

## VARIABILIDAD OCEANOGRÁFICA Y CLIMÁTICA EN EL BAJO GOLFO DE CALIFORNIA: INFLUENCIAS DEL TRÓPICO Y PACÍFICO NORTE

### OCEANOGRAPHIC AND CLIMATIC VARIABILITY IN THE LOWER GULF OF CALIFORNIA: LINKS WITH THE TROPICS AND NORTH PACIFIC

Gladys Bernal  
Pedro Ripa<sup>†</sup>  
Juan Carlos Herguera\*

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada  
Km 107 Carretera Tijuana Ensenada  
Ensenada, Baja California, México  
\*E-mail:herguera@cicese.mx

*Recibido en abril de 2001; aceptado en septiembre de 2001*

#### RESUMEN

Se exploraron las relaciones entre el clima y oceanografía del Bajo Golfo de California (BGC) y la variabilidad física observada en el Océano Pacífico a escalas de interanuales a decadales, la cual es recogida mayormente por dos índices: el índice de El Niño – Oscilación Austral (ENOA) y el índice de la Oscilación Interdecadal del Pacífico Norte (ODPN). Se compararon las series de tiempo de temperatura superficial del mar (TSM), rapidez de los vientos, precipitación pluvial y nivel del mar para la región de La Paz, Baja California Sur, México, en el BGC, con estos índices climáticos, encontrando que los forzamientos más importantes provienen del Pacífico tropical y ecuatorial, representados por el índice del ENOA y asociados significativamente con la precipitación, la TSM y el nivel del mar. La influencia del Pacífico Norte, representada por el índice de la ODPN, está asociada a los vientos y, en menor medida, a la TSM y la precipitación. Se encontró que la variabilidad de la TSM de la región está controlada por ambos índices. Se propone un modelo para explicar el control que cada uno de ellos ejerce sobre la variabilidad de la TSM en el BGC. En este modelo el exceso de calor aportado por aguas tropicales superficiales por la intensificación de los eventos de El Niño a partir de los años ochenta, junto con el calentamiento de las aguas observado a lo largo del siglo pasado, son disipados parcialmente por vientos invernales más fríos e intensos derivados de cambios en los patrones de circulación atmosférica del Pacífico Norte y capturados por las anomalías positivas de la ODPN. Se propone que este proceso controla la variabilidad oceanográfica especialmente a partir de la década de los años setenta cuando la TSM muestran un cambio en el signo de su respuesta a los vientos, fenómeno que no fue observado en décadas anteriores.

*Palabras clave:* ENOA, ODPN, Golfo de California, TSM, precipitación, vientos.

#### ABSTRACT

The links between climate and oceanography in the lower Gulf of California (LGC) and the observed physical variability in the open Pacific were studied on interannual to decadal timescales. Two indices

reflect the North Pacific's oceanic and climatic variability: the *El Niño* Southern Oscillation index (ENSO) and the North Pacific Decadal Oscillation index (PDO). The sea surface temperatures, wind speed, precipitation and sea level records of La Paz region, Baja California Sur (Mexico) in the LGC were used to compare them with the PDO and ENSO indices. The most important forcing processes were observed coming from the tropical and the equatorial Pacific, represented by the ENSO index, significantly associated with precipitation, sea surface temperature (SST) and sea level. The Northern Pacific influence, represented by the PDO index, is associated with the winds and to a lesser extent with SSTs and precipitation. These results show that SST variability in the region is controlled by both indices. A model is proposed to explain the control that each of them exerts on the LGC SST variability. In this model the excess heat brought by surface tropical waters, especially after the intensification of ENSO events since the 1980s, in addition to the long term warming observed over the past century, is partially dissipated by stronger winter winds in the gulf. These stronger and cooler winds, derived from changes in the atmospheric circulation patterns of the North Pacific and captured by the PDO positive anomalies, act as negative feedback to the warming dissipating part of the accumulated heat and dampening the raise in SSTs. This process is proposed to operate, especially after the 1970s sign shift of the PDO, when no change in the SSTs' trend occurs showing an opposite behavior in respect to wind variability, which was not observed for previous decades.

*Key words:* ENSO, PDO, Gulf of California, SST, rainfall, winds.

## INTRODUCCIÓN

La oceanografía del Pacífico subtropical en el Hemisferio Norte está controlada por la influencia de la Corriente Norecuatorial, el Giro Subtropical del Pacífico Norte y la creciente importancia del calentamiento oceánico del siglo pasado a escalas que van de interanual a interdecadal. Dos índices climáticos reflejan esta variabilidad: el índice de la Oscilación Interdecadal del Pacífico Norte (ODPN) y el índice de El Niño y la Oscilación Austral (ENOA) (Emery y Hamilton, 1985; Norton *et al.*, 1985; Mantua *et al.*, 1997; Zhang *et al.*, 1997; Gershunov *et al.*, 1999). El índice de ENOA (Bjerkness, 1969) está basado en las diferencias de presión atmosférica entre Tahití y Darwin, Australia. En años normales, la presión en el Pacífico ecuatorial oriental (Tahiti) es relativamente alta sobre aguas más frías, mientras que del lado occidental (Darwin), sobre la alberca de aguas cálidas del Pacífico ecuatorial y tropical occidental, se localiza un centro de baja presión, que da origen a intensas

## INTRODUCTION

The oceanography of the subtropical Pacific Ocean in the northern hemisphere is controlled by the influence of the North Equatorial Current, the North Pacific Subtropical Gyre and the increasing importance of the ocean warming over the last century at interannual and interdecadal scales. Two climatic indices reflect this variability: the North Pacific Decadal Oscillation (PDO) index and the *El Niño* Southern Oscillation (ENSO) index (Emery and Hamilton, 1985; Norton *et al.*, 1985; Mantua *et al.*, 1997; Zhang *et al.*, 1997; Gershunov *et al.*, 1999). The ENSO index is based on the differences of atmospheric pressure between Tahiti and Darwin, Australia (Bjerkness, 1969). In normal years, the pressure at the eastern Equatorial Pacific (Tahiti) is relatively high over colder water, while at its western side (Darwin), over the warm water pool of the equatorial and western tropical Pacific, there is a low pressure center, which originates intense rainfall on that region.

lluvias en esta región. Durante los eventos de El Niño hay un desplazamiento de la fuente de calor atmosférico hacia el este, lo que ocasiona un descenso en la presión del Pacífico ecuatorial, en su porción oriental, y un ascenso, en su parte occidental, asociados a una alteración general de los patrones de precipitación en la zona ecuatorial que se repite con una periodicidad entre 2 y 7 años. En contraste, el índice de la ODPN, derivado del primer modo de las Funciones Empíricas Ortogonales (FEOs) de las temperaturas superficiales del Pacífico, al norte de los 20°N, muestra una importante componente decadal (Mantua *et al.*, 1997; Zhang *et al.*, 1997). En la región de nuestro estudio, incluida en el subtropico, se puede considerar que el índice ENOA representa la influencia tropical en la variabilidad climática y oceánica, mientras que el ODPN representa la del Pacífico Norte.

Durante los periodos en los que el índice ODPN es positivo (v.g. 1923–1943 y 1977–1998), las anomalías de las temperaturas superficiales del mar en el Pacífico Norte presentan una distribución similar a la de un evento de El Niño (ENOA negativo). Así, mientras el Pacífico oriental y la corriente de frontera oriental (Corriente de California) presentan anomalías cálidas, el Pacífico Norte central presenta anomalías frías (Mantua *et al.*, 1997; Zhang *et al.*, 1997). Por otro lado, se ha observado cómo durante periodos en los que la ODPN se encuentra en su modo positivo, los eventos de El Niño tienen un efecto mucho más intenso sobre la porción occidental de Norteamérica y la frontera oriental del Pacífico Norte, mientras que durante los periodos en los que la ODPN está en su modo negativo (antes de 1923 y de 1943 a 1977), los eventos de El Niño son de menor intensidad y los eventos asociados a La Niña se amplifican (Gershunov *et al.*, 1999). El último cambio del índice ODPN se produjo durante 1976–77, viéndose afectadas un gran número de variables oceanográficas

Durante *El Niño* events, there is a displacement of the source of atmospheric heat eastwards, causing a decrease in the Equatorial Pacific pressure in its eastern side and an increase in the western side, associated with a general alteration of the precipitation patterns of the equatorial zone, a phenomenon known to recur with a periodicity between 2 and 7 years. In contrast, the PDO index, derived from the first mode of the Empirical Orthogonal Functions (EOFs) of the North Pacific's sea surface temperatures (SSTs) north of 20°N, shows an important decadal component (Mantua, *et al.*, 1997; Zhang *et al.*, 1997). In our study region, considered as part of the subtropical domain, the ENSO represents the tropical influence in the climatic and oceanic variability, while the PDO represents that from the North Pacific.

During periods when the PDO index is positive (e.g. 1923–1943 and 1977–1998), the sea surface temperature anomalies in the North Pacific exhibit a similar distribution to that of an *El Niño* event (negative ENSO). Periods with a positive PDO show warm anomalies in the eastern tropical Pacific and at its eastern North Pacific boundary current (the California Current), while the central North Pacific is colder (Mantua *et al.*, 1997; Zhang *et al.*, 1997). Furthermore, during periods when the PDO is in its positive mode, the *El Niño* events have shown to have a more intense effect on the western side of North America and the eastern boundary of the North Pacific, whereas during periods when the PDO is in its negative mode (pre-1923 and 1943–1977), the *El Niño* events seem to be less intense and the events associated to *La Niña* are amplified (Gershunov *et al.*, 1999). The last change in the PDO index occurred during 1976–77, affecting a large number of oceanographic variables all over the North Pacific (Norton *et al.*, 1985; Lange *et al.*, 1990; McGowan *et al.*, 1998; Levitus *et al.*, 2000). This change has been associated with the predominance of positive

para todo el Pacífico Norte (Norton *et al.*, 1985; Lange *et al.*, 1990; McGowan *et al.*, 1998; Levitus *et al.*, 2000). Este cambio está asociado al predominio de anomalías positivas en la temperatura superficial y en el nivel del mar en la región de frontera oriental del Pacífico Norte.

La oceanografía del Golfo de California, cuya boca está localizada en la zona de convergencia de la Corriente Ecuatorial y el Giro del Pacífico Norte, responde sensiblemente al fenómeno ENOA (Baumgartner y Christensen, 1985; Robles y Marinone, 1987; Torres-Orozco, 1993; Lavín *et al.*, 1997; Trasviña *et al.*, 1999; Castro *et al.*, 2000). Los resultados de las observaciones durante años de El Niño muestran una anomalía positiva en las TSM más temprana, más profunda y más persistente a lo largo del Golfo de California, lo que a su vez sugiere una mayor penetración y permanencia de aguas ecuatoriales asociadas con anomalías positivas del nivel del mar. Asociado a este calentamiento de la superficie del mar se han observado una mayor incidencia de tormentas y un aumento neto en la precipitación (Sancetta, 1995; Salinas-Zavala *et al.*, 1998). Se conoce poco acerca de la respuesta oceanográfica del Golfo de California a la variabilidad de largo período caracterizada por el ODPN. Se esperaría que durante períodos positivos de ODPN las características de los años de El Niño se intensificarían, como sucedió después de 1977, de una forma similar a lo que ocurre en la vecina Corriente de California. Sin embargo, la configuración geográfica del Golfo de California, caracterizado por ser un mar profundo, estrecho y alargado en dirección NW-SE, limitado por la árida península de Baja California al occidente y por los desiertos de Sonora y Sinaloa al oriente, le confiere un clima de carácter más continental que el de la vecina Corriente de California. Los cambios estacionales en la posición latitudinal y la intensidad del sistema de alta presión del

anomalías en las SSTs y el nivel del mar en la zona de frontera oriental del Pacífico Norte.

The oceanography of the Gulf of California that opens through its mouth to the convergence of the North Equatorial Current and the North Pacific Gyre, is highly responsive to the ENSO phenomenon (Baumgartner and Christensen, 1985; Robles and Marinone, 1987; Torres-Orozco, 1993; Lavín *et al.*, 1997; Trasviña *et al.*, 1999; Castro *et al.*, 2000). Results from observations during *El Niño* years show an earlier, deeper and more persistent warm water anomaly throughout the gulf, that suggests a larger penetration and longer residence times of equatorial waters into it, associated with positive sea level anomalies, a higher occurrence of storms and a net increase in precipitation (Sancetta, 1995; Salinas-Zavala *et al.*, 1998). Little is known about the oceanographic response of the Gulf of California to the long-term variability characterized by the PDO. We would expect an intensification of ENSO events during positive PDO years, such as those after 1977, as in the nearby California Current. However, the geographic configuration of the Gulf of California, a deep, narrow and elongated NW-SE trending sea, bounded by the arid Baja California Peninsula to the West and by the Sonoran and Sinaloa Deserts to the East, constrains its continental climate in contrast with the temperate marine California Current climate. Seasonal changes in the latitudinal position and strength of the North Pacific high pressure system relative to the North American low, control the seasonal reversing winds along the gulf: cold and dry air sweeping from the NW in winter and warm and humid air blowing from the SE in summer (Badan-Dangon *et al.*, 1991).

In this work time-series of SSTs, winds, sea level and precipitation were analyzed for the Lower Gulf of California, in the region of La Paz basin (fig. 1) and compared them with the two indices for the Pacific, the ENSO and the

Pacífico Norte, en relación al centro de baja presión de Norteamérica, controlan la inversión estacional de los vientos a lo largo del golfo: aire frío y seco proveniente del NW en invierno y aire tibio y húmedo del SE en verano (Badan-Dangon *et al.*, 1991).

En este trabajo se analizaron series de tiempo de temperatura superficial del mar (TSM), vientos, nivel del mar y precipitación en el Bajo Golfo de California, en la región de la cuenca de La Paz (fig. 1), y se compararon con los dos índices del Pacífico, el del ENOA y el de la ODPN, con el objetivo de establecer la influencia que cada uno de éstos ejerce sobre la variabilidad climática y oceanográfica observada en la región.

## METODOLOGÍA

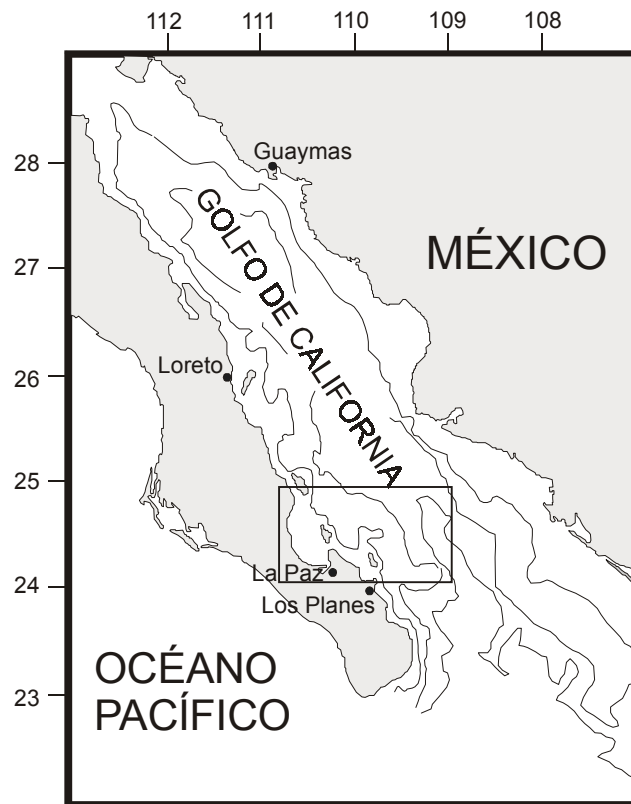
Se utilizaron datos de temperatura superficial del mar y de vientos de la base de datos COADS (*Comprehensive Oceanic and Atmospheric Data Set*; Fletcher *et al.*, 1983) para la región comprendida entre los 24–25°N y los 109–111°W (fig. 1). Los datos provenientes de localidades dentro del cuadrante se promediaron, espacial y temporalmente (mensualmente), obteniendo una serie discontinua entre 1861 y 1997. Los datos sobre nivel del mar provienen de la base de datos del CICESE (Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada) y son promedios mensuales de mediciones tomadas en La Paz, Baja California Sur (BCS), México, entre 1952 y 1983, los cuales se completaron con datos de Loreto, BCS, hasta 1990. Los datos de Loreto fueron usados después de comprobar que las series de anomalías en La Paz y Loreto se comportan de una manera similar (media e intervalo anual). Los datos de precipitación provienen de una base de datos elaborada en CICESE, a partir de información del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y del Servicio Meteorológico Nacional (Quintas, 2000). Se trata de totales

PDO, in order to establish the influence that each of these indices exerts on the climatic and oceanographic variability of this region.

## METHODOLOGY

Sea surface temperature and wind data were used from the COADS (*Comprehensive Oceanic and Atmospheric Data Set*; Fletcher *et al.*, 1983) database for the region between 24–25°N and 109–111°W (fig. 1). Data from this quadrant were spatially and temporally (monthly) averaged, obtaining a discontinuous series between 1861 and 1997. Sea surface level data were obtained from a CICESE's (*Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada*) database and are monthly averages of records taken in La Paz, Baja California Sur (BCS), Mexico, between 1952 and 1983 and completed with data from Loreto, BCS, until 1990. Data from Loreto were used after verifying that anomalies in La Paz and Loreto (mean and annual interval) behave similarly. Precipitation data were extracted from a database generated at CICESE with information from the *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua* (Mexican Institute of Water Technology) and the *Servicio Meteorológico Nacional* (National Meteorological Service) (Quintas, 2000). These data correspond to monthly precipitation totals between 1951 and 1990 measured at Los Planes meteorological station (24°4'N; 109°59'W) located near the city of La Paz. PDO and ENSO indices were obtained from NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration of the United States of America: <http://www.noaa.gov/>) and correspond to monthly data between 1900 and 1998. Anomalies were calculated for each series (to each particular value its mean was subtracted) and the annual series (the annual average).

The most complete instrumental time-series for this region begin in 1952. The winds



**Figura 1.** Mapa de la zona de estudio en el Golfo de California. El cuadrante muestra el área de estudio. (●) Estaciones de nivel del mar (La Paz y Loreto) y de precipitación (Los Planes) de donde provienen los datos utilizados en este trabajo.

**Figure 1.** Map of the study site in the Gulf of California. The quadrant shows the study area. (●) Sea level stations (La Paz and Loreto) and precipitation (Los Planes) from which data used in this research come.

mensuales de precipitación entre 1951 y 1990 tomados en la estación meteorológica de Los Planes, BCS (24°4'N; 109°59'W), localizada cerca de la ciudad de La Paz. Los índices ODPN y ENOA fueron obtenidos de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration* de los Estados Unidos de América: <http://www.noaa.gov/>) y corresponden a datos mensuales entre 1900 y 1998. De todas las series se calcularon las anomalías (cada valor menos su media) y las series anuales (resultado del promedio anual).

and the SSTs time-series have an important data gap between 1912 and 1949, whereas sea level and precipitation series are available but since 1952. This was the main reason why we decided to use data from the period between 1952 and 1990, so that we would be able to perform the comparisons and statistical analyses of all the series. Owing to the lack of data for some months, we used the “splines” interpolation method in order to transform the series into a continuous one. Interpolated series were compared to the original ones and no

Las series instrumentales de tiempo más completas para esta región comienzan a partir de 1952. Las series de vientos y TSM tienen un vacío importante de datos entre 1912 y 1949, mientras que sólo se cuenta con series de nivel del mar y precipitación a partir de 1952. Esta fue la principal razón por la que se optó por trabajar con los datos correspondientes al periodo entre 1952 y 1990 para poder realizar las comparaciones y análisis estadísticos de todas las series. A falta de datos en algunos meses, utilizamos el método de interpolación por “*splines*” con el fin de hacer continuas las series. Las series interpoladas se compararon con las originales y no se encontraron diferencias significativas entre ambas, asegurándonos de no introducir una señal artificial con este tipo de interpolación. Los resultados derivados de este ejercicio provienen de comparaciones gráficas y de análisis de funciones empíricas ortogonales (FEOs) a partir de las series mensuales, después de aplicar un promedio continuo de 12 meses a fin de trabajar con promedios anuales.

## RESULTADOS

### Variabilidad anual

El ciclo anual de la TSM en la cuenca de La Paz presenta dos estaciones bien definidas con respecto al patrón estacional de vientos (fig. 2). Durante invierno-primavera, los menores niveles de insolación junto con la influencia de los vientos del NW, son los causantes del enfriamiento de las aguas superficiales hasta alcanzar sus mínimos anuales (21°C–24°C), mientras que las TSMs más elevadas (27°C–31°C) se registran durante verano-otoño, cuando la insolación es mayor y vientos más débiles del SE, acarrear por advección aguas cálidas del trópico hacia el golfo.

El ciclo anual del nivel del mar está en fase con el de la TSM (fig. 2), de tal manera que

significant differences were found between them, assuring not to introduce an artificial signal by using this kind of interpolation. The results derived from this exercise come from graphic comparisons and Empirical Orthogonal Functions (EOFs) analyses from monthly series, after applying a 12-month average in order to operate with yearly averages.

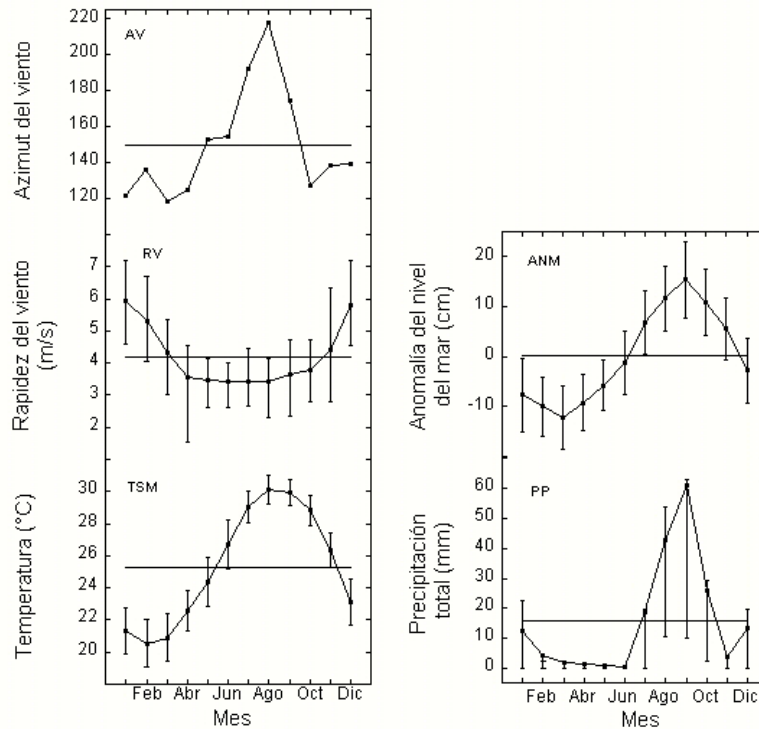
## RESULTS

### Annual variability

The annual cycle of the SST for the La Paz basin shows two well-defined seasons in respect of the wind patterns (fig. 2). During winter-spring, the lower insolation levels together with the influence of the NW winds, cause surface waters to cool to their minimum annual values (21°C–24°C), while when the highest SSTs (27°C–31°C) are observed during summer-autumn, the solar insolation is higher, and weaker winds from the SE advect warm tropical water into the gulf.

The annual cycle of the sea level is in phase with the SSTs (fig. 2). During the cooler winter and spring months, the anomalies are negative, while during the warmer summer and early fall these are positive. The maximum as well as the minimum values of the sea level anomalies (SLA) are reached a month after the maximum and the minimum SSTs. Annual changes in the sea level are related to changes in temperature and salinity of the water column, forced locally and remotely by the Pacific Ocean through the mouth of the Gulf of California (Ripa, 1990, 1997; Beier, 1997; Lavin *et al.*, 1997).

The main rainfall period occurs during August and September (fig. 2). The winter rains, of lesser importance than those in summer (less than 15% of the annual rainfall), occur mainly in December and January as a response to climatic conditions in the North



**Figura 2.** Ciclo anual del clima en la región de La Paz: Azimut o dirección dominante del viento, en grados; rapidez de los vientos; temperatura superficial del mar (TSM), anomalías del nivel del mar (ANM); y precipitación mensual total. Las barras de error representan, la desviación estándar, para las temperaturas y el nivel del mar; y los cuartiles 1 y 3, para la precipitación y los vientos.

**Figure 2.** Climate annual cycle in the La Paz region: Azimuth or dominant wind direction, in degrees; wind speed; sea surface temperature (SST), sea level anomalies (SLA) and total monthly precipitation. Error bars represent the standard deviation for temperatures and sea level; and quartiles 1 and 3, for precipitation and winds.

durante los meses más fríos de invierno y primavera las anomalías son negativas, mientras que durante el período más cálido (verano e inicios del otoño) éstas son positivas. Tanto el máximo como el mínimo de las anomalías del nivel del mar (ANM) se alcanzan un mes después que el máximo y mínimo de la TSM. Los cambios anuales en el nivel del mar están relacionados con cambios en la temperatura y salinidad de la columna de agua, forzados local y remotamente por el Océano Pacífico, a través

Pacific during this season (Salinas-Zavala *et al.*, 1990). Comparing the annual cycle of the SSTs and precipitation, summer rains are present when the SST rises above 28°C, indicating contributions by local convective activity. Another observation worth mentioning in this respect is how summer rains show their greatest variability precisely during summer, in association with passing storms brought by late summer hurricanes that occasionally hit the tip of the Baja California Peninsula.



de la boca del Golfo de California (Ripa, 1990, 1997; Beier, 1997; Lavín *et al.*, 1997).

El principal período de lluvias ocurre durante los meses de agosto y septiembre (fig. 2). Las lluvias de invierno, de mucha menor importancia que las de verano (menos del 15% de la lluvia anual), ocurren principalmente en diciembre y enero, y responden a las condiciones climáticas del Pacífico Norte durante esta estación (Salinas-Zavala *et al.*, 1990). Al comparar el ciclo anual de las TSMs y la precipitación se observa que las lluvias de verano ocurren principalmente cuando la TSM sobrepasa los 28°C, lo que indica aportes por actividad convectiva local. Por otro lado, es notorio cómo las lluvias de verano son las que presentan la mayor variabilidad en el ciclo anual, debido al efecto de las tormentas asociadas con huracanes que, durante el verano, ocasionalmente alcanzan la punta de la Península de Baja California.

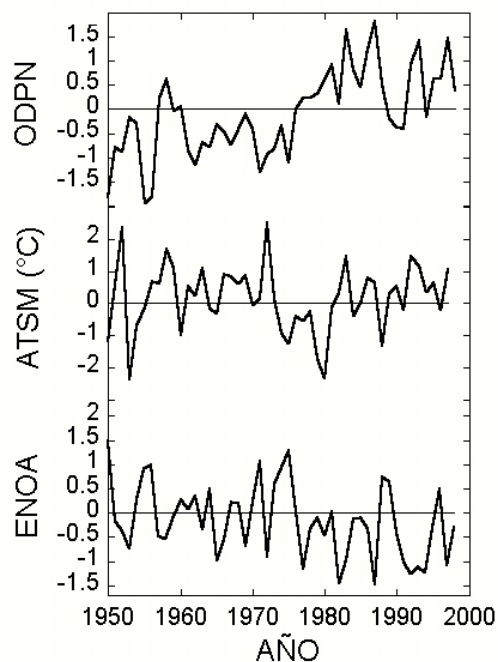
#### Variabilidad interanual

Las series de tiempo de la TSM muestran de manera consistente un techo en sus valores máximos durante los veranos alrededor de los 31°C, mientras que las temperaturas de invierno muestran una mayor variabilidad que se refleja en las barras de la desviación estándar de la figura 2. Una de las implicaciones de esta diferencia en la variabilidad estacional es que los cambios climáticos interanuales se manifiestan principalmente en las TSM de invierno, como parece ocurrir en el resto del Pacífico nororiental (Emery y Hamilton, 1985; McGowan *et al.*, 1998). Este límite superior de las temperaturas de verano, alrededor de los 31°C, es debido posiblemente a una intensificación de los procesos de transferencia de calor latente a la atmósfera, a través de una mayor evaporación, y a la formación de nubes que potencian el albedo en la región y que actúan

#### Interannual variability

Sea surface temperature time-series exhibit consistently a ceiling in their maximum values during summer around 31°C while during winter they show a higher variability, a feature readily appreciated from the standard deviation bars in figure 2. One of the implications of this different seasonal variability is that the interannual climatic changes are manifested mainly in the SSTs for winter, as it seems to happen in the rest of the NE Pacific (Emery and Hamilton, 1985; McGowan *et al.*, 1998). The mechanism that keeps the upper limit of summer SSTs around 31°C, is probably an intensification of the latent heat transfer to the atmosphere through stronger evaporation and cloud formation, which enhances the albedo over this region, that acts as a negative feedback to the warming.

In figure 3 a comparison between the ENSO and the PDO indices, as well as the SSTs averaged annual anomalies are shown. The variabilities of the SST in the La Paz basin and the ENSO are anti-correlated as expected, except for a short interval during the transition of 1976-77 (PDO's shift in sign). During this transition the SST anomalies became negative until the 1982-83 *El Niño* event, considered as the strongest of the study period, when anomalies become positive again. Because of the geographic proximity of the Gulf of California to the California Current, we would expect that a positive PDO index to be associated with warm conditions inside the gulf. However, the average of the monthly SST anomalies between 1950 and 1976 is +0.26°C, while between 1977 and 1990 the average is -0.15°C. This indicates that relatively cooler conditions are present since 1977. Despite the fact that after the 1982-83 *El Niño* event the anomalies reach positive values, there is a remarkable decrease in the temperature during the transition. Moreover,



**Figura 3.** Comparación entre las anomalías de la temperatura superficial del mar (ATSM) en la región de La Paz y los índices de El Niño-Oscilación Austral (ENOA) y de la Oscilación interdecadal del Pacífico Norte (ODPN).

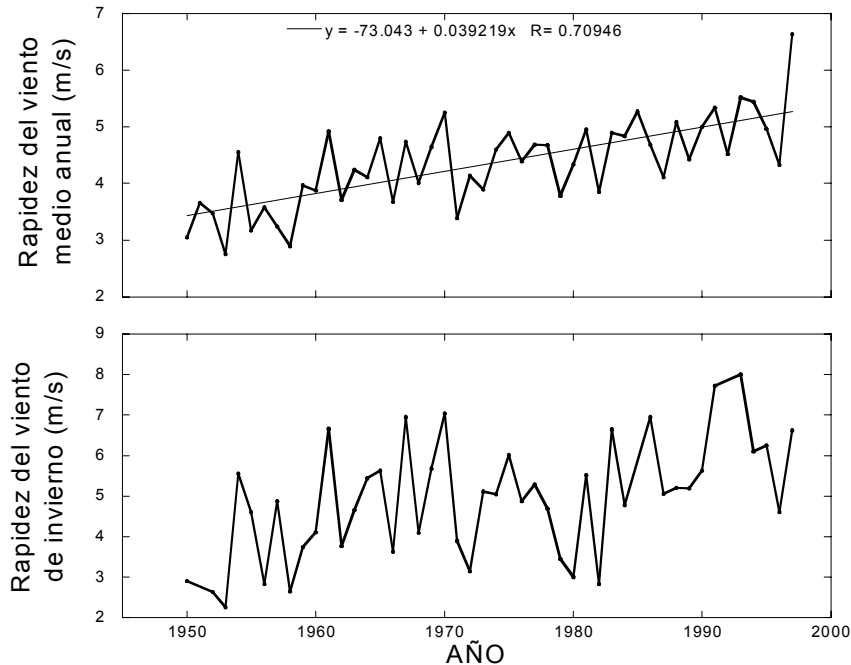
**Figure 3.** Comparisons between sea surface temperature anomalies (ATSM) in the La Paz region, and the El Niño Southern Oscillation index (ENOA) and the North Pacific Decadal Oscillation index (ODPN).

retroalimentando negativamente el calentamiento.

En la figura 3 se presenta una comparación entre los índices ENOA y ODPN, así como las anomalías medias anuales de la TSM. Las variabilidades de la TSM en la Cuenca de la Paz y el ENOA están anticorrelacionadas, a excepción de un corto intervalo durante la transición de 1976-77 (cambio de signo de la ODPN). Durante esta transición las anomalías de las TSMs son negativas hasta la aparición de El Niño de 1982-83, considerado el evento más fuerte del período de estudio y en el que las anomalías se vuelven nuevamente positivas. Por la vecindad geográfica del Golfo de California con la Corriente de California,

the amplitudes of the positive anomalies are greater before the transition than after it.

An intensification of mean wind speeds during winter was also observed, in association with these changes, especially after the 1950s (fig. 4). During the mid-1970s transition, winter winds decayed for a few years to pick up again in the early 1980s and become even faster than during the previous period characterized by a negative PDO. During the same transition, an important shift is observed in the relationship between the SST anomalies and the winter winds (fig. 5). Before 1977, years when winter winds show negative anomalies – or decreased wind speeds – SSTs exhibit a relative warming, characterized by positive



**Figura 4.** Promedio anual de la rapidez del viento y promedio estacional de la rapidez de los vientos de invierno, en La Paz desde 1950.

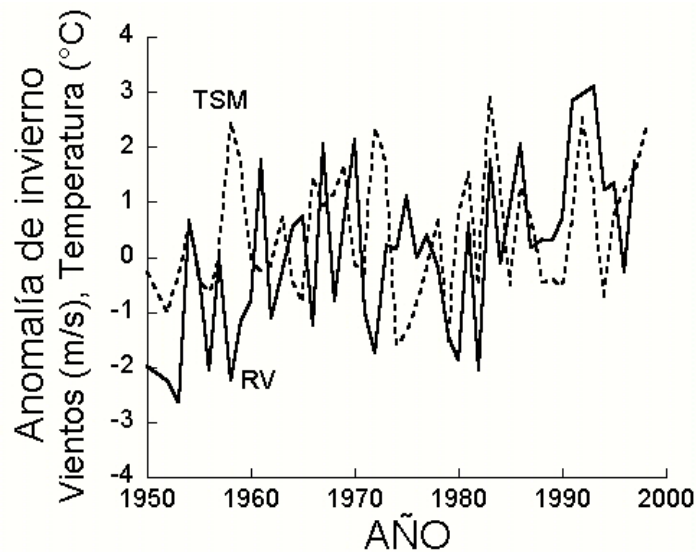
**Figure 4.** Wind speed annual average and wind speed seasonal average for winter in La Paz since 1950.

esperaríamos que un índice ODPN positivo estuviera asociado con condiciones cálidas dentro del golfo. Sin embargo, el promedio de las anomalías mensuales de TSM entre 1950 y 1976 es de  $+0.26^{\circ}\text{C}$ , mientras que entre 1977 y 1990 este es de  $-0.15^{\circ}\text{C}$ , indicativo de condiciones relativamente más frías a partir de 1977. A pesar de que después de El Niño 1982-83 las anomalías también alcanzan valores positivos, la disminución de temperatura durante la transición es muy marcada y las amplitudes de las anomalías positivas son mayores, antes de la transición, que después de ésta.

Se observó también una intensificación de los vientos medios y, sobre todo, de los de invierno a partir de 1950 (fig. 4). Durante la transición de los años setenta los vientos de

anomalías, while years with increased wind speed show negative SST anomalies. This behavior is expected according to observations and oceanographic models on the relation between winds and SSTs. However, for the period after 1976-77 this relation reverses in sign and the SST and wind annual anomalies parallel each other. In other words, years when winds intensify SSTs seem to be warmer, a paradoxical response considering that SSTs should decrease in response to an intensification of the winds.

As for sea level, the 1970s transition is not clearly observed in the time-series from La Paz and Loreto (fig. 6). During the period after 1977, there are extreme oscillations marked by the positive anomaly of the 1982-83 *El Niño*



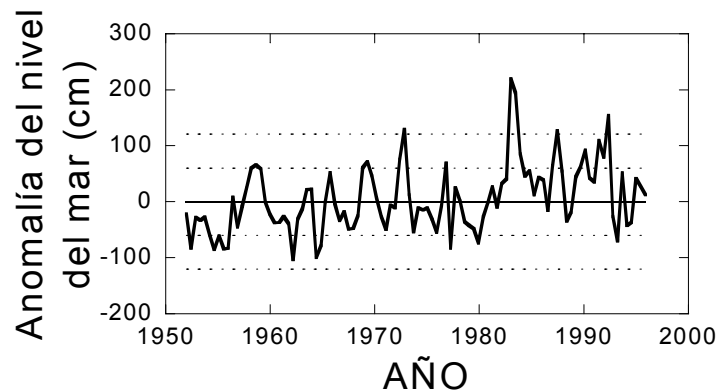
**Figura 5.** Anomalías de las temperaturas de la superficie del mar en invierno (TSM, línea discontinua) y de los vientos de invierno (RV, línea continua), desde 1950.

**Figure 5.** Anomalies of the sea surface temperature (TSM, dashed line) and the winter winds (RV, continuous line) since 1950.

invierno decaen temporalmente para entrar en un período en que cobran una mayor intensidad que durante el período anterior, caracterizado por una ODPN negativa. Durante la transición de los años setenta se observa un cambio importante en la relación entre las anomalías de las TSMs invierno y los vientos de invierno (fig. 5). Durante el período anterior a 1977, los años en los que los vientos de invierno muestran anomalías negativas –esto es, en los que disminuye su intensidad– las TSMs muestran un calentamiento relativo, caracterizado por anomalías positivas. Este comportamiento es el esperado de acuerdo a observaciones y modelos oceanográficos sobre la relación entre los vientos y la TSM. Sin embargo, para el período posterior a 1976-77 esta relación invierte su signo de manera que las anomalías anuales de la TSM y el viento van en el mismo sentido. Esto es, en los años en que se intensifican los vientos, las TSM se elevan, lo que es un

event as well as by a large negative anomaly due to the 1989 *La Niña* event in the Gulf of California. However, when we average the anomalies over a broader region of the gulf and include more data and more stations, negative anomalies dominate the period prior to the 1983 *El Niño*, while positive anomalies dominate after this event. This is the behavior we would expect as a response to the intensification of *El Niño* events during a positive PDO period.

Summer rains dominate the precipitation patterns in the La Paz region. In general, *El Niño* events are associated with a positive annual anomaly in precipitation, while *La Niña* events are associated to negative anomalies. In normal years, summer positive anomalies are higher than those from winter, and generally, the winter rain of the year following to an *El Niño* event shows positive anomalies as well. Years when the ENSO index is negative (warm



**Figura 6.** Anomalías del nivel del mar (ANM) en el Bajo Golfo de California (La Paz; línea discontinua), y media para el Golfo de California (línea continua), ambas en cm. Los datos para esta figura provienen de la base de datos sobre nivel del mar en el Golfo de California del CICESE.

**Figure 6.** Lower Gulf of California sea surface anomalies (ANM) (La Paz; dashed line), and average for the Gulf of California (continuous line). Data come from the Gulf of California sea level data base from CICESE.

comportamiento paradójico ya que éstas deberían disminuir en respuesta a esta intensificación de los vientos.

En cuanto al nivel del mar, en la serie de tiempo de anomalías de La Paz y Loreto no se observa claramente la transición de los años setenta (fig. 6). En el período posterior a 1977, hay oscilaciones extremas marcadas por la anomalía positiva de El Niño de 1982-83 y una gran anomalía negativa de La Niña de 1989, sobre el Golfo de California. Sin embargo, cuando se hace un promedio de las anomalías con muchos más datos y más estaciones, para todo el golfo, las anomalías negativas dominan el período anterior a El Niño de 1983 y, a partir de éste evento, son las anomalías positivas las que prevalecen. Este comportamiento sería el esperado en respuesta a una intensificación en los eventos de El Niño durante un período positivo de la ODPN.

Los patrones de precipitación en la región de La Paz están dominados por las lluvias de verano. En general los eventos de El Niño se encuentran asociados a una anomalía anual

events associated to *El Niño*) are generally associated with an increase in summer rainfall or with an increase in the precipitation in both rainy seasons, whereas cold events are associated with a slight increase of winter rains or with a reduction in precipitation during both seasons.

In order to show which variables are associated, in which way and with which index, and moreover which modes dominate the variability of the different time-series, we proceeded to find correlations between variables and indices. Empirical Orthogonal Functions (EOFs) were calculated for the four variables and the two climatic indices. The results for this analysis are presented in tables 1 and 2. The variability modes can be described as follows: the first one (M1), that explains nearly 43% of the total variance, associates the variability of the climatic indices and all measured variables but winds, assigning more weight to the ENSO index and to the sea surface anomaly; the second one (M2) represents 23% of the total variance, mainly associating winds and the PDO

positiva en la precipitación, mientras que los años de La Niña se asocian con anomalías negativas. En los años normales, las anomalías positivas de verano son mayores que las de invierno y, generalmente, la lluvia de invierno al año siguiente, después de un evento de El Niño, también presenta anomalías positivas. Los años en que el índice ENOA es negativo (eventos cálidos asociados a El Niño) generalmente están asociados con un aumento en las lluvias de verano, o con un aumento en la precipitación en ambos períodos lluviosos, mientras que los eventos fríos están más asociados con un ligero aumento de las lluvias en invierno, o con la disminución de la precipitación en ambas temporadas.

Con el fin de mostrar cuales de las variables están asociadas, de qué manera y con qué índices y, además, qué modos dominan la variabilidad de las series, se hicieron correlaciones entre las variables e índices y se calcularon Funciones Empíricas Ortogonales (FEOs) de las cuatro variables y los dos índices climáticos. Los resultados de este análisis se presentan en las tablas 1 y 2. Los modos de variabilidad pueden describirse de la siguiente manera: el primero (M1), que explica cerca del 43% de la varianza total, asocia la variabilidad de los índices climáticos y todas las variables a excepción de los vientos, asignando mayor peso al índice ENOA y a la anomalía del nivel del mar; el segundo (M2) representa un 23% de la varianza total y asocia los vientos y el índice ODPN, principalmente; el tercero (M3; 12.5% de la variabilidad total) asocia a la TSM, la precipitación y, de manera marginal, el índice ODPN y los vientos; el cuarto (M4; 9.4%) asocia a los vientos y a la precipitación; el quinto (M5), asocia las anomalías del nivel del mar y la temperatura superficial del mar; y el último modo (M6), con sólo un 4.8%, está asociado únicamente con los índices climáticos.

Las correlaciones entre los vientos y las demás variables e índices son muy bajas. Las

index; the third one (M3; 12.5% of the total variability) associates SSTs, precipitation and, although marginally, the PDO index and the winds; the fourth one (M4; 9.4%) associates winds and precipitation; the fifth one (M5), associates sea level anomalies and SSTs; and the last mode (M6), with just 4.8%, is associated only with both climatic indices.

The correlations between the winds and the rest of the variables and indices are very low. The best ones occur between the precipitation and the PDO. Together, the three modes that are affected by the winds (M2, M3 and M4) explain almost the same variability than the first mode, from which they are excluded. The highest correlations observed for the SSTs are associated with the SLA, the ENSO index and the precipitation anomalies (PPA). These higher correlations and its low correlation with winds and the PDO index, imply that the main control of SSTs in this region is originated in the tropics.

Time-series from COADS for winds and SSTs were reviewed for the whole century in order to observe long-term trends in the records (fig. 7). The SST series was divided into winter (January-April) and summer (July-October) temperatures since 1880. Winter SSTs show a tendency to increase through the last century; this rise does not seem to be the result of an instrumental bias since this is not evident in the summer temperatures. Winter winds do not show the same trend throughout the last century but the intensification previously described is noted since the 1950s.

## DISCUSSION

The annual extremes in the climatology and oceanography of the Lower Gulf of California (LGC) can be summarized in the following way: during winter, the intensification of the Aleutian's Low dominates over the North Pacific, while a high pressure stabilizes over the southwestern United States of America

**Tabla 1.** Matriz de correlación entre variables e índices. RV = Rapidez del viento; TSM = Temperatura superficial del mar; ANM = Anomalía del nivel del mar; APP = Anomalía de la precipitación; ODPN = Índice de la Oscilación del Pacífico Norte; ENOA = Índice de El Niño y la Oscilación Austral. Valores mayores a 0.3 en negrillas.

**Table 1.** Correlation matrix between variables and indices. RV = wind speed; TSM = Sea surface temperature; ANM = Sea level anomaly; APP = Precipitation anomaly; ODPN = North Pacific decadal oscillation index; ENOA = El Niño Southern Oscillation index. Values higher to 0.3 in bold.

	RV	TSM	ANM	APP	ODPN	ENOA
RV	<b>1</b>					
TSM	-0.15	<b>1</b>				
ANM	-0.13	<b>0.46</b>	<b>1</b>			
APP	-0.29	<b>0.34</b>	<b>0.4</b>	<b>1</b>		
ODPN	0.24	0.11	<b>0.33</b>	0.21	<b>1</b>	
ENOA	0.013	<b>-0.44</b>	<b>-0.52</b>	<b>-0.35</b>	<b>-0.6</b>	<b>1</b>

**Tabla 2.** Resultados del análisis de funciones empíricas ortogonales (FEOs). M1-6 = Modos de variabilidad; RV = Rapidez del viento; TSM = Temperatura superficial del mar; ANM = Anomalía del nivel del mar; APP = Anomalía de la precipitación; ODPN = Índice de la Oscilación del Pacífico Norte; ENOA = Índice de El Niño y la Oscilación Austral. Valores mayores al 12% en negrillas.

**Table 2.** Results from the Empirical Orthogonal Functions (EOFs). M1-6 = Variability modes; RV = Wind speed; TSM = Sea surface temperature; ANM = Sea level anomaly; APP = Precipitation anomaly; ODPN = North Pacific decadal oscillation index; ENOA = El Niño Southern Oscillation index. Values higher to 12% in bold.

	M1	M2	M3	M4	M5	M6
RV	1.1	<b>50.6</b>	<b>12</b>	<b>31.6</b>	1.7	3
TSM	<b>17.5</b>	4.9	<b>48.8</b>	1.4	<b>17.4</b>	10
ANM	<b>24.1</b>	0.3	3.6	1.7	<b>70.1</b>	0.2
APP	<b>16.4</b>	9.7	<b>20.2</b>	<b>52.9</b>	0.1	0.8
ODPN	<b>13.9</b>	<b>29.4</b>	<b>15.3</b>	2.3	2.4	<b>36.7</b>
ENOA	<b>27</b>	5.1	0.2	10	8.4	<b>49.3</b>
<b>Total</b>	<b>42.5</b>	22.7	<b>12.5</b>	<b>9.4</b>	<b>8.2</b>	<b>4.8</b>

mejores se dan entre la precipitación y la ODPN. Los tres modos que se ven afectados por los vientos (M2, M3 y M4), juntos, explican casi la misma variabilidad que el primer modo, del que están excluidos. Las más altas correlaciones observadas de la TSM se producen con las ANMs, el índice del ENOA y las anomalías de precipitación (APP), lo que aunado a su baja correlación con los vientos y el índice ODPN, implica que la TSM en esta región está principalmente controlada por el clima y la oceanografía del trópico.

Con el fin de observar la existencia de tendencias de largo período que afecten a las variables revisadas, se recurrió a las series de tiempo de vientos y de TSMs para todo el siglo XX, de COADS (fig. 7). La serie de TSMs desde 1880 se separó en temperaturas de invierno (enero-abril) y de verano (julio-octubre). En las temperaturas de invierno se notó una tendencia a aumentar a lo largo del siglo. El aumento registrado no parece haber sido causado por los instrumentos utilizados ya que éste no se observa tan claramente en las temperaturas de verano. Los vientos de invierno no manifiestan una tendencia constante durante todo el siglo y la intensificación anteriormente descrita sólo ocurre a partir de 1950.

## DISCUSIÓN

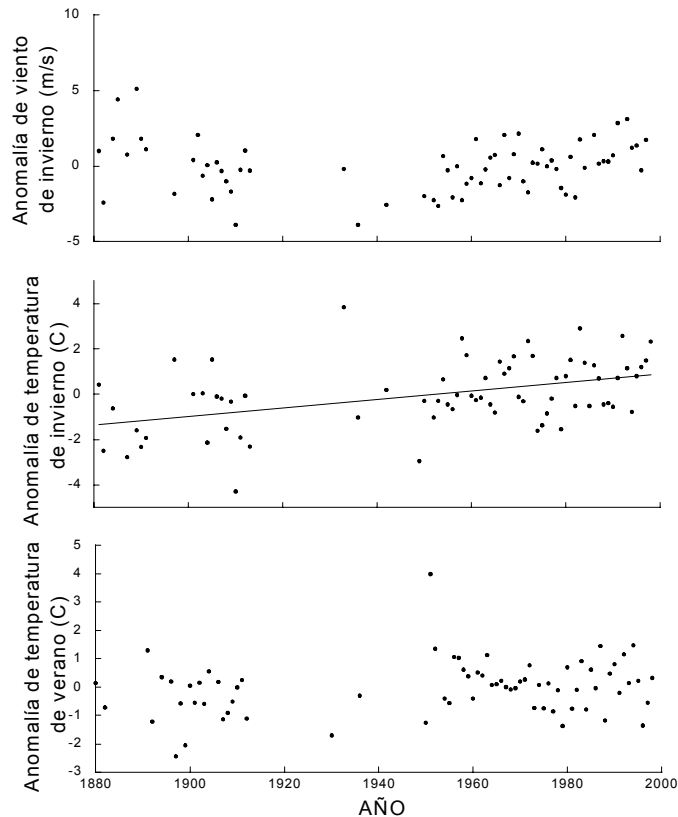
Los extremos anuales de la climatología y oceanografía del Bajo Golfo de California (BGC) pueden resumirse de la siguiente manera: en invierno, la intensificación del Centro de Baja Presión de las Aleutianas domina sobre el Pacífico Norte, mientras que un centro de alta presión se estabiliza sobre el suroeste de los Estados Unidos de América (EUA) (Badan-Dangon, 1991). Este centro de alta presión, ubicado al NW del Golfo de California, genera vientos intensos que siguen el gradiente medio de presión a lo largo del mismo, atravesándolo en dirección NW-SE. Estos vientos generan las

(USA) (Badan-Dangon, 1991). This high-pressure center, located to the NW of the Gulf of California, generates intense winds that follow the mean pressure gradient along the gulf crossing it in a NW-SE direction. These winds that generate the most important upwelling events in the Gulf of California aid to the loss of heat from the mixed layer which, coupled with the lower insolation, are responsible for the lowest SSTs throughout the year. Negative sea level anomalies parallel this cooling. The rains are scarce during this period and are caused mainly by the influence of the Pacific side of the peninsula, by the intensification of the Aleutians' Low or by the southward invasion of the Polar Front.

During summer the pressure gradient reverses in response to the summer position of the low-pressure center over the Sonoran Desert, while the high pressure cell is located over the subtropical Pacific. In the Gulf of California, the resulting dominant surface winds flow from the South (Badan-Dangon, 1991). During this season, the North Equatorial Current intensifies and the development of the Costa Rican Current carries subtropical water towards the gulf (Badan-Dangon, 1998; Baumgartner and Christensen, 1985). In the LGC, the advection of warmer waters from the South and the summer warming are followed by a rise in sea level, increased SSTs and increased precipitation. The precipitation during this period is the result of water vapor transport by the Mexican Monsoon (Douglas *et al.*, 1993; Badan-Dangon, 1998) and by convective processes fueled by the high SSTs. Hurricanes and tropical storms reach their maximum development during this season (Roden, 1964) causing, in part, the great variability observed in the summer rains.

In general we found that the responses of all the analyzed variables since 1950 shifted in sign following the PDO index shift during the mid-1970s. An intensification of the winds and





**Figura 7.** Anomalías de los vientos de invierno y de la temperatura superficial del mar, en invierno y verano para la zona de estudio desde 1880.

**Figure 7.** Winter wind anomalies and winter and summer sea surface temperature anomalies for the study area since 1880.

surgencias más importantes del Golfo de California y una pérdida de calor de la capa de mezcla que, junto con la menor insolación, se manifiestan como una disminución de la TSM a lo largo de todo el año. Paralelo a este enfriamiento se observan anomalías negativas del nivel del mar. Las lluvias son escasas durante este período y son debidas principalmente a la influencia de la vertiente del Pacífico de la península, por la intensificación del centro de Baja Presión de las Aleutianas, o bien, por la invasión del Frente Polar hacia el sur.

En verano el gradiente de presión se invierte en respuesta a la posición estival del centro de baja presión que se encuentra sobre el

a relatively slight cooling of surface waters in the LGC were observed after 1977, running parallel to an increase in the mean sea level throughout the Gulf of California. However, not all these responses happen immediately after the 1976-77 sign shift in the PDO, for some variables—as for SSTs—these changes are obvious only after the 1982-83 *El Niño*. During the transition from 1975 to 1983, SST anomalies are negative while winter winds decrease in their intensity. After 1982-83, winter winds reach the highest intensities observed since the 1950s and the SST anomalies become positive.

Bakun (1990) noticed an intensification of the winds in the large upwelling areas between

desierto de Sonora, mientras que la celda de alta presión se encuentra sobre el Pacífico subtropical. En el Golfo de California, los vientos superficiales resultantes soplan desde el sur (Badan-Dangon, 1991). Durante esta estación se intensifica la Corriente Norecuatorial y el desarrollo de la Corriente de Costa Rica acarrea agua subtropical hacia el golfo (Badan-Dangon, 1998; Baumgartner y Christensen, 1985). En el BGC, esta advección de aguas más cálidas del sur, junto con el calentamiento estival, son seguidos por un incremento en el nivel del mar, un aumento en la TSM y una mayor precipitación. La precipitación en este período es producto de un acarreo de humedad por el Monzón Mexicano (Douglas *et al.*, 1993; Badan-Dangon, 1998) y por procesos convectivos causados por las altas TSMs. Huracanes y tormentas tropicales alcanzan su máximo desarrollo durante esta misma estación (Roden, 1964), causando en parte la gran variabilidad observada en las lluvias de verano.

En general, se encontró que las respuestas de todas las variables analizadas desde 1950 cambian de signo siguiendo el cambio del índice ODPN a mediados de los años setenta. Después de 1977 se observó una intensificación de los vientos y un relativamente ligero enfriamiento de las aguas superficiales en el BGC, en paralelo a un aumento relativo en el nivel medio del mar de todo el Golfo de California. No todas estas respuestas se producen inmediatamente después del cambio de signo en la ODPN en 1976-77, ya que para algunas variables, como las TSMs, estos cambios solo se aprecian claramente a partir de El Niño de 1982-83. Durante la transición de 1975 a 1983, las anomalías de las TSMs son negativas mientras que los vientos de invierno disminuyen su intensidad. Después de 1982-83, los vientos invernales alcanzan las mayores intensidades observadas desde los años cincuenta y las anomalías de TSM cambian de signo, volviéndose positivas.

1950 and 1985, an effect that he attributed to global warming. In our case, the two modes that associate the winds with the PDO (M2 and M3), mainly the M2, indicate that the effect of the PDO's interdecadal variability can be important for the winds. How can we explain this association between a positive PDO index and the intensification of the winds? During winter and spring of *El Niño* years the intensification of the Aleutians Low brings higher rainfall to the Californian coasts. However, most of this moisture is lost when clouds cross the Baja California Peninsula towards the Gulf of California, which is swept by predominantly dry and intense winds reinforced by the high pressure over the southwestern USA (Badan-Dangon *et al.*, 1991). If these conditions are extrapolated to interdecadal scales, a positive PDO index would favor the intensification of the Aleutians' Low enhancing the gradient with the high-pressure center over the southwestern USA which would fuel an increase in the wind's intensity in contrast to negative PDO periods, when a weaker pressure gradient would favor a weaker wind field.

The first five modes of variability can be separated on the basis of the influence that the wind exerts over them, in this way we would have: (i) modes that do not show influence by winds (M1 and M5) explaining 50% of the total variability; and (ii) modes that are affected by winds (M2, M3 and M4) which explain the remaining 44%. Of the variables and indices, the SLAs and the ENSO are exclusively associated with modes that are not affected by winds, while the PDO and the PPA are associated to both kinds of variability.

Further evidence on the influence of winds on SSTs is that nearly 55% of their variability is related to wind intensity. Here we highlight some interesting aspects of the SST time-series in this study: (i) a long-term trend to surface warming; (ii) an inverse relation with the ENSO index explaining 44% of the variability;

Bakun (1990) había notado ya una intensificación de los vientos en las grandes zonas de surgencias entre 1950 y 1985, efecto que atribuyó al calentamiento global. En nuestro caso, los dos modos que asocian a los vientos con la ODPN (M2 y M3), principalmente el M2, indican que el efecto de la variabilidad interdecadal del índice ODPN puede ser importante sobre los vientos. ¿Cómo explicar la asociación entre un índice ODPN positivo y la intensificación de los vientos? El centro de Baja Presión de las Aleutianas se ve reforzado durante el invierno y la primavera de los años de El Niño, lo que trae más lluvias a las costas del Pacífico californiano. Sin embargo, gran parte de esta humedad se pierde cuando las nubes cruzan la Península de Baja California, hacia el golfo, el que es barrido por los vientos predominantemente secos e intensos del NW, reforzados por el centro de alta presión que se encuentra sobre el sur de los EUA (Badan-Dangon *et al.*, 1991). Si se extrapolan estas condiciones a escalas interdecadales, un índice ODPN positivo favorecería la intensificación del centro de Baja Presión de las Aleutianas incrementando su gradiente con el centro de alta presión del SW, lo que a su vez alimentaría el aumento de la intensidad de los vientos en contraste con los períodos negativos de la ODPN, en los que un menor gradiente de presión favorece un campo de vientos más débiles.

Podemos separar los cinco primeros modos de variabilidad basándonos en la influencia que el viento ejerce sobre ellos, de esta manera tendríamos: (i) modos que no muestran influencia de los vientos (M1 y M5), que explican el 50% de la variabilidad total; y (ii) modos afectados por los vientos (M2, M3 y M4), que explican el 44% restante. De las variables e índices, las ANMs y el ENOA se asocian exclusivamente con los modos no afectados por los vientos, mientras que la ODPN y las APPs se asocian con ambos tipos de variabilidad.

Una indicación de la importancia de los vientos sobre la variabilidad de las TSM es que

and (iii) a dual response to the PDO index, characterized by a shift in the sign of its response to wind anomalies after the mid-1970s change.

The response of the Lower Gulf of California's SSTs to the PDO during the 1976-77 transition towards negative anomalies could be explained by the intensification of the winds. However, no cooling is observed as expected from that intensification, and the immediate response of the SSTs to the wind's action is contrary to that expected. A plausible explanation to this apparent lack of response in the SSTs is a larger heat transport from the tropics that results from a higher frequency in *El Niño* events, together with the long-term ocean-warming trend observed during the past century. The effect of the signal, advected by the tropical waters, and clearly observed in the SLAs, competes with the effect of local winds and the resulting signal exhibits a mixture of both forcing processes.

Baumgartner and Christensen (1985) had already reported how the main mode of the interannual variability of the climate in the Gulf of California was associated to the ENSO, explaining nearly 50% of this variability. They showed a relatively low correlation between sea level and SSTs (0.4), their interpretation stressed the importance of some local variability on the SSTs, which had no effects on sea level. According to our results, in the case of the LGC, these local parameters are the winds, which at the same time, respond to a large-scale forcing from the North Pacific.

In this work, a similar correlation between SSTs and sea level ( $r = 0.46$ ) and an anti-correlation, with a value of  $r = -0.52$ , between sea level and the ENSO index, were found. Furthermore, this is the highest correlation found in this study between variables and indices and coincides with that reported by Baumgartner and Christensen (1985). Sea level anomalies for the whole Gulf of California indicate that after 1977, a period with a higher frequency of

cerca del 55% de esta variabilidad está relacionada con la intensidad de los vientos. En nuestros resultados se destacan varios aspectos interesantes de la serie de tiempo de la TSM: (i) una tendencia de largo período al calentamiento superficial; (ii) una relación inversa con el índice ENOA que explica un 44% de su variabilidad; y (iii) una respuesta dual al índice ODPN, caracterizada por un cambio de signo de su respuesta a las anomalías del viento, a partir del cambio de mediados de la década de los setenta.

La respuesta de la TSM del Bajo Golfo de California a la ODPN durante la transición de 1976-77 hacia anomalías negativas podría ser explicada por la intensificación de los vientos. Sin embargo, no se observa el enfriamiento esperado ante dicha intensificación, y la respuesta inmediata de la TSM a la acción del viento es contraria a la esperada. Una explicación factible a esta aparente falta de respuesta de las TSMs, podría darse en función de un mayor transporte de calor desde el trópico, resultado de una mayor frecuencia en los eventos de El Niño y la tendencia de largo plazo al calentamiento observada en el siglo pasado. El efecto de la señal transportada por advección de aguas tropicales y claramente observada en las ANMs compite con el efecto de los vientos locales y la señal resultante refleja una mezcla de ambos forzamientos.

Baumgartner y Christensen (1985) ya habían reportado de qué manera el modo principal de variabilidad interanual en el clima del Golfo de California estaba asociado con el ENOA, explicando cerca del 50% de esta variabilidad. Ellos encontraron una correlación relativamente baja entre el nivel del mar y la TSM ( $r = 0.4$ ), en su interpretación aluden a la importancia de alguna variabilidad local en las TSM que no tuvo efectos en el nivel del mar. De acuerdo con nuestros resultados, en el caso del BGC, estos parámetros locales son los vientos, que a su vez responden a un forzamiento de gran escala del Pacífico Norte.

*El Niño* events, the accumulated heat in the water increases the positive anomalies in the sea level. This increase in heat content can be responsible for the apparent lack of response of SSTs to stronger winds after the 1976-77 transition. The winds, in this case, act as a negative feedback mechanism by dissipating some of the stored heat and dampening the warming of surface waters.

From the analyses herein presented, the modes associated with the winds show to be controlled by the PDO rather than by the ENSO, and therefore respond to a temperate forcing instead of a tropical one. Sea level shows a different response since it is not clearly related to winds and seems to be highly responsive to the tropical forcing (ENSO), while SSTs and precipitation seem to be affected by both forcing processes, the tropical and the temperate one. In both variables, the response to the tropical forcing dominates, as the warm *El Niño* events produce higher surface warming and precipitation, whereas in *La Niña* events, they produce the opposite effect. The response of winds and SSTs to temperate forcing is due to the fact that the PDO also implies different configurations between the high- and low-pressure centers over the North Pacific basin and North America. In contrast, the precipitation does not show a direct response to the PDO, probably because it occurs in the summer season, when the tropical influence dominates over this region.

## CONCLUSIONS

The modes of variability in the Lower Gulf of California can be separated in two main groups: those controlled by the ENSO or tropical forcing, associated with precipitation and the sea level anomalies; and those controlled by the PDO or temperate forcing, associated with the winds.

Both patterns of climatic variability control SSTs, reinforcing their effects during positive

En este trabajo se encontró una correlación similar entre las TSM y el nivel del mar ( $r = 0.46$ ) y una anticorrelación con un valor de  $r = -0.52$ , entre el nivel del mar y el ENOA, que es la mayor correlación encontrada en este estudio entre variables e índices, y que coincide con la reportada por Baumgartner y Christensen (1985). Las ANM para todo el Golfo de California indican que después de 1977, periodo con una mayor frecuencia de eventos El Niño, la acumulación de calor en las aguas incrementa las anomalías positivas del nivel del mar. Este incremento de calor puede ser el responsable de que las temperaturas superficiales no respondan a los vientos de la manera esperada después de la transición de 1976-77. Los vientos, en este caso, actúan como un mecanismo de retroalimentación negativa disipando parte del calor acumulado y amortiguando el calentamiento de las aguas superficiales.

A partir de los análisis presentados, los modos asociados con los vientos se muestran más controlados por la ODPN que por el ENOA y, por lo tanto, responden a un forzamiento más de tipo templado que tropical. El nivel del mar presenta una respuesta diferente ya que al no estar relacionado claramente con los vientos y parece ser especialmente sensible al forzamiento tropical (ENOA), mientras que la TSM y la precipitación parecen estar afectadas por ambos forzamientos, el tropical y el templado. En ambas variables domina la respuesta al forzamiento del trópico, ya que los eventos ENOA cálidos producen un mayor calentamiento superficial y mayor precipitación, mientras que, en los años de La Niña, se produce el efecto inverso. La respuesta de los vientos y la TSM al forzamiento templado se debe a que la ODPN también implica configuraciones distintas entre los centros de alta y baja presión atmosférica sobre la cuenca del Pacífico Norte y Norteamérica. En contraste, la precipitación no muestra una respuesta directa

ENSO and negative PDO periods, while mitigating them after the last transition of the PDO to its positive mode.

An intensification of the winds in the LGC was observed since the 1950s. However, the long-term warming from the tropical Pacific, especially after the 1970s, dampens its effect on sea surface temperatures.

Sea level anomalies in the LGC show the influence of ENSO and the long-term warming especially after the 1982-83 event.

The precipitation in the western edge of the LGC, dominated by summer rains, shows to be associated with *El Niño* events, implying the tropical origin of precipitation variability for this region.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to express our appreciation to the National Center for Atmospheric Research (USA) for providing us with the time-series for SST and winds from the COADS database. To Edgar Pavía and Jorge Reyes, for their help to access their precipitation database. To CICESE for the funding granted to G.B. during the development of her doctoral thesis. This work was possible thanks to the funding by the Inter-American Institute for Global Change Research (IAI), project UCAR 597-73970, and CONACYT, project G35229-T.

English translation by Adrián R. López

---

a la ODPN, probablemente debido a que aquella se concentra en el periodo de verano, cuando la influencia tropical es la dominante.

#### CONCLUSIONES

Los modos de variabilidad en el Bajo Golfo de California pueden separarse en dos grupos principales: los controlados por el ENOA, el

forzamiento tropical, y que están asociados a la precipitación y a las anomalías del nivel del mar; y los controlados por la ODPN, o forzamiento templado, asociados a los vientos.

Ambos patrones de variabilidad controlan las temperaturas superficiales, sumándose durante períodos en los que el índice de ENOA es positivo y el de la ODPN es negativo, y paliándose después de la última transición de la ODPN al modo positivo.

Se observó una intensificación de los vientos en el BGC a partir de 1950. Sin embargo, el efecto de esta intensificación, sobre las TSM, se encuentra amortiguado por el calentamiento de largo período procedente del Pacífico tropical.

Las anomalías del nivel del mar en el Golfo de California muestran la influencia del ENOA y el efecto del calentamiento de largo período que se manifiesta claramente a partir del evento de 1982-83.

La precipitación en la margen occidental del BGC está dominada por las lluvias de verano, las que a su vez muestran una asociación importante con el índice del ENOA que refuerza el origen tropical de los patrones de precipitación en esta región.

#### **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos al Centro Nacional para la Investigación Atmosférica de los EUA por proporcionarnos los datos de TSM y vientos de la base de datos de COADS. A Edgar Pavía y a Jorge Reyes, por el acceso a su base de datos de precipitación. A CICESE por su apoyo económico a G. B. para el desarrollo de su tesis doctoral. Este proyecto ha sido posible gracias al financiamiento del Instituto Inter-Americano de Investigación para el Cambio Global (IAI) proyecto UCAR 597-73970 y CONACYT, proyecto G35229-T.

#### **REFERENCIAS**

- Badan-Dangon, A., Dorman, C.E., Merrifield, M.A. and Winant, C.D. (1991). The lower atmosphere over the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 96(16): 877-896.
- Badan-Dangon, A. (1998). Coastal circulation from the Galapagos to the Gulf of California. In: A.R. Robinson and K.H. Brink. *The Sea*, vol. 11. John Wiley and sons, inc. pp 315-343.
- Bakun, A. (1990). Global climate change and intensification of coastal ocean upwelling. *Science*, 247: 198-201.
- Baumgartner, T.R. and Christensen, N.Jr. (1985). Coupling of the Gulf of California to large-scale interannual climatic variability. *Journal of Marine Research*, 43: 825-848.
- Bjerknes, J. (1969). Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, 97: 163-172.
- Emery, W.J. and Hamilton, K. (1985). Atmospheric forcing of interannual variability in the Northeast Pacific Ocean: Connections with El Niño. *Journal of Geophysical Research*, 90(C1): 857-868.
- Fletcher, J.O., Slutz, R.J. and Woodruff, S.D. (1983). Towards a comprehensive ocean-atmosphere dataset. *Trop. Ocean-Atmos. Newsletter*, 20: 13-14.
- Gershunov, A., Barnett, T.P. and Cayan, D.R. (1999). North Pacific interdecadal oscillation seen as factor in ENSO-related North American climate anomalies. *EOS Transactions*, 80(3): 25, 29-30.
- Lange, C., Burke, S.K. and Berger, W.H. (1990). Biological production off Southern California is linked to climatic change. *Climatic Change*, 16: 319-329.
- Lavin, M.F., Beier, E. y Badan, A. (1997). Estructura hidrográfica y circulación del Golfo de California: Escalas estacional e interanual. En: Lavin, F. (ed.) *Contribuciones a la Oceanografía Física en México*. Unión Geofísica Mexicana, Monografía No. 3. pp 141-171.
- Levitus, S., Antonov, J.I., Boyer, T.P. and Stephens, C. (2000). Warming of the world ocean. *Science*, 287: 2225-2229.

- McGowan, J.A., Cayan, D.R. and Dorman, L.M. (1998). Climate-Ocean variability and ecosystem response in the northeast Pacific. *Science*, 281: 210–217.
- Mantua, N.J., Hare, S.R., Zhang, Y., Wallace, J.M. and Francis, R.C. (1997). A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(6): 1069–1079.
- Norton, J., McLain, D., Brainard, R. and Husby, D. (1985). The 1982-83 El Niño event off Baja and Alta California and its ocean climate context. In: W.J. Wooster and D.L. Fluharty (eds.). *El Niño North*. University of Washington, pp 44–72.
- Quintas, I. (2000). Eric II, Base de datos climatológica compactada, archivos y programa extractor. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, 54 p.
- Ripa, P. (1990). Seasonal circulation in the Gulf of California. *Annales Geophysicae*, 8: 559–564.
- Ripa, P. (1997). Towards a physical explanation of the seasonal dynamics and thermodynamics of the Gulf of California. *J. Phys. Oceanogr.*, 27: 597–614.
- Robles, J.M. and Marinone, S.C. (1987). Seasonal and interannual termohaline variability in the Guaymas basin of the Gulf of California. *Continental Shelf Research*, 7(7): 715–733.
- Roden, G.I. (1964). Oceanographic aspects of Gulf of California. From: T.H. Van Andel and G.G. Shor (eds.) *Marine geology of the Gulf of California*. AAPG Memoir, 3: 30–58.
- Salinas-Zavala, C.A., Leyva-Contreras, A., Lluch-Belda, D. y Díaz-Rivera, E. (1990). Distribución geográfica y variabilidad climática de los regimenes pluviométricos en Baja California Sur, México. *Atmósfera*, 3: 217–237.
- Salinas-Zavala, C.A., Lluch-Belda, D. Hernández-Vázquez, S. y Lluch-Cota, D.B. (1998). La aridez en el noroeste de México: un análisis de su variabilidad espacial y temporal. *Atmósfera*, 11: 29–44.
- Sancetta, C. (1995). Diatoms in the Gulf of California: Seasonal flux patterns and the sediment record for the last 15000 years. *Paleoceanography*, 10 (1): 67–84.
- Torres-Orozco, E. (1993). Análisis volumétrico de las masas de agua del Golfo de California. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, México. 80 p.
- Zhang, Y., Wallace, J.M. and Batisti, D.J. (1997). ENSO-like interdecadal variability: 1900–93. *Journal of Climate*, 10: 1004–1020.