

CO-VARIABILIDAD DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR ENTRE CUENCAS DEL HEMISFERIO SUR

*Ana Laura Berman*¹, *Rosa Compagnucci*¹, *Gabriel Silvestri*²

¹ Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos/Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (DCAO/FCEN) - Universidad de Buenos Aires (UBA) -(CONICET). Int. Guiraldes 2160, Ciudad Universitaria, C1428EGA, Buenos Aires, Argentina. E-mails: alberman@at.fcen.uba.ar ;

² Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA)/CONICET-UBA. Int. Guiraldes 2160, Ciudad Universitaria, C1428EGA, Buenos Aires, Argentina. E-mail: gabriels@cima.fcen.uba.ar

RESUMEN

En este trabajo se estudian relaciones estadísticas entre diferentes regiones de los océanos del Hemisferio Sur en todo el espacio tiempo-frecuencia durante los últimos cincuenta años aplicando la metodología de transformada ondeletas de coherencia a promedios anuales de anomalías mensuales de temperatura superficial del mar.

Entre los resultados más relevantes encontrados debe mencionarse que las regiones del oeste y centro del Pacífico tropical tienen una estrecha relación en oscilaciones menores a 8 años y en oscilaciones alrededor de 12 años pero notables desacoples son detectados en el resto del espacio de frecuencias. Por otra parte, la relación entre las regiones del oeste y del este del Pacífico tropical es significativa sólo en oscilaciones menores a 8 años con una clara interrupción durante la década de 1980. Importantes conexiones en oscilaciones interdecadales son detectadas entre las regiones del oeste y centro del Pacífico subtropical. En el Océano Atlántico se encuentran relaciones significativas en un amplio rango de frecuencias entre las regiones del oeste y, especialmente, entre las regiones tropicales mientras que en el Océano Índico solo se observan relaciones importantes entre áreas subtropicales en oscilaciones decadales e interdecadales. El análisis también revela fuertes conexiones entre las tres cuencas oceánicas en diferentes bandas de frecuencia.

Palabras clave: temperatura superficial del mar, análisis de ondeletas de coherencia, teleconexiones en el Hemisferio Sur, variabilidad climática.

ABSTRACT

Relations among different regions of the Southern Hemisphere oceans in the whole time-frequency space during the last fifty years are studied applying the methodology of Wavelet Coherence Analysis to annual means of monthly anomalies of sea surface temperature.

Among the most relevant results, it must be mentioned that the western and central regions of the tropical Pacific have a close relation in oscillations shorter than 8 years and in oscillations around 12 years but important disconnections are detected in the rest of the space of frequencies. Moreover, the relation among the western and eastern regions of the tropical Pacific is significant only in oscillations shorter than 8 years with a clear interruption during the 1980s. Important connections in interdecadal oscillations are detected among the western and central regions of the subtropical Pacific. Significant relations in a wide range of frequencies among the western and, specially, among the tropical regions of the Atlantic Ocean are found. In the Indian Ocean, the relations among subtropical areas in decadal and interdecadal scales are the only ones important. The analysis also reveals strong connections among the three oceanic basins in different bands of frequencies.

Keywords: sea surface temperature, Wavelet Coherence analysis, Southern Hemisphere teleconnections, climatic variability

INTRODUCCIÓN

Las interacciones entre la atmósfera y el océano contribuyen a las fluctuaciones climáticas en un amplio rango de escalas de tiempo. Es así que resulta importante conocer las relaciones entre diferentes regiones oceánicas en todo el espectro de frecuencias dado que los patrones de variabilidad de la temperatura superficial del mar (TSM) en diferentes escalas de tiempo resulta de una combinación de procesos atmosféricos y oceánicos (Liu y Alexander, 2007; Deser et al., 2010; entre otros).

Estudios previos describieron oscilaciones bipolares en la TSM del Océano Atlántico Sur (Venegas et al., 1997) y del Océano Indico (Behera y Yamagata, 2001) mientras que relaciones significativas entre la variabilidad interanual de la TSM de los océanos Atlántico Sur, Indico y Pacífico Sur fueron mostradas por Fauchereaud et al. (2003). A su vez, Liu et al. (2010) identificaron relaciones significativas entre la región subtropical del mar de la China, el Océano Indico y las regiones del Océano Pacífico cercanas a Filipinas y al este de Australia. Estos y otros trabajos analizaron las posibles inter-correlaciones de la variabilidad de la TSM en distintas regiones oceánicas utilizando cross-correlación de diferentes índices de TSM (Wang et al., 2009) y descomposición en valores singulares (Wang, 2010). Algunos autores aplicaron transformada de ondeletas (en inglés, Wavelets Transform, WT) para analizar las frecuencias de variación de la TSM del Pacífico tropical y de áreas al sur de China (Tian et al., 2000) y la transformada de ondeletas de coherencia (en inglés, Wavelets Transform Coherency, WTC) para estudiar las co-variabilidades entre el Pacífico tropical y el Atlántico Norte en todo el espectro de frecuencia (Müller et al., 2008). No obstante, aún faltan estudios integradores que abarque el análisis de la co-variabilidad de la TSM desde la alta a la baja frecuencia de subregiones de las cuencas oceánicas del Hemisferio Sur (HS) relacionadas con la variabilidad climática en Sudamérica como se describirá en la siguiente sección. Consecuentemente, el objetivo de este trabajo es investigar las relaciones entre diferentes regiones tropicales y subtropicales de los océanos del HS en el espacio tiempo-frecuencia utilizando el análisis WTC que es la metodología más indicada para determinar las frecuencias en las que la co-variabilidad entre dos series de tiempo es significativa y obtener información respecto a la fase y persistencia temporal de dicha relación (Torrence y Compo, 1998; Torrence y Webster, 1999; Grinsted et al., 2004).

El trabajo está organizado de la siguiente manera. Los datos y metodología se describen en la sección 2, las relaciones entre diferentes áreas oceánicas se presentan en la sección 3 y las conclusiones se sintetizan en la sección 4.

METODOLOGÍA

Las anomalías mensuales de TSM fueron extraídas del conjunto de datos del Hadley Centre (HadSST2, Rayner et al., 2006) siendo anomalías con respecto a los valores medios en el período 1961-1990. Si bien las condiciones en los océanos varían de una estación del año a otra, en este análisis se consideraron los valores promedios anuales a fin de focalizar la co-varianza en las escala interanual a interdecadal para facilitar la relación posterior entre los resultados encontrados aquí y la variabilidad climática registrada mediante proxy datos que, en general, son de resolución anual. Debido a la discontinuidad en la TSM a fines de la década de 1940 mostrada por Thompson et al. (2008), el análisis fue limitado al periodo 1950-2007.

El área de estudio fue restringida a los océanos tropicales y subtropicales entre 10°N y 40°S. Se definieron dieciséis regiones distribuidas en el oeste, centro y este de cada océano (Figura 1). En el Pacífico tropical se consideraron las típicas regiones El Niño 4 (EN4), El

Niño 3.4 (EN34), El Niño 3 (EN3) y El Niño 1+2 (EN12). Las regiones subtropicales del Pacífico oeste (PSO) y central (PSC) fueron delimitadas considerando los trabajos de Petterson y White (1998) y Barros y Silvestri (2002), respectivamente, que muestran influencia de estas regiones oceánicas en la variabilidad climática del sur de Sudamérica. Una región adicional en el Pacífico subtropical este (PSE) fue agregada al análisis.

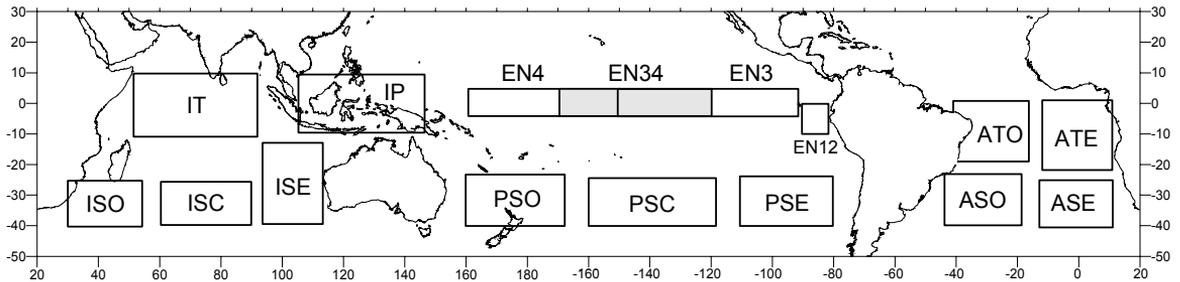


Figura 1: Regiones de TSM consideradas en el análisis. IT, Indico Tropical; ISO, Indico Subtropical Oeste; ISC, Indico Subtropical Central; ISE, Indico Subtropical Este; IP, Indico-Pacífico; EN4, El Niño 4; EN34, El Niño 3.4 (área sombreada); EN3, El Niño 3; EN12, El Niño 1+2; PSO, Pacífico Subtropical Oeste; PSC, Pacífico Subtropical Central; PSE, Pacífico Subtropical Este; ATO, Atlántico Tropical Oeste; ATE, Atlántico Tropical Este; ASO, Atlántico Subtropical Oeste; ASE, Atlántico Subtropical Este. Ver el texto principal para más detalles.

Considerando los trabajos de Barros y Silvestri (2002), Gonzalez y Vera (2010) y Gonzalez et al. (2010) que muestran la influencia de áreas del Océano Índico en la precipitación sobre el sudeste de Sudamérica, se definieron las regiones en el Índico tropical (IT) y subtropical oeste (ISO), central (ISC) y este (ISE). También se consideró la región oceánica al norte de Australia (región Indico-Pacífico, IP). Los resultados de Robertson y Mechoso (1998) que relacionan la variabilidad de la TSM del Atlántico Sur con los caudales de los ríos del sudeste de Sudamérica y el trabajo de Colberg y Reason (2007) sobre la variabilidad de la TSM del Atlántico Sur fueron usados para dividir este océano en las regiones tropicales y subtropicales oeste (ATO y ASO) y este (ATE y ASE).

Como se comentó en la sección anterior, la metodología utilizada en este trabajo es el análisis WTC. Esta herramienta matemática permite describir la relación entre dos series de tiempo, X e Y, para todo el espacio de tiempo-frecuencia distinguiendo no solo la relación de fase entre ellas sino también la evolución temporal de la co-variación. Los resultados que se obtienen con el WTC son, por su definición, índices contenidos entre 0 y 1. Alta co-variabilidad entre las series implica valores de WTC cercanos o iguales a 1 mientras que si las series no presentan ningún tipo de sincronización el WTC es cercano a 0. La relación de fase entre las series es expresada por los vectores que se mostrarán en las figuras correspondientes. Las relaciones en fase (anti-fase) serán indicadas por vectores horizontales hacia la derecha (izquierda) mientras que las relaciones con defasajes serán indicadas con vectores no horizontales tal que inclinados hacia abajo indican que la señal de la serie X está adelantada respecto a la Y (si el vector es perpendicular hacia abajo el ángulo de adelanto de X es de 90°) y si están inclinadas hacia arriba es Y la que está adelantada respecto a X (si el vector es vertical hacia arriba el ángulo de retraso de X es de 90°). En el encabezado de las

figuras del análisis WTC se indicará el par ordenado X-Y. El nivel de significancia del WTC es estimado usando un test Monte Carlo con ruido rojo determinando la significancia estadística al 95% (Torrence y Webster, 1999). En las figuras también se indicará el cono de influencia (COI) que es la región en el espacio tiempo-frecuencia en donde la metodología podría alterar las oscilaciones reales de las series analizadas distorsionando las relaciones entre ellas (Torrence y Compo, 1998). Mayor información sobre los conceptos matemáticos involucrados en el análisis WTC y una detallada guía para entender e interpretar los resultados puede encontrarse en Grinsted et al. (2004) y Velasco y Mendoza (2008), entre otros. El software utilizado está disponible en <http://www.pol.ac.uk/home/research/waveletcoherence>.

RESULTADOS

Con la metodología de análisis WTC se investigaron no solo las relaciones estadísticas dentro de cada cuenca oceánica sino también las relaciones entre cuencas. En el caso particular de las subregiones definidas en el Océano Índico, sólo se observan relaciones importantes entre las áreas subtropicales ISC e ISO en oscilaciones mayores a 8 años mientras que las relaciones entre las otras áreas de este océano son significativas durante unos pocos años específicos en oscilaciones menores a 8 años (figuras no mostradas). Los resultados para las regiones de los océanos Pacífico y Atlántico así como las relaciones entre las tres cuencas oceánicas son descriptas a continuación.

Relaciones en el Océano Pacífico

Estudios previos focalizados en la variabilidad de la TSM del Océano Pacífico tropical demostraron que la variabilidad interanual es dominada por los eventos El Niño-Southern Oscillation (ENSO) (Wallace et al., 1998) pero también son importantes las fluctuaciones en escala casi-anual (Jin et al. 2003), bianual (Ropelewski et al., 1992) y decadal (Trenberth y Hurrell, 1994; Gu y Philander, 1997). Por otra parte, el análisis realizado por Torrence y Webster (1999) concluye que la variabilidad en la típica banda ENSO de 2–8 años fue especialmente importante en los períodos 1875-1920 y 1960–90 pero más débil en 1920-1960.

Los resultados del análisis WTC muestran que la relación entre la TSM de las regiones EN4 y EN34 resulta significativa en todo el espectro de frecuencias excepto en oscilaciones alrededor de 8 años durante fines de la década 1970 y comienzos de 1980 (Figura 2a). A su vez, las regiones EN4 y EN3 muestran relaciones significativas en periodicidades menores a 6 años y en una banda alrededor de 12 años habiendo un claro y pronunciado desacople en oscilaciones de 6-10 años en las décadas 1960-1990 y en oscilaciones mayores a 15 años en todo el período de estudio (Figura 2b). Las regiones EN4 y EN12 presentan co-variabilidad significativa sólo en oscilaciones menores a 8 años durante las décadas 1950-1960 y en oscilaciones menores a 6 años después de 1980 habiendo un importante defasaje entre estas series indicado por la orientación no-horizontal de los vectores de fase (Figura 2c). Si bien las regiones EN34 y EN3 están significativamente relacionadas en casi todo el espacio de variabilidad, se detecta una clara desconexión en oscilaciones alrededor de 8 años en las décadas 1970-1990 (Figura 2d). Las regiones EN34 y EN12 tienen estrecha relación en oscilaciones menores a 8 años excepto durante la década 1980 en oscilaciones menores a 2 años (Figura 2e). Un patrón muy similar es observado en las relaciones entre EN3 y EN12 (Figura 2f).

En el Océano Pacífico subtropical, las regiones PSO y PSC tienen relaciones significativas en una amplia porción del espacio de frecuencias, particularmente en oscilaciones de 6-8 años en las décadas 1950-1980 y en oscilaciones mayores a 12 años durante todos los años analizados (Figura 2g). Por el contrario, no se detectan relaciones importantes entre las regiones PSO y PSE ni entre PSC y PSE (figuras 2h-i)

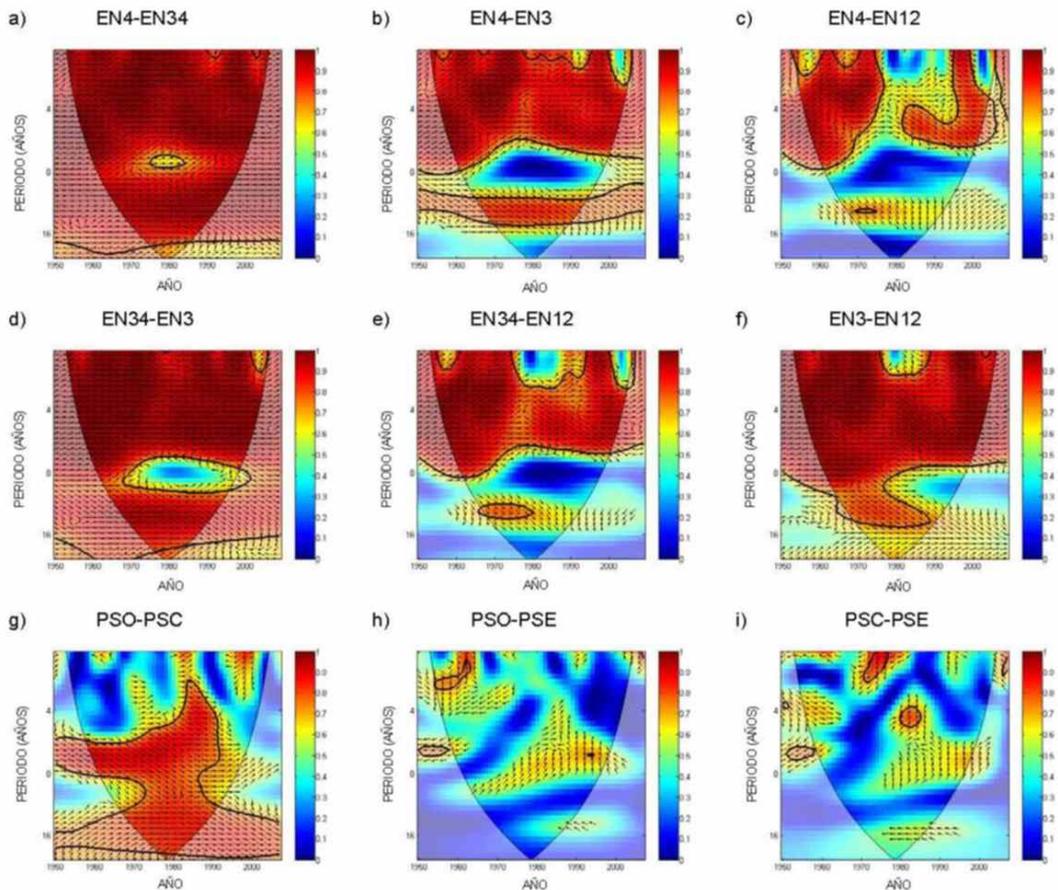


Figura 2: WTC entre las series de TSM del Océano Pacífico tropical (arriba y centro) y subtropical (abajo). Los vectores indican la relación de fase entre las series. Las curvas negras gruesas delimitan regiones significativas al 95% definidas según un test Monte Carlo con ruido rojo. El cono de influencia (COI) donde la metodología puede distorsionar las relaciones se muestra en tonos más claros por debajo de las curvas negras delgadas. Ver el texto principal para más detalles.

La existencia de relaciones entre las anomalías de TSM de las regiones tropicales y subtropicales del Océano Pacífico fue propuesta por diversos autores que analizaron posibles mecanismos físicos intervinientes en dichas teleconexiones. En particular, Lau y Nath (1994) describieron un “puente atmosférico” por el cual las anomalías de TSM del Pacífico tropical podrían afectar la variabilidad de los océanos globales a través de intercambios de energía mientras que Gu y Philander (1997) mostraron que la interacción entre las regiones

tropicales y subtropicales del Pacífico podría producir una fluctuación climática interdecadal permanente en el tiempo. El análisis WTC muestra algunos vínculos significativos entre regiones tropicales y subtropicales del Pacífico pero las características resultan muy complejas. En efecto, las relaciones más significativas de la TSM en EN4 se tienen con la región PSO en oscilaciones menores a 6 años durante las décadas 1970-1980 siendo relaciones desfasadas en tiempo tal como lo indica la orientación no horizontal de los vectores de fase (Figura 3a).

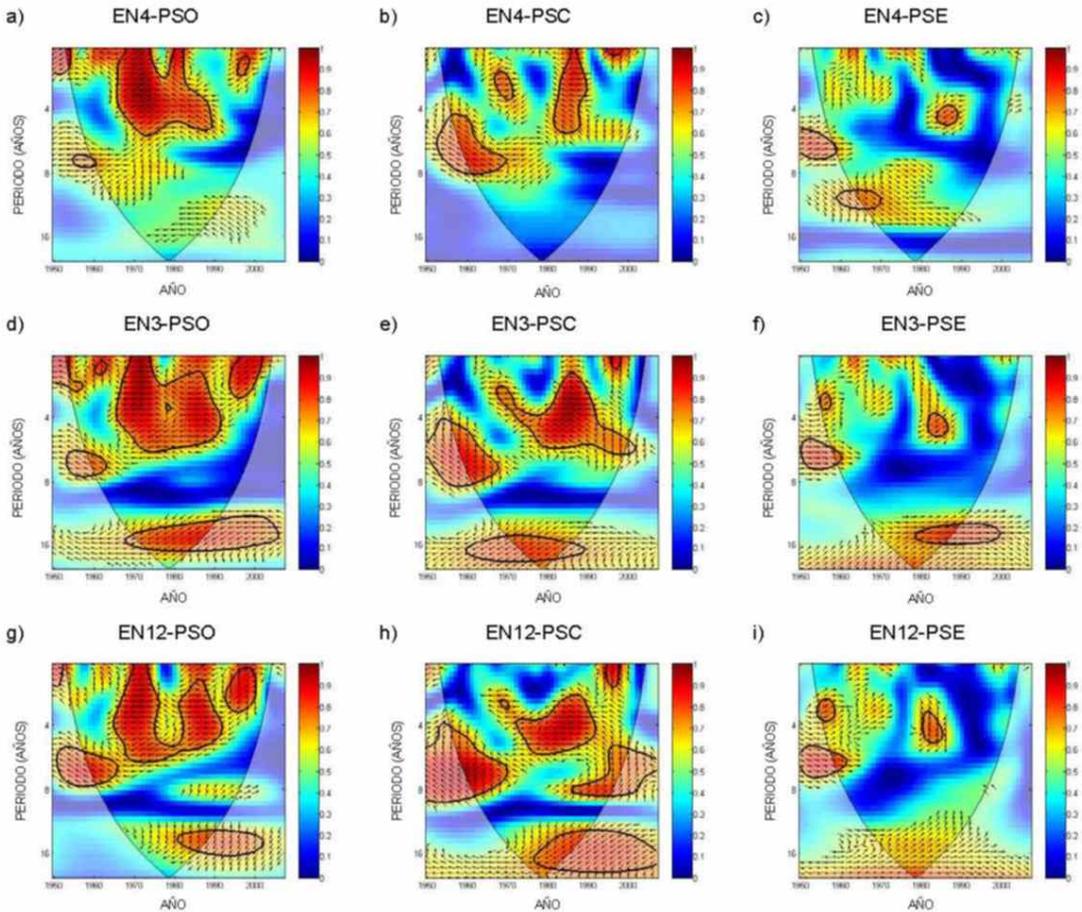


Figura 3: Como Figura 2 pero entre las series de TSM del Océano Pacífico tropical y subtropical.

Por el contrario, las conexiones significativas de EN4 con las regiones PSC y PSE son de carácter esporádico ocurriendo durante unos pocos años específicos (figuras 3b-c). Similares características se observan en EN34 (figuras no mostradas) debido a la estrecha relación entre EN4 y EN34 en todas las bandas de variabilidad mostrada previamente. La región EN3 tiene relaciones significativas con el área PSO en oscilaciones menores a 6 años durante las

décadas 1970-1980 y en oscilaciones alrededor de 16 años durante las décadas 1970-1990 (Figura 3d). Las relaciones significativas de EN3 con el Pacífico subtropical se debilitan hacia la región PSC (Figura 3e) y prácticamente desaparecen en el área PSE (Figura 3f).

La región EN12 tiene relaciones significativas con las áreas PSO y PSC del Pacífico subtropical en oscilaciones menores a 8 años y también en oscilaciones mayores a 12 años en las décadas 1980-2000 (figuras 3g-h) pero no se detectan relaciones importantes con el área PSE inmediatamente subyacente (Figura 3i).

Relaciones en el Océano Atlántico

La variabilidad de la TSM en regiones tropicales y subtropicales del Océano Atlántico ha sido investigada por diversos autores. En particular, Venegas et al. (1996, 1997) describen el modo principal de variabilidad acoplada atmósfera-oceano conocido como dipolo del Atlántico Sur que representa oscilaciones de 14–16 años en la intensidad del anticiclón del Atlántico subtropical acompañadas de una estructura bipolar norte-sur en la variabilidad de la TSM. Esta estructura de variabilidad oceánica emerge también como uno de los modos principales de variabilidad espacio-temporal de la TSM del Atlántico descritos por Palastanga et al. (2002). Por otra parte, el análisis realizado por Colberg y Reason (2007) sugiere la división del Atlántico en cuatro subregiones de variabilidad. En efecto, estos autores encuentran que la región tropical con fuertes fluctuaciones interanuales, la región subtropical cercana a la costa de Africa con importante variabilidad en escalas interanual a decadal, la región este de latitudes medias con importante variabilidad interanual y multidecadal y la región del sudoeste cercana a la costa de Sudamérica con importante variabilidad en escalas interanual y decadal pueden constituir subdominios de variabilidad de TSM en el Océano Atlántico. Las cuatro regiones se corresponden con las áreas consideradas en este trabajo (ver Figura 1).

El análisis WTC muestra que las regiones ATO y ASO, áreas que conformarían el dipolo del Atlántico Sur, tienen relaciones significativas en oscilaciones menores a 4 años en las décadas 1970-1990 siendo relaciones en fase o con un leve defasaje pero en ningún momento describen relaciones en anti-fase entre las series involucradas (Figura 4a). También se detectan relaciones significativas en oscilaciones interdecadales (oscilaciones en una banda alrededor de 15 años) durante todo el período de análisis para las cuales los vectores de fase tampoco describen una conexión en anti-fase.

Las relaciones entre las áreas ATO y ATE son significativas en una amplia región del espacio tiempo-frecuencia (Figura 4b). A mediados de la década 1960 comienzan a ser significativas las relaciones entre estas regiones en oscilaciones menores a 6 años mientras que para oscilaciones en bandas alrededor de 10 años la relación es significativa en las décadas 1950-1990. Las relaciones entre las restantes regiones del Atlántico son de carácter esporádico en las diferentes bandas de variabilidad (figuras 4c-f).

De los resultados mostrados no emergen relaciones en anti-fase como podrían esperarse por la existencia del ya mencionado dipolo del Atlántico Sur. Es importante tener en cuenta que los trabajos que prueban la existencia del dipolo oceánico fueron hechos considerando valores mensuales o promedios estacionales de anomalías de TSM mientras que el análisis WTC aquí presentado fue realizado para promedios anuales de las anomalías mensuales. Ésta es la posible causa de las diferencias entre los resultados obtenidos aquí y los de trabajos previos dado que si existen relaciones en anti-fase entre las variables involucradas, la metodología WTC las detecta y expone claramente.

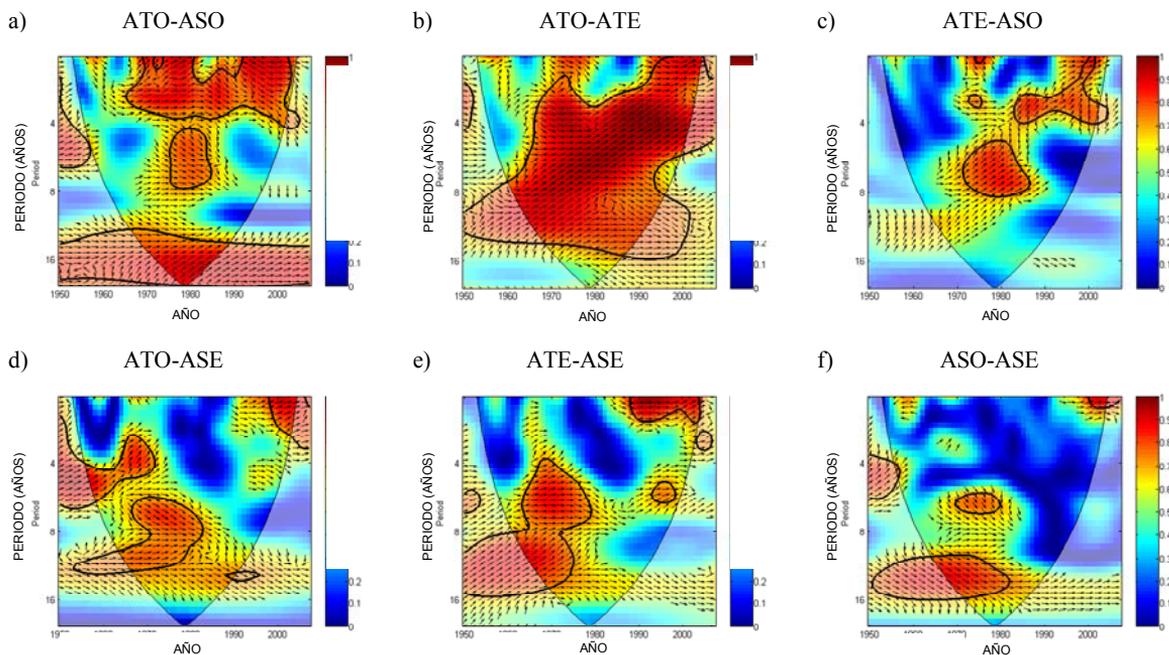


Figura 4: Como Figura 2 pero entre las series de TSM del Océano Atlántico.

Relaciones entre los océanos Pacífico e Indico

Estudios previos analizaron las interacciones entre los océanos Indico y Pacífico enfatizando la influencia de los eventos ENSO en la variabilidad del Indico y viceversa en la modulación del ciclo ENSO por condiciones particulares en el Océano Indico (Yu et al., 2002; Wu y Kirtman, 2004; Annamalai et al., 2005; entre otros).

Los resultados del análisis WTC para la interacción entre ambos océanos muestran diferencias tanto en la intensidad de la co-variabilidad como en la relación de fase para las diversas bandas de frecuencia según las áreas consideradas. La región tropical IP presenta relación significativa con la variabilidad en la vecina región IT en oscilaciones mayores a 16 años durante todo el periodo de análisis y en oscilaciones alrededor de 8 años en las décadas 1970-1990 (Figura 5a). Por otra parte, las regiones IP y EN4 tienen relación significativa solo durante unos pocos años específicos en oscilaciones menores a 4 años (Figura 5b). La pobre conexión entre las regiones IP y EN4 podría deberse en parte a la existencia de dos tipos de eventos El Niño, el Central Pacific (CP)-El Niño con anomalías centradas en la región EN4 para los cuales el este del Pacífico tendría anomalías poco o nada significativas y el Eastern Pacific (EP)-El Niño con anomalías en las regiones EN3 y EN12 (Ashok et al., 2007; Kao y Yu 2009; entre otros). Esta diferente estructura espacial de las anomalías de TSM conllevan a diferentes patrones de teleconexión, en especial con la región IP la cual siempre tiene anomalías negativas durante años El Niño mientras que la región EN4 tiene anomalías positivas relevantes sólo para los años CP-El Niño y viceversa en casos La Niña. A su vez, la asimetría espacial entre los eventos El Niño y La Niña (Hoerling et al., 1997; An y Jin, 2004; entre otros) también podría influir en esta pobre relación.

El análisis WTC detecta fuertes conexiones entre las regiones IP y PSO en oscilaciones menores a 8 años después de la década 1970 y en la banda de 8-16 años durante todos los

años analizados (Figura 5c). Por su parte, la TSM en la región IT tiene estrecha relación con EN4 en oscilaciones menores a 8 años (Figura 5d) coincidiendo con las conclusiones de los trabajos antes mencionados. Además, el defasaje descrito por la inclinación hacia arriba de los vectores de fase indica que la variabilidad en la región EN4 está adelantada en tiempo respecto de la variabilidad en IT.

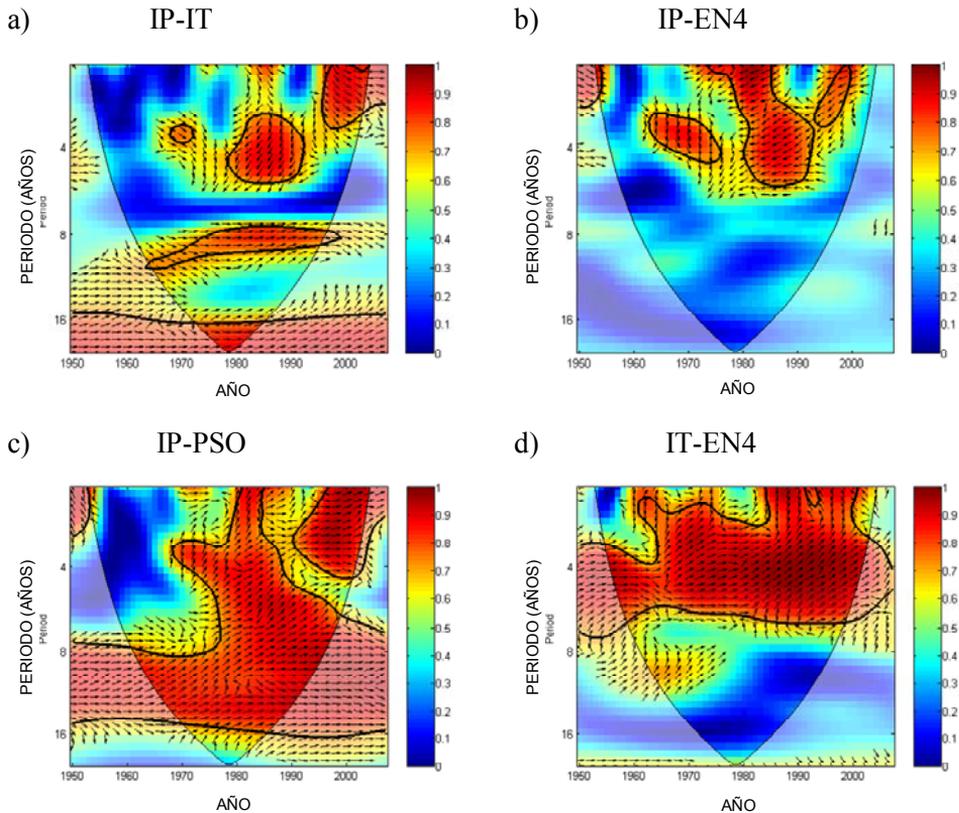


Figura 5: Como Figura 2 pero entre las series de TSM de los océanos Pacífico e Índico.

Relaciones entre los océanos Pacífico y Atlántico

La existencia de relaciones entre la variabilidad de TSM en el Pacífico tropical y en el Atlántico Sur ha sido propuesta en estudios previos. En particular, Colberg et al. (2004) sugieren que las anomalías producidas en el Pacífico tropical central inducirían, por medio de cambios en la fuerza del viento, anomalías de TSM en el Atlántico Sur. En cambio Rodríguez-Fonseca et al. (2009) proponen que los veranos de anomalías cálidas (frías) en el Atlántico alterarían la circulación atmosférica favoreciendo el desarrollo de eventos La Niña (El Niño) en el Pacífico tropical durante el invierno siguiente. Por su parte, Wang et al. (2009) demuestran que el Atlántico tropical puede influenciar la variabilidad de la TSM del Pacífico tropical del mismo modo que el Pacífico puede afectar al Atlántico. Esta mutua interacción quedaría establecida por medio de la circulación de Walker que se desarrolla entre latitudes tropicales y subtropicales de ambos océanos.

El análisis WTC muestra que la región EN4 tiene relación significativa con el Atlántico sólo en oscilaciones de 4-6 años en las décadas 1950-1970 estando el Pacífico adelantado respecto a las regiones ATO y ASO (figuras 6a-b) pero atrasado respecto a la región ASE (Figura 6c) no detectándose relaciones significativas entre las regiones EN4 y ATE (figura no mostrada). Las series correspondientes a las regiones EN12 y ATO describen relaciones significativas en oscilaciones interdecadales siendo relaciones desfasadas de tal manera que el Atlántico está retrasado respecto al Pacífico (Figura 6d). La relación entre estas regiones también es significativa en oscilaciones de 2-6 años a partir de mediados de la década 1960 con una relación de fase que no es constante a través del tiempo pero en todo momento las anomalías del Atlántico seguirían a la señal del Pacífico en coincidencia con los resultados de Colberg et al. (2004). La región EN12 tiene relaciones significativas en oscilaciones menores a 8 años con la región ASO en casi todos los años considerados (Figura 6e), con la región ASE durante unos pocos años específicos (Figura 6f) y con la región ATE en las décadas 1980-2000 (Figura 6g). En todos los casos, la señal del Pacífico está adelantada con respecto al Atlántico.

Relaciones entre los océanos Indico y Atlántico

Las relaciones entre las anomalías de TSM en el Océano Indico y las ocurridas en el Atlántico fueron descriptas en trabajos previos. En particular, el estudio realizado por Fauchereau et al. (2003) muestra variabilidades comunes del Atlántico subtropical oeste con las regiones del centro y oeste del Indico subtropical durante el verano austral producidas por vientos en superficie y flujos de calor latente resultantes del desarrollo de una onda 4 en latitudes subtropicales del HS. Este estudio fue ampliado por Hermes y Reason (2004) utilizando un modelo numérico y sus conclusiones sugieren una posible influencia de la Oscilación Antártica (Thompson y Wallace, 2000) y de ondas de Rossby asociadas a los eventos ENSO en la conexión Atlántico-Indico.

Los resultados del análisis WTC indican que las dos regiones del Indico descriptas por Fauchereau et al. (2003) son precisamente las que tienen relación significativa con el Atlántico subtropical en las series anuales aquí estudiadas. Esta relación es claramente en fase para oscilaciones de 12-16 años mientras que en las ondas más cortas la conexión resulta esporádica (figuras 6h-i). Para las otras regiones definidas en los océanos Indico y Atlántico las relaciones son significativas sólo en pequeñas áreas del espacio tiempo-frecuencia indicando que no hay variabilidades comunes importantes entre ellas (figuras no mostradas).

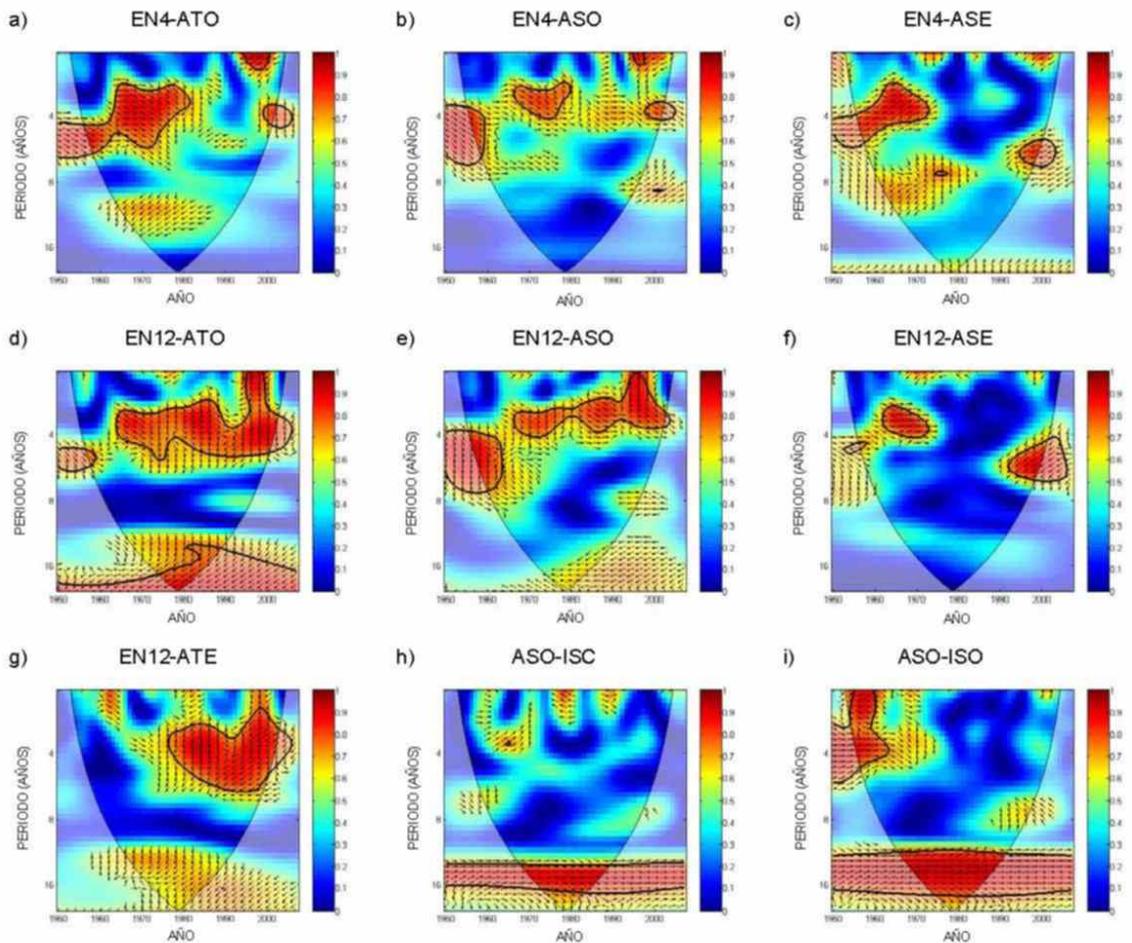


Figura 6: Como Figura 2 pero entre las series de TSM de los océanos Pacífico-Atlántico e Indico-Atlántico.

CONCLUSIONES

En este trabajo se estudiaron relaciones estadísticas entre series de TSM de diferentes regiones de los océanos del Hemisferio Sur. El uso de la metodología WTC ha permitido describir las características de tales relaciones en todo el espacio de tiempo-frecuencia. El análisis se desarrolló con valores medios anuales de TSM para focalizar la variabilidad en escalas interanual a interdecadal facilitando la posible relación entre estos resultados y la variabilidad climática registrada mediante proxy datos que, en general, son de resolución anual.

Los resultados obtenidos describen complejas relaciones en cada una de las cuencas oceánicas. En efecto, las regiones tropicales del oeste y centro del océano Pacífico tienen una estrecha relación en gran parte del espacio de frecuencias. Ambas regiones se relacionan significativamente con las áreas del este del Pacífico tropical en oscilaciones menores a 8 años pero notables desacoples se detectan en oscilaciones más largas. En el Pacífico subtropical, las regiones del oeste y del centro están significativamente conectadas en oscilaciones mayores a 6 años pero no tienen relación con las áreas subtropicales del este.

Las relaciones entre las regiones tropicales y subtropicales del Pacífico muestran conexiones de características muy complejas siendo en todos los casos relaciones que no se extienden a través de todo el periodo de análisis. En el océano Índico, sólo se detectan relaciones importantes entre las regiones del centro y oeste de latitudes subtropicales en oscilaciones mayores a 8 años mientras que en el Océano Atlántico las relaciones entre las regiones tropicales y entre las regiones del oeste son las más importantes.

El análisis entre cuencas revela que la región tropical del Océano Índico se relaciona significativamente con la región oceánica al norte de Australia y con el oeste del Pacífico tropical en oscilaciones mayores a 16 años y menores a 8 años, respectivamente. La TSM en la región al norte de Australia también se relaciona significativamente con el Pacífico subtropical oeste en amplias áreas del espacio de frecuencias, especialmente en la banda de 8-16 años. Importantes relaciones en fase en la escala interdecadal se detectan entre la región oeste del Atlántico subtropical y las porciones oeste y central del Océano Índico subtropical.

Los resultados aquí mostrados son relevantes para futuros trabajos de variabilidad climática en el sur de Sudamérica, especialmente en la región de la Patagonia argentina. En efecto, las investigaciones realizadas sobre la influencia oceánica en la variabilidad climática de esta región han sido concentradas en la escala interanual (Gonzalez y Vera, 2010; Gonzalez et al., 2010; Garreaud, 2009; entre otros) no habiendo antecedentes del estudio de la influencia oceánica en distintas bandas del espectro de frecuencias desde escalas decadales hasta multidecadales. Conocer en detalle estos aspectos de la variabilidad climática regional es de gran importancia dado que puede ayudar a comprender las causas de las importantes fluctuaciones de la lluvia y temperatura detectadas en Patagonia durante los últimos siglos (Boninsegna et al., 2009; entre otros). El estudio de las relaciones entre la TSM y el clima regional en diferentes bandas de frecuencias puede facilitarse estudiando previamente las relaciones entre diversas áreas de los océanos del Hemisferio Sur. En efecto, la detección de variabilidades comunes (relaciones en fase o en anti-fase) en diferentes áreas de los océanos permitiría reducir el número de regiones oceánicas a considerar en el estudio. Pero a la luz de los resultados aquí expuestos, todas las regiones consideradas podrían ser forzantes independientes de la variabilidad climática en Patagonia en diferentes bandas de frecuencia dado que las únicas regiones acopladas en todo el espectro de variabilidad son las regiones vecinas EN4 y EN34 en el Pacífico tropical. Para análisis focalizados en una específica banda de frecuencias la información proporcionada por diferentes regiones oceánicas puede ser coincidente (ejemplo: las regiones ISO y ASO en escala interdecadal representan básicamente las mismas oscilaciones) pero esto ocurre en los pocos casos detectados en este trabajo.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por los proyectos UBACYT EX016, AGENCIA-MINCYT PICT-2007-00438, CONICET PIP(2011-2013) 201001-00250. Se agradece especialmente a la Editora y al revisor anónimo cuyos comentarios y sugerencias ayudaron a mejorar la calidad de este trabajo.

REFERENCIAS

- An, S. y F. Jin, 2004. Nonlinearity and asymmetry of ENSO. *J. Clim.* 17: 2399–2412.
- Annamalai, H., S. Xie, J. McCreary y R. Murtugudde, 2005. Impact of Indian Ocean sea surface temperature on developing El Niño. *J. Clim.* 18: 302–319.

- Ashok, K., S. Behera, S. Rao, H. Weng y T. Yamagata, 2007. El Niño Modoki and its possible teleconnection. *J. Geophys. Res.* 112: C11007. doi:10.1029/2006JC003798.
- Barros, V. y G. Silvestri, 2002. The relationship between sea surface temperature at the subtropical south-central Pacific and precipitation in southeastern South America. *J. Clim.* 15: 251-267.
- Behera, S. y T. Yamagata, 2001. Subtropical SST dipole events in the southern Indian Ocean. *Geophys. Res. Lett.* 28, 327–330, doi:10.1029/2000GL011451.
- Boninsegna, J., y coautores, 2009. Dendroclimatological reconstructions in South America: A review. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281: 210-228.
- Colberg, F., C. Reason y K. Rodgers, 2004. South Atlantic response to El Niño–Southern Oscillation induced climate variability in an ocean general circulation model. *J. Geophys. Res.* 109, C12015, doi:10.1029/2004JC002301.
- Colberg, F. y C. Reason, 2007. Ocean model diagnosis of low-frequency climate variability in the South Atlantic region. *J. Clim.* 20: 1016-1034.
- Deser, C., M. Alexander, S. Xie y A. Phillips, 2010. Sea surface temperature variability: Patterns and mechanisms. *Annual Review of Marine Science* 2: 115-143.
- Fachereau, N., S. Trzaska, Y. Richard, P. Roucou, y P. Camberlin, 2003. Sea-surface temperature co-variability in the southern Atlantic and Indian Oceans and its connections with the atmospheric circulation in the Southern Hemisphere. *Int. J. Climatol.* 23: 663–677.
- Garreaud, R. 2009: The Andes climate and weather. *Adv. Geosciences.* 7: 1-9.
- Gonzalez, M., M. Skansi, y F. Losano, 2010. A statistical study of seasonal winter rainfall prediction in the Comahue region (Argentina). *Atmosfera.* 23(3): 277-294.
- Gonzalez, M., y C. Vera, 2010. On the interannual wintertime rainfall variability in the southern Andes. *Int. J. Climatol.* En prensa.
- Grinsted, A., J. Moore, y S. Jevrejeva, 2004. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes Geophys.* 11(5/6): 561-566.
- Gu, D. y S. Philander, 1997. Interdecadal climate fluctuations that depend on exchanges between the tropics and extratropics. *Science.* 275: 805–807.
- Hermes, J., y C. Reason, 2004. Ocean model diagnosis of interannual coevolving SST variability in the South Indian and South Atlantic Oceans. *J. Clim.* 18: 2864-2882.
- Hoerling, M., A. Kumar y M. Zhong, 1997. El Niño, La Niña, and the nonlinearity of their teleconnections. *J. Clim.* 10: 1769–1786.
- Jin F-F, J-S. Kug, S-I. An, I-S. Kang, 2003. A near-annual coupled ocean–atmosphere mode in the equatorial Pacific Ocean. *Geophys. Res. Lett.* 30: 1080. doi:10.1029/2002GL015983
- Kao, H-Y y J-Y Yu, 2009. Contrasting Eastern-Pacific and Central-Pacific types of ENSO. *J. Clim.* 22: 615-632.
- Lau N-C y M. Nath, 1994. A modeling study of the relative roles of tropical and extratropical SST anomalies in the variability of the global atmosphere-ocean system. *J. Clim.* 7(8): 1184-1207.
- Liu, Z. y M. Alexander, 2007. Atmospheric bridge, oceanic tunnel, and global climatic teleconnections. *Rev. Geophys.* 45: RG2005. doi:10.1029/2005RG000172.
- Liu, G., L. Ji, S. Sun y Q. Zhang, 2010. An Inter-hemispheric Teleconnection and a Possible Mechanism for Its Formation. *Advances in Atmospheric Sciences.* 27(3): 629-638, DOI: 10.1007/s00376-009-8172-x.

- Müller, W., C. Frankignoul y N. Chouaib, 2008. Observed decadal tropical Pacific–North Atlantic teleconnections. *Geophys. Res. Lett.* 35: L24810. doi:10.1029/2008GL035901.
- Palastanga, V., C. Vera y A. Piola, 2002. On the leading modes of sea surface temperature variability in the South Atlantic Ocean. *Clivar Exchanges*. 7(3/4): 12-16.
- Peterson, R., y W. White, 1999. Slow oceanic teleconnections linking the Antarctic Circumpolar Wave with the tropical El Niño–Southern Oscillation. *J. Geophys. Res.* 103: 24573–24583.
- Rayner, N., P. Brohan, D. Parker, C. Folland, J. Kennedy, M. Vanicek, T. Ansell y S. Tett, 2006. Improved analyses of changes and uncertainties in sea surface temperature measured in situ since the mid-nineteenth century: the HadSST2 data set. *J. Clim.* 19: 446–469.
- Robertson A. y C. Mechoso, 1998. Interannual and Decadal Cycles in River Flows of Southeastern South America. *J. Clim.* 11: 2570–2581.
- Rodríguez-Fonseca, B., I. Polo, J. García-Serrano, T. Losada, E. Mohino, C. Mechoso y F. Kucharski, 2009. Are Atlantic Niños enhancing Pacific ENSO events in recent decades?. *Geophys. Res. Lett.* 36: L20705. doi:10.1029/2009GL040048.
- Ropelewski, C., M. Halpert y X. Wang, 1992. Observed tropospheric biennial variability and its relationship to the Southern Oscillation. *J. Clim.* 5: 594–614.
- Thompson, D. y J. Wallace, 2000. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. *J. Clim.* 13: 1000–1016.
- Thompson, D., J. Kennedy, J. Wallace y P. Jones, 2008. A large discontinuity in the mid-twentieth century in observed global-mean surface temperature. *Nature*. 453(29): 646–649.
- Tian, J., J. Xu y E. Wei, 2000. The wavelet analysis of satellite sea surface temperature in the South China Sea and the Pacific Ocean. *Chinese Science Bulletin*. 45: 2187–2192.
- Torrence, C. y G. Compo, 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 79: 61–78.
- Torrence, C. y P. Webster, 1999. Interdecadal changes in the ENSO–monsoon system. *J. Clim.* 12: 2679–2690.
- Trenberth, K., J. Hurrell, 1994. Decadal atmosphere–ocean variations in the Pacific. *Clim. Dyn.* 9: 303–319.
- Velasco, V. y B. Mendoza, 2008. Assessing the relationship between solar activity and some large scale climatic phenomena. *Adv. Space Res.* 42: 866–878.
- Venegas, S., A. Lawrence y D. Straub, 1996. Evidence for interannual and interdecadal climate variability in the South Atlantic. *Geophys. Res. Lett.* 23(19): 2673–2676.
- Venegas, S., L. Mysak y D. Straub, 1997. Atmosphere–ocean coupled variability in the South Atlantic. *J. Clim.* 10: 2904–2920.
- Wallace, J., E. Rasmusson, T. Mitchell, V. Kousky, E. Sarachik y H. von Storch, 1998. On the structure and evolution of ENSO-related climate variability in the tropical Pacific: Lessons from TOGA. *J. Geophys. Res.* 103: 14241–14259.
- Wang, C., F. Kucharski, R. Barimalala y A. Bracco, 2009. Teleconnections of the Tropical Atlantic to the Tropical Indian and Pacific Oceans: A Review of Recent Findings. *Meteorol. Z.* 18: 445–454.
- Wang, F., 2010. Subtropical dipole mode in the Southern Hemisphere: A global view. *Geophys. Res. Lett.*, 37: L10702, doi:10.1029/2010GL042750.
- Wu, R., y B. Kirtman, 2004. Understanding the impacts of the Indian Ocean on ENSO variability in a coupled GCM. *J. Clim.* 17: 4019–4031.

Yu, J-Y, C. Mechoso, J. McWilliams y A. Arakawa, 2002. Impacts of the Indian Ocean on the ENSO cycle. *Geophys. Res. Lett.* 29: 1204. doi:10.1029/2001GL014098.

Recibido: 16 de abril de 2011

Aceptado: 29 de septiembre de 2011