

INFLUENCIA DE LAS TEMPERATURAS SUPERFICIALES DEL MAR SOBRE LA PRECIPITACIÓN EN EL ATLÁNTICO TROPICAL

William CABOS NARVÁEZ, Francisco ÁLVAREZ GARCÍA, Emilia SÁNCHEZ GÓMEZ
y María José ORTIZ BEVIÁ

Departamento de Física, Universidad de Alcalá

RESUMEN

En este trabajo se examina la relación que existe entre la variabilidad interanual de la temperatura de la superficie en el océano Atlántico tropical y la de la precipitación en tres regiones de interés: El Nordeste brasileño, la región del Sahel y la costa norte del Golfo de Guinea. Esta conexión se pone de manifiesto en la correlación entre índices representativos de la variabilidad de la precipitación en dichas regiones y otro índice oceánico representativo de la evolución de la temperatura de la superficie marina en el Atlántico ecuatorial. El origen de las correlaciones significativas entre estas series se busca en la estructura presentada por las anomalías de la temperatura de la superficie del mar en la cuenca atlántica tropical. El problema es estudiado en datos tanto observados como simulados, con lo que se lleva a cabo una evaluación de la bondad de un modelo acoplado océano-atmósfera de última generación.

Palabras clave: temperatura superficial del mar, precipitación, Atlántico tropical.

ABSTRACT

The relationship between the interannual variability of the sea surface temperature across the tropical Atlantic ocean and that of the precipitation in three areas of interest, namely, the brazilian Nordeste, the Sahel region and the northern coast of the Gulf of Guinea, is examined in this work. Such connection is revealed by the correlation of indices representing rainfall variability in the said regions with an oceanic one representative of the evolution of the sea surface temperature in the equatorial Atlantic. The origins of the significant correlations among those time series are sought in the structure shown by the sea surface temperature and sea level pressure anomalies across the tropical Atlantic basin. The issue is addressed in both observed and simulated data, so an assessment of the performance of an 'state-of-the-art' coupled atmosphere-ocean model is also carried out.

Key words: sea surface temperature, precipitation, tropical Atlantic.

1. INTRODUCCIÓN

Es sabido que la variabilidad en el Atlántico tropical influye en los eventos meteorológicos extremos que tienen lugar en algunas regiones de África (LAMB 1978; FOLLAND *et al.*, 1991).

Las anomalías de temperatura superficial del mar en el Atlántico tropical y las anomalías de presión y vientos asociadas son también factores climáticos importantes para la evolución de las ano-

malías de precipitación en la región Nordeste de Brasil (HASTENRATH y GREISCHAR, 1993, NOBRE y SHUKLA, 1996)

Las anomalías de precipitación en la región del Nordeste y en el Sahel muestran un amplio espectro de variabilidad interanual y una clara componente decadal. Los años de sequía en el Nordeste tienden a ocurrir cuando las SST al norte del ecuador son más cálidas de lo normal y las SST al sur del ecuador son más frías de lo normal (HASTENRATH y HELLER, 1977). El comportamiento de las lluvias en el oeste de África ecuatorial es más complejo, pero también muestra una fuerte dependencia de la variación de las SST en el Atlántico tropical (LAMB y PEPPLER, 1987). Las anomalías de precipitación son positivas cuando las anomalías tropicales de SST al norte del ecuador son positivas y las anomalías tropicales de SST al sur del ecuador son negativas. Además del Atlántico tropical, otras señales climáticas influyen sobre las precipitaciones en las regiones arriba mencionadas. Así, la circulación atmosférica sobre África es también influida por las SST del Océano Índico (FOLLAND *et al.*, 1986) y El Niño-Oscilación del sur (ENSO) (NICHOLSON, 1997). La región del Nordeste también es afectada por ENSO a través de la modificación de la celda de Walker (ELLIOT *et al.*, 2001). Con ayuda de un método Bayesiano, RUIZ DE ELVIRA y otros (2000), realizaron predicciones de las temperaturas en el Atlántico tropical. El análisis preliminar que realizaron para identificar las regiones que eran potenciales predictores confirma la importancia de ENSO y las SST en el Atlántico ecuatorial para la variabilidad climática en toda la franja tropical del Atlántico y las regiones continentales adyacentes. El presente trabajo está organizado de la siguiente manera: En la sección 2 se presentan los datos analizados y la metodología empleada. En la sección 3 se presentan los resultados obtenidos y, finalmente, en la sección 4 se ofrecen las conclusiones a que hemos llegado.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

Para este estudio se han utilizado datos provenientes de observaciones y datos extraídos de la salida de una simulación numérica. Las observaciones de precipitación provienen de la recopilación histórica de datos provenientes de estaciones terrestres en todo el mundo desde el año 1900 al 1998 interpolados a una rejilla de 2.5° en latitud y 3.75° en longitud; originalmente dadas en valores medios mensuales, para este estudio se han empleado promedios estacionales. Las de temperatura de la superficie del mar (en lo que sigue, SST) se han obtenido de HadISST1 (RAYNER *et al.*, 2000), una base de datos elaborada por el Hadley Centre. Cubre el período 1881-1998 y contiene medias mensuales sobre una red espacial de $1^\circ \times 1^\circ$; para este trabajo se ha efectuado una interpolación a una red $2^\circ \times 2^\circ$. Finalmente se han empleado datos medios mensuales de presión al nivel del mar (en lo sucesivo SLP), tomados del conjunto global de datos GMSLP del Hadley Centre, con un intervalo de muestreo espacial de 5° en latitud y longitud. La simulación analizada fue llevada a cabo en el marco del experimento SINTEX. En este experimento el modelo atmosférico ECHAM4 (ROECKNER *et al.*, 1995) fue acoplado al modelo oceánico ORCA (MADEC *et al.*, 1998). Este modelo simula bien la variabilidad de los océanos tropicales (GUALDI *et al.*, 2002; CABOS NARVÁEZ *et al.*, 2002). Para este estudio se usan los últimos 100 años de la simulación, ya que durante este período el modelo se ha ajustado casi completamente.

Para analizar las distintas variables físicas se han utilizado índices definidos en distintas regiones clave de África y América tropicales. Estos índices se calculan promediando la magnitud física bajo examen sobre cada una de las regiones. En África hemos tomado el índice de Sahel (de ahora en adelante SH), dado por el promedio en (20°O, 10°E)-(8°N, 20°N). Más al sur definimos otro índice que engloba la costa norte del golfo de Guinea (de ahora en adelante GC), sobre la región delimitada por (20°O, 10°E)-(4°N, 8°N). En América del Sur, analizaremos el índice del Nordeste (de ahora en adelante NE), para el cuál hemos tomado la región (50°O, 35°O)-(10°S, 0°N), que cubre la región del Nordeste brasileño.

En la figura 1 están representadas las climatologías de los índices de precipitación para las observaciones y el modelo en cada una de las regiones de interés. Se puede ver que el modelo reproduce aceptablemente bien la climatología de las observaciones, en particular en lo relativo a su marcha estacional en las regiones de interés; la magnitud de las precipitaciones está sobreestimada en la mayor parte de los casos, con la excepción de la primavera en el Nordeste de Brasil.

La variabilidad oceánica en el Atlántico Ecuatorial se caracteriza a través de un índice que se obtiene promediando las anomalías de SST en el Golfo de Guinea (de ahora en adelante GG) que cubre la región (20°O, 10°E)-(10°S, 5°N)

Para identificar los patrones físicos que determinan la influencia de las SST en GG primero hemos hallado las correlaciones entre el índice GG para las SST y los índices de anomalías de precipitación en las distintas regiones. Las correlaciones se calculan del siguiente modo: Para las anomalías de precipitación hemos separado el índice por estaciones: Enero- Febrero-Marzo (EFM), Abril-Mayo-Junio (AMJ), etc., construyendo nuevos índices con la media de las anomalías en cada estación, obteniendo un valor para cada año. De esa manera se generan 4 nuevos índices en cada una de las regiones de interés. Del índice GG de SST hemos generado 12 nuevos índices, promediando 3 meses consecutivos, tomando como inicial cada uno de los 12 meses del año, de manera que el primer índice se obtiene promediando Enero, Febrero y Marzo de cada año y el último promediando Diciembre, Enero y Febrero (estos dos últimos meses son del siguiente año). Las correlaciones se calculan entre estos 12 índices y los 4 índices obtenidos en cada una de las regiones.

Con ayuda de estas correlaciones hemos podido identificar los meses para los que las anomalías de SST están más correlacionadas con las anomalías de precipitación. Esto nos permitirá identificar los patrones de temperatura y presión que más influyen sobre las precipitaciones en cada una de las regiones estudiadas.

3. RESULTADOS

En la figura 2 se representan las correlaciones entre los índices GG y NE para el modelo y las observaciones para las estaciones Enero, Febrero y Marzo (EFM) y Octubre, Noviembre y Diciembre (OND). Estos dos períodos están incluidos dentro del período de lluvias en el Nordeste. En el eje de las X se representa el primer mes de cada uno de los grupos de tres meses. Por ejemplo, JAN-1 representa la correlación entre el grupo de tres meses que comienza en enero el año anterior al de la estación de las precipitaciones y APR 0 la correlación entre el índice de precipitación y el grupo de 3 meses que comienza en Abril del mismo año.

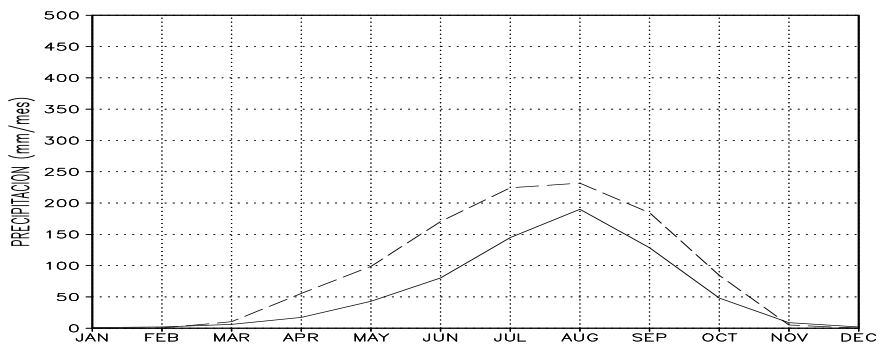
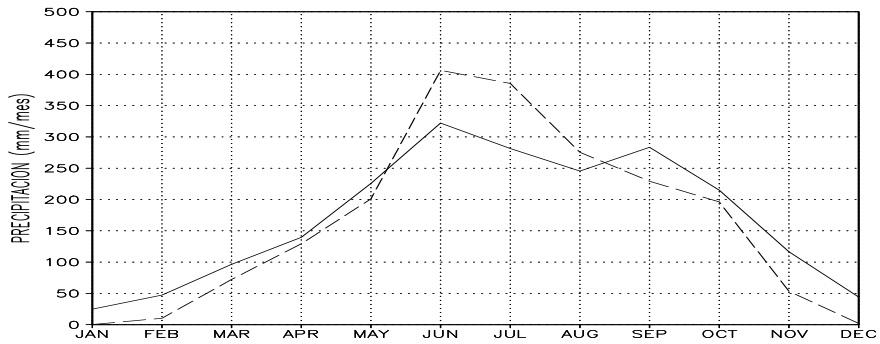
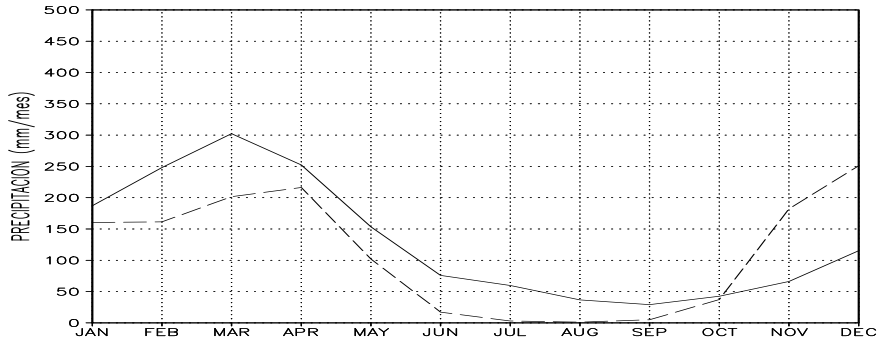


Figura 1: Climatología de la precipitación en las regiones NE (arriba), GG (medio) y SH (abajo) para las observaciones (línea continua) y la simulación con ECHAM4-ORCA (línea discontinua).

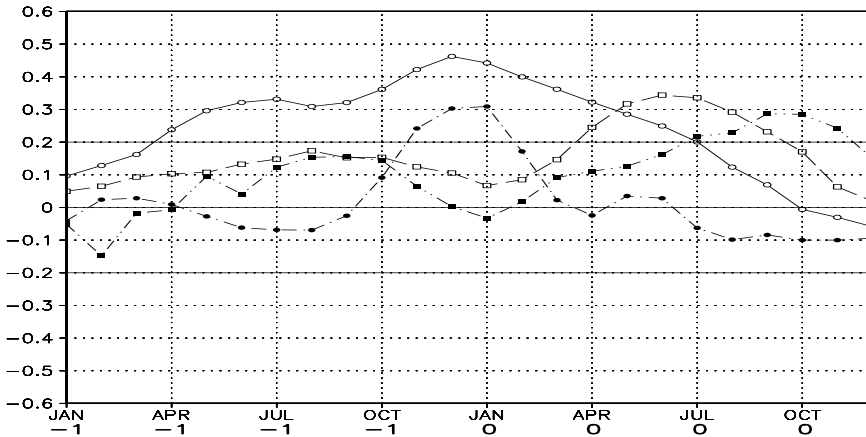


Figura 2: Correlaciones entre el índice oceánico GG y el índice de precipitaciones NE: línea continua-círculos vacíos: precipitaciones observadas en EFM; punto-línea-círculos llenos: precipitaciones simuladas en EFM; línea discontinua-cuadrados vacíos: precipitaciones observadas en OND; línea-punto-punto-cuadrado llenos: precipitaciones simuladas en OND.

Podemos ver que para EFM, tanto en el modelo como en las observaciones, los valores de correlación más altos se obtienen para los periodos entre NOV-1 y JAN 0. En el modelo el máximo se obtiene para JAN 0, lo cual parece indicar que las precipitaciones en el Nordeste en EFM son más afectadas por las anomalías de SST en GG que tienen lugar en la misma estación. En el caso de las observaciones, el máximo se alcanza para DEC-1, indicando que posiblemente aquí las precipitaciones están más relacionadas con las anomalías de SST un mes antes. Para OND los resultados son distintos. La correlación en las observaciones es máxima cuando la separación es casi de dos estaciones, en tanto que en el modelo se observa el mismo comportamiento que para la lluvias en EFM.

Hemos investigado cuáles son las distribuciones espaciales de anomalías de SST en el Atlántico Tropical que están vinculadas a las correlaciones descritas entre el índice oceánico GG y el de precipitaciones NE. Así, la figura 3 muestra la estructura de SST obtenida para la estación EFM promediando sobre todas las estaciones EFM a lo largo del registro cuya pluviosidad en NE se halla por encima de la desviación estándar de este índice. El campo de anomalías de SST resultante concuerda con el sugerido en estudios previos en relación con las lluvias en NE (Hastenrath y Seller, 1977), con anomalías cálidas al sur del ecuador hasta 20°S, especialmente intensas en el Golfo de Guinea, y frías al norte entre 5°N y 15°N. Para los años secos (es decir, con anomalías negativas de precipitación en el índice NE en la estación de EFM de magnitud superior a la desviación estándar), la distribución de SST media en EFM del mismo año es prácticamente la anterior cambiada de signo. Se han efectuado los mismos cálculos con las precipitaciones en NE y las

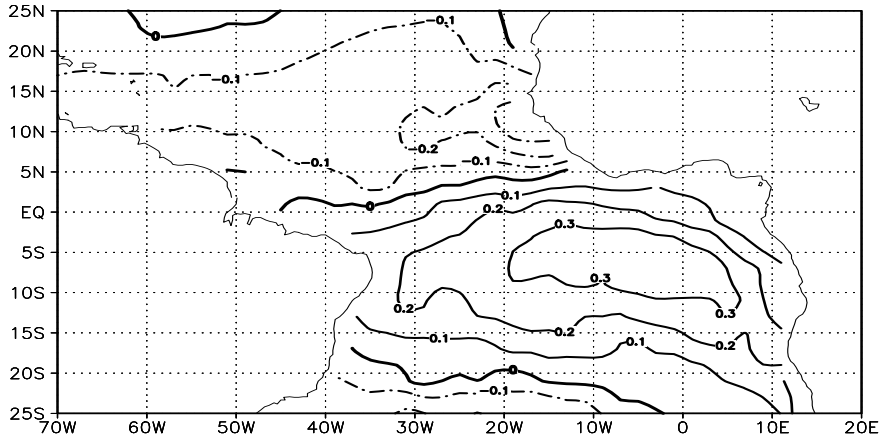


Figura 3: Anomalías observadas de SST ($^{\circ}\text{C}$) en el Atlántico tropical en la estación EFM asociadas a estaciones EFM lluviosas en NE.

anomalías de SST en la simulación para verificar que la conexión entre ellas se establece por las mismas vías que en las observaciones. Las diferencias entre la figura 4, que muestra la estructura de anomalías de SST en EFM asociada a estaciones EFM lluviosas en el índice NE simulado, y la figura 3 ponen de manifiesto que esto no es así, en lo que abundan las discrepancias entre los campos asociados de anomalías de presión al nivel del mar (en lo sucesivo SLP) observados y simulados (figura 5). Estos últimos sugieren que en el modelo podría estar primando, de un modo poco realista, el efecto de la intensificación de los alisios del sudeste que dominan sobre Brasil durante el verano austral.

Para la región de GC se observa que el período con precipitaciones se extiende entre Mayo y Octubre-Noviembre, tanto en las observaciones como en el modelo, aunque la magnitud de las precipitaciones es algo superior en el modelo. El análisis de las correlaciones indica que para las anomalías de precipitación en Julio, Agosto y Septiembre (JAS), en el modelo y las observaciones la correlación es máxima para JUL 0 y JUN 0 respectivamente. La distribución de SST asociada muestra, tanto en la estación JJA como en la JAS, que un intenso calentamiento (enfriamiento) de las aguas del Golfo de Guinea se vincula con una estación JAS particularmente lluviosa (seca) en GC, ocupado por anomalías negativas (positivas) de SLP en tal situación. Este comportamiento es esencialmente el que también muestra la simulación, al menos en lo relativo a la región de interés, con notables diferencias fuera de ella. Las precipitaciones en Abril, Mayo y Junio (AMJ) en GC y el índice oceánico GG muestran correlaciones negativas significativas. En estos meses las precipitaciones climatológicas se están recuperando de la sequía de Noviembre-Abril. Las anomalías de SST asociadas a estaciones AMJ secas (figura 6) en las observaciones poseen una estructura dipolar, con valores positivos al sur de una frontera con orientación nordeste desde el ecuador en la costa americana a 5°N en la de África, y valores negativos al sur de la misma. El modelo reproduce

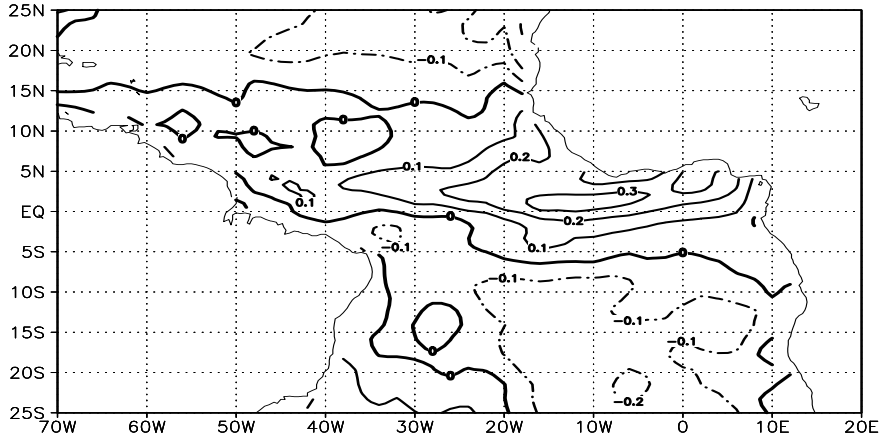


Figura 4: Anomalías de SST (°C) simuladas con ECHAM4-ORCA en el Atlántico tropical en la estación EFM asociadas a estaciones EFM lluviosas en NE.

parcialmente esta situación, con las anomalías negativas de SST más concentradas en la costa de África del Norte; su aparición en el modelo parece confirmar, en cualquier caso, que tales anomalías negativas forman parte importante del mecanismo que afecta a la pluviosidad en AMJ en el área GC. En el caso de los años lluviosos, las anomalías de SST simuladas presentan básicamente la distribución anterior con signo opuesto, lo que contrasta con lo que revelan las observaciones: en ellas, las anomalías de SST ligadas a estaciones AMJ lluviosas en GC son débiles y con escasa estructura espacial. Sugiere esto que mientras en el modelo el vínculo entre SST y precipitación en AMJ en la región GC actúa en ambos sentidos, en las observaciones sólo lo hace para generar una menor pluviosidad; debe existir en la realidad un factor limitante en el caso contrario que no está bien representado en la simulación.

Para el Sahel sólo se encuentran correlaciones significativas entre precipitaciones y SST en la estación AMJ, y son negativas. Durante esta estación, la climatología de las lluvias en el Sahel también se encuentra en fase de recuperación (ver figura 1). La distribución de anomalías de SST vinculada a un aumento de las lluvias en el Sahel en este momento del ciclo anual es muy parecida a la descrita en el párrafo anterior con relación a la influencia de la SST sobre la pluviosidad en GC durante AMJ. Se repite la estructura dipolar, de manera que anomalías frías (cálidas) en el norte y cálidas (frías) en el sur se asocian a un descenso (aumento) de las precipitaciones en SH en AMJ. En este caso sí aparece la misma distribución de anomalías de SST, con la salvedad del signo, relacionada bien con un aumento, bien con un descenso en la precipitación.

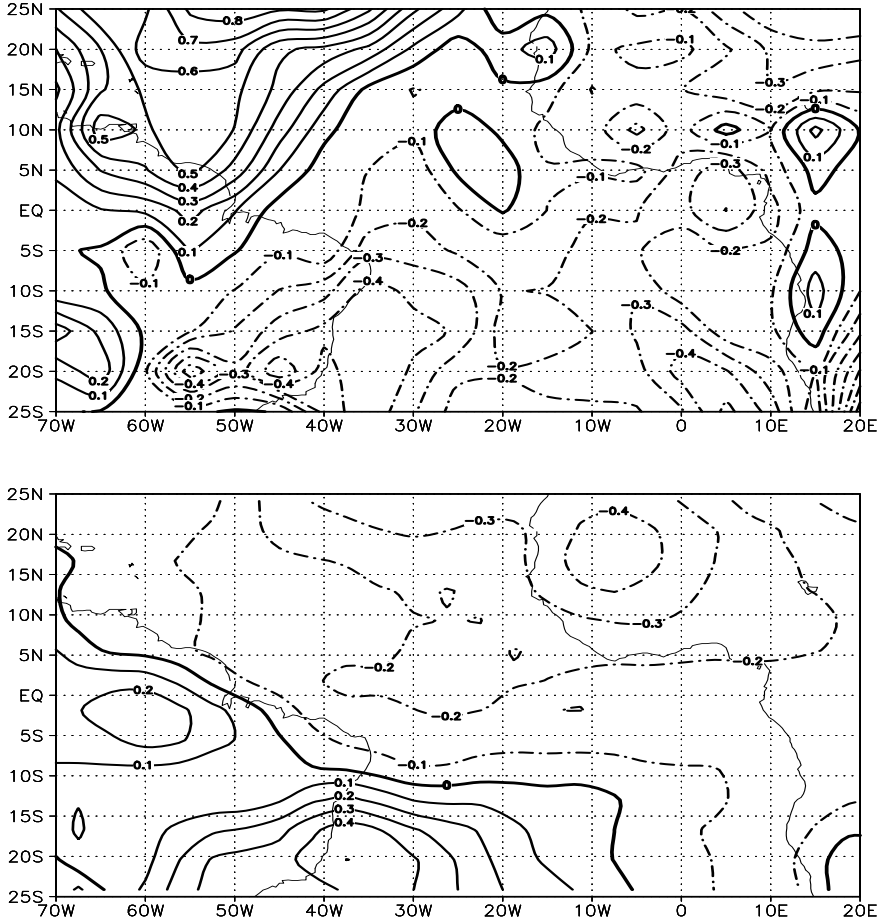


Figura 5: Anomalías de SLP (hPa) en el Atlántico tropical en la estación EFM asociadas a estaciones EFM lluviosas en NE: (arriba) observaciones; (abajo) simulación con ECHAM4-ORCA.

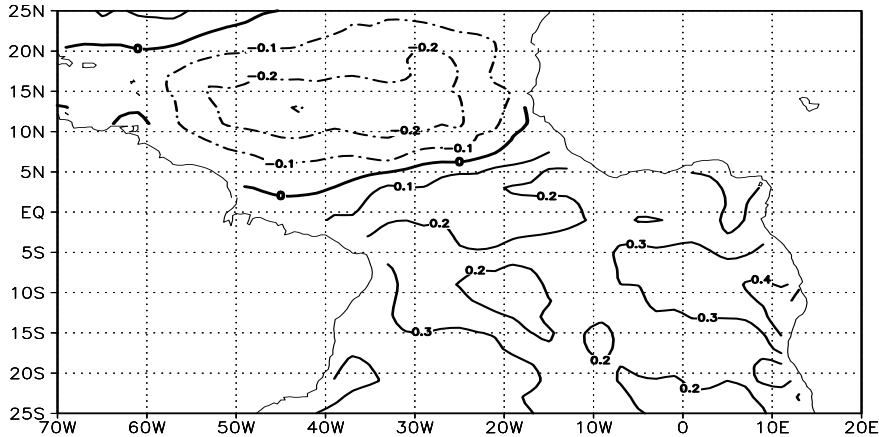


Figura 6: Anomalías observadas de SST (°C) en el Atlántico tropical en la estación AMJ asociadas a estaciones AMJ secas en GG.

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha investigado la conexión entre las anomalías de SST en la cuenca atlántica tropical y las precipitaciones en tres regiones de particular interés: el Golfo de Guinea (representado por el índice GG), el Sahel (índice SH) y el Nordeste brasileño (índice NE). Se han encontrado correlaciones significativas entre ellos y el índice oceánico GG, que representa la evolución de la SST en el Atlántico ecuatorial. Estas correlaciones significativas nos conducen a un vínculo entre determinados patrones de SST en el océano Atlántico tropical y la ocurrencia de estaciones anormalmente lluviosas o secas en las áreas bajo estudio, lo que supone la existencia de un potencial predictivo en tanto en cuanto las anomalías de SST en el Atlántico tropical son susceptibles de ser anticipadas tanto mediante técnicas estadísticas como a través de modelos numéricos de distinta complejidad. En particular, el modelo analizado en este trabajo ha demostrado que puede reproducir características de la variabilidad observada, lo que podría indicar cierto potencial predictivo. Detalles de los mecanismos físicos implicados en los resultados obtenidos, así como la exploración del potencial predictivo del modelo serán estudiados en trabajos futuros.

5. REFERENCIAS

- CABOS NARVAEZ, W., ALVAREZ GARCÍA, F. y ORTIZ BEVIÁ, M.J. (2002): Scale interactions in the tropical Atlantic Variability Simulated with a coupled GCM. *Ann. Geofis.*, en prensa.
- ELLIOTT, J.R., JEWSON, S.P. y SUTTON, R.T. (2001) The Impact of the 1997/98 El Niño event on the Atlantic Ocean. *J. Climate*, 14, pp. 1069-1077.

- FOLLAND, B., OWEN, J.A., WARD, M.N. y COLEMAN, A.W. (1991): Prediction of seasonal rainfall in the Sahel region of Africa using empirical and dynamical methods. *J. Forecasting*, 10, pp. 21-56.
- FOLLAND, C.K., PALMER, T. y PARKER, D. (1986): Sahel rainfall and worldwide sea temperatures: 1901-85. *Nature*, 320, pp. 602-606.
- GUALDI, S., NAVARRA, A., GUILYARDI, E. y DELECLUSE, P. (2002): Assessment of the Tropical Indo-Pacific Climate in the SINTEX CGCM. *Ann. Geofis.*, en prensa.
- HASTENRATH, S. y GREISCHAR, L. (1993): Further work on the prediction of northeast Brazil rainfall anomalies. *J. Climate*, 6, pp. 743-758.
- HASTENRATH, S. y HELLER, L. (1977): Dynamics of climatic hazards in Northeast Brazil. *Quartely Journal of the Royal Meteorological Society*, 103(435), pp. 77-92.
- LAMB, H.H. y PEPLER, R.A. (1987): North Atlantic Oscillation. Concept and application. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 68, pp. 1218-1225.
- LAMB, P.J. (1978): Case studies of Tropical Atlantic surface circulation patterns during recent sub-Saharan weather anomalies: 1967 and 1968. *Mont. Wea. Rev.*, 106, pp. 482-491.
- MADEC, G., DELECLUSE, P., IMBARD, M. y LÉVY, C. (1998): *OPA 8.1 Ocean General Circulation Model reference manual*. Note du Pôle de modélisation. Institut Pierre-Simon Laplace, N°11, 91 pp.
- NICHOLSON, S. (1997): An Analysis of the ENSO Signal in the Tropical Atlantic and Western Indian Oceans. *International Journal of Climatology*, 17, pp. 345-375.
- NOBRE, P. y SHUKLA, J. (1996): Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical Atlantic and South America. *J. Climate*, 9, pp. 2464-2479.
- RUIZ DE ELVIRA, A., ORTIZ BEVIÁ, M.J. y CABOS NARVAEZ, W. (2000): Empirical forecasts of tropical Atlantic sea surface temperature anomalies. *Quartely Journal of the Royal Meteorological Society*, 126, pp. 2199-2210.
- ROECKNER, E., ARPE, K., BENGTTSSON, L., CHRISTOPH, M., CLAUSSEN, M., DÜMENIL, L., ESCH, M., GIORGETTA, M., SCHLESE, U. y SCHULZWEIDA, U. (1996): *The atmospheric general circulation model ECHAM-4: model description and simulation of present-day climate*. Max-Planck Institute for Meteorology, Report No.218, Hamburg, Germany, 90 pp.