

Eventos Cálidos y Fríos en el Atlántico Tropical Sur

ERIC J. ALFARO¹ · FRANCISCO J. SOLEY

¹Centro de Investigaciones Geofísicas, Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología y DFAOP-Escuela de Física, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica

²Centro de Investigaciones Geofísicas y DFAOP-Escuela de Física, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica

(Recibido el 3 de noviembre de 1999, aceptado el 30 de noviembre de 1999)

ABSTRACT

The warm and cold events in the Tropical South Atlantic (2° N – 22° S, 35° W – 15° E) region are quantified using sea surface temperature (SST) normalized indices. This oceanic region had shown some influence on the precipitation of the Costa Rica's Caribbean Slope. A warm (cold) event was defined if the 5-month running mean index was above (below) the fourth (second) quintile for six or more months. As in the Tropical North Atlantic, the event occurrence was non-periodic and the durations showed great variability. Cold events occur 37% of the time and cold events occur 15% of the time. It was not noticed any preferential semester for the begin or end for both cold and warm events.

1. Introducción

En un trabajo reciente, Alfaro (2000) definió la duración temporal, en meses, de los eventos fríos y cálidos en la región del Atlántico Tropical Norte (ATN, 6-22° N, 15-80° W), basado en la metodología propuesta por Trenberth (1997) y Mora y Amador (1999), que cuantifican la duración temporal en meses de los eventos fríos y cálidos del fenómeno conocido como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). El objetivo de este estudio es el de estimar la duración temporal, en meses, de los eventos cálidos y fríos en la región del Atlántico Tropical Sur (ATS, 2° N – 22° S, 35° W – 15° E), haciendo uso de datos de Temperatura Superficial del Mar o TSM.

La importancia de esta estimación radica en que esta región oceánica mostró tener una influencia, a través de correlaciones negativas, sobre el régimen de precipitación de la Vertiente Caribe de Costa Rica (Alfaro y Cid, 1999). Detectar y analizar los predictores de la precipitación en la región del Caribe costarricense es clave para la economía del país, debido a que situaciones de mal tiempo inhabilitan el uso de sus vías de comunicación, tanto marítimas como terrestres, vitales en la importación y exportación de productos. También, en esta región se cultiva banano, uno de los principales productos de exportación de Costa Rica y es una zona altamente explotada por el sector turístico, por lo

que situaciones de tiempo severo afectan estas dos actividades.

Además de lo anterior, la estimación de estos eventos permite cuantificar la variación interanual del ATS (Philander, 1990), que está relacionada con campos de precipitación sobre el subcontinente suramericano, específicamente el Nordeste Brasileño (Uvo et al., 1998; Enfield, 1996) y con el Sahel en el continente africano (Lough, 1986). Por último, permite la comparación con otros estudios hechos en esta zona oceánica (e.g. Carton y Huang, 1994).

2. Datos y Metodología

2.1 Índices Oceánicos

El área oceánica utilizada para la construcción del índice de TSM del Atlántico Tropical Sur fue la misma usada por Enfield (1996), definida entre los 2° N - 22° S y los 35° W - 15° E (ver Fig. 1a). El índice fue calculado como la anomalía estandarizada del promedio de los puntos de la rejilla dentro del área geográfica antes descrita. En este trabajo se utilizaron y compararon dos versiones del mismo índice. La primera es la de Smith et al. (1996) y la segunda es la de Kaplan et al. (1998). Ambas versiones de estos índices están ampliamente descritas en Alfaro (2000). De

¹ Corresponding author address: Dr. Eric J. Alfaro
Escuela de Física, Universidad de Costa Rica
2060- San José, Costa Rica.
E-mail:ejalfaro@cariari.ucr.ac.cr

aquí en adelante estas series de tiempo serán referidas como ATSS y ATSK respectivamente. Ambas versiones de los índices fueron obtenidas del Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory (AOML), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) de los Estados Unidos de América.

El período disponible para la serie ATSS comprendió entre enero de 1950 y abril de 1997 y para la serie ATSK comprendió entre enero de 1856 y diciembre de 1991.

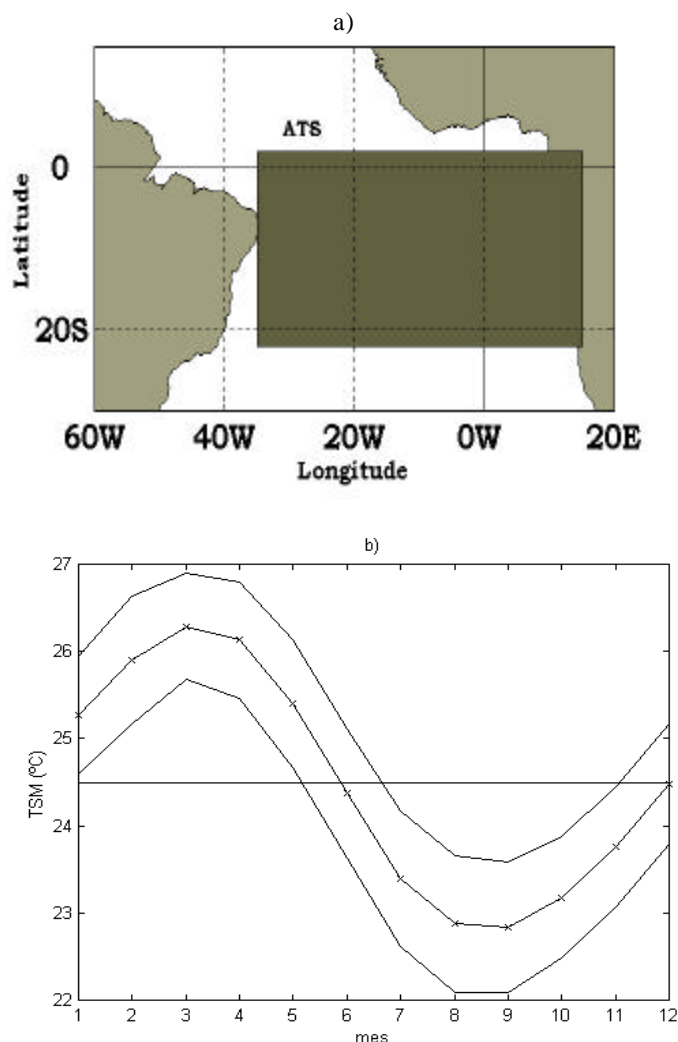


Figura 1. a) Área oceánica usada para la construcción del índice ATS. b) Ciclo anual (línea con cruces) de la región del índice ATS. Las bandas representan una desviación estándar y la línea horizontal el promedio anual.

2.2 Metodología

Como primer paso se procedió al análisis exploratorio de los datos, para corregir posibles tendencias y puntos atípicos. Luego, las series de tiempo fueron suavizadas con un promedio móvil triangular de 5 meses (Soley, 1994) y se les calculó los quintiles a ambas series. Se

definió como evento frío (cálido) a aquellos períodos mayores o iguales a seis meses en los que dichos promedios móviles fueran inferiores (superiores) a los valores del segundo (cuarto) quintil, lo que permite una estimación robusta de dichos períodos (Graedel y Kleiner, 1985).

Por último, el análisis en el dominio de la frecuencia se realizó en dos partes. Primero, se supuso una serie estacionaria y se analizó el periodograma de las series para detectar alguna posible periodicidad estadísticamente significativa y segundo, se realizó un análisis de ondas (wavelets en inglés) para ver el comportamiento de las frecuencias en el tiempo asumiendo no estacionariedad. La onda usada fue la de Morlet descrita por Torrence y Compo (1998) y Lau y Weng (1995), los cuales la aplicaron a series de TSM en las áreas de Niño3 y del Hemisferio Norte, respectivamente. Para efectos de comparación, el análisis de ondas se realizó además para las series del Atlántico Tropical Norte descritas en Alfaro (2000).

3. Resultados

Ambas series, ATSS y ATSK, presentaron una tendencia lineal positiva significativa al 95 % de 0.013 y 0.004 $^{\circ}\text{C mes}^{-1}$ respectivamente, la cual fue sustraída. La tendencia encontrada en ambas series de TSM es consistente con el calentamiento global mostrado por Mann (1999) para la temperatura superficial del aire del período 1856-1998.

La correlación entre ambas series de TSM en su período común (del 01/1950 al 12/1991) fue de 0.97, lo que denota buena coherencia entre ellas. En la Figura 1b, se presenta el ciclo anual de la serie ATSS (el de la serie ATSK es idéntico). Esta región presenta un promedio anual de 24.5 $^{\circ}\text{C}$ y sigue el ciclo solar de acuerdo a los equinoccios de primavera y otoño austral, pues presenta un máximo durante el mes de marzo y un mínimo durante el de septiembre.

Para ilustrar el método, en la Figura 2, se muestra la serie de tiempo del ATSK con los respectivos límites de los quintiles usados. Nótese que aunque hay períodos que sobrepasan los valores del segundo y cuarto quintil con valores similares a los de los eventos fríos y cálidos, estos fueron por períodos menores a seis meses.

La duración de los eventos fríos y cálidos de ambas series se detallan en las Tablas 1 y 2. No se encontró diferencia, estadísticamente significativa al 95%, entre la duración promedio de los eventos fríos y cálidos para una misma serie, ni entre la duración promedio de un evento, ya sea cálido o frío, entre las dos series. Lo anterior indica que, en promedio, la duración de estos eventos es igual estadísticamente. Del período total de estudio, los eventos fríos ocuparon un 37% para la serie ATSK y un 36% para la serie ATSS y los eventos cálidos ocuparon un 17% para la serie ATSK y un 14% para la serie ATSS. Nótese que para ambas series, se encontró una mayor cantidad de eventos fríos con respecto a los eventos cálidos, debido principalmente a que los primeros se mostraron más estables en el tiempo.

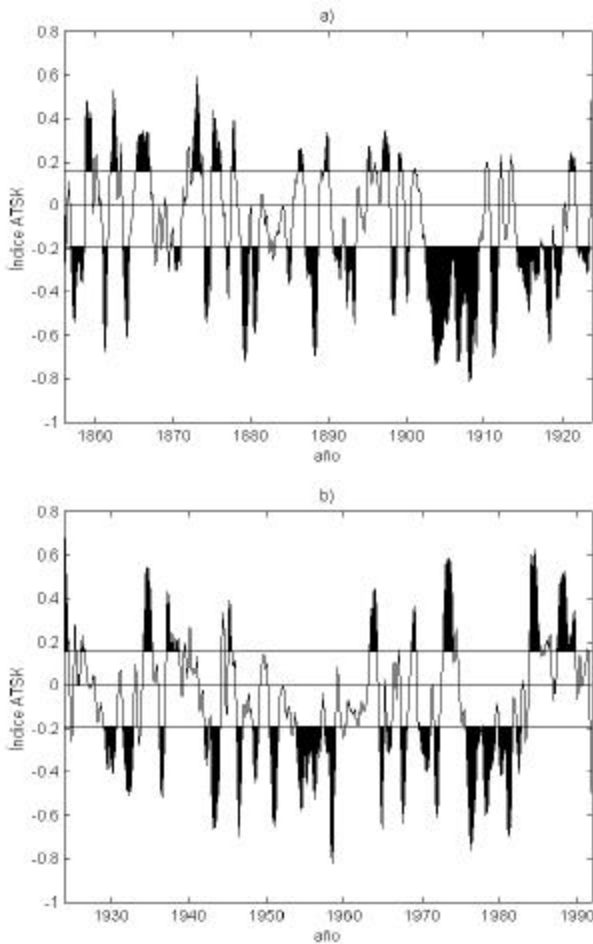


Figura 2. Índice ATSK, suavizado con una media móvil de 5 meses, para el período a) 01/1856-01/1924 y b) 02/1924-12/1991. Las líneas horizontales superior e inferior representan el valor del límite entre el cuarto y quinto quintiles y entre el primero y segundo quintiles respectivamente. Las áreas sombreadas representan los eventos cálidos y fríos.

Para ambas series, no se presentó una fecha más probable de inicio de los eventos fríos o cálidos, las cuales más bien tuvieron carácter aleatorio. Este resultado contrasta con el de Alfaro (2000) que sí encuentra cierto sesgo para los eventos fríos y cálidos del ATN al empezar durante el semestre de diciembre a mayo y en finalizar durante el semestre de junio a noviembre. Además no se encontró ninguna sucesión de eventos entre las zonas del ATN y ATS.

Durante los años 1950, 1954, 1955, 1958, 1964, 1969, 1970, 1971, 1976, 1978 y 1980, los cuales coinciden con eventos fríos en alguna de las dos series, se produjeron en el Atlántico Tropical Norte más ciclones tropicales que el promedio de 9.8 ciclones por año del período 1949-1996 (Banichevich y Lizano, 1998), mientras que durante los años 1962, 1963, 1968, 1972, 1973 y 1987, los cuales coinciden con eventos cálidos, se produjeron menos ciclones tropicales que el promedio. Esto podría estar relacionado con lo

descrito por Uvo et al. (1998), los cuales sugieren un corrimiento hacia el Sur (Norte) de la Zona de Convergencia Inter-Tropical (ZCIT) durante los eventos cálidos (fríos) en la región del ATS. Esto afectaría la estabilidad atmosférica en la región del ATN aumentándola (disminuyéndola). Esta relación es muy importante para Costa Rica, ya que según Alfaro (1993), los ciclones tropicales del Atlántico son muchas veces productores de mal tiempo en el país.

En la Figura 3 se presenta el periodograma de ambas series en donde no se nota ninguna periodicidad importante que destacar, ajustándose bien a la prueba de AR(1) del ruido rojo con coeficiente $\Phi_1 = 0.97$ para ambas series (Soley, 1988; 1987).

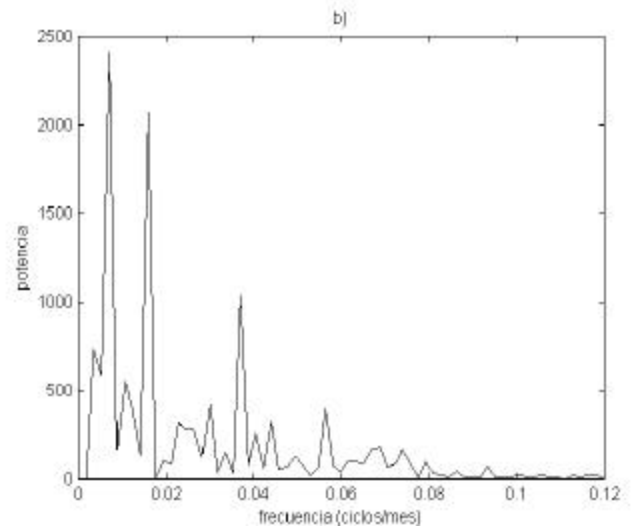


Figura 3. Periodograma de la serie a) ATSK y b) ATSS.

Por último, de la Figura 4a, se nota que la mayor parte de la energía en el espectro de ondata del ATSS esta concentrada entre períodos de 8 y 18 años durante los años 1965 y 1992, con un máximo secundario alrededor del período de 5 años en la primera mitad de la década de los años 70. La forma de esta figura es bastante similar a la presentada por Lau y Weng (1995), pero para las anomalías de TSM del Hemisferio Norte y en períodos entre los 32 y 64 años. Por su parte la serie del ATSK (Fig. 4b) mostró que la mayor parte de la energía se concentra entre los períodos de 50 a 70 años, prácticamente durante toda la serie. Se nota también un dominio de frecuencias con períodos de aproximadamente 11 años entre 1900 y 1940. Además en su extremo inferior izquierdo reproduce el patrón de la Figura 4a, lo que confirma la buena coherencia entre ellas. La Figura 5a del ATNK (índice del Atlántico Tropical Norte, a partir del conjunto de datos de Kaplan et al. (1998)), es bastante similar en términos generales a la del ATSK, ella presentó una oscilación bastante fuerte de 128 meses durante los períodos 1870-1890 y 1970-1980, ausente en el resto de la serie. Por su parte, la serie del ATNS (índice del Atlántico Tropical Norte, a partir del conjunto de datos de Smith et al.

(1996)) concentra su máximo de energía en períodos de 8 a 13 años de 1965 a 1992, en forma análoga con el ATSS. Este comportamiento de predominio de frecuencias bajas, es reproducido por los espectros de Fourier discutidos en el párrafo anterior (Fig. 3).

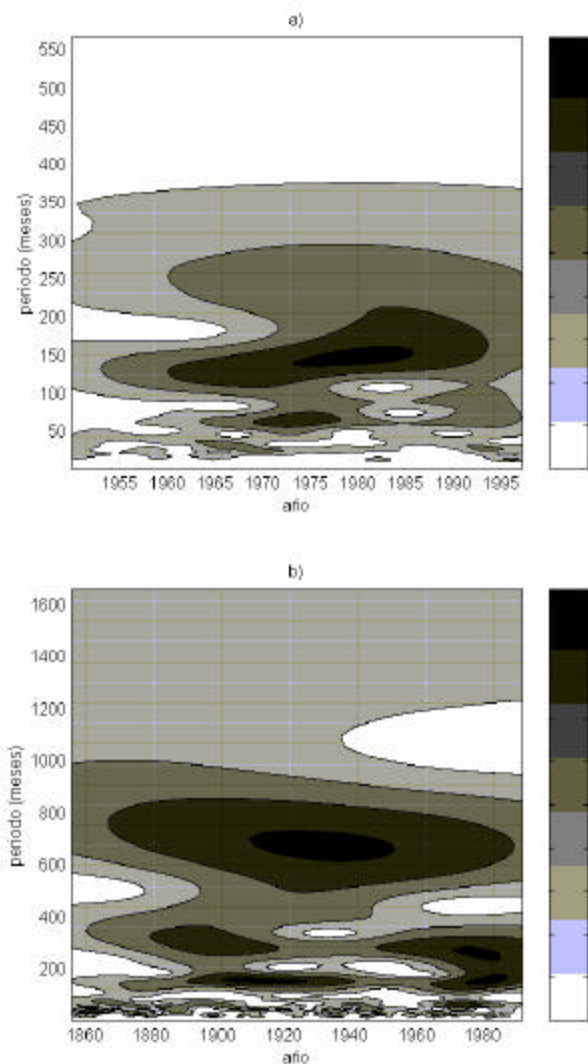


Figura 4. Espectro de ondas para la serie a) ATNS y b) ATNK.

4. Discusión y Conclusiones

Por medio de un análisis estadístico sencillo se pudo determinar la ocurrencia y duración de los eventos cálidos y fríos en el región del ATS, que ayudó a completar la descripción de la variación interanual del océano Atlántico Tropical. La ocurrencia de estos eventos mostró ser un fenómeno aperiódico (Figs. 2, 3 y 4) y la duración de los mismos presentó una gran variabilidad (Tablas 1 y 2).

Los eventos cálidos de los años 1963, 1968, 1973, 1984, 1987 y 1988 coinciden con los propuestos en el análisis de Carton y Huang (1994), los cuales usaron el

área oceánica comprendida entre los 2° N-6° S y 20° W-10° E para la producción de su índice. Únicamente se apartan de

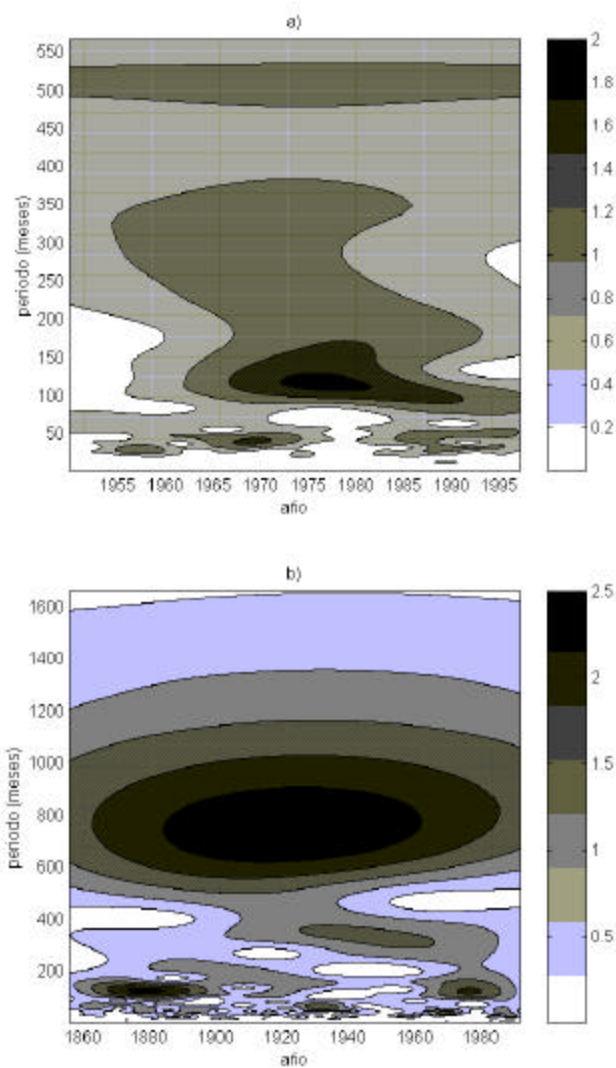


Figura 5. Espectro de ondas para la serie a) ATNS y b) ATNK.

este comportamiento los eventos por ellos definidos para los años de 1963, 1981 y parcialmente el de 1974. Las pequeñas diferencias se deben principalmente a que ellos usan un criterio menos riguroso en la definición de su evento. También está presente de las Tablas 1 y 2 el año 1984 como evento cálido (Carton y Huang, 1994; Mechoso y Lyons, 1988; Philander, 1990), lo cual confirma lo propuesto por Alfaro (2000), que lo ubicaba en una región más austral que la del ATN.

Uvo et al. (1998) postula que el principal mecanismo de relación entre los eventos cálidos y fríos en el ATS y la precipitación en Suramérica, específicamente en el Nordeste Brasileño, es la posición latitudinal de la ZCIT, la cual toma una posición mas al sur (norte) durante eventos cálidos (fríos) del ATS, que a su vez está asociada con

anomalías positivas (negativas) de precipitación; en concordancia con esto, Mechoso y Lyons (1988) encontraron

Eventos Fríos		Eventos Cálidos	
Período, Mes (Año)	Duración (meses)	Período, Mes (Año)	Duración (meses)
Dic(1857)-May(1858)	18	Sep(1858)-Jun(1859)	10
Dic(1861)-Jul(1861)	8	Nov(1861)-Sep(1862)	11
Ago(1863)-Abr(1864)	9	Abr(1865)-Dic(1866)	21
Feb(1870)-Nov(1870)	10	Jul(1872)-Jun(1873)	12
Feb(1874)-Nov(1874)	10	Feb(1875)-Ene(1876)	12
Oct(1876)-Mar(1877)	6	Jul(1877)-Dic(1877)	6
Oct(1878)-Sep(1879)	12 [▼]	Ene(1886)-Sep(1886)	8
Mar(1880)-Dic(1880)	10 [▲]	Jun(1889)-Ene(1890)	8
Jul(1884)-Feb(1885)	8	Dic(1894)-May(1895)	6 [▼]
Ene(1887)-Ago(1888)	20	Nov(1896)-Oct(1897)	12 [▲]
Sep(1890)-Sep(1891)	13 [▼]	Ene(1899)-Jun(1899)	6
Mar(1892)-Jul(1893)	16 [▲]	Dic(1920)-Sep(1921)	10
Ene(1898)-Sep(1898)	9	Oct(1923)-Jul(1924) +	10
Dic(1899)-May(1900)	6	Feb(1926)-Ago(1926) +	7
Jun(1902)-May(1909) +	84	Abr(1934)-Abr(1935)	13
Oct(1910)-Oct(1911) +	13	Ene(1937)-Sep(1938)	21
Abr(1914)-Mar(1917) +	36 [▼]	Ene(1945)-Jun(1945)	6
Sep(1917)-Oct(1918)	14 [◄]	Abr(1963)-Mar(1964) +	12
Feb(1919)-Dic(1919)	11 [▲]	Sep(1968)-Abr(1969) +	8
Feb(1922)-Jun(1923) +	17	Sep(1972)-Ene(1974) +	17
Ene(1929)-Ago(1930) +	19	Nov(1983)-Abr(1985)	18
Jul(1931)-	17	Dic(1985)-	9

Tabla 1. Eventos cálidos y fríos en la región del ATS, definidos a partir del índice ATSK, para el período 01/1856-12/1991. Las flechas se usan para denotar eventos consecutivos en los cuales el índice no cambió de signo. Los eventos marcados con + concuerdan con eventos del mismo signo en la región del Niño 3.

además la aparición de patrones de convergencia en superficie sobre la costa ecuatorial brasileña durante un evento cálido en el ATS. Esta misma relación fue encontrada por Enfield (1996) el cual además la cuantificó al usar como uno de sus índices la posición latitudinal de la ZCIT en el Atlántico. Enfield también encuentra una relación entre las anomalías en el ATS y la precipitación cercana a la cuenca del Río de la Plata. Díaz et al. (1998), propone que esta relación podría deberse a un corrimiento de la Zona de Convergencia del Atlántico Sur (ZCAS), la cual actúa en un ciclo de retroalimentación con la convergencia en superficie

de la Corriente Cálida de Brasil y la Corriente Fría de las Malvinas.

No se encontró ninguna relación estadística entre los eventos del ATS y aquellos del ATN descritos por Alfaro (2000), por lo que este estudio confirma lo sugerido por Enfield y Mayer (1997), los cuales postulan la variación

Eventos Fríos	Duración (meses)	Eventos Cálidos	Duración (meses)
Período, Mes (Año)		Período, Mes (Año)	
Sep(1950)-May(1951) +	9	Abr(1962)-Oct(1962)	7 [▼]
Ene(1954)-Sep(1954) +	9	Feb(1963)-Mar(1964) +	14 [▲]
Nov(1955)-Jul(1956) +	9	Sep(1968)-Abr(1969) +	8
Sep(1957)-Nov(1958)	15	Ago(1972)-Ene(1974) +	18
Jul(1964)-Feb(1965) +	8	Dic(1983)-Feb(1985)	15 [▼]
Jul(1965)-Feb(1966)	8	May(1987)-Sep(1988) +	17 [▲]
Abr(1967)-Abr(1968)	13		
Jul(1969)-Dic(1970) +	18		
Ago(1975)-Abr(1979) +	45		
Dic(1979)-Jul(1981)	20		
Feb(1982)-Nov(1982)	10		
Abr(1983)-Sep(1985)	6		
Ago(1991)-Jun(1993)	23		
Jun(1994)-Nov(1994)	6		
Nov(1995)-Abr(1997) * +	6		
Promedio	13.6	promedio	13.2
desv. Est.	10.2	desv. est.	4.6

Tabla 2. Eventos cálidos y fríos en la región del ATS, definidos a partir del índice ATSS, para el período 01/1950-04/1997. Las flechas se usan para denotar eventos consecutivos en los cuales el índice no cambió de signo. El evento marcado con un * no se tomó en cuenta para el cálculo de los estadísticos. Los eventos marcados con + concuerdan con eventos del mismo signo en la región del Niño 3.

interanual del ATS como independiente de aquella del ATN. Por último, a pesar de que hay cierta concordancia entre eventos del mismo signo para las zonas del ATS y aquellos del Niño3 definidos por Trenberth (1997) y Mora y Amador (1999) (ver Tablas 1 y 2), esta no mostró un patrón de causalidad definido.

Agradecimientos

Este trabajo se realizó gracias al apoyo de los proyectos VI-112-99-305, VI-805-94-204 y VI-805-98-506 de la Universidad de Costa Rica. Se agradece al Dr. David Enfield, del AOML de la NOAA, por facilitar los datos de TSM dentro del marco del proyecto CRN-TC³ del IAI. Los espectros de ondas se calcularon con los programas de C. Torrence y G. Compo, que están disponibles en la página <http://paos.colorado.edu/research/wavelets/>.

Resumen

Por medio del uso de índices normalizados de temperatura superficial del mar (TSM), se cuantifican los eventos cálidos y fríos en la región del Atlántico Tropical Sur, definida entre los 2° N - 22° S y los 35° W - 15° E, la cual influye sobre el régimen de precipitación de la Vertiente Caribe de Costa Rica. Se definió como evento cálido (frío) a aquel período de tiempo en el cual el índice de TSM, suavizado con un promedio móvil de cinco meses, permanece por encima (abajo) del cuarto (segundo) quintil por seis o más meses. Al igual que en la región del Atlántico Tropical Norte, la ocurrencia de eventos se mostró como aperiódica y con duraciones de gran variabilidad. Del período total de estudio, los eventos fríos ocuparon en promedio un 37% y los cálidos un 15%. En general, no se notó una fecha preferencial ni para el comienzo ni para el término de eventos cálidos y fríos.

Referencias

- Alfaro, E., 2000. Eventos cálidos y fríos en el Atlántico Tropical Norte. Aceptado en *Atmósfera*, México, en prensa.
- Alfaro, E., 1998. *Influencia de los Océanos Pacífico y Atlántico Tropical sobre los patrones de precipitación en Centroamérica*. Tesis Doctoral, Universidad de Concepción, Concepción, Chile. 111 p.
- Alfaro, E., 1993. *Algunos aspectos del clima en Costa Rica en las últimas décadas y su relación con fenómenos de escala sinóptica y planetaria*. Tesis de Grado, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 75 p.
- Alfaro, E. y L. Cid, 1999. Ajuste de un modelo VARMA para los campos de anomalías de precipitación en Centroamérica y los índices de los océanos Pacífico y Atlántico Tropical. *Atmósfera*, **12**(4), 205-222.
- Banichevich, A. y O. Lizano, 1998. Interconexión a nivel ciclónico-atmosférico entre el Caribe y el Pacífico centroamericanos. *Rev. Biol. Trop.*, **46**(Supl. 5), 9-22.
- Carton, J. and B. Huang, 1994. Warm events in the tropical Atlantic. *J. Phys. Oceanogr.*, **24**, 888-903.
- Díaz, A., C. Studzinski and C. Mechoso, 1998. Relationships between precipitation anomalies in Uruguay and Southern Brazil and sea surface temperature in the Pacific and Atlantic Oceans. *J. Climate*, **11**, 251-271.
- Enfield, D., 1996. Relationships of inter-American rainfall to tropical Atlantic and Pacific SST variability. *Geophys. Res. Lett.*, **23**(23), 3305-3308.
- Kaplan, A., M. Cane, Y. Kushnir, A. Clement, M. Blumenthal, and B. Rajagopalan, 1998. Analyses of global sea surface temperature 1856-1991. *J. Geophys. Res.*, **103**, 18567-18589.
- Enfield, D., and D. Mayer, 1997. Tropical Atlantic sea surface temperature variability and its relation to El Niño-Southern Oscillation. *J. Geophys. Res.*, **102**(C1), 929-945.
- Lau, K. and H. Weng, 1995. Climate signal detection using wavelet transform: How to make a time series sing. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **76**(12), 2391-2402.
- Graedel, T. and B. Kleiner, 1985. Exploratory analysis of atmospheric data. *Probability, Statistics and Decision Making in the Atmospheric Sciences*, A. Murphy y R. Katz, Eds., Westview Press, Inc. Cap. 1, 1-44.
- Lough, J., 1986. Tropical Atlantic sea surface temperature and rainfall variations in Sub-Saharan Africa. *Mon. Wea. Rev.*, **114**, 561-570.
- Mann, M., 1999. Global temperature 1856-1998. *Tiempo Bulletin*, **31**, 25.
- Mechoso, C. and S. Lyons, 1988. On the atmospheric response to SST anomalies associated with the Atlantic warm event during 1984. *J. Climate*, **1**, 422-428.
- Mora, I. y J. Amador, 1999. El chorro de bajo nivel en el oeste del Caribe y su relación con los eventos ENSO durante el período 1982-1994. Enviado a *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, Instituto Meteorológico Nacional, San José, Costa Rica.
- Philander, S. G., 1990. *El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation*. Academic Press, 293 pp.
- Smith, T., R. Reynolds, R. Livezy and D. Stokes, 1996. Reconstruction of historical sea surface temperatures using empirical orthogonal functions. *J. Climate*, **9**, 1403-1420.
- Soley, J., 1994. Suavizamiento de series cronológicas geofísicas con ruido blanco y rojo aditivo. *Rev. Geofísica*, **41**, 33-58.
- Soley, J., 1988. Some statistical significance tests useful in spectral analysis of meteorological time series. *Rev. Geofísica*, **28**, 85-100.
- Soley, J., 1987. Statistical significance of a weak spectral peak using filtering techniques: a case study. *Ciencia y Tecnología*, **11**(1), 5-14.
- Trenberth, K., 1997. The definition of El Niño. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**(12), 2771-2777.
- Torrence, C. and G. Compo, 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **79**(1), 61-78.
- Uvo, C., C. Repelli, S. Zebiak and Y. Kushnir, 1998. The relationships between Tropical Pacific and Atlantic SST and Northeast Brazil monthly precipitation. *J. Climate*, **11**, 551-562.