subtropical sobre Sudamérica y océanos adyacentes aparece como una característica común tanto para la alta frecuencia de noches cálidas (Fig. 9b) como para la baja frecuencia de noches frías (Fig. 13a). Esto se diferencia significativamente de los inviernos con alta frecuencia de noches frías y baja frecuencia de noches calientes que muestran un jet subtropical intensificado (Fig. 8b). Lo anterior concuerda con trabajos recientes de Müller y Berri (2012) que muestran el rol preponderante del jet subtropical sobre la región sur de Sudamérica a la hora de determinar heladas generalizadas *muy persistentes* en la "Pampa Húmeda".

a) Vector viento 300hPa (JJA) bajo TN10



b) Vector Viento en 900hPa (JJA) bajo TN10

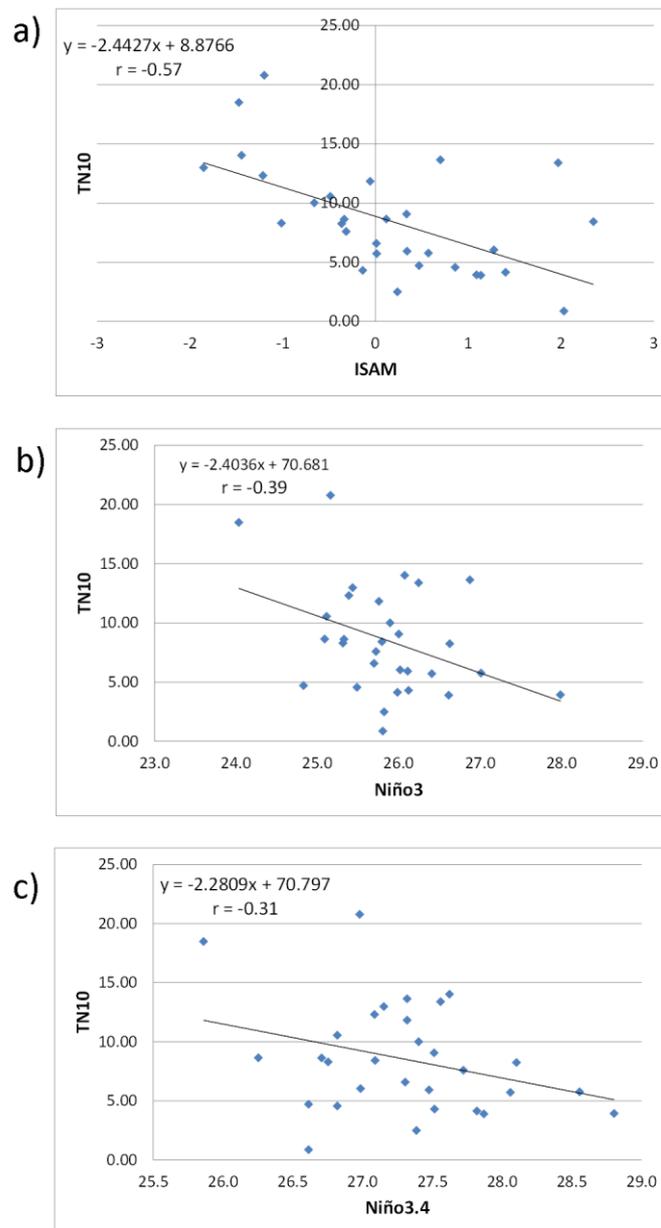


**Figure 13:** Composite anomalies of horizontal vector wind (V) at 300hPa (panel a) and 900hPa (panel b) for low values of TN90. Arrows highlighted in red are significant at over 90% of confidence.

**Figura 13:** Anomalías compuestas de vector viento horizontal (V) en 300hPa (panel a) y 900 hPa (panel b) para valores bajos de TN90. Vectores resaltados en gama de rojo significativos a más del 90% de confianza.

## CONCLUSIONES

El objetivo del presente trabajo ha sido definir las condiciones medias de la circulación troposférica asociadas a la frecuencia de ocurrencia de noches frías (TN10) y noches cálidas (TN90) durante el invierno austral (JJA) sobre la región ASA (Fig. 1 y 3), e identificar posibles forzantes remotos. Se encuentra que la frecuencia de ocurrencia de noches cálidas (Tmin superiores al percentil 90, TN90) está modulada interanualmente por la propagación de OCE de Rossby desde el Índico y el Pacífico, asociadas principalmente a anomalías de convección en la región tropical inducidas por las anomalías de TSM. Particularmente la alta frecuencia de noches cálidas (altos valores de TN90) está asociada a calentamiento anómalo del Pacífico central ecuatorial (fase positiva del ENOS). La menor frecuencia de noches cálidas, en cambio, está relacionada con convección anómala en la región del Índico. Esto se observa especialmente sobre el área del monzón indiano y sobre el sector occidental del Índico sur tropical, que favorece una teleconexión entre el Índico, el Pacífico y el sur de Sudamérica, mediante propagación de actividad de OCE de Rossby. Este mismo esquema de teleconexión es el que favorece la alta frecuencia de noches frías (Tmin inferiores al percentil 10, TN10) durante un invierno, ya que se trata de fenómenos, en parte, mutuamente excluyentes. De esta manera tanto para valores altos de TN10 (alta frecuencia de noches frías) como para bajos de TN90 (baja frecuencia de noches cálidas) regionalmente se establece una



**Figura 14:** Ídem Fig.11, pero para la correlación lineal entre índices TN10 y ISAM (panel a), Niño3 (panel b) y Niño3.4 (panel c).  
**Figure 14:** As in Fig. 11, but for the linear correlation between the indices TN10 and ISAM (panel a), Niño3 (panel b) and Niño3.4 (panel c).

circulación anómala con componente del sur en capas bajas y la ocurrencia de temperaturas bajas sobre ASA (Fig. 5). Para valores bajos de TN10, es decir, para la fase de baja frecuencia de noches frías, uno podría esperar una vinculación con el ENOS similar a la encontrada con altos valores de TN90 (alta frecuencia de noches cálidas), sin embargo, esta fase no está tan vinculada a teleconexiones de origen tropical. Así, los valores bajos de TN10 están vinculados a variabilidad de baja frecuencia del modo de variabilidad de altas latitudes del hemisferio sur (el MAS) que induce sobre la región anomalías anticiclónicas que bloquean el flujo de los oestes, predominando la componente este-noreste del viento sobre ASA.

El comportamiento del jet subtropical sobre ASA es diferencial respecto a la frecuencia de noches frías y cálidas. Así, el fortalecimiento (debilitamiento) del jet subtropical sobre Sudamérica y océanos adyacentes caracteriza los inviernos con alta (baja) frecuencia de noches frías (cálidas) en ASA.

Estos resultados son alentadores para investigar en trabajos futuros la posibilidad del pronóstico regional para invierno de la ocurrencia de noches frías o noches cálidas sobre ASA ya que los forzantes remotos encontrados involucran procesos atmosféricos/oceánicos que se interconectan inter-estacionalmente.

**Agradecimientos:** Los autores sinceramente agradecen a la UCA por las prestaciones brindadas, a los proyectos del CONICET PIP 112-2009-0100439, 4-201001-00250 y 0227 (2011-2013); de la ANCyT PICT 2007-00438 y 2007-01888 (ICES/IDAC) y UBA 20020100200165 y 20020100100789. Gratitud expresa a la Orden del Carmen por toda la ayuda brindada.

## REFERENCIAS

- Agosta, E. A. and R.H. Compagnucci 2008: The 1976/77 Austral Summer Climate shift Effects on the Atmospheric Circulation and Climate in southern South America. *Jou. of Clim.* 21, 4365-4383 DOI: 10.1175/2008JCLI2137.1.
- Agosta, Eduardo A., Rosa H. Compagnucci, 2012: Central-West Argentina Summer Precipitation Variability and Atmospheric Teleconnections. *J. Climate*, 25, 1657–1677.
- Alexander, L., Zhang, X., Peterson, T.C., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A., Haylock, M., Collins, D., Trewin, B., Rahimzadeh, F., Tagipour, A., Ambenje, P., Rupa Kumar, K., Revadekar, J., Griffiths, G., Vincent, L., StephENOSn, D., Burn, J., Aguilar, E., Brunet, M., Taylor, M., New, M., Zhai, P., Rusticucci, M., Vazquez-Aguirre, J.L., 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J. Geophys. Res.* 111, D05109.
- Barreiro, M. 2010: Influence of ENOS and the South Atlantic Ocean on climate predictability over Southeastern South America. *Clim. Dyn.*, 35, 1493–1508. DOI 10.1007/s00382-009-0666-9
- Barros, V, a. Grimm y M. Doyle, 2002: Relationship between Temperature and Circulation in Southeastern South America and its Influence from El Niño and La Niña Events. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 80, No. 1, pp. 21–32, 2002.
- Barros, V., M. E. Doyle, and I.A. Camillioni 2008: Precipitation trends in southeastern South America: relationship with ENOS phases and with low-level circulation. *Theo. and Appl. Clim.*, 1:2, 19-33, DOI: 10.1007/s00704-007-0329-x.
- Barros, V.R., M. Castañeda y M. Doyle 1996: Recent precipitation trends in Southern South America to the east of the Andes: an indication of a mode of climatic variability. En: "Greenhouse gas emission under Developing Countries Point of View", L.P. Rosa y M.A. Santos eds., COPPE, Río de Janeiro, Brasil, 41-67.
- Barrucand, M., Rusticucci, M., Vargas, W., 2008. Temperature extremes in the south of South America in relation to Atlantic Ocean surface temperature and Southern Hemisphere circulation. *J. Geophys. Res.* 113, D20111.
- Bjerknes, J. 1966: A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature. *Tellus*, 18, 820-829.
- Bjerknes, J. 1969: Atmospheric teleconnection from the equatorial Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, 97, 163-172.
- Cerne, S.B., Vera, C.S., 2010. Influence of the intraseasonal variability on heat waves in subtropical South America. *Clim. Dyn.* 1–13.
- Chan, S. C., S.K. Behera and T. Yamagata 2008: Indian Ocean Dipole on South American rainfall. *Geo. Res. Let.*, 35, L14S12, doi:10.1029/2008GL034204.
- decadal climate oscillation with impacts on salmon. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78:1069–1079.
- Costa, A.J y Agosta, E.A., 2012: South Pacific quasi-stationary waves and anomalously cold summers in the northernmost Antarctic Peninsula. *Geoacta*, 37, 73-82.
- Drumond A.R. de M. y Ambrizzi. T., 2008: The role of the South Indian and Pacific oceans in South American monsoon variability. *Theoretical and Applied Climatology*, 94, 125-137.
- Ebbesmeyer C.C., Cayan D.R., McLain D.R., Nichols F.H., Peterson D.H. and Redmond T. 1991: 1976 Step in the Pacific Climate: Forty environmental changes between 1968-1975 and 1977-1984. *Proceeding of the 7th Annual Pacific Climate PACLIM, Workshop, April 1990*, Eds. Betancourt, J.L. y V.L. Tharp, Californian Dep. of Water Resources, Interagency Ecological Studies Program, Tech. Rep. 26, 115-126.
- Escobar, G., Compagnucci, R., Bischoff, S., 2004. Sequence patterns of 1000 hPa and 500 hPa geopotential height fields associated with cold surges over Central Argentina. *Atmosfera* 17 (2), 69–89 1 April 2004. extremes over Argentina. *J. Clim.* 17, 4099–4107.
- Frich, P., Alexander, L.V., Della-Marta, P., Gleason, B., Haylock, M., Klein Tank, A.M.G., Peterson, T., 2002. Observed coherent change in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Clim. Res.* 19, 193–212.
- Garreaud, R. D., and D. S. Battisti, 1999: Interannual ENOS and interdecadal ENOS-like variability in the Southern Hemisphere. *J. Climate*, 12, 2113–2123.

- Garreaud, R., 1999. Cold air incursions over subtropical South America: a numerical case study. *Mon. Wea. Rev.* 127, 2823–2853.
- Gill, A.E. 1980: Some simple solutions for heat-induced tropical circulation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 106, 447-462.
- Karoly, D.J. R.A. Plumb and M. Ting 1989: Examples of horizontal propagation of quasi-stationary waves, *J. Atmos. Sci.*, 46, 2802-2811.
- Lau, N-C, and M.J. Nath 1996: The role of the “atmospheric bridge” in linking tropical Pacific ENOS events to extratropical SST anomalies. *Jou. of Clim.* 9, 2036-2057.
- Mantua, N. J., S. R. Hare, Y. Zhang, J. M. Wallace, and R. C. Francis. 1997. A Pacific decadal climate oscillation with impacts on salmon. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78:1069–1079.
- Marshall, G. J., 2003: Trends in the southern annular mode from observations and reanalyses. *J. Climate*, 16, 4134–4143
- Marshall, G.J. 2007: Half-century seasonal relationships between the Southern Annular Mode and Antarctic temperatures. *Int. J. of Clim.* 27, 373-383.
- Misra Vasubandhu 2004: The teleconnection between the Western Indian and the Western Pacific Oceans. *Monthly Weather Review*, 132,445-455.
- Moser, B.K., G.R. Stevens 1992: Homogeneity of variance in the two-sample means test, *Am. Stat.*, 46, 19-21.
- Müller, 2007. Patterns leading to extreme events in Argentina: partial and generalized frosts. *Int. J. Climatol.* 27 (10), 1373–1387.
- Müller, G., Nuñez, M., Seluchi, M., 2000. Relationship between ENOS cycles and frost events within the Pampa Húmeda region. *Int. J. Climatol.* 20, 19–1637.
- Müller, Gabriela V; Ambrizzi, Tércio. 2007. Teleconnection Patterns and Rossby Wave Propagation Associated to generalized Frosts over Southern South America. *ClimateDynamics*, 29, 633-645. Doi 10.1007/S00382-007-0253-X.
- Müller, Gabriela V; Ambrizzi, Tércio; Ferraz, Simne E. 2008. The Role of the Observed Tropical Convection in the Generation of Frost Events in the Southern Cone of South America. *Annales Geophysicae*, 26, 1379-1390.
- Müller, G.V., 2010. Temperature decrease in the extratropics of South America in response to a tropical forcing during the austral winter. *Ann. Geophys.* 28 (1), 1–9.
- Müller, G.V., Berri, G.J., 2007. Atmospheric circulation associated with persistent generalized frosts in Central-Southern South America. *Mon. Wea. Rev.* 135 (4), 1268–1289.
- Müller and Berri 2012, Atmospheric Circulation Associated with Extreme Generalized Frosts Persistence in Central-Southern South America. *Climate Dynamic.*, 38 (5-6), 837-857. DOI: 10.1007/s00382-011-1113-2.
- NCEP-DEO AMIP-II Reanalysis (R-2): M. Kanamitsu, W. Ebisuzaki, J. Woollen, S-K Yang, J.J. Hnilo, M. Fiorino, and G. L. Potter. 1631-1643, Nov 2002, *Bulletin of the American Meteorological Society*.
- Pezza, A.B., Ambrizzi, T., 2005. Dynamical conditions and synoptic tracks associated with different types of cold surge over tropical South America. *Int. J. Climatol.* 25 (2), 215–241.
- Plumb, R. Alan, 1985: On the Three-Dimensional Propagation of Stationary Waves. *J. Atmos. Sci.*, 42, 217–229.
- Rasmusson, E. M., and Carpenter, T.H. 1982: Variations in tropical sea surface temperature and surface winds fields associated with the Southern Oscillation-El Niño. *Mon. Wea. Rev.*, 110, 354-384.
- Rasmusson, E. M., and K. C. Mo, 1993: Linkages between 200 mb tropical and extratropical circulation anomalies during the 1986–1989 ENOS cycle. *J. Climate*, 6, 595–616.
- Renom, M., Rusticucci, M. and Barreiro, M. 2011: Multidecadal changes in the relationship between extreme temperature events in Uruguay and the general atmospheric circulation. *Clim. Dyn.*, DOI 10.1007/s00382-010-0986-9.
- Robertson, A. W., C. R. Mechoso, 1998: Interannual and decadal cycles in river flows of southeastern South America. *J. Climate*, 11, 2570–2581.
- Rusticucci, 2012: Observed and simulated variability of extreme temperature events over South America. *Atmospheric Research* 106 (2012) 1–17
- Rusticucci, M., Barrucand, M., 2004. Observed trends and changes in temperature
- Rusticucci, M., Vargas, W., 1995. Synoptic situations related to spells of extreme temperatures over Argentina. *Meteorol. Appl.* 2, 291–300 Part 4.
- Rusticucci, M., Vargas, W., 2001. Interannual variability of temperature spells over Argentina. *Atmósfera* 14, 75–86 Numero 2.
- Rusticucci, M.M. and Penalba, O.C. 2000: Interdecadal changes in precipitation seasonal cycle over South America. Relationship with surface temperature. *Climate Research*, 16, N 1, 1-15
- Rusticucci, M.S., Venegas, A., Vargas, W.M., 2003. Warm and cold events in Argentina and their relationship with South Atlantic and South Pacific sea surface temperature. *J. Geophys. Res.* 108, 3356.
- Seager R., Harnik N., Robinson W.A., Kushnir Y., Ting M., Huang H.P., Velez J. 2005: Mechanisms of ENOS-forcing of hemispherically symmetric precipitation variability. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 131(608): 1501-1527.

Shabbar and Yu 2009: The 1998–2000 La Niña in the context of historically strong La Niña events. *Jou. of Geoph. Res.*, 114, D13105, 15pp. doi:10.1029/2008JD011185

Solomon, S., D. Qin, M. Manning, R.B. Alley, T. Berntsen, N.L. Bindoff, Z. Chen, A. Chidthaisong, J.M. Gregory, G.C. Hegerl, M. Heimann, B. Hewitson, B.J. Hoskins, F. Joos, J. Jouzel, V. Kattsov, U. Lohmann, T. Matsuno, M. Molina, N. Nicholls, J. Overpeck, G. Raga, V. Ramaswamy, J. Ren, M. Rusticucci, R. Somerville, T.F. Stocker, P. Whetton, R.A. Wood and D. Wratt, 2007: Technical Summary. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Taschetto, A.S. y Tercio Ambrizzi 2011: Can Indian Ocean SST anomalies influence South American rainfall? *Clim. Dyn.* DOI: 10.1007/s00382-011-1165-3.

Torrence, Ch. And G.P Compo 1998: A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Am. Met. Soc.*, 79, 1, 61-78.

Vera, C.S., Vigliarolo, P.K., 2000. A diagnostic study of cold-air outbreaks over South America. *Mon. Wea. Rev.* 128 (1), 3–24.

Vincent, L.A, T. C. Peterson, V. R. Barros, M.B Marino, M. Rusticucci, G. Carrasco, E. Ramirez, L.M Alves, T. Ambrizzi, M.A Berlato, A.M Grimm, J.A. Marengo, L. Molion, D.F. Moncunill, E. Rebello, Y. Anunciação, J. Quintana, J.L. Santos, J. Baez, G. Coronel, J. Garcia, I. Trebejo, M. Bidegain, M.R. Haylock, D. Karoly, 2005, Observed trends in indices of daily temperature extremes in South America 1960-2000. *Journal of Climate*. Vol.18, 23, 5011-5023.

Recibido: 30-7-12

Aceptado: 9-10-12