

## UNA NOTA SOBRE LA VARIABILIDAD NO ESTACIONAL DE LA REGION CENTRAL DEL GOLFO DE CALIFORNIA

### A NOTE ON NON-SEASONAL VARIABILITY IN THE CENTRAL GULF OF CALIFORNIA

S. G. Marinone

Departamento de Oceanografía Física  
Centro de Investigación Científica y  
de Educación Superior de Ensenada  
Ensenada, Baja California, México

Marinone, S.G. Una nota sobre la variabilidad no estacional de la región central del Golfo de California. A Note on Non-Seasonal Variability in the Central Gulf of California. *Ciencias Marinas* 14(4): 117-134, 1988.

#### RESUMEN

Un análisis de componentes principales de 16 campañas hidrográficas en la cuenca de Guaymas del Golfo de California, desarrolladas entre febrero de 1956 y octubre de 1983 estudia la variabilidad no estacional del nivel del mar, temperatura y salinidad, así como la de los campos geostroficados inferidos, velocidad y vorticidad. Los resultados indican que la mayor parte de la variabilidad se debe a la influencia del fenómeno de El Niño-Oscilación Austral (ENOA). La gran amplitud estacional de temperatura (Ripa y Marinone, 1988) aunada a la intrusión de aguas del Pacífico Subtropical en épocas de ENOA, tiene como consecuencia que la anomalía de esta variable pueda ser tanto positiva como negativa, dependiendo de la estación del año, una situación que no se da en costas abiertas del Pacífico.

#### ABSTRACT

A Principal Component Analysis of 16 hydrographic cruises in the Guaymas Basin, between February 1956 and October 1983 is used to define the non-seasonal variability of sea level, temperature and salinity, and the inferred geostrophic fields of velocity and vorticity. The results show that most of the variability is due to the influence of the El Niño-Southern Oscillation (ENSO). The large seasonal amplitude of temperature (Ripa and Marinone, 1988) together with the Subtropical Pacific Waters intrusion in ENSO times, results in anomalies of this variable that can be positive or negative, depending on the season, a situation not found in the Pacific open coast of America.

#### INTRODUCCION

El Golfo de California es un mar marginal de México cuyas fronteras son la Península de Baja California por el Oeste, y los estados de Sonora y Sinaloa por el Este (Fig. 1). Hacia el sur, el Golfo está ampliamente comunicado con el Océano Pacífico a través de una boca de aproximadamente 200km de ancho. Topográficamente está dividido por una serie de cuencas, con dos regí-

#### INTRODUCTION

The Gulf of California is a marginal sea of Mexico, bordered on the west by the Peninsula of Baja California and on the east by the states of Sonora and Sinaloa (Fig. 1). Towards the south, a mouth approximately 200km wide amply communicates the Gulf with the Pacific Ocean. Topographically, it is divided by a series of basins, with two hydrographic regimens separated by the Gulf's

menes hidrográficos separados por las grandes islas del Golfo. La zona central del Golfo, constituida básicamente por la cuenca de Guaymas, parece limitar la influencia oceánica del Pacífico, es decir, es la última de una serie de cuencas a partir de la boca en la cual se han medido propiedades con características del Pacífico (ver por ejemplo, Robles y Marinone, 1987; Ripa y Marinone, 1988, a este último trabajo nos referiremos como RM en adelante).

Las propiedades termodinámicas del Golfo varían en una amplia gama de escalas espaciales y temporales. Por ejemplo, en la cuenca de Guaymas se observa la aparición y desaparición de chorros costeros, giros y filamentos en escalas de algunos días (Badan-Dangon *et al.*, 1985; Navarro y Lavín, comunicación personal), la propagación de ondas costeras provenientes del Pacífico con escalas temporales del orden de 10 días (Christensen *et al.*, 1983), el cambio estacional de variables como temperatura, salinidad, velocidad geostrofica y nivel del mar (RM; Bray, 1988), y la variación interanual del nivel del mar y temperatura superficial (Baumgartner y Christensen, 1985).

La influencia del Pacífico sobre la variabilidad del Golfo de California es de esperarse pues su comunicación con éste es amplia. Sin embargo, el Golfo está semicerrado y presenta variabilidad propia debida al forzamiento local: calentamiento y esfuerzo del viento. La acción del Pacífico ha sido detectada en el análisis del nivel del mar, variable en la que resulta fácil observar eventos asociados a la propagación de ondas. Baumgartner y Christensen (1985) encuentran que los cambios interanuales del Golfo de California, indicados por anomalías del nivel del mar, se relacionan al fenómeno de El Niño-Oscilación Austral (ENOA) y a la circulación ciclónica nor-ecuatorial.

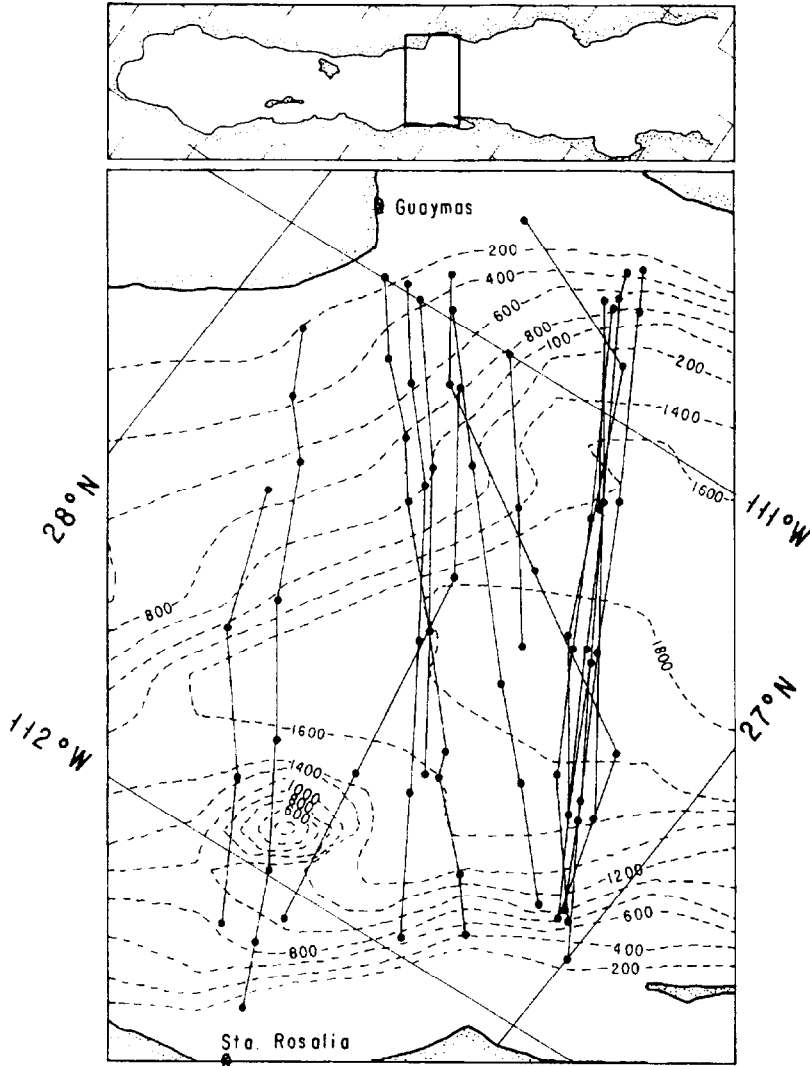
Cambios en otras variables, como salinidad, indican la ocurrencia de procesos advectivos, los cuales sugieren cambios importantes en las características y variabilidad del Golfo pues tienen asociados a ellos la invasión de masas de agua. Robles y Marinone (1987) destacan la presencia de aguas de la corriente

big islands. The central region of the Gulf, which basically consists of the Guaymas Basin, seems to limit the oceanic influence of the Pacific. That is, it is the last of a series of basins starting from the mouth in which properties characteristic of the Pacific have been measured (see for example, Robles and Marinone, 1987; Ripa and Marinone, 1988, henceforth referred to as RM).

The thermodynamic properties of the Gulf vary in a wide range of spatial and temporal scales. For example, in the Guaymas Basin the following are observed: appearance and disappearance of coastal jets, eddies and filaments in scales of several days (Badan-Dangon *et al.*, 1985; Navarro and Lavín, personal communication); propagation of coastal waves coming from the Pacific in time scales of the order of ten days (Christensen *et al.*, 1983); seasonal changes in variables such as temperature, salinity, geostrophic velocity and sea level (RM; Bray, 1988) and interannual variation of sea level and surface temperature (Baumgartner and Christensen, 1985).

The influence of the Pacific on the variability in the Gulf of California is to be expected since they are amply communicated. However, the Gulf is semiclosed and presents a variability of its own due to local forces: heating and wind stress. The action of the Pacific has been detected in the analysis of the sea level, a variable in which events associated to wave propagation are easy to observe. Baumgartner and Christensen (1985) found that interannual changes in the Gulf of California, indicated by sea level anomalies, relate to the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) phenomenon and to the nor-equatorial cyclonic circulation.

Changes in other variables, such as salinity, indicate the occurrence of advective processes, which suggest important changes in the characteristics and variability of the Gulf since they are associated with the invasion of masses of water. Robles and Marinone (1987) indicate the presence of California Current waters as well as subtropical subsurface waters. That is, the influence of the Pacific is detected up to the Guaymas Basin.



**Figura 1.** Localización del área de estudio. Las líneas continuas indican el derrotero de cada crucero en la cuenca de Guaymas y los puntos las estaciones de muestreo. Las líneas quebradas corresponden a la batimetría en metros.

**Figure 1.** Location of the study area. The continuous lines indicate the course of each cruise in the Guaymas Basin and the dots the sampling stations. The broken lines correspond to the bathymetry in meters.

de California así como aguas Subtropical Sub-superficiales, esto es, la influencia del Pacífico es detectable hasta la cuenca de Guaymas.

En otros trabajos (Bray, 1988; RM) se ha resuelto con bastante éxito el cambio estacional local de variables como temperatura, salinidad, velocidad y nivel del mar en la cuenca de Guaymas. Dado que en esta cuenca están presentes las aguas del Pacífico y que éste sufre variaciones no estacionales, cabría esperar que los campos en los que se destaca un ciclo estacional estén también sujetos a cambios no estacionales, como por ejemplo, los debidos a fenómenos como ENOA.

En esta nota se pretende ver si la influencia del Pacífico sobre el Golfo de California, observada en las variaciones del nivel del mar, se refleja también en las características termodinámicas de la cuenca de Guaymas. En particular, se pretende analizar la variabilidad de temperatura, salinidad, velocidad y vorticidad en escalas no estacionales, relacionadas principalmente con ENOA.

## DATOS

Para el desarrollo de este trabajo se utilizan datos históricos de temperatura y salinidad. La base de datos es la misma utilizada por Robles y Marinone (1987), Marinone y Ripa (1988) y RM. Estadísticas de los datos y una descripción detallada de los mismos se puede consultar en esos trabajos. En la Figura 1 se presenta el derrotero de cada campaña; algunos datos pertinentes se presentan en la Tabla I.

A partir de estas variables, se calculan los campos de vorticidad y velocidad geostrofica haciendo uso de la relación del viento térmico. Esta nos relaciona el corte vertical de velocidad con los gradientes horizontales de temperatura y salinidad, i.e.,

$$fV_z = g(\alpha T_x + \beta S_x)$$

donde  $V$  es la velocidad en la dirección a lo largo del Golfo,  $f$  es el parámetro de Coriolis,  $\alpha$  y  $\beta$  los coeficientes de expansión térmica y

Other studies (Bray, 1988; RM) have quite successfully determined the local seasonal change of variables such as temperature, salinity, velocity and sea level in the Guaymas Basin. Given that the Pacific waters are present in this basin and undergo non-seasonal variations, it is to be expected that the fields showing a seasonal cycle would also be subjected to non-seasonal changes, as for example those due to phenomena such as ENSO.

The purpose of this note is to study whether the influence of the Pacific on the Gulf of California, observed in the sea level variations, is also reflected in the thermodynamic characteristics of the Guaymas Basin. In particular, to analyse the variability of temperature, salinity, velocity and vorticity in non-seasonal scales, mainly related to ENSO.

## DATA

In this study, historical data of temperature and salinity are used. The data basis is the same as that used by Robles and Marinone (1987), Marinone and Ripa (1988) and RM. The statistics and a detailed description of the data can be found in these papers. The course of each cruise is shown in Figure 1 and some relevant data are presented in Table I.

The geostrophic velocity and vorticity fields were calculated from these variables, using the thermal wind relation. This relates the vertical shear velocity to the horizontal gradients of temperature and salinity, i.e.,

$$fV_z = g(\alpha T_x + \beta S_x)$$

where  $V$  is the velocity along the Gulf,  $f$  is the Coriolis parameter,  $\alpha$  and  $\beta$  thermal expansion and saline contraction coefficients respectively,  $g$  is the acceleration due to gravity and the subindices  $z$  and  $x$  denote derivatives relative to the vertical and to the transversal direction to the Gulf respectively. From this relation and using the minimum energy criterion (Fomin, 1984), an estimation of the absolute velocity field was done. "Velocity" will refer to the mean velocity of the whole section and "vorticity" to  $\zeta = \nabla_x V_z$ .

**Tabla I.** Campañas en la cuenca de Guaymas, Golfo de California, utilizados en el presente análisis.**Table I.** Cruises in the Guaymas Basin, Gulf of California, used in the present analysis.

Lances Hidrográficos				
Crucero No.	Días	Mes/Año	No.	Embarcación
1	12-13	02/56	3	Black Douglas
2	14	04/56	3	Black Douglas
3	13-14	02/57	6	Horizon
4	12-13	04/57	6	Black Douglas
5	13-16	06/57	5	Stranger
6	16	08/57	5	Stranger
7	25-30	04/59	5	S.F. Baird
8	31-01	11/61	6	B.M. Smith
9	08-09	11/61	4	B.M. Smith
10	28-29	03/70	5	A. Agassiz
11	17-22	10/74	4	A. Agassiz
12	23-24	10/81	3	M. Matamoros
13	28-29	06/82	9	El Puma
14	18-19	03/83	3	El Puma
15	01-02	05/83	8	El Puma
16	12-13	10/83	6	M. Matamoros

contracción salina respectivamente,  $g$  es la aceleración debida a la gravedad y los sub-índices  $z$  y  $x$  indican derivadas respecto a la vertical y dirección transversal al Golfo respectivamente. A partir de esta relación y utilizando el criterio de mínima energía (Fomin, 1984) se hizo una estimación del campo absoluto de velocidad. Por "velocidad" nos referiremos a la velocidad media de toda la sección, y por "vorticidad" a  $\zeta = \nabla \cdot \mathbf{v}_t$ .

El interés de este trabajo se centra en escalas de tiempo no estacionales, por lo que se hace necesario trabajar con anomalías de las variables respecto de la señal estacional. Esta última ha sido bien resuelta para este mismo conjunto de datos en RM. La señal estacional fue calculada ajustando por cuadrados mínimos una función de la forma

$$S_j(t) = A_0 + A_1 \cos(\omega t) + A_2 \sin(\omega t) + A_3 \cos(2\omega t) + A_4 \sin(2\omega t), \quad (1)$$

The interest of this study is centred on non-seasonal time scales, making it necessary to work with anomalies of the variables relative to the seasonal signal. The latter has been well determined for this same set of data by RM. The seasonal signal was calculated by least squares fitting a function of the form

$$S_j(t) = A_0 + A_1 \cos(\omega t) + A_2 \sin(\omega t) + A_3 \cos(2\omega t) + A_4 \sin(2\omega t), \quad (1)$$

where  $\omega = 2\pi/(365 \text{ d})$  and  $S_j$  represents any of the variables: temperature [T, (j=1)]; salinity [S, (j=2)]; velocity [V, (j=3)] or sea level [ $\eta$ , (j=5)]. This fit does not apply to vorticity [ $\zeta$ , (j=4)] since RM were unable to extract a significant seasonal signal for this variable. In this case,  $S_4(t)=0$  in equation (2) onwards. Thus, the  $B_{jt}$  anomalies of each one of the

donde  $\omega = 2\pi/(365 \text{ d})$  y  $S_j$  representa a cualquiera de las variables temperatura [T, (j=1)], salinidad [S, (j=2)], velocidad geostrófica [V, (j=3)] o nivel del mar [ $\eta$ , (j=5)]. Este ajuste no se aplica a la vorticidad [ $\zeta$ , (j=4)] pues RM no le pudieron extraer una señal estacional significativa a esta variable: en este caso hacemos  $S_4(t)=0$  de la ecuación (2) en adelante. En breve, las anomalías  $B_{jt}$  de cada una de las variables son obtenidas restándole a los datos la señal estacional calculada en RM, es decir,

$$B_{jt} = D_{jt} - S_j(t_j), \quad t = 1, \dots, 16. \quad (2)$$

Los datos del nivel del mar disponibles corresponden al período 1952-1984, que no incluye la campaña hidrográfica de marzo de 1939. De esta manera, el conjunto de datos sobre los que se desarrolla el trabajo corresponde a 16 tiempos diferentes, de febrero de 1956 a octubre de 1983, en vez de los 17 que se utilizaron para calcular la señal estacional.

### VARIABILIDAD NO ESTACIONAL

El ajuste estacional obtenido con (1) explica fracciones diferentes para cada variable. En la Tabla II se muestra la varianza explicada por (1) para T, S, V y  $\eta$ , asimismo, se incluye la desviación estándar de la anom-

variables are obtained by subtracting the seasonal signal calculated by RM from the data, that is,

$$B_{jt} = D_{jt} - S_j(t_j), \quad t = 1, \dots, 16. \quad (2)$$

The available sea level data correspond to the 1952-1984 period, which does not include the hydrographic cruise of March 1939. Therefore, this study is based on a set of data corresponding to 16 different times, from February 1956 to October 1983, instead of the 17 that were used to calculate the seasonal signal.

### NON-SEASONAL VARIABILITY

The seasonal fit obtained with (1) explains different fractions for each variable. The variance explained by (1) for T, S, V and  $\eta$  is shown in Table II and the standard deviation of the anomaly of these variables is also included. The anomalies present a large variability (Fig. 2). The first two parameters have maxima and minima in August 1957 and during March and May 1983. The variation in temperature goes from -3.3 to 3.2°C with a standard deviation ( $\sigma$ ) of 1.5°C and in salinity, the interval is of 0.45 to -0.30 ppm ( $\sigma = 0.16$  ppm). In Figure 2 the salinity vertical scale has been inverted in order to make its correlation with T and the first mode of the principal components (which will be shown further on) clearer. [The salinity maximum is

**Tabla II.** Desviación estándar ( $\sigma$ ) de la anomalía y porcentaje de la varianza explicado por un ajuste estacional (anual + bianual) de los campos de temperatura (T), salinidad (S), velocidad geostrófica (V), nivel de mar ( $\eta$ ) y vorticidad ( $\zeta$ ).

**Table II.** Standard deviation ( $\sigma$ ) of the anomaly and variance percentage explained by a seasonal fit (annual + biannual) of the temperature (T), salinity (S), geostrophic velocity (V), sea level ( $\eta$ ) and vorticity ( $\zeta$ ) fields.

Variable	T	S	V	$\eta$	$\zeta$
$\sigma$	1.54°C	0.16ppm	8.6cm/s	7cm	0.07
Varianza Señal Estac.	94%	70%	39%	86%	
Confiable al	99%	96%	75%	99%	

lía de estas variables. Las anomalías presentan una gran variabilidad (Fig. 2). Los dos primeros parámetros (T y S) se destacan con máximos y mínimos en agosto de 1957 y durante marzo y mayo de 1983. Para temperatura la variación va desde -3.3 a 3.2°C con una desviación estándar ( $\sigma$ ) de 1.5°C; en salinidad el intervalo es de 0.45 a -0.30ppm ( $\sigma = 0.16$ ppm). En la Figura 2 se ha invertido la escala vertical de salinidad para facilitar visualmente su correlación con T y el 1er modo de las componentes principales (que se mostrarán más adelante). [El máximo de salinidad resulta de extraer un valor del ajuste estacional dado por (1) muy pequeño; como se explica en RM para el verano el ajuste estacional de salinidad no es confiable y la estructura en esta época corresponde a un mínimo, el cual es sólo resultado de la minimización del ajuste por cuadrados mínimos, por lo tanto, el máximo reportado no es confiable tampoco dado que lo que correspondería sería lo contrario, una anomalía negativa por la intrusión de aguas menos salinas a la del Golfo]. El nivel del mar va desde -12 a 15cm ( $\sigma = 7.5$ cm); el máximo corresponde al evento del ENOA de 1983 (destacando mayo). Los campos de velocidad y vorticidad varían de -14 a 19cm/s ( $\sigma = 8.6$  cm/s) y -0.11 a 0.10 ( $\sigma = 0.07$ ) respectivamente. Recordando que ambos son una medida de la pendiente y curvatura del nivel del mar (es decir:  $\eta_x = fV/g$  y  $\eta_{xx} = f^2\zeta/g$ ) en el lado derecho de las figuras se ha puesto los valores de  $\eta_x L$  y  $1/2\eta_{xx} L^2$  para  $L = 70$ km que corresponde al semiancho de la sección. Los límites correspondientes son de -6.8 a 9.3cm ( $\sigma = 4$ cm) y de -12.9 a 11.7cm ( $\sigma = 8$ cm) respectivamente. El intervalo y desviación estándar es mayor para  $\zeta$  que para V. Los extremos de estas variables no coinciden con fechas de ocurrencia del fenómeno del Niño, a excepción del máximo de vorticidad.

En la Figura 2 se aprecia cierta correlación entre T & -S, entre V &  $\zeta$ , y una buena correlación entre  $\eta$  con la T y S en la parte final de las series y de  $\eta$  con V y  $\zeta$  en la primera parte. La matriz de correlaciones entre todas las variables se calculó como

$$C_{kj} = \langle V_{kt} V_{jt} \rangle$$

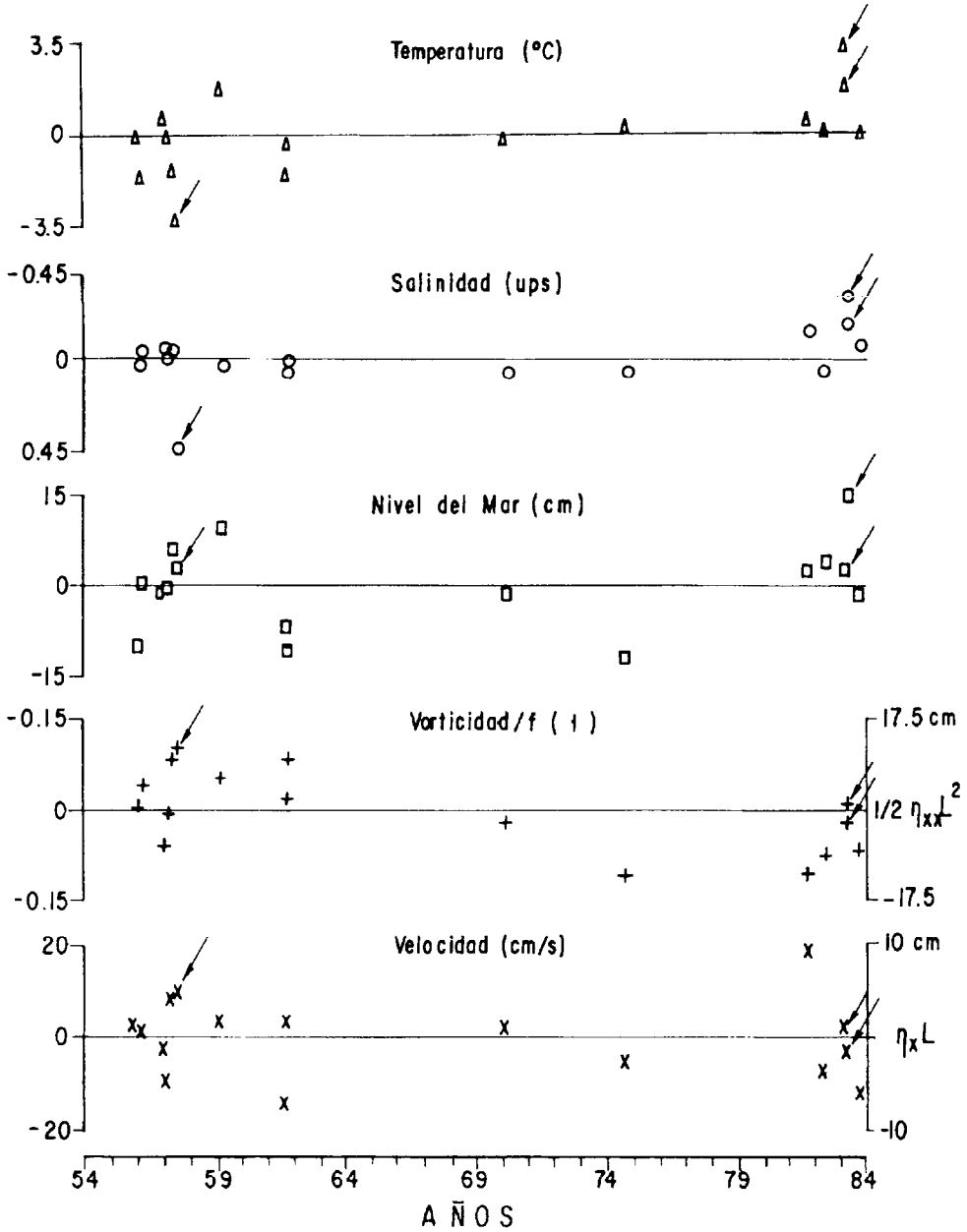
obtained by extracting a very small seasonal fit value given by (1). As explained by RM for the summer, the salinity seasonal fit is unreliable and the structure during this period corresponds to a minimum, which is only the result of the minimization of the least squares fit. Therefore, the reported maximum is also unreliable since the opposite would be expected: a negative anomaly because of the intrusion of waters less saline than the Gulf water.] The sea level goes from -12 to 15cm ( $\sigma = 7.5$ cm); the maximum corresponds to the 1983 ENSO event (noticeably May). The velocity and vorticity fields vary from -14 to 19cm/s ( $\sigma = 8.6$ cm/s) and -0.11 to 0.10 ( $\sigma = 0.07$ ) respectively. As both are a measure of the slope and curvature of the sea level (that is:  $\eta_x = fV/g$  and  $\eta_{xx} = f^2\zeta/g$ ) the values of  $\eta_x L$  and  $1/2\eta_{xx} L^2$  for  $L = 70$ km, corresponding to the halfwidth of the section, have been placed on the right-hand side of the figures. The corresponding limits are of -6.8 to 9.3cm ( $\sigma = 4$ cm) and of -12.9 to 11.7cm ( $\sigma = 8$ cm) respectively. The range and standard deviation are larger for  $\zeta$  than for V. The extremes of these variables, except for the vorticity maximum, do not coincide with the dates in which El Niño occurred.

In Figure 2 a certain correlation can be seen between T & -S, between V &  $\zeta$ , and a good correlation between  $\eta$  with T and S in the final part of the series and between  $\eta$  with V and  $\zeta$  in the first part. The correlation matrix between all these variables was computed as

$$C_{kj} = \langle V_{kt} V_{jt} \rangle$$

where  $\langle \dots \rangle$  means temporal average and  $V_{jt}$  are the data normalized to unity variance [i.e.,  $V_{jt} = (B_{jt} - \langle B_{jt} \rangle) / \sigma_j$ ].

The correlation matrix of the data is shown in Table III. From this, a highly significant correlation is extracted only for the T-S combination and a lesser one for T- $\zeta$ ; the first combination can be appreciated directly from the data, but not the second. The S and V fields are slightly related to  $\zeta$  and  $\eta$  and the correlation between S and  $\eta$  with V is very weak. In the following section, the temporal variability will be separated using the method



**Figura 2.** Anomalías de las diferentes variables para el período 1954-1983. Las flechas sobre los diferentes símbolos indican la ocurrencia del evento de El Niño Oscilación Austral (ENOA).  
**Figure 2.** Anomalies of the different variables for the 1954-1983 period. The arrows over the different symbols indicate the occurrence of the El Niño Southern Oscillation (ENSO) event.



**Tabla III.** Matriz de correlación de las variables obtenida de 16 observaciones. Los números subrayados son significativos con un Nivel de Confianza mayor que 99.9%; el marcado con asterisco (\*) es significativo al 88%.

**Table III.** Correlation matrix of the variables obtained from 16 observations. The underlined numbers are significant with a Confidence Level higher than 99.9%. The number marked with an asterisk (\*) is 88% significant.

T	1				
S	<u>-0.731</u>	1			
V	-0.050	0.057	1		
$\zeta$	-0.417*	0.336	0.216	1	
$\eta$	0.291	-0.344	0.252	0.182	1
	T	S	V	$\zeta$	$\eta$

donde  $\langle \dots \rangle$  significa promedio temporal y  $V_{jt}$  son los datos normalizados a varianza unitaria [i.e.,  $V_{jt} = (B_{jt} - \langle B_{jt} \rangle) / \sigma_j$ ].

En la Tabla III se muestra la matriz de correlación de los datos; de ésta se extrae solamente una correlación altamente significativa para la combinación T-S y menor para T- $\zeta$ ; la primer combinación es apreciable de los datos directamente, no así la segunda. Los campos de S y V se relacionan poco con  $\zeta$  y  $\eta$ ; y la correlación entre S y  $\eta$  con V es muy baja. En la siguiente sección se intenta separar la variabilidad temporal usando el método de Componentes Principales con el fin de tratar de extraer un patrón dominante en los datos, si es que existe.

### Componentes Principales

De la combinación de los datos (Fig. 2) y la matriz de correlación es posible distinguir algún grado de asociación entre las variables, sin embargo la dependencia temporal está mezclada u oscurecida. Una herramienta poderosa que permite separar patrones independientes de variabilidad en algún sentido (en este caso tiempo y variables) lo constituye la Descomposición en Valores Singulares (DVS) o Componentes Principales (CP) [también conocidos como Funciones Empíricas Ortogonales (FEOS)]. El formalismo para este caso consiste en separar las variables, que son funciones del tiempo, en una serie de modos que representan unos la parte temporal y otros

of Principal Components in order to try to extract a dominant pattern, if it exists, from the data.

### Principal Components

From the combination of the data (Fig. 2) and the correlation matrix it is possible to distinguish some degree of association between the variables. However, the temporal dependence is mixed or obscured. The Singular Values Decomposition (SVD) or Principal Components (PC) [also known as Empirical Orthogonal Functions (EOF)] is very useful in order to separate independent patterns of variability (in this case time and variables). The formalism for this case consists in separating the variables, which are a function of time, into a series of modes, some of which represent the temporal part and others the weight or amplitude of the different values, that is,

$$V_{it} = \sum_{k=1}^5 X_{ik} t_{kt}$$

$X_{ik}$  are the orthogonal eigenvectors, that is,

$$\sum_i X_{ik} X_{il} = \delta_{kl}$$

The variance of the five series of data (T, S, V,  $\zeta$ ,  $\eta$ ) is divided into five non-correlated

el peso o amplitud de las diferentes variables, es decir,

$$V_{it} = \sum_{k=1}^5 X_{ik} t_{kt}.$$

$X_{ik}$  son los autovectores ortogonales, es decir,

$$\sum_i X_{ik} X_{il} = \delta_{kl}.$$

La varianza de las cinco series de datos (T, S, V,  $\zeta$ ,  $\eta$ ) es dividida en cinco autovectores (componentes) no correlacionados. Los autovalores  $\lambda_k$  son equivalentes a la varianza de los diferentes modos, es decir,

$$Var_k = 100 \lambda_k \left[ \sum_{l=1}^5 \lambda_l \right]^{-1}$$

Los autovectores  $T_{kt}$  representan los distintos modos de variabilidad expandidos en el tiempo. Su normalización es tal que

$$\langle T_{kt} T_{lt} \rangle = (N - 1) \lambda_l \delta_{kl},$$

donde N es el número de observaciones de las variables. La correlación ( $P_{ik}$ ) del modo k ( $T_{kt}$ ) con la variable i ( $V_{it}$ ) se obtiene directamente de

$$P_{ik} = X_{ik} \sqrt{\lambda_k};$$

luego  $100 P_{ik}^2$  es el porcentaje de varianza de la variable i explicado por el modo k. En la Tabla IV se muestran las cuatro primeras componentes. En ésta se incluye la correlación de las CP con las variables, la varianza explicada por cada modo, y el cociente de "certeza"

$$\lambda_k (2/N)^{1/2} / (\lambda_k - \lambda_{k+1}).$$

Si este último es mayor o del orden de la unidad, entonces los autovectores o modos k y k+1 son una combinación lineal de los

eigenvectors (components). The eigenvalues  $\lambda_k$  are equivalent to the variance of the different modes, that is,

$$Var_k = 100 \lambda_k \left[ \sum_{l=1}^5 \lambda_l \right]^{-1}$$

The eigenvectors  $T_{kt}$  represent the different variability modes expanded in time. Their normalization is such that

$$\langle T_{kt} T_{lt} \rangle = (N - 1) \lambda_l \delta_{kl},$$

where N is the number of observations of the variables. The correlation ( $P_{ik}$ ) of the mode k ( $T_{kt}$ ) with the variable i ( $V_{it}$ ) is obtained directly from

$$P_{ik} = X_{ik} \sqrt{\lambda_k};$$

then,  $100 P_{ik}^2$  is the percentage of variance of the variable i explained by the mode k. The first four components are shown in Table IV. Also included are the correlation of the PC with the variables, the variance explained by each mode and the confidence ratio

$$\lambda_k (2/N)^{1/2} / (\lambda_k - \lambda_{k+1}).$$

If the latter is larger or of the order of unity, then the eigenvectors or modes k and k+1 are a linear combination of the real eigenvectors (North *et al.*, 1982). In the present case, the first two are of the order of 1, which makes them marginally acceptable.

The 86% of the variance is distributed in the first three modes. The first (with 42%) is a result of the variability of temperature and salinity with some contribution by  $\zeta$  and sea level and none by V. The correlation of the first mode with S is of -0.895 and with  $\zeta$  of -0.566. These variables are in counterphase with T which has a correlation of 0.908 with this mode. The second mode consists of or mainly represents the fields of V,  $\eta$  and  $\zeta$  (all in phase) and the third relates V and  $\zeta$  (out of phase). The fourth mode (with a low explained variance, 9%) explains the rest of the

autovectores verdaderos (North *et al.*, 1982). En nuestro caso los dos primeros son del orden de 1, lo cual los hace marginalmente aceptables.

El 86% de la varianza se distribuye en los tres primeros modos. el primero (con 42%) es un reflejo de la variabilidad de la temperatura y salinidad con algo de contribución de  $\zeta$  y nivel del mar y nula de V. La correlación del primer modo con S es de -0.895 y con  $\zeta$  es de -0.566, variables que están en contrafase con T que tiene una correlación de 0.908 con este modo. El 2º modo está constituido o representa principalmente los campos de V,  $\eta$  y  $\zeta$  (todos en fase) y el 3º relaciona a V y  $\zeta$  (fuera de fase). El cuarto modo (con poca varianza explicada, 9%) está explicando el resto de la variabilidad del nivel del mar y la vorticidad. El análisis de Componentes Principales ha logrado resaltar cierto grado de asociación entre las variables. Esto es, de la matriz de correlación de los datos no se extrae más que una buena correlación entre T y S; ahora se encuentra que T, S y  $\zeta$  tienen un grado de asociación claro, esto es, se correlacionan altamente con un cuarto invitado: el primer modo o componente que a su vez refleja la variabilidad conjuntamente de estas tres variables (o aquella variabilidad común no apreciable entre ellas). De igual manera, otro patrón de variabilidad, el segundo modo, resalta una correlación ahora entre V,  $\zeta$  y  $\eta$ . El tercer modo destaca alguna asociación entre V y  $\zeta$  únicamente.

### Evolución Temporal de los Modos

El análisis de los coeficientes expandidos en el tiempo de las componentes principales ( $T_{kt}$ ) resalta los distintos patrones presentes de variabilidad en los datos. Estos son precisamente aquellos en que la correlación de las variables es mejorada por medio de la comparación no entre ellas sino con un patrón separado. En la Figura 3 se muestran los dos primeros modos (correspondientes a los de la Tabla IV). En el primer modo se destacan tres extremos (señalados con flechas) correspondientes a agosto de 1957 y marzo y mayo de 1983, fechas en que se conocen los dos eventos más importantes del fenómeno de El Niño Oscilación Austral (ENOA). Este primer

variability of sea level and vorticity. The Principal Components analysis has managed to emphasize a certain degree of association between the variables. That is, from the correlation matrix of the data only a good correlation between T and S is obtained; it is found that T, S and  $\zeta$  have a high degree of association, that is, they correlate highly with a fourth guest: the first mode or component which in turn reflects the combined variability of these three variables (or that common variability not appreciable between them). Likewise, another variability pattern, the second mode, indicates a correlation this time between V,  $\zeta$  and  $\eta$ . The third mode indicates some association only between V and  $\zeta$ .

### Temporal Evolution of the Modes

The analysis of the time-expanded coefficients of the principal components ( $T_{kt}$ ) emphasizes the different variability patterns present in the data. They are precisely those in which the correlation between variables is improved by comparing them to a separate pattern and not to each other. In Figure 3, the first two modes (which correspond to those of Table IV) are shown. In the first mode, three extremes are noticeable (indicated with arrows) which correspond to August 1957 and March and May 1983, dates in which the two most important events of the El Niño Southern Oscillation (ENSO) phenomenon are known to have occurred. This first mode, as mentioned in the previous section, is mainly composed of the variables T and S and its structure is therefore basically that of these variables.

The first of the extremes (August 1957) corresponds to a negative anomaly of T and positive for S (see Fig. 2). That is, it corresponds to temperatures lower than expected in a seasonal cycle and higher for S (however, this latter case is unreliable and physically unacceptable). At this time, due to ENSO effects, an invasion by waters of tropical origin occurred, bringing waters of a lower temperature than that reached by the Gulf in summer (according to RM, the seasonal cycle variation of T is from 16°C in winter, reaching its maximum in summer at around 31°C). On the other hand, the sea level anomaly is

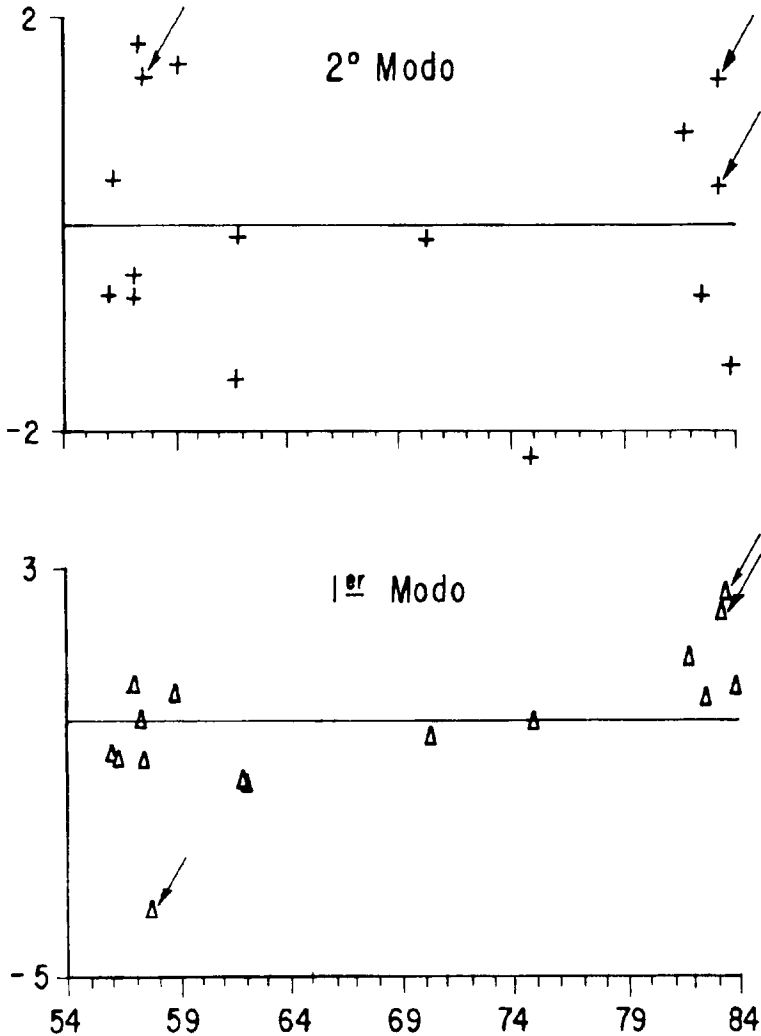


Figura 3. Evolución temporal de las dos primeras componentes principales. Las flechas indican la época del ENOA.

Figure 3. Temporal evolution of the first two principal components. The arrows indicate the ENSO periods.

modo, como se dijo en la sección anterior, está compuesto principalmente de las variables T y S por lo que su estructura es básicamente la de estas variables.

El primero de los extremos (agosto de 1957) corresponde a una anomalía negativa de T y positiva para S (ver Fig. 2), es decir,

positive (though small, since the intense summer heating gives rise to a large increase of  $\eta$  seasonally).

The other extremes of the first mode correspond to March and May 1983, with the opposite sign than the August 1957 case. This is also explained by an invasion of tropical

corresponde a temperaturas menores a la esperada con un ciclo estacional y mayores para S (sin embargo este último caso no es confiable ni aceptable físicamente). En esta época ocurrió, por efectos de ENOA, una invasión de aguas de origen tropical que trae consigo aguas de menor temperatura a la lograda por el Golfo en verano (de acuerdo a RM la variación del ciclo estacional de T es desde 16°C en invierno llegando a su máximo en verano con cerca de 31°C). Por su parte, la anomalía del nivel del mar es positiva (aunque pequeña, pues el gran calentamiento de verano trae consigo una alta elevación de  $\eta$  estacionalmente).

Marzo y mayo de 1983 corresponden a los otros extremos del primer modo y ocurre con signo opuesto al caso de agosto de 1957. Este resultado también se explica con una invasión de aguas tropicales pues ahora el ciclo estacional está apenas saliendo del mínimo de T y el primer mínimo de S (este campo tiene una fuerte componente bianual y este mínimo corresponde a agosto y ya fue explicado; ver RM). De aquí que la invasión de estas aguas, en este caso, produce anomalías positivas para T y negativas para S; también coincide con anomalía positiva de  $\eta$  (y en este caso grande debido al gran evento de El Niño 1982-1983).

El 2º modo (con 29% de la varianza explicada) está resolviendo la variabilidad de V,  $\zeta$  y  $\eta$  (Fig. 3b). En particular, está fuertemente correlacionado con V y  $\eta$  (ver Tabla IV) reflejando las anomalías positivas durante los eventos ENOA. Este modo refleja también las variaciones rápidas de V correspondientes a las ocupaciones de 1961, que estando separadas tan sólo una semana tienen una velocidad media con signo opuesto, como también ocurre en noviembre de dos años normales diferentes (1974 y 1981).

Los dos primeros modos reflejan la variabilidad interanual del Golfo de California, con algo de contaminación de escalas pequeñas). Esto es, se destaca entre los dos modos los máximos y mínimos de T, S y  $\eta$ . Temperatura y salinidad en contrafase y resueltos básicamente por el primer modo y el nivel del mar en el segundo (en combinación con V y  $\zeta$ ). En estas fechas se reporta la

waters since the seasonal cycle is now just leaving the minimum of T and the first minimum of S (this field has a strong biannual component and this minimum is statistically and physically significant; the second minimum corresponds to August, as already explained by RM). Therefore, in this case, the invasion of these waters produces positive anomalies for T and negative for S; it also coincides with a positive anomaly of  $\eta$  (and in this case large due to the 1982-1983 El Niño event).

The second mode (with 29% of the explained variance) resolves the variability of V,  $\zeta$  and  $\eta$  (Fig. 3b). In particular, it is strongly correlated with V and  $\eta$  (see Table IV) reflecting the positive anomalies during the ENSO events. This mode also reflects the fast variations of V corresponding to the 1961 occupations, which being separated by only one week, have the same mean speed but with opposite sign. This also occurred in November of two different normal years (1974 and 1981).

The first two modes reflect the interannual variability of the Gulf of California, with some small scale contamination. That is, the maxima and minima of T, S and  $\eta$  are noticeable from among the two modes. Temperature and salinity in counterphase are basically resolved by the first mode and sea level by the second (in combination with V and  $\zeta$ ). During these dates, the influence of ENSO in the Gulf of California is reported, mainly through the analysis of sea level data and by T-S properties (Robles and Marinone, 1987; Baumgartner *et al.*, 1985). However, the correlation of the three variables (T, S and  $\eta$ ) is not evident or represented in a single mode. This is due to the fact that, because of El Niño, the sea level has a single sign (positive) anomaly, while the temperature can have both depending on the time of year. In particular, negative anomalies are noticeable because the tropical waters invasion can have temperatures lower than those of the Gulf, thus cooling it (contrary to what occurs in the open coasts of South America). Therefore, the first mode has both negative and positive anomalies due to ENSO, depending on the time of year, and the second reflects anomalies which are always positive because of the greater weight of the sea level in this mode.

**Tabla IV.** Resultados para las cuatro primeras componentes de la Descomposición en Valores Singulares (DVS). Los números subrayados son significativos con un Nivel de Confianza mayor al 99.9%, los que tienen un asterisco (\*) a más del 99%, con signo (+) al 95% y con doble signo (++) al 90%.

**Table IV.** Results for the first four components of the Singular Values Decomposition (SVD). The numbers underlined are significant with a Confidence Level higher than 99.9%, the numbers with an asterisk (\*) higher than 99%, with the (+) sign at 95% and with the (++) sign at 90%.

Modo	1	2	3	4
Varianza explicada	42%	29%	15%	9%
Certeza	1.09	0.75	0.84	0.88
Autovectores				
T	0.625	0.019	0.038	0.291
S	-0.615	-0.078	0.093	-0.379
V	-0.073	0.599	0.788	0.115
ζ	-0.389	0.486	-0.488	0.602
η	0.273	0.631	-0.362	-0.629
Correlaciones con cada modo				
T	<u>0.908</u>	0.023	0.033	0.192
S	<u>-0.895</u>	-0.094	0.081	-0.251
V	-0.106	0.712*	0.685*	0.076
ζ	-0.566+	0.582+	-0.424++	0.399
η	0.397	<u>0.754</u>	-0.315	-0.416
Varianza explicada por cada modo				
T	82	0.	0.	4
S	80	1	1	6
V	1	51	47	1
ζ	32	34	18	16
η	16	57	10	17

influencia del ENOA (principalmente a través del análisis de datos de nivel del mar y por propiedades T-S) en el Golfo de California (Roblesy Marinone, 1987; Baumgartner *et al.*, 1985), pero la correlación de las tres variables (T, S y ζ) no resulta directa o representada en un solo modo. Esto se debe a que el nivel del mar tiene como anomalía debida a El Niño un solo signo (positiva), mientras que temperatura puede tener ambos dependiendo de la época del año. En particular, se destacan anomalías negativas pues la invasión de aguas tropicales puede ser de temperaturas menores a las del Golfo, enfriándolo (al contrario a lo que ocurre

Baumgartner and Christensen (1985) carried out a decomposition in Principal Components of a set of monthly anomalies of remote climatic variables (for the 1952-1974 period). The first mode which they found is composed of those indices which reflect ENSO. They correlated this mode with an equal time series of sea level and temperature anomalies in the Gulf of California (composed of several stations), finding a high correlation for the first (-0.72). Based on this, they concluded that 52% of the interannual variability can be explained as an expression of ENSO. In the

en las costas abiertas de América del Sur). Entonces el 1<sup>er</sup> modo tiene anomalías debidas al ENOA con ambos signos, dependiendo de la época del año, y el 2<sup>o</sup> refleja anomalías siempre positivas por el mayor peso del nivel del mar en este modo.

Baumgartner y Christensen (1985) hacen una descomposición en Componentes Principales de un conjunto de anomalías mensuales de variables climáticas remotas (para el período 1952-1974). El primer modo que encuentran está compuesto por aquellos índices que reflejan al ENOA. Este modo lo correlacionan con una serie de tiempo igual de anomalías del nivel del mar y de temperatura del Golfo de California (compuesto de varias estaciones) encontrando una alta correlación para con el primero (-0.72). En base a esto concluyen que el 52% de la variabilidad interanual puede explicarse como una expresión del ENOA. Nuestro resultado es del mismo orden y con bases de datos bien diferentes, con una serie de tiempo modesta cuya señal estacional es modelada con una descomposición armónica (con las limitaciones ya mencionadas) y removida para obtener las anomalías.

El tercero y cuarto modos ya con muy poca varianza, explican la variabilidad restante de velocidad, vorticidad y nivel del mar sin un patrón claro.

## CONCLUSIONES

La descomposición en Componentes Principales separó la influencia de fenómenos aperiódicos (ENOA) en la estructura de T y S. La alta correlación de estas variables y el nivel del mar con los modos permite concluir que más del 50% de la variabilidad no estacional es una consecuencia o expresión del forzamiento exterior del Golfo de California.

La pobre resolución temporal no permite inferir el origen de la variabilidad de escala menor a la estacional ni la interanual no debida a ENOA, aunque se detecta claramente que existe (representadas en los modos 2, 3 y 4). Sin duda, el forzamiento local es importante y se manifiesta también en escalas no estacionales.

present study, a similar result is obtained using very different data bases, with a modest time series whose seasonal signal is modelled with a harmonic decomposition (with the already mentioned limitations) and then removed in order to obtain the anomalies.

The third and fourth modes with very little variance, explain the remaining variability of velocity, vorticity and sea level with no clear pattern.

## CONCLUSIONS

The decomposition in Principal Components separated the influence of aperiodic phenomena (ENSO) in the structure of T and S. From the high correlation of these variables and sea level with the modes, it can be concluded that more than 50% of the non-seasonal variability is a consequence or expression of the external forcing in the Gulf of California.

Due to the low temporal resolution, the origin of the variability, both on a lower scale than the seasonal and the interannual not due to ENSO, cannot be inferred, though it is clearly detected (represented in modes 2, 3 and 4). Undoubtedly local forcing is important and is also shown on a non-seasonal scale.

The first mode separately reflects the hydrographic structure, since velocity is completely excluded from this mode and vorticity makes a small contribution (see Table IV). The opposite occurs in the second and third modes, i.e., they completely exclude the hydrographic variability and reflect the dynamic variability. It seems that the ENSO effect is not as noticeable in the geostrophic velocity field or that more data are needed to resolve it.

It is found that temperature anomalies can be positive or negative depending on the time of year. This is different to what occurs in South America where the temperature anomalies are always positive during ENSO. These sign changes can explain why Baumgartner and Christensen (1985) did not find such a high correlation in temperature as in

El primer modo refleja por separado la estructura hidrográfica, pues la velocidad queda totalmente excluida de este modo y la vorticiad tiene una contribución pequeña (ver Tabla IV). Lo contrario ocurre en el segundo y tercer modos, i.e., éstos excluyen por completo la variabilidad dinámica. Aparentemente, el efecto del ENOA no es tan notable en el campo de velocidad geostrofica, o se necesitan más datos para resolverlo.

Se encuentra que las anomalías de temperatura pueden ser positivas o negativas dependiendo de la época del año. Esto es diferente a lo que ocurre en América del Sur donde las anomalías de temperatura son siempre positivas durante los ENOA. Esta alternancia de signo puede ser la razón por la cual Baumgartner y Christensen (1985) no encuentran una correlación tan alta en temperatura como en el nivel del mar con su primer modo (representativo del ENOA). Posiblemente, la razón por la cual ellos no encuentran este tipo de anomalías es que su serie de temperatura está compuesta del promedio de estaciones de Mazatlán, Topolobampo, Guaymas y La Paz; resultando en una serie definitivamente con características del Pacífico donde no se alcanzan las temperaturas tan altas como las del interior del Golfo.

#### AGRADECIMIENTOS

A J.M. Robles por facilitar parte de los datos de este trabajo y sus valiosos comentarios, a S. Ramos por los dibujos y a P. Ripa por sus comentarios y consejos en la preparación del trabajo.

#### LITERATURA CITADA

Badan-Dangon, A., Koblinsky, C.J. y Baumgartner, T. (1985) Spring and Summer in the Gulf of California: Observations and Surface Thermal Patterns. *Oceanologica Acta*, 8: 13-22.

Baumgartner, T. y Christensen, N. (1985) Coupling the Gulf of California to Large-Scale Interannual Climatic Variability. *Journal of Marine Research*, 43: 825-848.

sea level with their first mode (representative of ENSO). It is possible that the reason they do not find this type of anomalies is that their temperature series is made up of the average from stations in Mazatlán, Topolobampo, Guaymas and La Paz. This results in a series with definite Pacific characteristics where temperatures as high as those in the inner Gulf are not reached.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

To J.M. Robles for providing part of the data used in this study and for his valuable comments, to S. Ramos for the drawings and to P. Ripa for his comments and advice on the preparation of this paper.

English translation by Christine Harris.

---

Baumgartner, T., Ferreira-Bartrina, V., Scharder, H. y Soutar, A. (1985) A 20 Year Varve Record of Siliceous Phytoplankton Variability in the Central Gulf of California. *Marine Geology*, 64:113-129.

Bray, N. (1988) Thermohaline Circulation in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 93: 4993-5020.

Christensen, N., de la Paz, R. y Gutiérrez, G. (1983) A Study of Sub-Inertial Waves of the West Coast of México. *Deep Sea Research*, 30:835-850.

Fomin, L.M. (1984) Calculation of the Absolute Velocity of Currents in the Ocean by the Dynamic Method, Based on the Principle of Minimum of Kinetic Energy. *Oceanology*, 24:33-39.

Marinone, S.G. y Ripa, P. (1988) Geostrophic Flow in the Guaymas Basin, Central Gulf of California. *Continental Shelf Research*, 8:159-166.

North, G.R., Bell, T.L., Cahalan, R.F. y Moeng, F.J. (1982) Sampling Errors in the Estimation of Empirical Orthogonal Functions. *Monthly Weather Review*, 110:699-706.



Ripa, P. y Marinone, S.G. (1988) Seasonal Variability of Temperatura, Salinity, Velocity, Vorticity and Sea Level in the Central Gulf of California, as Inferred from Historical data. Submitted to the Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.

Robles, J.M. y Marinone, S.G. (1987) Seasonal and Interannual Thermohaline Variability in the Guaymas Basin of the Gulf of California. *Continental Shelf Research*, 7:715-733.