

DIAGNÓSTICO Y PREDICCIÓN DE EL NIÑO 2002-2003

Lina I. Ceballos y Germán Poveda

Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente

Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín

gpoveda@unalmed.edu.co

Recibido para evaluación: 16 de Junio de 2005 / Aceptación: 25 de Agosto de 2005 / Recibida versión final: 29 de Agosto de 2005.

RESUMEN

Se realiza un diagnóstico de las condiciones climáticas que originaron, mantuvieron y culminaron El Niño 2002-2003. Las primeras señales de calentamiento aparecieron a comienzos del año 2002 y se hicieron evidentes a partir de mayo del mismo año, el evento tuvo su fase pico en noviembre-diciembre de ese año, fecha a partir de la cual comenzó a decaer. Las anomalías se manifestaron tanto en variables oceánicas y atmosféricas como la temperatura superficial del mar, vientos superficiales y profundidad de la termoclina. El evento fue de una intensidad moderada con anomalías de temperatura superficial del mar que no superaron los 2.5°C.

Adicionalmente se presentan los resultados de la predicción de las anomalías de temperatura superficial en las regiones clásicas El Niño utilizando el Modelo Lineal Inverso. Se consideraron varios casos de pronósticos que involucran el mes de inicio de la predicción (3,6,9, y 12 meses antes de la aparición del evento). Los resultados muestran un calentamiento del Pacífico para el caso de 6 meses, sin embargo la amplitud de las anomalías apenas alcanzó los 0.7°C. El caso de 3 meses es crítico pues involucra pronóstico durante la primavera del hemisferio norte (barreara de la predecibilidad), lo cual representa un gran reto para los investigadores pues durante esta época resulta particularmente difícil realizar pronósticos acertados. Para 9 y 12 meses, las deficiencias se atribuyen a la memoria de los procesos involucrados ya que son periodos de tiempo más largos.

PALABRAS CLAVES: El Niño, Temperatura Superficial del Mar, Modelo Lineal Inverso, Componentes Principales.

ABSTRACT

A diagnosis of the climatic conditions which originated, maintained and culminated El Niño 2002-2003 is made. The first signals of heating appeared at the beginning of 2002 and became evident in May of the same year. The event had its peak phase in November-December 2002, when it began to decay. The anomalies were observed in both oceanic and atmospheric variables like the sea surface temperature (SST), surface winds and thermocline depth. The event has a moderate intensity with SST anomalies below 2.5°C.

Additionally the results of the prediction of the SST anomalies on El Niño classic regions using the Linear Inverse Model are show. Several cases of prediction were considered which involve the month of beginning of the prediction (3, 6, 9, and 12 months before the beginning of the event). The results show a heating of the Pacific for the case of 6 months, nevertheless the amplitude of the anomalies were at least 0.7°C. The case of 3 months is critical because it involves prediction during the spring of the North hemisphere (spring barrier predictability), which represents a challenge for the researchers because during this periods is particularly difficult to make accurate predictions of the SST. For 9 and 12 months, the deficiencies are attributed to the memory of the involved processes because there are longer periods of time to make predictions.

KEY WORDS: El Niño, Sea Surface Temperature, Linear Inverse Model, Principal Components.

1. INTRODUCCIÓN

El clima y la hidrología de Colombia son el resultado de la interacción dinámica de fenómenos que ocurren en los océanos Pacífico y Atlántico, así como también sobre la atmósfera y la superficie terrestre (Poveda, 1998). Dichos fenómenos ocurren a diferentes escalas espaciales y temporales. La escala temporal varía desde la escala de días o meses hasta la escala interanual o decadal.

Uno de los fenómenos globales más importantes a la escala de tiempo interanual es El Niño - Oscilación del Sur (ENSO por sus iniciales en inglés), resultado de la interacción océano - atmósfera en el Pacífico tropical (Neelin et al., 1998). Este fenómeno presenta dos fases diferenciadas: una cálida conocida como El Niño y una fría llamada La Niña. La fase cálida está caracterizada por un calentamiento anómalo de las aguas superficiales del Pacífico Tropical Central y Oriental, que induce una profundización de la termoclina oceánica en la porción oriental de dicho océano. Este calentamiento anómalo está asociado con el debilitamiento de los vientos alisios del este y con el desplazamiento del centro de convección del occidente al centro del Océano Pacífico Tropical. La fase fría tiene, en general, características inversas.

Considerando la magnitud de las perturbaciones en los patrones de la circulación atmosférica, y los eventos hidrometeorológicos extremos que causan las dos fases del ENSO, su entendimiento y predicción son tareas fundamentales en planificación social, económica y ambiental y para ello se requiere de modelos físico-matemáticos que expliquen su origen, evolución y culminación. Los modelos, van desde los más simples, en los que se modela sólo la componente oceánica, hasta los más complejos, llamados Modelos de Circulación General, (GCM) los cuales involucran variables y simulaciones de escala planetaria. La aplicación de los distintos tipos de modelos ha mostrado, en general, capacidades predictivas aceptables.

Una característica importante del ENSO es que todos sus eventos tienen características diferenciadas entre sí. Por ello, la capacidad de pronóstico de cada uno de los modelos propuestos para su estudio no es similar, y los distintos modelos han mostrado diferentes capacidades predictivas en los diferentes eventos.

Debido a su ubicación sobre el ecuador y a la presencia del Pacífico Tropical, Colombia no es ajena a la influencia

del ENSO, y sus efectos causan importantes efectos ambientales, económicos, sociales y ambientales. Basta con recordar el racionamiento energético de 1992-1993, o la fuerte disminución de caudales y lluvias en el periodo 1997-1998 y sus implicaciones directas en las cosechas, suministro de agua potable, epidemias de malaria y dengue (Poveda y Rojas, 1997; Poveda, 1998, 2004). Tales efectos exigen un constante interés científico y aplicado sobre el ENSO y sus efectos en el país.

En este trabajo se utiliza el Modelo Lineal Inverso (MLI) para el pronóstico de las anomalías de temperatura superficial del mar en la región Niño 3.4 y se evalúa su desempeño tomando como caso particular El Niño 2002-2003. El MLI es un método usado regularmente para el pronóstico de la temperatura superficial del mar en el Pacífico Tropical en centros de investigación internacionales y el objetivo principal de este trabajo es realizar una aplicación del mismo en nuestro entorno. La elección de este método se debe principalmente a la experiencia que se tiene del mismo en nuestro medio, en particular en el pronóstico de caudales medios mensuales en ríos colombianos durante El Niño 1991-1992 (Poveda y Penland, 1994). Se decidió tomar como caso de estudio El Niño 2002-2003 principalmente por la disponibilidad de información, pues para este evento se cuenta con muy buena información tanto de variables oceánicas como atmosféricas que permiten realizar un completo seguimiento del evento desde su inicio hasta su final.

Así mismo se realiza un diagnóstico del estado de las principales variables oceánicas y atmosféricas claves en la aparición, desarrollo y culminación de El Niño 2002-2003 para establecer semejanzas y diferencias con otros eventos EL Niño ocurridos anteriormente que permitan ampliar el conocimiento que se tiene sobre este fenómeno. En la sección 2 se describe el método implementado, en la 3 la información utilizada y en la 4 los resultados del diagnóstico y pronóstico de las temperaturas y la discusión de los mismos.

2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO UTILIZADO

Este modelo, propuesto por Penland, (1989, 1993), es un método estadístico que pretende representar la evolución temporal de un sistema mediante un modelo estocástico lineal, autorregresivo y multivariado utilizando el análisis de los patrones principales de oscilación (POP - Principal Oscillation Patterns). La suposición fundamental de este modelo es que el campo

de anomalías de la temperatura superficial del mar (SSTA) evoluciona linealmente y tiene un forzamiento estocástico, ruido blanco. Esta suposición permite realizar un análisis completo de las Funciones Ortogonales Empíricas (FOE) en el espacio geográfico que es transformado al espacio geográfico mediante una transformación lineal.

Sea $x(t)$ un vector d -dimensional, cuya i -ésima componente $x_i(t)$ representa una anomalía con media cero en el lugar i en el tiempo t , que obedece a la ecuación diferencial estocástica:

$$\frac{dx}{dt} = Bx + \xi \quad (1)$$

donde B una matriz constante y determinística, y ξ es un vector de ruido blanco con matriz de covarianza Q ; la i -ésima componente de ξ representa una excitación aleatoria del campo en el sitio i , las matrices B y Q se estiman a partir de los datos.

Teniendo en cuenta que el Modelo Lineal Inverso es un modelo autorregresivo, el valor esperado x en el tiempo $t + \tau$, dado $x(t)$ puede ser obtenido como:

$$\hat{x}(t + \tau) = G(\tau) x(t) \quad (2)$$

donde $G(\tau)$ es la función de Green, definida como:

$$G(\tau) = \langle x(t + \tau) x^T \rangle \Lambda^{-1} \quad (3)$$

y Λ es la matriz de covarianza del proceso x que se calcula como, $\langle x x^T \rangle = \Lambda$. Los símbolos $\langle \rangle$ representan el valor esperado de la variable estudiada.

Hasta acá no se utiliza la suposición que $x(t)$ obedece la ecuación (1). Desde (2) hasta (3) no se ha hecho más que describir el método de predicción de un modelo markoviano en el espacio continuo. Ahora, a partir de (1), es posible identificar a $G(\tau)$ con la dinámica determinística:

$$G(\tau) = \exp(B\tau) \quad (4)$$

En este caso, no se requiere calcular la ecuación (3) para cada rezago τ . Una vez que se ha calculado $G(\tau_0)$ usando algún rezago τ_0 , la descomposición espectral

proporciona la función de Green para cualquier otro valor de τ . La estimación de $G(\tau_0)$ se efectúa a partir del análisis de vectores y valores propios, como se muestra a continuación. Se obtienen los vectores propios $\{u_\alpha\}$ y los valores propios $\{g_\alpha\}$ de $G(\tau_0)$, que han sido estimadas a partir de los datos usando (3), de tal forma que,

$$G(\tau_0) \cdot u_\alpha = u_\alpha g_\alpha(\tau_0) \quad (5)$$

Ya que el sistema es lineal, los vectores propios de $G(\tau_0)$ son iguales a los vectores propios de B , y quiere decir que corresponden a los modos normales de la dinámica determinística. En forma similar, los valores propios $\{g_\alpha\}$ del sistema lineal tienen relación con los valores propios $\{\beta_\alpha\}$

$$g_\alpha(\tau_0) = \exp(\beta_\alpha \tau_0) \quad (6)$$

de donde es posible obtener los valores propios $\{\beta_\alpha\}$, Un valor propio β_α puede ser real, en cuyo caso el correspondiente modo normal también es real e indica una estructura que decae en forma exponencial, o puede ser uno de un par de complejos conjugados, en cuyo caso los correspondientes modos normales también serán complejos, indicando una onda estacionaria o viajera que decae en forma exponencial como los modos reales.

Las matrices transpuestas $G^T(\tau_0)$ y B^T tienen los mismos valores propios que las matrices $G(\tau_0)$ y B , pero diferentes vectores propios $\{v_\alpha\}$. Si u y v son las matrices de estos vectores propios (la i -ésima columna de cada uno de ellos es u_α y v_α , respectivamente), entonces u y v forman una base bi-ortogonal, es decir,

$$uv^T = u^T v = I \quad (7)$$

en donde I es la matriz identidad. Luego se construyen las descomposiciones espectrales de $G(\tau_0)$ y B como:

$$G(\tau_0) = \sum_{\alpha=1}^d u_\alpha g_\alpha(\tau_0) v_\alpha^T \quad (8)$$

$$B = \sum_{\alpha=1}^d u_\alpha \beta_\alpha v_\alpha^T \quad (9)$$

Dado que los valores propios $\{g_\alpha\}$ tienen una forma exponencial dada por (6), la función de Green para cualquier rezago τ es obtenida por medio de su descomposición espectral:

$$G(\tau) = \sum_{\alpha=1}^d u_\alpha [g_\alpha(\tau_0)]^{\tau/\tau_0} v_\alpha^T. \quad (10)$$

Si el sistema representado por los datos está regido por una dinámica lineal, como supone este método, la expresión (10) será independiente de τ_0 . La linealidad de la dinámica del fenómeno real puede ser verificada mediante esta expresión, ya que una dinámica no lineal arrojará valores diferentes de $G(\tau)$ para valores diferentes de τ_0 .

3. INFORMACIÓN NECESARIA

Para implementar este modelo se requiere información de las anomalías de temperatura superficial del mar. Para

tal efecto se utilizó una base de datos suministrada por la NOAA denominada "NOAA Optimum Interpolation (OI) Sea Surface Temperature (SST) V2". Esta base de datos comprende todos los océanos, tiene una resolución temporal mensual y una espacial de $1^\circ \times 1^\circ$. Las anomalías se calcularon respecto al periodo 1970-2000. Para más detalles véase a Reynolds et al. (2002).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del fenómeno El Niño 2002-2003

De acuerdo con los índices típicos utilizados para el diagnóstico de El Niño (Índice de Oscilación del Sur (SOI) y anomalías de temperatura en la región Niño 3.4), el evento 2002-2003 fue moderado y comparable con los eventos de 1986-1987 y 1991-1992 tal y como se muestra en la Figura 1.

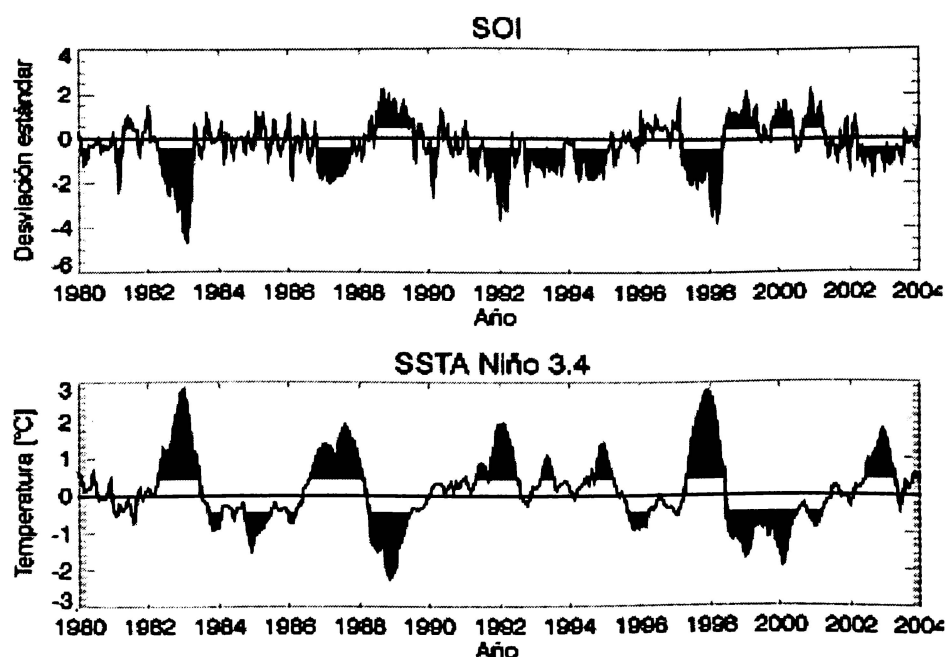


FIGURA 1. Índice de Oscilación del Sur (anomalías estandarizadas) y anomalías de temperatura superficial en la región Niño 3.4. Anomalías positivas mayores de 0.5°C indica eventos El Niño y anomalías menores de -0.5°C señalan eventos La Niña.

Las primeras señales de calentamiento aparecieron a mediados de 2001 a medida que la SST comenzó a incrementarse cerca de la línea de cambio de fecha (Figura 2), lo cual coincidió con el aumento en la actividad de las ráfagas de viento provenientes del occidente, asociadas con las fases activas de Oscilación de Madden-Julian (MJO) que pueden observarse en las anomalías de la

radiación de onda larga (OLR por sus siglas en inglés) (Figura 2). Las anomalías del viento en diciembre de 2001 (Figura 2a) forzaron ondas Kelvin que profundizaron la termoclina entre 20-30 m (McPhaden, 2004) con lo cual las anomalías en la SST se mantuvieron positivas hacia el oriente de la línea de cambio de fecha a comienzos de 2002.

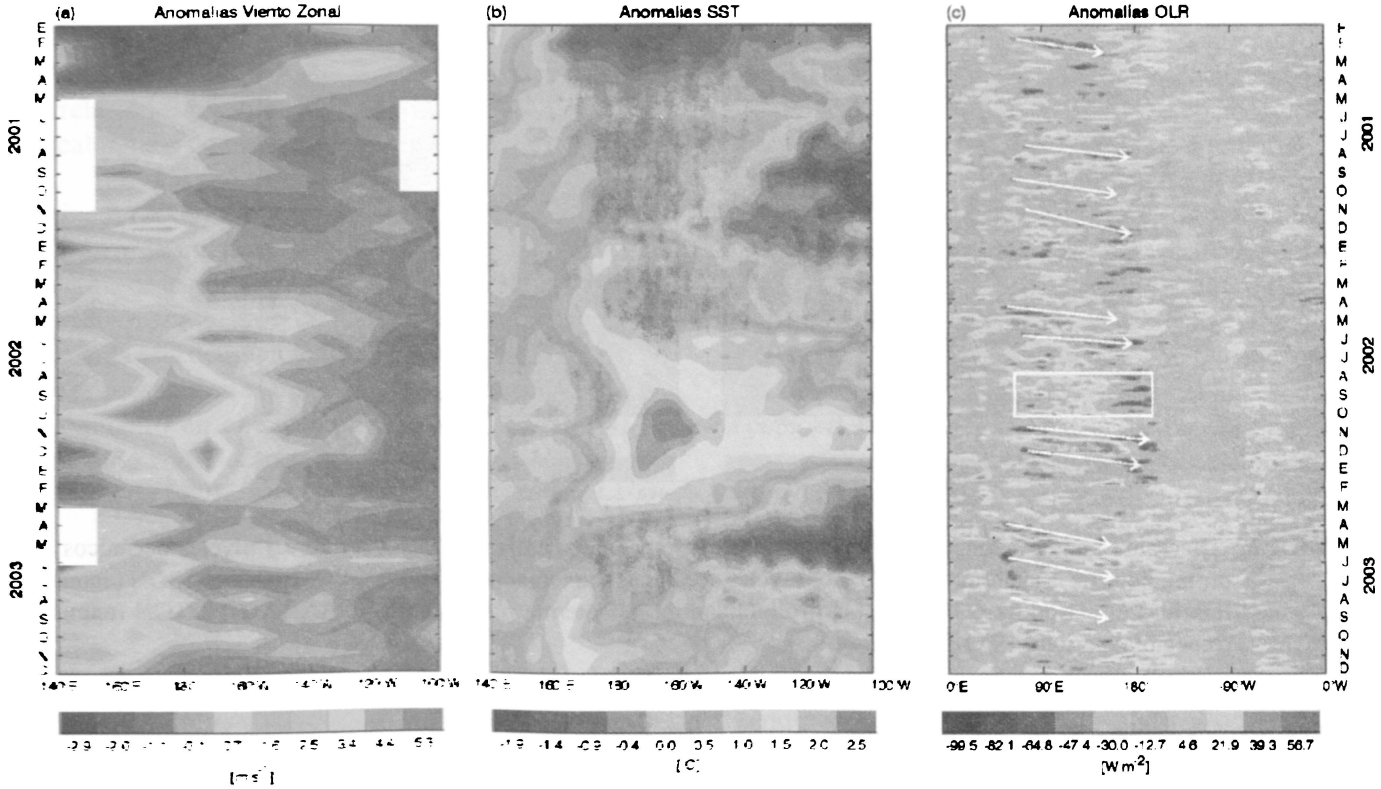


FIGURA 2. Diagramas tiempo - longitud de las anomalías (promediadas entre los 2°N-2°S) de a) viento zonal, b) SST y c) OLR para el periodo 2001-2003. El viento, la SST y la corrientes están promediados entre los 2°N-2°S y la OLR entre 5°N-5°S. La información de SST es de NOAA OI SST (anomalías referidas al periodo 1970-2000), la de viento zonal proviene de NOAA TAO/TRITON (anomalías referidas al periodo) y la de OLR es derivada de los satélites de la NOAA (anomalías referidas al periodo 1979-1995)

En mayo se observó una nueva ráfaga de viento (Figura 2a) que produjo un calentamiento de aproximadamente 1°C en todo el Pacífico Tropical (Figura 2b). Este calentamiento fue mantenido en los meses siguientes por anomalías en el viento, relacionadas con la actividad de la Oscilación de Madden-Julian y en junio de 2002 se confirmó oficialmente la aparición de El Niño 2002-2003 (www.noaanews.noaa.gov/stories/s938.htm).

En el segundo semestre del año 2002, las anomalías oceánicas y atmosféricas asociadas a El Niño se amplificaron. Las anomalías en el viento continuaron excitando ondas Kelvin que profundizaron la termoclina en el Pacífico oriental, mientras que las ondas Rossby la elevaron en el Pacífico occidental (Figura 3).

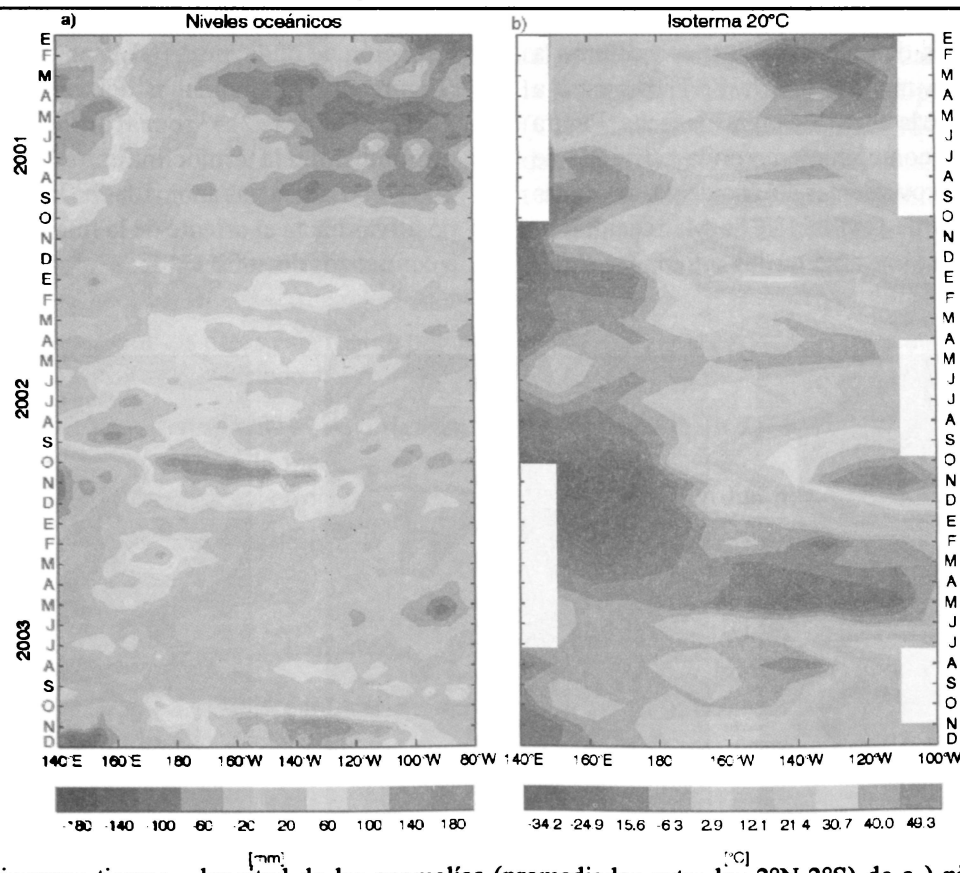


FIGURA 3. Diagrama tiempo - longitud de las anomalías (promediadas entre los 2°N-2°S) de a) niveles oceánicos y b) profundidad de la isoterma de 20°C. Los niveles oceánicos son tomados de TOPEX-POSEIDON JASÓN (anomalías referidas al periodo 1993-2001) y la profundidad de la isoterma proviene de NOAA TAO/TRITON (anomalías respecto al periodo 1970-1990)

Durante la etapa de máximo desarrollo (finales de 2002), las anomalías de temperatura superficial del mar en la región Niño 3.4 no superaron los 2°C (Figura 1) y las máximas anomalías se concentraron en el Pacífico central y alcanzaron los 2.5°C (Figura 2b). En cuanto a la temperatura subsuperficial, las máximas anomalías se observaron en noviembre de 2002 y se concentraron en el Pacífico oriental cerca a las costas suramericanas (Figura 4). Las anomalías en la profundidad de la termoclina alcanzaron los 50 m en el Pacífico oriental y los 30 m en el Pacífico occidental; las anomalías en los niveles oceánicos estuvieron entre 10-20 cm en el Pacífico occidental (Figura 3).

A finales del año 2002 y comienzos de 2003, El Niño comenzó a debilitarse tal y como lo indican las anomalías en la SST (Figura 2b) y la profundidad de la termoclina (Figura 3b) entre otras variables oceánicas y atmosféricas. Los mecanismos que indujeron la desaparición de las anomalías asociadas a El Niño involucran ondas Rossby y su reflexión como ondas

Kelvin que proporcionaron el efecto de retroalimentación rezagada que eventualmente da término a eventos El Niño, tal y como lo señala la teoría del Oscilador Rezagado propuesta por Battisti y Hirst (1989) y Suárez y Schopf (1988). Sin embargo, el asomamiento de la termoclina también estuvo relacionado con ondas Kelvin forzadas directamente por vientos del occidente anómalos lo cual ha dado término a otros eventos cálidos (Weisberg y Wang, 1997; McPhaden y Yu, 1999).

Variabilidad en el contenido de calor

La variabilidad del ENSO está íntimamente relacionada con estados alternantes entre el almacenamiento de contenido de calor oceánico y su posterior descarga en latitudes ecuatoriales (Wyrtki, 1975, 1986). Estas variaciones en el contenido de calor son mediadas por ondas ecuatoriales forzadas por el viento y afectan la SST a través la surgencia ecuatorial y otros procesos.

En la teoría del Oscilador de Recarga (Jin, 1997), se

plantea (1) como prerequisite para la ocurrencia de El Niño un almacenamiento excesivo de contenido de calor oceánico, (2) durante El Niño, el exceso de contenido de calor en el Pacífico ecuatorial es eliminado y (3) el tiempo entre eventos El Niño está determinado en parte por el tiempo necesario para recargar las latitudes ecuatoriales con exceso de contenido de calor. Se ha determinado de manera empírica que la magnitud de las anomalías en la SST durante El Niño escala en proporción a la magnitud del almacenamiento previo de contenido de calor (McPhaden, 2004). Adicionalmente existe una alta correlación entre las anomalías en la SST y el contenido de calor, tal y como se muestra en la Figura 5.

Meinen, (2000) define el contenido de calor como el volumen de agua cálido (WWV) integrado sobre la isoterma de los 20°C entre los 5°N - 5°S desde la frontera este (80°W) hasta la oeste (120°E) del Pacífico. Teniendo en cuenta esta definición, se construyó la serie de tiempo que se presenta en la Figura 5, en donde es claro que un crecimiento en el contenido de calor ecuatorial ha precedido con 3 ó 4 meses de anticipación a todos El Niño desde 1980.

El contenido de calor previo a El Niño 2002-2003 es casi la mitad del de El Niño 1997-1998, y comparable al de los eventos de 1986-1987 y 1991-1992. El WWV en el ecuador alcanzó su máximo en Septiembre de 2002 y a partir de este momento comenzó a decrecer rápidamente, lo cual respalda las hipótesis de Wyrki (1975, 1986) y de Jin (1997). La rápida caída en el WWV entre Septiembre/2002-Febrero/2003 fue un anuncio de la culminación de El Niño en la primavera boreal. Esta descripción ilustra la importancia del contenido de calor oceánico como un precursor de las variaciones en la SST en la escala temporal del ENSO. Sin embargo, un análisis detallado de la Figura 5 muestra que comportamientos similares en el WWV no dan origen a eventos cálidos. Por ejemplo, a comienzos de 2000 se observa un exceso de contenido calórico que decreció a mediados del mismo año y reapareció nuevamente a principios de 2001; sin embargo, no ocurrió un evento El Niño en ninguno de los dos años mencionados a pesar de que el exceso de calor en ambos años fue similar al del año 2002. Este comportamiento sugiere que si bien el crecimiento del contenido de calor ecuatorial es una condición necesaria para la ocurrencia de El Niño, no es suficiente e involucra patrones de variabilidad del viento y la SST de gran escala que se refuerzan mutuamente.

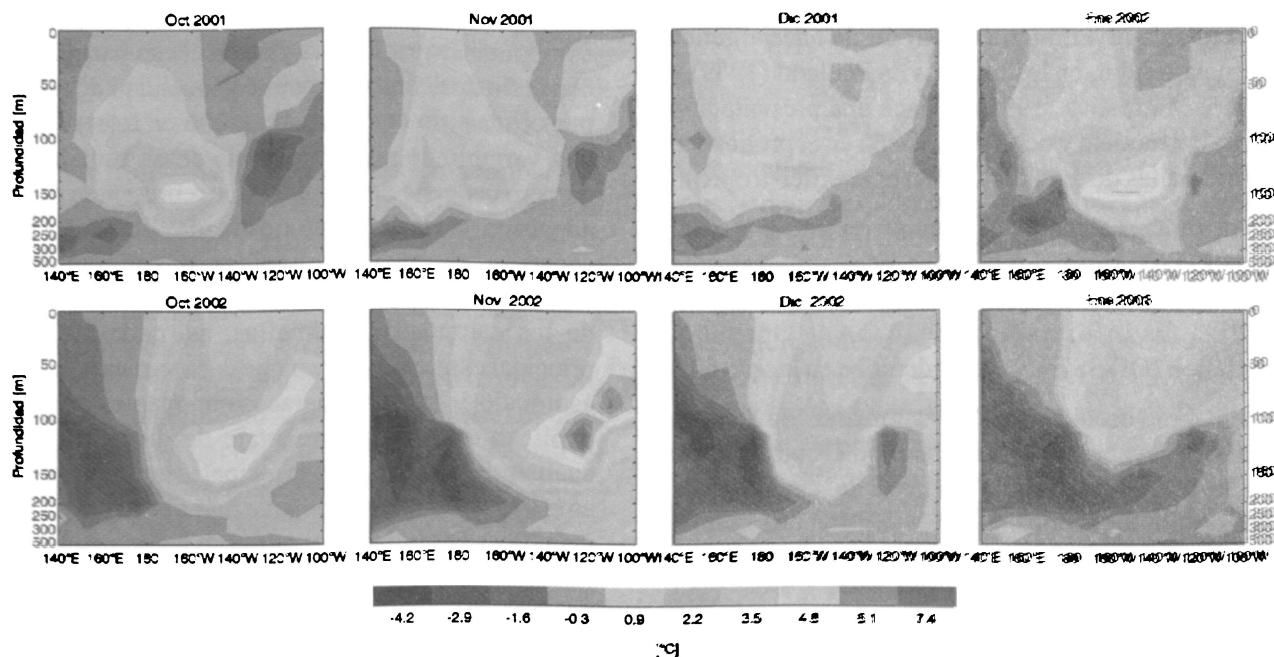


FIGURA 4. Sección longitudinal de las anomalías en la temperatura subsuperficial promediada entre los 2°N-2°S para los periodos Octubre 2001-Enero 2002 y Octubre 2002-Enero 2003 (TAO/TRITON). Las anomalías se calculan respecto al periodo 1970-1990.

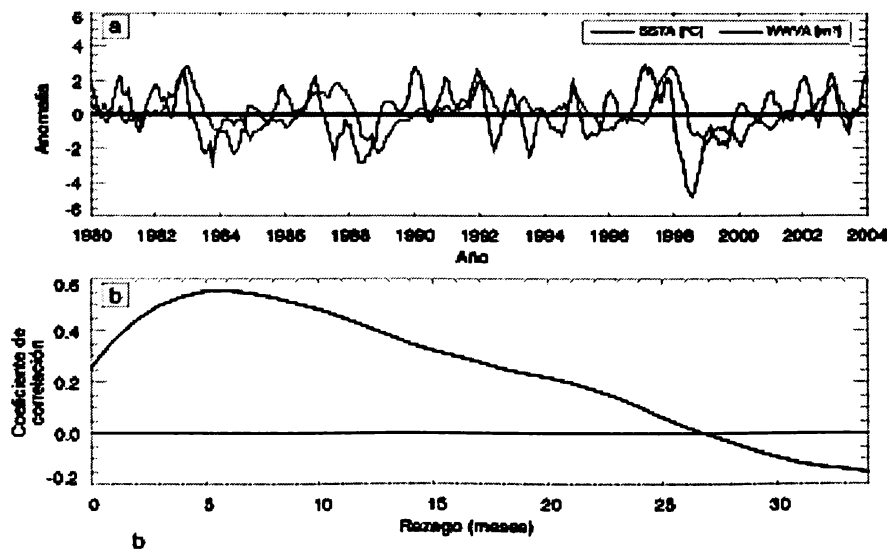


FIGURA 5. a) Anomalías mensuales de WWV (volumen de aguacálida entre los 5°N-5°S, 80°W-120°E sobre la isoterma de 20°C) y de la SST en la región Niño 3.4. b) Correlación cruzada entre las anomalías de WWV y la SST en la región Niño 3.4. La mayor correlación (0.56) se presenta para un rezago de 6 meses.]

4.2. Predicción de las anomalías de temperatura superficial del mar

Como se mencionó anteriormente con esta aplicación se pretende realizar la implementación del MLI en nuestro medio de manera autónoma, pues este método se viene utilizando regularmente para el pronóstico de las anomalías de temperatura superficial en centros de investigación a nivel internacional desde hace algunos años. En particular, en los trabajos de Penland (1989) y Penland y Matrosova (1993) se hace una presentación detallada del modelo y de su desempeño en el pronóstico de las anomalías de temperatura en el Pacífico tropical.

Para realizar la predicción de la temperatura superficial del mar (SSTA) utilizando el MLI se requiere únicamente información de las anomalías de temperatura. Para ello se utiliza la información de NOAA Optimum Interpolation (OI) SST V2 que se describe en la sección 3

Para realizar la predicción de las anomalías de SST, se consideró la cuenca del Océano Pacífico Tropical (30°N – 30°S; 100°E – 70°W) como predictor del campo de las regiones Niño 3, Niño 3.4, Niño 1.2. Para el campo predictor se construyeron series de tiempo de las anomalías en diferentes sitios, definidos por la resolución del campo utilizado. En el caso del Pacífico Tropical, se tienen 1036 sitios definidos por una malla de 37 x 28 columnas, que corresponden a un campo de temperatura con una resolución espacial de 2° lat x 5° lon. Posteriormente, se calcularon promedios móviles de 3

meses con estas series de anomalías. Este último procedimiento se realiza con el fin de eliminar ruido presente en la serie, minimizando la distorsión de los parámetros determinados estadísticamente respecto a la aplicación de un filtro de bajo paso. Adicionalmente este filtro no contradice directamente la suposición de que la variable puede ser ajustada utilizando un modelo lineal estocástico.

El MLI realiza los pronósticos en el campo de las componentes principales y no en el espacio geográfico, con el fin de disminuir la dimensionalidad del problema, pues cada sitio en el océano (1036 en total) representa una variable de predicción y se desea trabajar con un número pequeño de variables que representen de manera adecuada la variable pronosticada. Teniendo esto en cuenta, el primer paso para realizar la predicción de SSTA utilizando el MLI es calcular las componente principales de los campos de anomalías, así cada componente principal explica un porcentaje de la varianza del proceso estudiado y las n -primeras componentes son las que explican un mayor porcentaje de dicha varianza. El análisis de componentes principales permite seleccionar aquellas variables (sitios) que más aportan a la varianza del proceso estudiado, en este caso las anomalías de SST en el Pacífico tropical, y con ello se disminuye el número de variables.

Para el cálculo de las componentes principales se tomó la información comprendida durante el periodo 1950-2001. En la Figura 6, que muestra el porcentaje acumulado de varianza explicado por las primeras 30

componentes principales, se observa que las primeras 10 componentes principales explican aproximadamente el 74% de la varianza, y que las primeras 30 explican

casi el 92%, por lo que no es necesario considerar las 1036 variables sino una fracción muy reducida de ellas y se obtienen resultados muy similares.

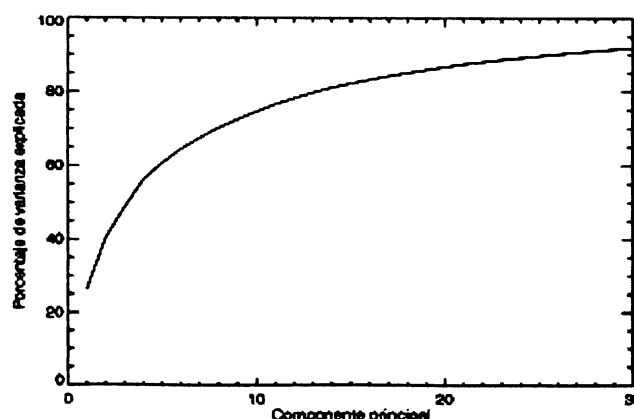


FIGURA 6. Porcentaje de varianza explicado por las primeras 30 componentes principales de las anomalías de SST en la región Niño 3.4

Para la predicción de las SSTA se consideraron las primeras 30 componentes principales. Se calcularon las matrices de covarianza de rezagos $\{1,2,\dots,7\}$ para este nuevo conjunto de series y la función de Green, $G(\delta)$, para los mismos rezagos tal y como se describe en la sección II. En este punto vale la pena señalar que la implementación del método se realizó sin llevar a cabo una calibración del mismo, pues como es un método usado regularmente para el pronóstico y sus resultados son reportados en boletines climáticos se acepta que los resultados de Penland (1989) y Penland y Matrosova (1993) brindan un soporte para la aplicación directa del método.

Un aspecto relevante en las tareas de pronósticos climáticos es el mes de inicio de la predicción. La barrera de la predecibilidad de la primavera representa un fuerte obstáculo en el pronóstico de la temperatura superficial del mar y por lo tanto el desempeño de los modelos se ve influenciado por el mes en el que se comienza la predicción. Con el fin de evaluar este aspecto, se realizó la predicción comenzando 3, 6, 9 y 12 meses antes de la fecha de comienzo del evento (mayo de 2002) para 24 meses hacia delante. A manera de ilustración se presentan en las Figuras 7 y 8 los resultados para ventanas de 3 y 6 meses y $\tau_0 = 4$ en las regiones: Niño 3, Niño 3.4 y Niño 1.2.

El inicio de la predicción en una ventana de 3 meses coincide con la primavera del hemisferio norte, época de mayor incertidumbre en los pronósticos, debido a las condiciones de inestabilidad del océano y la atmósfera

(barrera de predecibilidad). Esta dificultad se ve reflejada en la Figura 7 que muestra un comportamiento de las anomalías de temperatura predichas que se aleja bastante de las observaciones: esto es mientras que las observaciones muestran el aumento de la temperatura superficial del mar, las predicciones indican un enfriamiento continuo y creciente durante los meses siguientes al inicio de la predicción. Un comportamiento similar se observó para todos los valores de τ_0 considerados.

Para la ventana de 6 meses y $\tau_0 = 1$, los resultados de las predicciones indican anomalías positivas en la temperatura superficial del mar, lo cual coincide con las observaciones durante los primeros 6 meses de pronóstico. Sin embargo, a partir del séptimo mes de pronóstico el comportamiento de las predicciones se aleja de las observaciones, pues estas últimas comienzan a disminuir, mientras que las predicciones continúan aumentando y una vez las observaciones indican que el evento ha concluido, las predicciones señalan anomalías positivas. En cuanto a la intensidad de las anomalías, se observan diferencias, pues durante la época de máximas anomalías observadas se alcanzaron valores de 1.8°C (en los promedios móviles de 3 meses) mientras que las predichas sólo alcanzaron los 0.7°C . Considerando el valor de $\tau_0 = 4$ y la misma ventana de pronóstico, los resultados indican un calentamiento del Pacífico tropical durante los primeros 7 meses del horizonte pronóstico y un enfriamiento durante los siguientes meses. Este comportamiento coincide con las observaciones durante

el mismo periodo de tiempo, sin embargo la magnitud de las anomalías predichas es nuevamente inferior a las observadas y los meses en los cuales el calentamiento es máximo no coinciden.

Para las ventanas de 9 y 12 meses, el modelo sólo indica anomalías negativas durante todo el horizonte de pronóstico tal y como se observa en la Figura 9, en la cual se presenta la serie de tiempo de las anomalías de temperatura promediadas en la región Niño 3.4. En esta figura no se observa un buen ajuste entre las observaciones y las predicciones. Si bien en algunos casos se observa la misma tendencia en las anomalías observadas y predichas, particularmente en las series Niño1.2 (no mostrada en esta publicación) y Niño 3.4 para la ventana de 6 meses con $\tau_0 = 4$, las magnitudes predichas son inferiores a las observadas, y en otros casos las dos series están desfasadas, es decir, mientras las observaciones indican un calentamiento, las predicciones señalan un enfriamiento de la temperatura superficial del mar.

5. CONCLUSIONES

5.1. Diagnóstico del evento

- En relación al diagnóstico de las condiciones previas al desarrollo de El Niño 2002-2003, las observaciones permiten señalar de manera clara el papel de los forzamientos atmosféricos y la dinámica de gran escala y de baja frecuencia del sistema océano-atmósfera. La acumulación de calor previa a la aparición del evento también es clara, sin embargo la magnitud de la misma es similar al valor de años anteriores en los cuales no se ha desarrollado ningún evento cálido. Entonces, ¿qué pudo haber contribuido a la aparición de este evento? La respuesta involucra ráfagas de viento del Pacífico occidental que se presentaron durante mayo-julio de 2002, asociadas con la Oscilación de Madden-Julian (MJO). Una vez aparecieron las primeras señales de El Niño, la actividad convectiva asociada con la MJO se debilitó y la dinámica océano-atmósfera fue crucial en el crecimiento y mantenimiento de la señal cálida.
- El máximo de las anomalías oceánicas asociadas con el evento se alcanzó entre octubre-diciembre de 2002, caso típico de los eventos El Niño; sin embargo la distribución espacial de dichas anomalías fue un tanto inusual, pues las mayores anomalías en la SST se concentraron en el Pacífico central ecuatorial, mientras

que en las costas suramericanas fueron cortas y débiles.

- La culminación de El Niño 2002-2003 fue en el verano boreal (mayo-2003) e involucró una combinación de reflexiones en la frontera oeste de ondas Rossby, ondas Kelvin forzadas por el viento y la contracción de la piscina caliente del Pacífico occidental entre otros, lo cual coincide con eventos típicos El Niño.

5.2. Predicciones con el Modelo Lineal Inverso

- Para este modelo se implementaron en total 28 corridas, considerando 4 ventanas de pronóstico y 7 τ_0 , con el fin de evaluar la sensibilidad del modelo ante condiciones diferentes del mes de inicio de la predicción y del valor del rezago utilizado para calcular la función de Green. Aunque en este reporte sólo se presentan los resultados para las ventanas de 3 y 6 meses y para algunos valores de τ_0 , se pudo observar claramente la dificultad de hacer buenas predicciones comenzando durante la primavera del hemisferio norte, pues los pronósticos que se hacían considerando esta condición (ventana de 3 meses) o bien mostraban anomalías negativas o simplemente no la mostraban. Un comportamiento similar se observó para las predicciones en las ventanas de 9 y 12 meses, lo cual señala la dificultad de hacer predicciones en horizontes superiores a 7 u 8 meses, debido a la dinámica de los procesos involucrados en un fenómeno de la magnitud de El Niño.
- En la ventana de 6 meses los resultados del pronóstico fueron un poco mejores, pues se observó un aumento en las anomalías de temperatura que señalaba el desarrollo de un evento cálido en el Pacífico tropical, sin embargo, la amplitud de las anomalías predichas fue inferior a la observada.
- En relación al desempeño del modelo en función del valor de τ_0 se encontró que los resultados más deficientes corresponden a un valor de $\tau_0 = 1$. De acuerdo con Penland (1993), con un valor de $\tau_0 = 7$ se obtienen resultados aceptables en el pronóstico de la SSTA en la región Niño 3, sin embargo, en algunos casos los mejores resultados se obtuvieron para $\tau_0 = 4$. De cualquier manera vale la pena aclarar que el campo predictor reportado por Penland involucra el océano Pacífico y el Índico y por lo tanto se pueden generar diferencias.

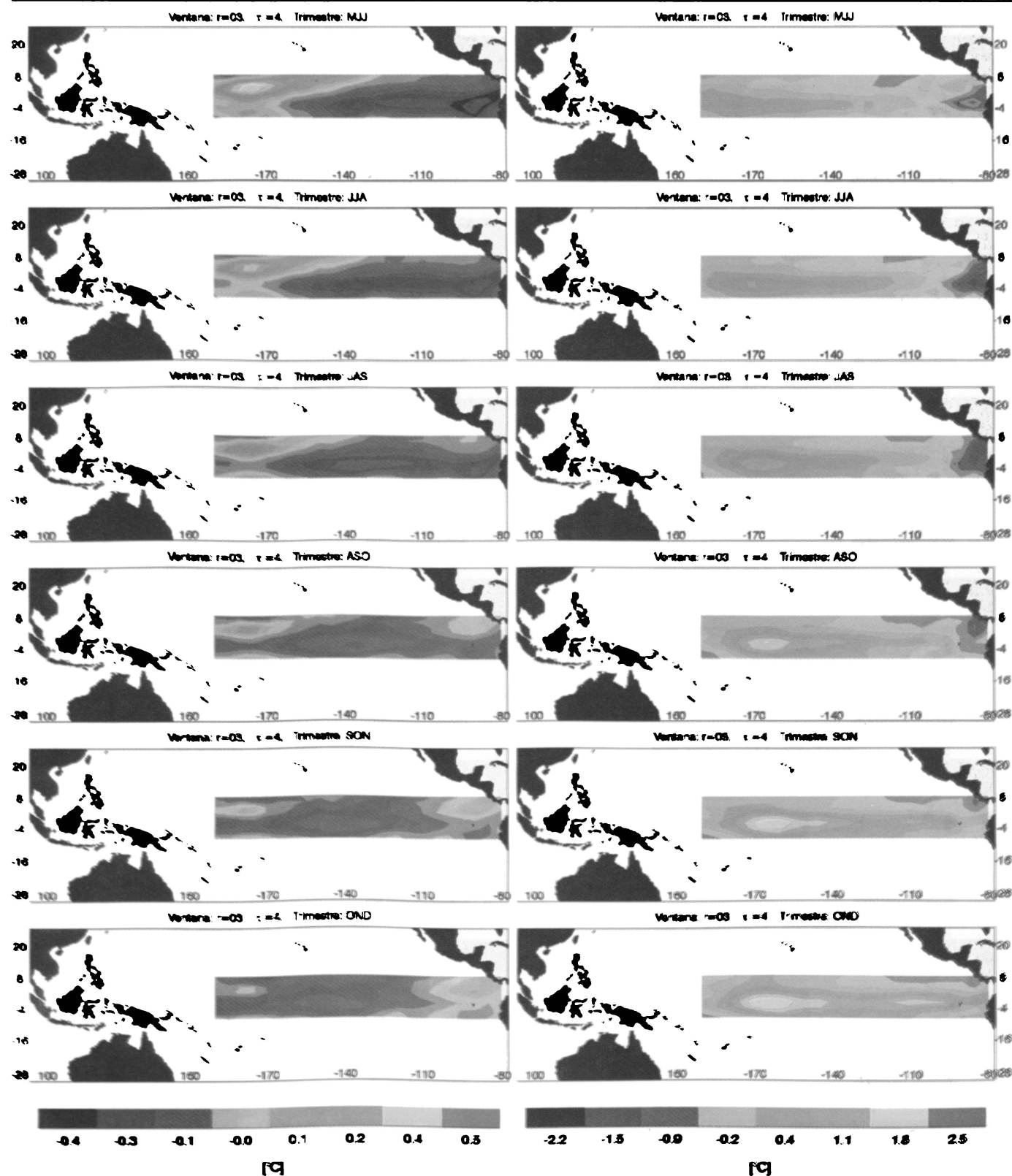


FIGURA 7. Predicción de las anomalías de SST con el Modelo Lineal Inverso (izquierda) para el periodo 2002-2003 utilizando una ventana de 3 meses y $\tau_0 = 4$. En la derecha se muestran las observaciones de las anomalías para el respectivo periodo. Los valores usados fueron obtenidos aplicando un promedio móvil de 3 meses sobre los datos originales. El inicio de la predicción se es el promedio de los meses febrero, marzo y abril de 2002.

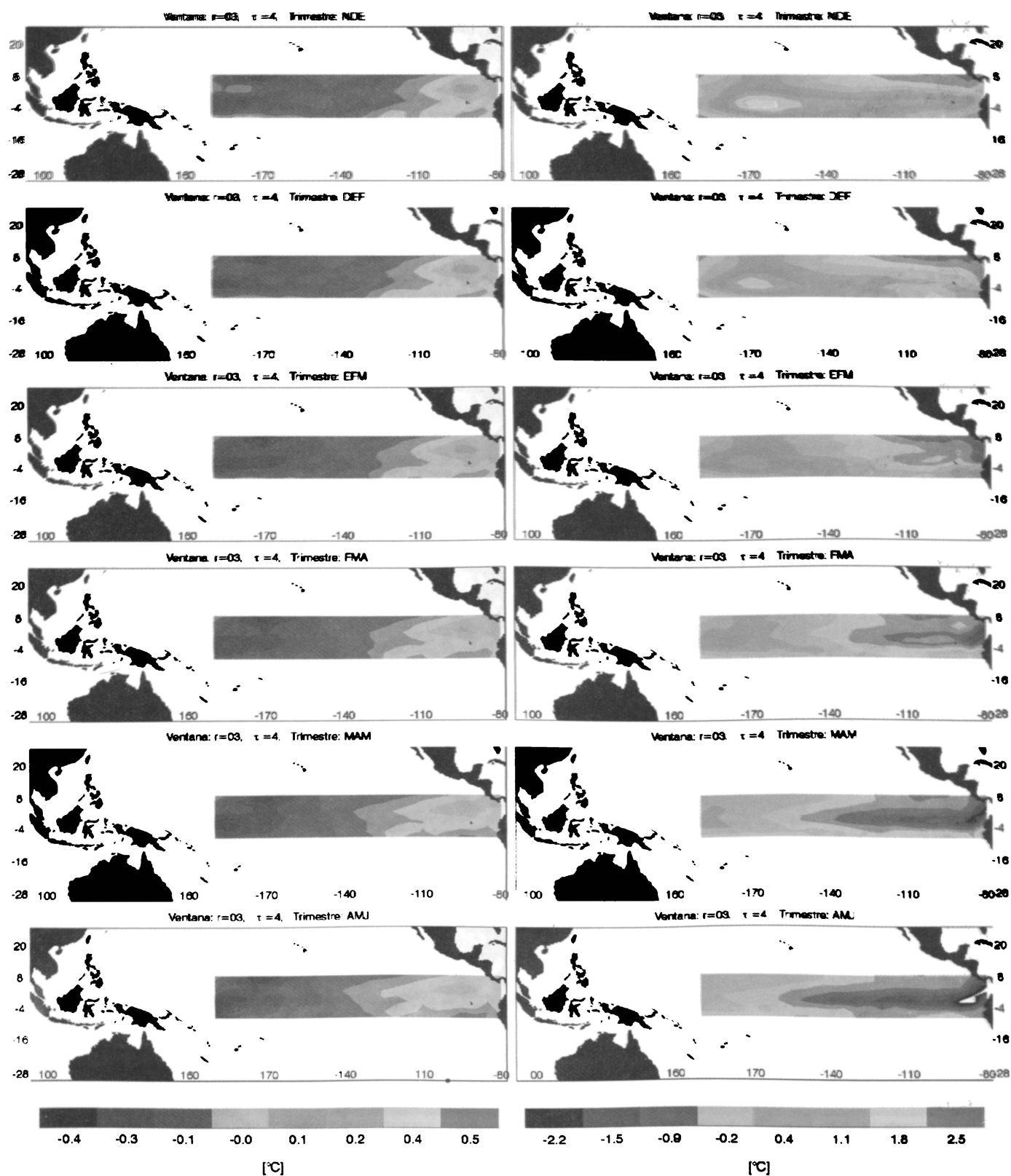


FIGURA 7. Continuación

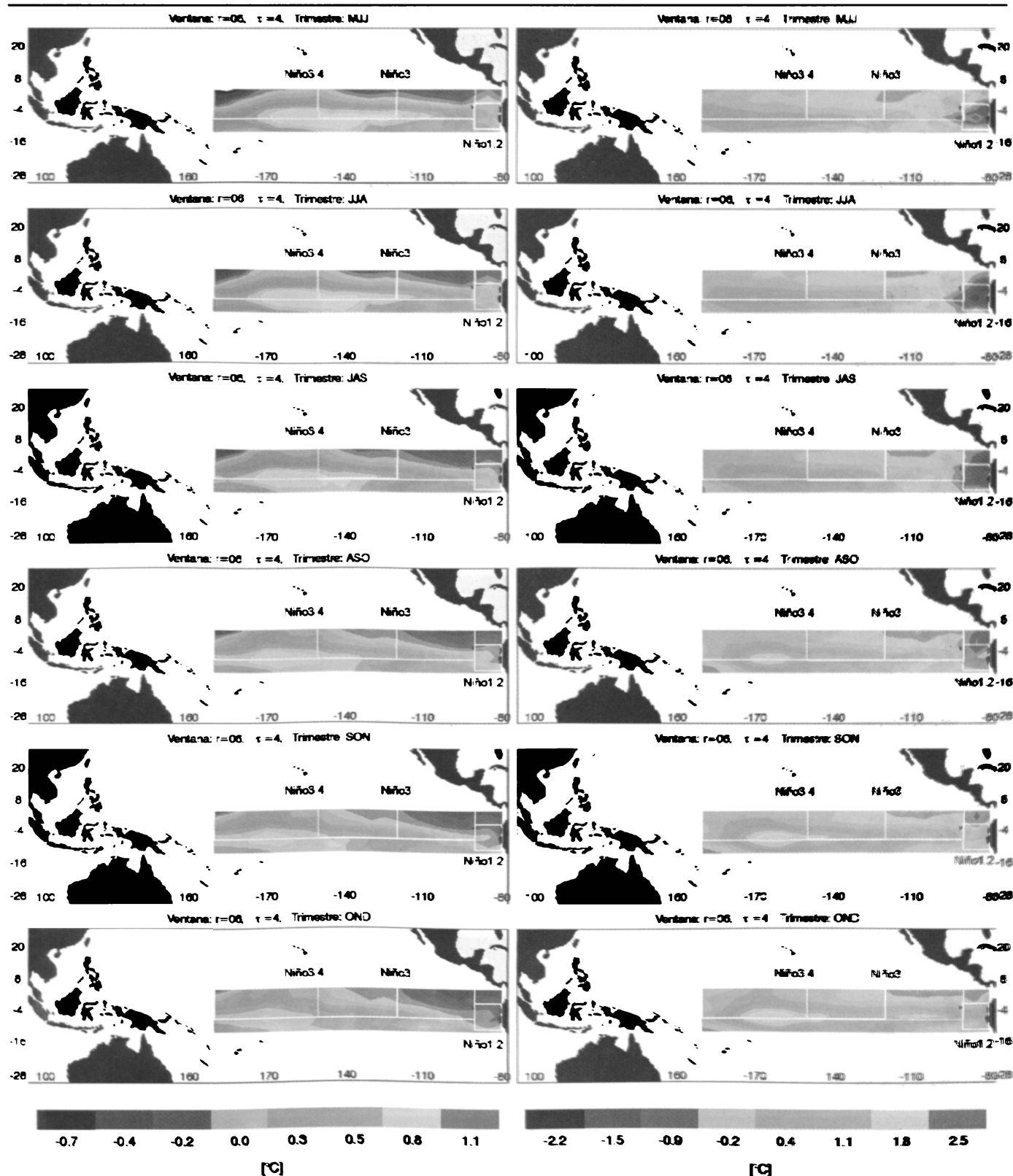


FIGURA 8. Predicción de las anomalías de SST con el Modelo Lineal Inverso (izquierda) para el periodo 2002-2003 utilizando una ventana de 6 meses y $\tau_0 = 4$. En la derecha se muestran las observaciones de las anomalías para el respectivo periodo predicho. Los valores usados fueron obtenidos aplicando un promedio móvil de 3 meses sobre los datos originales. El inicio de la predicción se es el promedio de los meses noviembre, diciembre y enero de 2001-2002.

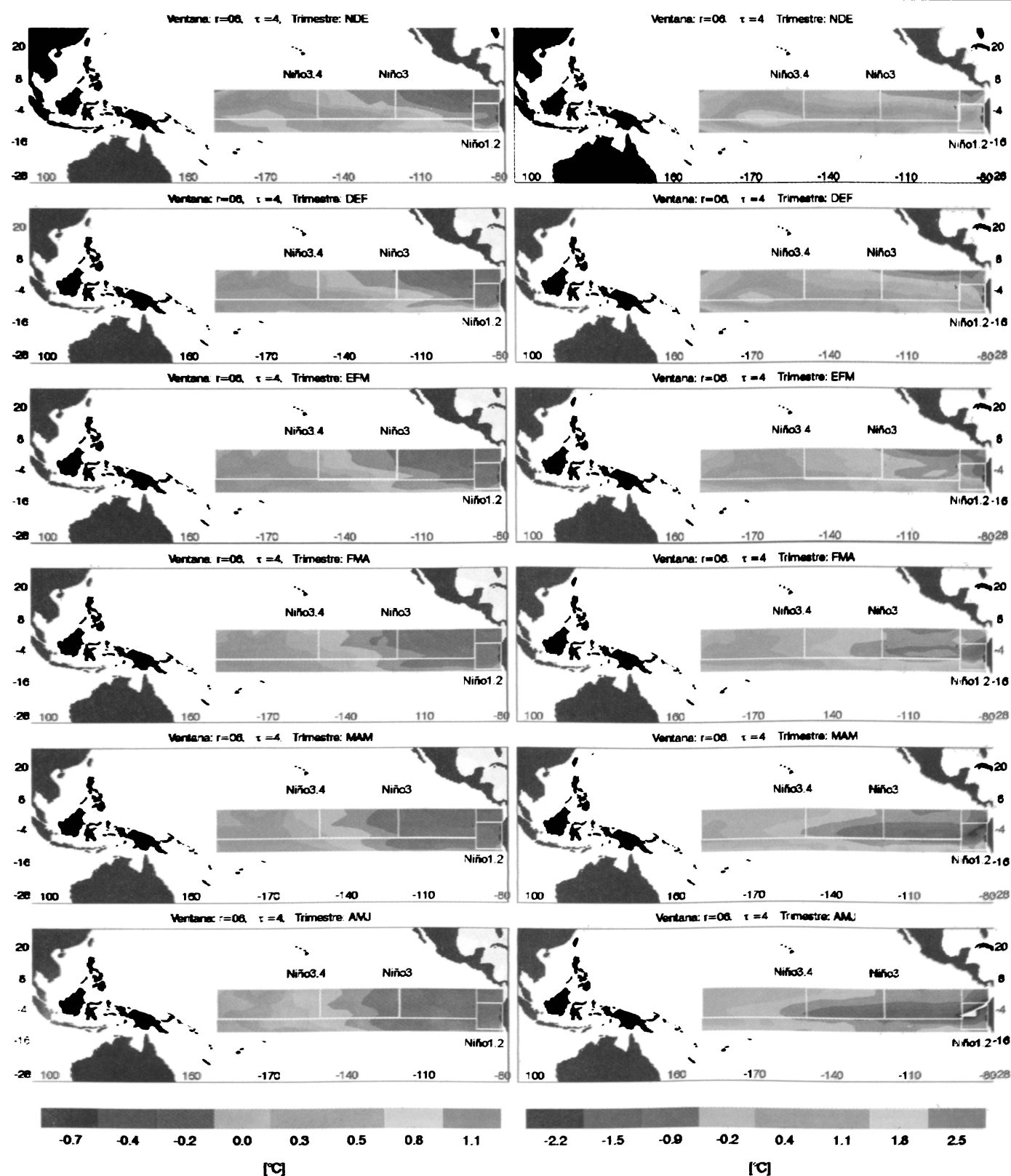


FIGURA 8. Continuación

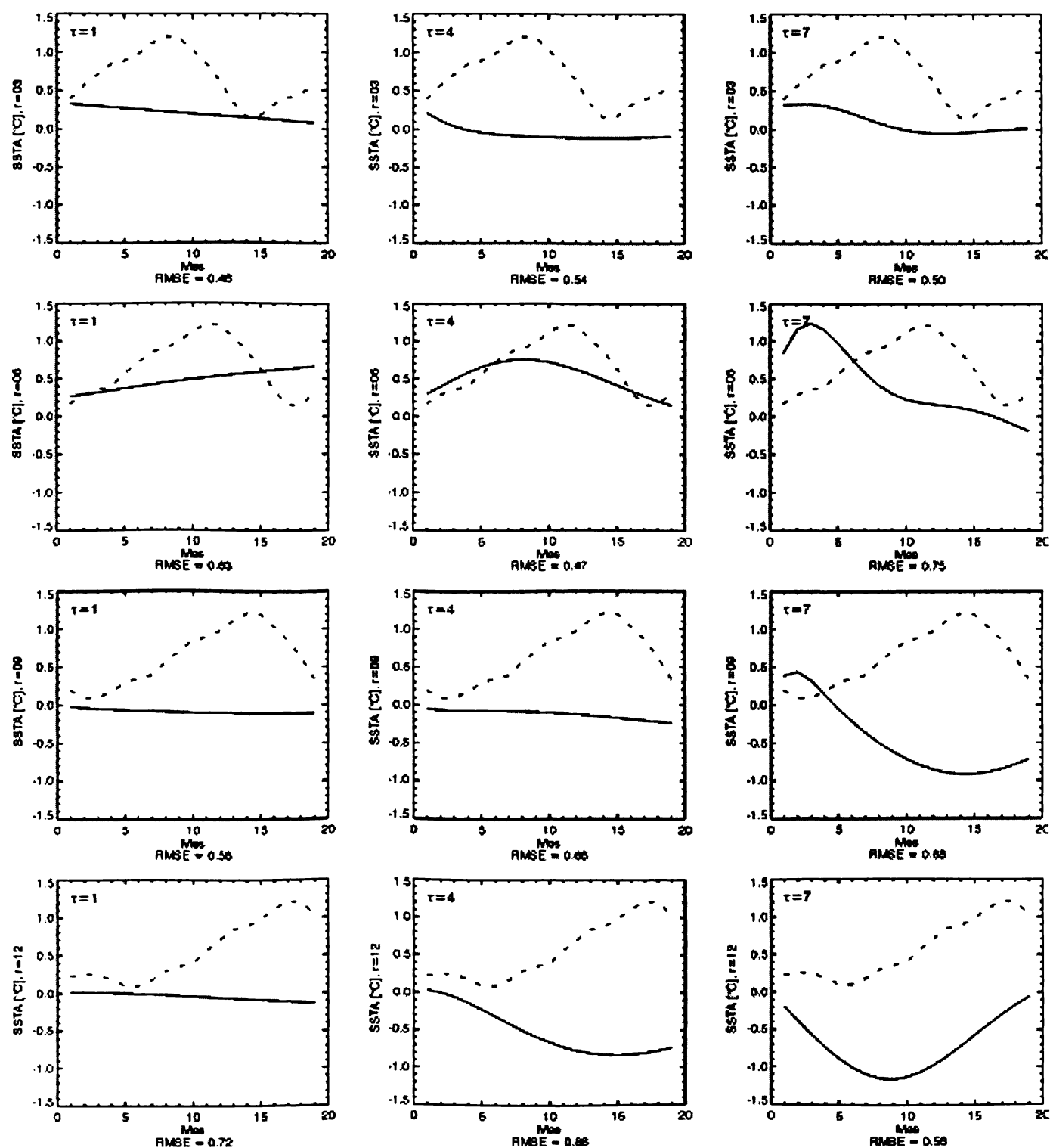


FIGURA 9. Serie de tiempo de las anomalías de temperatura superficial del mar promediadas en la región Niño 3.4. La línea punteada corresponde a las observaciones de las anomalías y la línea continua a las predicciones utilizando el Modelo Lineal Inverso. En la parte inferior de cada gráfico se muestra el error cuadrático medio del caso considerado.

6. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por Colciencias en el marco del Programa de Ciencia y Tecnología del Mar convocatoria del año 2003. Los autores agradecen a Cecile Penland por sus valiosos aportes y contribuciones en la aplicación del Modelo Lineal Inverso.

7. BIBLIOGRAFIA

- Battisti, D.S. y A.C. 1989. Hirst. Interannual variability in the tropical atmosphere/ocean system: Influence of the basic state, ocean geometry and nonlinearity. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 46:pp. 1687-1712.
- Jin, F.F. 1997. An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part I: Conceptual model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 54: pp. 811-829
- McPhaden, M.J. 2004. Evolution of the 2002/03 El Niño. *Bulletin of the Amer. Met. Soc.*, 85 (5): pp. 677-695.
- McPhaden, M. J. y Yu, X. 1999. Equatorial waves and the 1997-1998 El Niño. *Geophys. Res. Lett.*, 26, pp. 2961-2964.
- Meinen, C.S. y McPhaden, M.J. 2000. Observations of warm water volume changes in the equatorial Pacific and their relationship to El Niño and La Niña. *Journal of Climate*, 13: pp. 3551-3559
- Neelin J.D., Battisti, D.S., Hirst, A.C., Jin, F.F., Wakata, Y., Yamagata, T. y Zebiak, S. 1998. Enso theory. *Journal of Geophysical Research*, 103(C7):14. pp. 261-14.290.
- Penland, C. 1989. Random forcing and forecasting using principal oscillation pattern analysis. *Monthly Weather Review*, 117: pp. 2166-2185.
- Penland, C. y Magorian, T. 1993 Prediction of Niño 3 sea surface temperature using Linear Inverse Modelling. *Journal of Climate*, 6:pp. 1067-1076.
- Poveda, G. 1998. Retroalimentación Dinámica entre el Fenómeno El Niño Oscilación del Sur y la Hidrología de Colombia. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia – Facultad de Minas.
- Poveda, G. 2004. La hidroclimatología de Colombia: Una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, XXVIII(107): pp. 201-221
- Poveda, G y Penland, C. Predicción de caudales medios en Colombia usando modelación lineal inversa. *Memorias : XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica : Vol. 4. Santiago, Chile, 1994*
- Poveda, G y Rojas, W. 1997. Evidencias de la asociación entre brotes epidémicos de malaria en Colombia y el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur. *Revista de la Academia de Ciencias exactas, Físicas y Naturales.*, 21(81)
- Reynolds R.W., Rayner, N.A., Smith, T.M., Stokes, D.C. y Wang, W. 2002. An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *Journal of Climate*, 15:pp. 1609-1625.
- Smith, N.R. 1999. The BMRC ocean thermal analysis system. *Australian Meteorological Magazine*, 44: pp. 93-110.
- Smith, N.R., Blomley, J.E. y Meyers, G. 1991. A univariate statistical interpolation scheme for subsurface thermal analyses in the tropical oceans. *Progress in Oceanography*, 28:pp. 219-256.
- Suárez, M.J. y Schopf, P.S. 1988. A delayed action for ENSO. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 45: pp. 3283-3287.
- Weisberg, R. H., y Wang, C. 1997. A western Pacific oscillator paradigm for the El Niño-Southern Oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, 24, pp. 779-782.
- Wyrtki, K. 1975. The dynamic response of the equatorial Pacific ocean to atmospheric forcing. *Journal of Physical Oceanography*, 5: pp. 572-584.
- Wyrtki, K. 1986. Water displacements in the Pacific and the genesis of El Niño cycles. *Journal of Geophysical Research*, 91: pp. 7129-7132.