

# Estudio del océano superior del Pacífico Tropical y su relación con un forzamiento del Atlántico

Marta Martín del Rey <sup>(1)</sup>, Irene Polo Sánchez <sup>(1)</sup>, Belén Rodríguez de Fonseca <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Dpto. de Geofísica y Meteorología. Universidad Complutense de Madrid. Madrid  
([martamartindelrey@estumail.ucm.es](mailto:martamartindelrey@estumail.ucm.es))

## 1. Introducción

Numerosos trabajos han descrito cambios atmosféricos y oceánicos globales (Vecchi et al., 2006; Cane et al., 1997; Hansen et al., 2006; Baines y Folland, 2006) a partir del denominado *climate shift* o transición climática del Pacífico Norte (1976-77, Graham et al., 1994; Miller et al., 1994).

Una de las consecuencias del cambio global es la evidencia de que después de los 70's, el Atlántico es capaz de influir en la cuenca del Pacífico. Rodríguez-Fonseca et al. (2009) han mostrado como el Niño Atlántico puede influir sobre el océano Pacífico a partir de la década de los 70's, de manera que cuando se produce un Niño Atlántico durante el verano boreal, se desarrolla una Niña en el Pacífico en el invierno siguiente (y viceversa), pudiendo llegar a coexistir ambos fenómenos en los meses de verano (fig.1). La conexión entre el océano Atlántico tropical y el Pacífico a través de puente atmosférico ha sido analizada en numerosos trabajos (Chiang et al., 2000; Dong et al. 2006, Wang 2006, Rodríguez-Fonseca et al., 2009). Sin embargo, los procesos que coexisten y por los cuales el Atlántico es capaz a partir de los 70's de afectar a la cuenca del Pacífico (y el Pacífico de ser afectado) están aún por resolver.

Por un lado, tanto el Niño del Pacífico como el del Atlántico son fenómenos interanuales. Por otro lado, se han encontrado evidencias similares de tal conexión a principios del siglo XX (Joly and Voldoire, 2009), lo cual indica una modulación multidecadal de la coexistencia de ambos fenómenos interanuales, aunque no se conoce cual es el factor multidecadal que domina en tal modulación.

Teniendo en cuenta el liderazgo del Atlántico sobre el Pacífico mostrado por Rodríguez-Fonseca et al. (2009) a partir de los 70, el presente trabajo analiza los cambios decadales producidos en un conjunto de variables tanto atmosféricas como oceánicas, a escala global y local, antes y después de la década de los 70's con objeto de conocer los cambios en el estado base. A continuación se estudia la posible modulación de los procesos interanuales mediante variaciones decadales. Nos centraremos en la conexión entre la cuenca Atlántica y Pacífica.

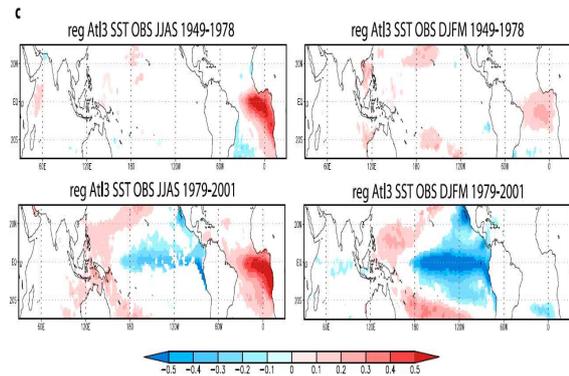


Fig. 1.- Regresión del índice Atl3 (arriba) en el verano boreal y la respuesta de la SST del Pacífico tropical al Niño Atlántico para diferentes anomalías de SST observadas en los periodos 1949-1978 (arriba) y 1979-2002 (abajo), en verano (izquierda) e invierno (derecha). De Rodríguez-Fonseca et al. (2009).

Para estudiar la posible influencia del Atlántico en los cambios en el Pacífico, utilizaremos el mismo experimento con un modelo acoplado que el descrito por Rodríguez-Fonseca et al. (2009). Se calcularán las diferencias entre periodos y se compararán los resultados con los de las observaciones, pudiendo así establecer si realmente existe una conexión entre cuencas liderada por el Atlántico. Asimismo, se analizarán aspectos interanuales dados por el modelo.

En la siguiente sección se describen los datos y la metodología empleada, para pasar a resumir, en la sección 3, los resultados más concluyentes tanto de variabilidad del estado base (variabilidad multidecadal) como de la variabilidad interanual. Finalmente se llevará a cabo una discusión de los resultados.

## 2. Datos y Metodología

En este trabajo se han utilizado tanto datos procedentes de Reanálisis atmosférico y oceánico como datos de un modelo global acoplado.

Los datos de la tensión del viento ( $\tau$ ), temperatura superficial del mar (SST) y profundidad de la termoclina ( $z_{20}$ , profundidad de la isoterma de 20°C como aproximación de la termoclina en los trópicos)

pertenecen a la base de datos del reanálisis del océano SODA (Simple Oceanic Data Assimilation; Carton et al., 2001) para el periodo 1958-2001. Mientras que los datos de velocidad zonal y vertical de las células de Walker, así como el potencial de velocidad han sido tomados del NCEP (National Centre for Environmental Prediction, Kalnay et al. 1996) para el mismo periodo.

El modelo utilizado para el estudio de la conexión del océano Atlántico y Pacífico es un modelo global atmosférico SPEEDY ICTP-AGCM versión 40 con 8 niveles (Kucharski et al., 2008) acoplado a un modelo de gravedad reducida extendido (Chang, 1994). El experimento consiste en un conjunto de 10 miembros para el periodo 1949-2002 en el que el modelo se acopla en la cuenca Indo-Pacífica (30N-30S) y se relaja la SST a la climatología en el Pacífico extratropical y a la media mensual observada en el Océano Atlántico (Rodríguez-Fonseca et al., 2009).

Para estudiar los cambios decadales que sufren las diferentes variables se han dividido los datos en dos periodos: 1958-1978 y 1979-2001. Se han restado los valores estacionales del primer periodo a los del segundo periodo, y se les ha aplicado un test-t de diferencia de medias con objeto de mostrar solamente los cambios significativos con un nivel de significación del 5%.

### 3. Resultados

Primeramente hemos realizado un análisis global de las variables atmosféricas y oceánicas observadas con el fin de visualizar cambios decadales en el comportamiento de las mismas, relacionados con el *climate shift*. Una figura que ilustra esta transición es el *hovmöller* de la SST ecuatorial global (fig.2). Aparece calentamiento en las cuencas del Pacífico, el Atlántico y el Índico a partir de mediados de los 70's, hecho que se observa, sobretodo, en los episodios cálidos que abarcan toda la cuenca Pacífica, hasta la costa oriental, donde rara vez se alcanzan temperaturas superficiales tan altas por la presencia de sistemas de afloramiento.

Este calentamiento lo demuestra la curva de la tendencia experimentada por la SST global anual y para el mes de Mayo (representativo de la máxima variabilidad en el Atlántico tropical) que se presenta en la figura 2 (abajo). Las flechas en el eje de abscisas indican la tendencia experimentada por la SST en cada cuenca (Índico 50°-100°, Pacífico 120°-280°, Atlántico 300°-360°). Se observa mayor incremento de SST en Mayo respecto al incremento anual, sobre todo en el Este del Pacífico, mientras que en el Atlántico central la tendencia es de enfriamiento. Por esta razón, los resultados mostrados a partir de ahora en este trabajo estarán calculados para los meses de primavera, Marzo, Abril, Mayo (MAM), estación de origen del desarrollo del Niño Atlántico (Polo et al., 2008).

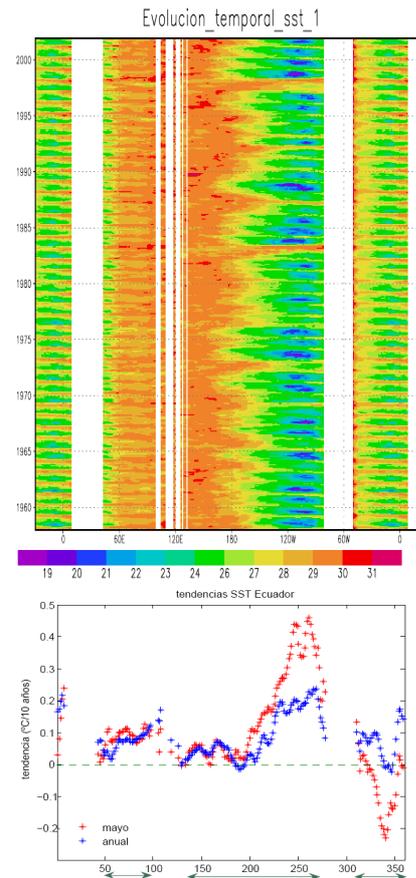


Fig. 2.- Hovmöller de la SST global ecuatorial (arriba, en °C) y tendencia experimentada por la SST en cada cuenca anual y para el mes de Mayo (abajo, en °C/10 años).

### Variabilidad multidecadal

Analizando las variaciones de SST en el océano Atlántico y Pacífico entre los dos periodos (fig. 3) aparecen estructuras de escala decadal o multidecadal descritas como propias de cada uno de ellos como son la *Pacific Decadal Oscillation* (PDO, Mantua y Hare, 2002) y la *Atlantic Multidecadal Oscillation* (AMO, Knight et al., 2005) en el Pacífico y Atlántico respectivamente.

La zona oriental del Pacífico Tropical presenta aumentos de SST de hasta 1.5 °C en el segundo periodo, además de anomalías de distinto signo en el Pacífico Norte asociadas con la PDO. Este tipo de estructura de la SST en el Pacífico Norte ya fue mostrada un estudio similar realizado por Miller et al. (1994). En la cuenca Atlántica, la mayor parte de las anomalías positivas aparecen en el Hemisferio Sur, asociadas a un debilitamiento del sistema de altas presiones subtropicales de Sta Helena (no mostrado) y al núcleo positivo de la AMO. En el Atlántico Norte aparece el núcleo negativo de la Oscilación Atlántica.

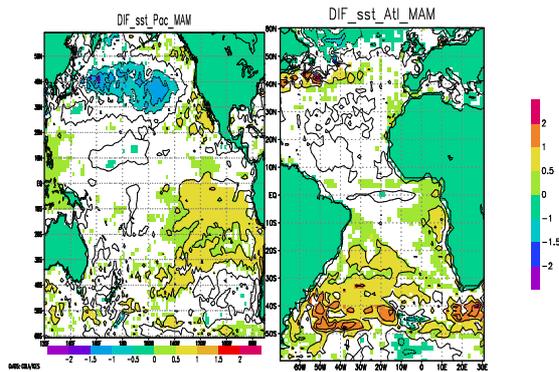


Fig. 3.- Diferencias de SST (en °C) en el océano Pacífico (izquierda) y el océano Atlántico (derecha) en MAM entre los periodos 1979-2001 y 1958-78.

Los cambios decadales oceánicos se pueden entender en base a los cambios experimentados en la atmósfera a partir de los 70 (Graham, 1994; Baines and Folland, 2006). Se han analizado los campos superficiales de la tensión del viento, el viento en superficie, la presión a nivel del mar (SLP), junto con el potencial de velocidad, la función de corriente y el geopotencial en el nivel de 200 hPa para representar la circulación media troposférica. Nos centramos en la zona tropical del Atlántico y Pacífico, por lo que en la figura 3 se presentan los cambios más significativos ocurridos en ambas cuencas para la tensión del viento, el potencial de velocidad y la circulación en el ecuador representando la circulación de Walker.

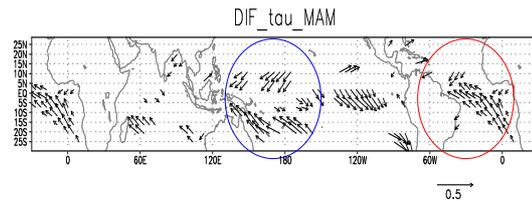
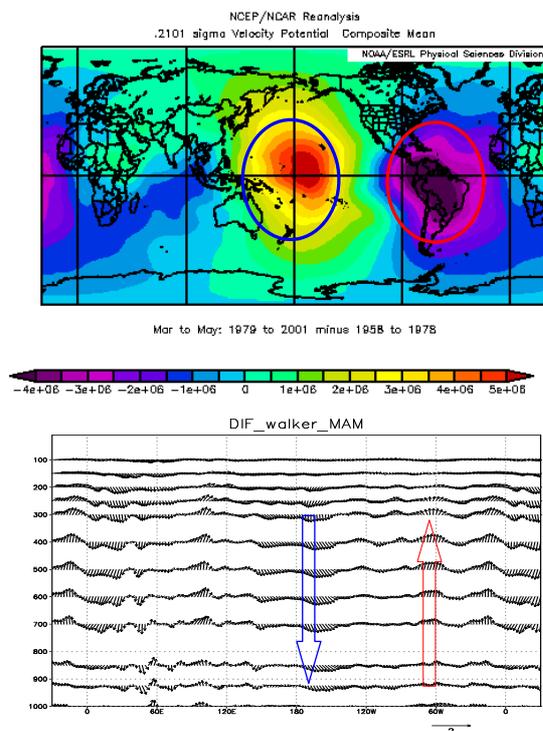
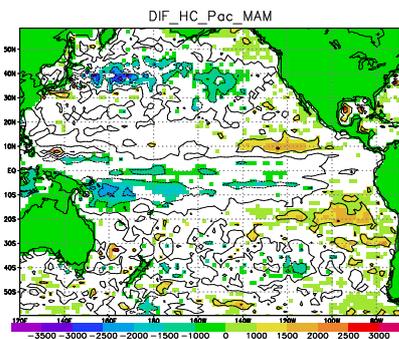


Fig. 3.- Diferencias entre periodos de la tensión del viento (abajo, en  $N/m^2$ ), el viento en el ecuador en la columna troposférica (representando las células de Walker, en el centro, en m/s la componente zonal y en  $-10^{-2}$  Pa/s la componente vertical) y el potencial de velocidad (arriba en  $m^2/s$ ) para la estación MAM.

Se aprecia convergencia de vientos en niveles bajos, en el Atlántico ecuatorial del Oeste en torno a  $60^\circ W$  (fig.3 panel de abajo), que produce ascensos de aire (fig.3 panel central) y divergencia en capas altas asociada con valores negativos del potencial de velocidad (figura.3 panel de arriba). Lo contrario ocurre en el Pacífico ecuatorial del Oeste sobre  $180^\circ E$ , donde existe divergencia del viento en superficie que está vinculada con un descenso de aire desde niveles altos donde se ha producido convergencia. Esto estaría de acuerdo con los resultados de Baines y Folland (2006) en un estudio realizado en un periodo menor (1958-1995) y con el trabajo de Marengo (2004), donde describe como desde los 70's, la cuenca del Amazonas ha sufrido un régimen húmedo posiblemente debido al calentamiento del Pacífico Este.



Centrando nuestro estudio en el océano Pacífico, se han calculado también diferencias entre periodos para otras variables oceánicas como son la salinidad a 100 metros de profundidad, la salinidad en la columna de agua en el Ecuador, el contenido de calor de la cuenca, y la temperatura en profundidad en el Ecuador. En el perfil vertical de temperatura (no mostrado) se aprecia que los cambios se producen solamente hasta una profundidad de 300 metros, es por eso, que hemos tomado este nivel como tope de la integración de la temperatura desde la superficie del mar para calcular el contenido de calor (HC) del océano Pacífico.



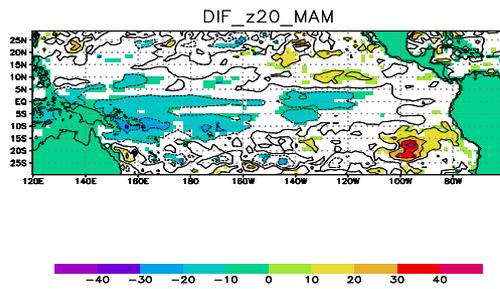


Fig. 5.- Diferencia de contenido de calor (en °C m) (arriba) y de la profundidad de la termoclina (en m) para MAM entre los periodos 1979-2001 y 1958-78.

La figura 5 muestra los cambios producidos en el contenido de calor del Pacífico. Este disminuye en el Oeste de la cuenca y aumenta en el Este, en clara relación con el patrón de cambio de la profundidad de la termoclina.

Dong et al. (2006) establecían que una fase positiva de la AMO (anomalías positivas en el Atlántico norte y negativas en el sur) estaría vinculada a una generación de vientos del Este sobre el centro y Oeste del Pacífico ecuatorial, que harían más profunda la termoclina en la parte occidental de la cuenca. Estos cambios darían lugar a una disminución de la variabilidad del ENSO. Los resultados mostrados en este trabajo, obtenidos tanto en el modelo como en las observaciones (figuras 5 y 6) sobre los cambios de SST del Atlántico y de la profundidad de la termoclina en el Pacífico muestran la situación inversa a la descrita por Dong: anomalías negativas de SST en el Atlántico Norte y positivas en el Atlántico Sur, una menor profundidad de la termoclina en la parte Oeste del Pacífico Ecuatorial, y una mayor variabilidad del ENSO a partir de los 70.

Esta menor inclinación de la termoclina ecuatorial puede estar relacionada con la mayor ocurrencia de fenómenos de ENSO (Federov y Philander, 2000) a partir del *climate shift* como se apreciaba en la figura 1. Lo que nos está indicando una posible modulación de los procesos interanuales mediante las variaciones decadales.

### Modulación de la variabilidad interanual causada por el Atlántico

Hemos realizado un análisis de diferencias entre periodos para los datos de SST, profundidad de la termoclina, contenido de calor y tensión de viento proporcionados por el modelo a partir de las SST prescritas del Atlántico.

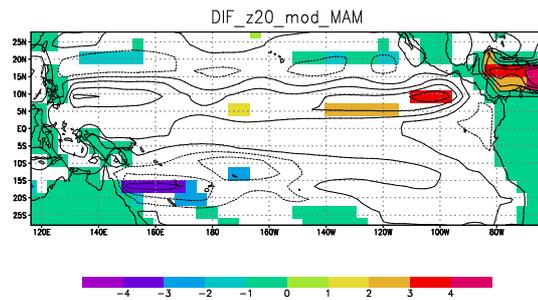


Fig. 6.- Diferencia de profundidad de la termoclina (en m) obtenida mediante los datos proporcionados por el modelo (abajo).

La amplitud de las respuestas del modelo es muy pequeña, aproximadamente el 10 % de los valores observados. Sin embargo, el modelo si que reproduce los cambios decadales del viento en superficie y de la profundidad de la termoclina (figura 6). La concordancia existente entre los resultados proporcionados por el modelo y los observados, sobre todo en la profundidad de la termoclina, reafirman nuestra hipótesis de partida de la influencia del Atlántico sobre el Pacífico.

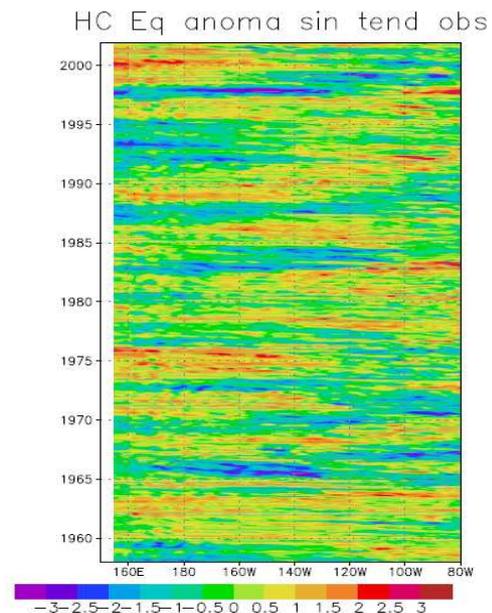


Fig. 7.- Hovmöller del contenido de calor estandarizado sin ciclo estacional ni tendencia mensual en el Pacífico, calculado a partir de las SST observadas.

Además se aprecia en los Hovmöller del contenido de calor estandarizado sin tendencia mensual y sin ciclo estacional (figura 8) una buena reproducción de la variabilidad interanual a partir de mediados de los 70 (comparándolo con el Hovmoller del contenido de calor de las observaciones, figura 7).

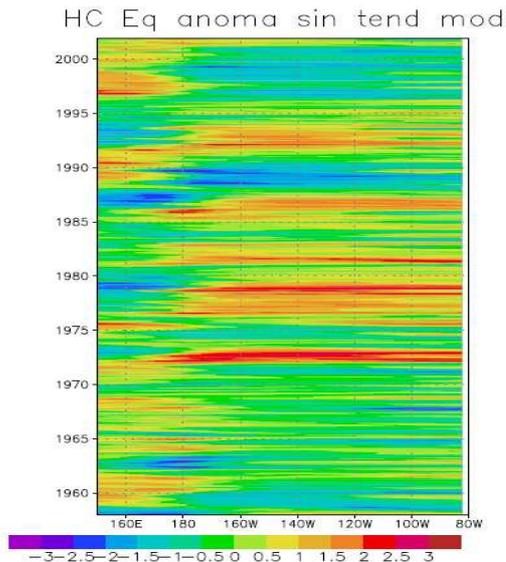


Fig. 8.- Hovmöller del contenido de calor en el Pacífico sin ciclo estacional y sin tendencia, calculado a partir de las SST proporcionadas por el modelo.

A la vista de los resultados mostrados, podemos decir que parece que las variaciones decadales del Atlántico podrían estar influyendo en los procesos interanuales.

#### 4. Discusión

Los resultados que se muestran en este trabajo evidencian la existencia de un cambio en el estado base de la atmósfera y del océano a escala global y local y que parece estar relacionado con oscilaciones decadales.

Los cambios en la cuenca Atlántica y Pacífica podrían estar conectados por puentes atmosféricos, como los sugeridos por trabajos anteriores (Wang et al., 2006; Rodríguez-Fonseca et al., 2009). La idea de que algunos cambios descritos en el Pacífico podrían ser consecuencia de variabilidad del Atlántico también ha sido sugerida por otros autores (Dong et al., 2006; Baines y Folland, 2006)

Nosotros aportamos una evidencia más gracias a un experimento con un modelo global acoplado diseñado para discernir procesos en el Pacífico Tropical ligados con la temperatura superficial en el Atlántico.

Los cambios mostrados en el Pacífico a partir de los datos observados, se reproducen en buena medida mediante el modelo utilizado que considera las SST prescritas del Atlántico.

A partir de estos resultados se pretende investigar en profundidad:

i) Los cambios en el estado base del Atlántico y del Pacífico y su relación con los fenómenos Niños en cada una de las cuencas.

ii) Los mecanismos a través de los cuales el Pacífico Tropical genera fenómenos ENSO forzados por el Atlántico. Para ello se analizarán los términos del balance de la ecuación de variación de la temperatura en la capa de mezcla tanto en el experimento descrito como en las observaciones.

#### 5. Referencias

**Baines, P.G., C.K. Folland (2006):** Evidence for a Rapid Global Climate Shift across the Late 1960s, *J. Climate* 20, 2721-2744.

**Cane M A, A C Clement, A Kaplan, Y Kushnir, D Pozdnyakov, R Seager, S E Zebiak and R Murtugudde (1997):** Twentieth- Century Sea Surface Temperature trends. *Science* 275, 957-960.

**Carton, J.A., G.A. Chepurin, X. Cao, and B.Giese (2000):** A Simple Ocean Data Assimilation retrospective analysis of the global ocean 1950-1995. Part I: Methodology, *J. Phys. Oceanogr.*, v.30, n. 2, 294-309.

**Chang, P. (1994):** A study of the seasonal cycle of sea surface temperature in the tropical Pacific Ocean using reduced gravity models, *J. Geophys. Res.*, 99, 7725-7741.

**Chiang J C H, Y Kushnir and S E Zebiak (2000):** Interdecadal changes in eastern Pacific ITCZ variability and its influence on the Atlantic ITCZ. *Geophys Res Lett*, 27: 3687-3690.

**Dong, B., R.T. Sutton, A.A. Scaife (2006):** Mulidecadal modulation of El Niño-Southern Oscillation (ENSO) variance by Atlantic Ocean sea surface temperatures, *Geophys.Res.Lett.*, 33,L08705,doi:10.1029/2006GL025766.

**Fedorov A V and S G Philander (2000):** Is El Niño changing? *Science*, 288, 1997-2002

**Graham, N.E. (1994):** Decadal scale variability in the 1970's and 1980's: Observations and model results. *Clim. Dyn.*, 10, 60-70.

**Hansen J, M Sato, R Ruedy, K Lo, D W Lea and M Medina-Elizade (2006):** Global temperature change. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 103, 14288-14293, doi: 10.1073/pnas.0606291103.

**Kalnay, E. Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., and others (1996):** The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bull. American Meteorol. Soc.*, 77(3), 437-471.

**Knight J R, R J Allan, C K Folland, M Vellinga and M E Mann (2005):** A signature of persistent natural thermohaline circulation cycles in observed climate. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L20708.

**Joly M., A.Voldoire (2009):** Role of the Gulf of Guinea in the interannual variability of the West African monsoon: what do we learn from CMIP3 coupled simulations? *Int. J. Climatol.* DOI: 10.1002/joc.2026.

**Kucharski, F., A. Bracco, J. H. Yoo, and F. Molteni (2008):** Atlantic forced component of the Indian monsoon interannual variability, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L04706.

**Marengo J. A. (2004):** Interdecadal variability and trends of rainfall across the Amazon basin. *Theor. Appl. Climatol.* 78, 79–96 DOI: 10.1007/s00704-004-0045-8

**Mantua N J and S R Hare (2002):** The Pacific Decadal Oscillation. *J. Oceanogr.*, 58, 35-44.

**Miller A J, D R Cayan, T P Barnett, N E Graham and J M Oberhuber (1994):** The 1976-77 –Climate Shift of the Pacific Ocean. *J. Oceanogr.* 7, 21-26.

**Rodriguez-Fonseca B., I. Polo, J. Garcia-Serrano, T. Losada, E. Mohino, C. R. Mechoso and F. Kucharski (2009):** Are the Atlantic Ninos enhancing Pacific ENSO events in recent decades?. *Geophys. Res. Lett.*, vol. 36, L20705, DOI: 10.1029/2009GL040048, 2009

**Polo, I., B. Rodríguez-Fonseca, T. Losada, and J. García-Serrano (2008):** Tropical Atlantic variability modes (1979–2002). Part I: Time-evolving SST modes related to West African rainfall, *J. Climate* 21, 6457–6475, doi:10.1175/2008JCLI2607.1.

**Vecchi, G.A., B Soden, A.T. Wittenberg, I. M. Held, A. Leetmaa, and M. J. Harrison (2006):** Weakening of Tropical Pacific Atmospheric Circulation Due to Anthropogenic Forcing, *Nature*, 441, 73–76.

**Wang,C. (2006):** An overlooked feature of tropical climate: Inter-Pacific-Atlantic variability, *Geophys.Res.Lett.*, 33, L12702.

## **AGRADECIMIENTOS**

\*Proyecto financiado por el MEC, con referencia CGL2009-10285, TRACS: Variabilidad del Atlántico Tropical y la Transición Climática.

\* Grupos de Investigación (Micrometeorología y Variabilidad Climática: 910437) financiados por el Banco Santander y la Universidad Complutense de Madrid (Financiación Grupos UCM-BSCH GR58/08).