

FLUJOS DE CALOR Y MOMENTUM A TRAVES DE LA SUPERFICIE EN EL GOLFO DE CALIFORNIA

SURFACE HEAT AND MOMENTUM FLUXES IN THE GULF OF CALIFORNIA

J.M. Figueroa R.¹
Roberto Palacios M.²

¹ Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada
Departamento de Oceanografía Física
Espinoza 843
Ensenada, Baja California, México

² Palacios Editores
Playa Hermosa 466
Col. Marte 08830
México, D.F.

Ciencias Marinas (1991), Vol. 17, No. 2, pp. 109-149.

RESUMEN

Con datos meteorológicos colectados en 11 campañas hidrográficas realizadas en el golfo de California entre octubre de 1981 y diciembre de 1986, empleando fórmulas empíricas se calculan los flujos superficiales de calor y momentum, y se estudia su comportamiento temporal (interanual y estacional) y espacial.

Si bien la información disponible es insuficiente para hacer una descripción completa, permite encontrar algunas tendencias generales. Los distintos flujos aquí estudiados muestran la presencia de una señal estacional y la existencia de diferencias regionales apreciables. El golfo gana más calor neto en verano que en invierno, y globalmente no pierde calor en ninguno de los meses aquí estudiados. Se encuentra que los altos valores de calor neto en verano no son necesariamente resultado de surgencias, sino tal vez de frentes térmicos que inhiben la evaporación (reducen el flujo de calor latente) y reducen o anulan el flujo de calor sensible, o incluso invierten su sentido. Los bajos valores de calor neto en invierno y la alta evaporación apoyan la hipótesis del hundimiento convectivo en el alto golfo como factor contribuyente a la formación de la masa de agua del golfo.

Contrariamente a lo que se pensaba, el flujo de calor latente hacia la atmósfera tiene una participación más bien modesta (7% de la radiación solar de onda corta) en el balance de calor en el golfo de California, lo cual sugiere que el golfo no es una cuenca de evaporación y determina en cierta medida que, durante un ciclo anual, el balance sea una ganancia considerable de calor. De este modo, el golfo debe exportar más calor por convección hacia el Pacífico adyacente de lo que se ha supuesto.

Con los datos de 1983 se establece, en términos generales, el efecto que sobre los flujos de calor tiene el fenómeno El Niño en el golfo de California; mientras que con los correspondientes a 1985 se analiza la influencia que sobre éstos tiene un frente térmico detectado en la región de las islas.

En cuanto a los flujos de momentum, la calidad y la cantidad de los datos no permite hacer conclusiones que sean sostenibles ya que los patrones no son claros ni muestran tendencias definidas.

ABSTRACT

Meteorological data gathered during eleven cruises in the Gulf of California (between October 1981 and December 1986) are used to calculate (on the basis of empirical formulae) surface heat and momentum fluxes. Their spatial and temporal distribution are studied.

The available information is not enough to make a complete description of the fluxes, but a few general tendencies are found. The presence of a seasonal signal is evident and very sharp spatial gradients are present.

In the general heat balance, latent heat fluxes represent a very small part (7% of the short-wave radiation). This implies that the Gulf is not an evaporation basin and that in an annual cycle it must gain heat across the surface and, in order to be in balance, heat must be exported across the Gulf's mouth to the Pacific Ocean.

INTRODUCCION

El golfo de California es un hermoso laboratorio natural que desde principios de siglo ha atraído fuertemente la atención de los oceanógrafos. No obstante tal fascinación, a 100 años de realizado el primer crucero hidrográfico en el área (Townsend, 1901; Roden, 1958), y a 50 del histórico crucero de Sverdrup (1941), puede decirse que el progreso en la descripción del ambiente y en la identificación de los procesos relevantes para la comprensión de su dinámica ha sido lento e insuficiente; así por ejemplo, poco se ha avanzado en la solución de los problemas planteados por Roden y Emilsson (1979) y, afortunadamente, las preguntas siguen siendo más que las respuestas. De entre tales problemas, el de flujos de calor a través de la superficie ha recibido muy poca atención.

Dado el carácter interactivo del sistema océano-atmósfera, la comprensión de su dinámica requiere del conocimiento de los procesos de intercambio que tienen lugar en su interfase, ya que éstos determinan a su vez otros como circulación termohalina, estratificación, formación de masas de agua, intercambio advectivo y difusivo con otras regiones y formación de frentes. No obstante el papel fundamental de los procesos de intercambio, sorprende la escasez de estudios al respecto en el golfo de California. Salvo estimaciones para algunas regiones (Roden, 1958, 1964; Noriega-Echeverría, 1985; Bray, 1988; Ripa y Marinone, 1989), sólo en dos trabajos (Roden y Emilsson, 1979; Lavín y Organista, 1988) se han realizado cálculos de flujos de calor para regiones más extensas y escalas temporales mayores. En este trabajo nos proponemos hacer una evaluación de la magnitud de los flujos de calor, utilizando para ello los datos colectados en 11 cruceros

INTRODUCTION

The Gulf of California is a beautiful natural laboratory and it has strongly attracted the attention of oceanographers since the beginning of the century. However, 100 years after the first hydrographic cruise was conducted in the area (Townsend, 1901; Roden, 1958) and 50 years after Sverdrup's (1941) historic cruise, one can say that progress in the description of the environment and in the identification of relevant processes for the understanding of its dynamics has been slow and insufficient. Thus, for example, little progress has been made in solving the problems raised by Roden and Emilsson (1979) and, fortunately, there are still more questions than answers. Among these problems, that of surface heat fluxes has received little attention.

Given the interactive nature of the ocean-atmosphere system, in order to understand its dynamics the interface exchange processes must be known, since these determine, in turn, others such as thermohaline circulation, stratification, formation of masses of water, advective and diffusive exchange with other regions and formation of fronts. Despite the fundamental role of the exchange processes, the lack of this kind of studies in the Gulf of California is surprising. Except for estimates for some regions (Roden, 1958, 1964; Noriega-Echeverría, 1985; Bray, 1988; Ripa and Marinone, 1989), only in two works (Roden and Emilsson, 1979; Lavín and Organista, 1988) have calculations been made of heat fluxes for more extensive regions and larger temporal scales. In this study we propose to evaluate the magnitude of the heat fluxes, using data collected during 11 hydrographic cruises conducted in the Gulf of California between October 1981 and Decem-

hidrográficos realizados en el golfo entre octubre de 1981 y diciembre de 1986. Asimismo, en la medida que lo permitan los datos, pretendemos estimar las variaciones en espacio y tiempo de dichos flujos.

A continuación presentamos algunos resultados pertinentes a este trabajo, obtenidos por otros autores. Revisiones detalladas de las condiciones hidrográficas en el golfo y de los fenómenos más relevantes que en éste tienen lugar pueden encontrarse en Roden y Emilsson (1979), Alvarez-Borrego (1983) y Bray y Robles (en prensa).

El estudio sistemático de la oceanografía del golfo fue iniciado por Sverdrup (1941), quien, en base a observaciones hidrográficas, dedujo la existencia de un umbral al sur de las islas San Esteban, San Lorenzo y Tiburón; además, sugirió que la masa de agua presente en las cuencas profundas al norte de este umbral se forma por convección durante el invierno en el alto golfo. El umbral y las islas contiguas son la característica fisiográfica más sobresaliente del golfo; dos de sus efectos son restringir la circulación y actuar como punto de generación de una fuerte mezcla de marea, lo que da lugar a la formación de frentes térmicos y explica la presencia cuasi-permanente de aguas frías superficiales en la región (Roden y Groves, 1959; Alvarez-Borrego, 1983; Argote *et al.*, 1985; Badan-Dangon *et al.*, 1985; Bray y Robles, en prensa).

Las bajas temperaturas registradas a lo largo de la costa oriental durante el invierno son consecuencia de surgencias producidas por vientos del noroeste (Sverdrup, 1941), mientras que en la costa occidental, durante el verano, las surgencias son debidas a vientos del sureste (Alvarez-Borrego, 1983). Esta situación ha sido confirmada por Badan-Dangon *et al.* (1985) mediante secuencias de imágenes de satélite.

Desde los trabajos de Roden (1958) hasta los más recientes (p.ej. Bray y Robles, en prensa), se ha coincidido en afirmar que el golfo es una gran cuenca de evaporación. En efecto, el hecho de que el golfo de California se encuentre localizado entre dos regiones áridas motivó que durante mucho tiempo se supusieran condiciones de baja humedad y, en consecuencia, elevada evaporación. Sin embargo, basados en seis años de observaciones, Lavín y Organista (1988) encontraron para el alto golfo un flujo de calor latente, y por tanto de vapor, cuatro veces menor que el común-

ber 1986. Furthermore, insofar as the data allow, we try to estimate the variations in space and time of these fluxes.

Some results obtained by other authors which are relevant to this work are presented below. Detailed reviews regarding the hydrographic conditions in the Gulf and the most relevant phenomena that occur there can be found in Roden and Emilsson (1979), Alvarez-Borrego (1983) and Bray and Robles (in press).

The systematic study of the oceanography of the Gulf was initiated by Sverdrup (1941), who, based on hydrographic observations, inferred the existence of a threshold to the south of the San Esteban, San Lorenzo and Tiburón Islands. Furthermore, this author suggested that the mass of water present in the deep basins to the north of this threshold is formed by convection during winter in the upper Gulf. The threshold and the contiguous islands are the most notable physiographic features of the Gulf. Two of their effects are to restrict the circulation and to act as a generation point for strong tidal mixing. This gives rise to the formation of thermal fronts and explains the presence of quasi-permanent cold surface waters in the region (Roden and Groves, 1959; Alvarez-Borrego, 1983; Argote *et al.*, 1985), Badan-Dangon *et al.*, 1985; Bray and Robles, in press).

The low temperatures recorded along the eastern coast in winter are due to upwellings produced by northwesterly winds (Sverdrup, 1941), whereas on the western coast, in summer, the upwellings are due to southeasterly winds (Alvarez-Borrego, 1983). This has been confirmed by Badan-Dangon *et al.* (1985) by using sequences of satellite images.

Since Roden's (1958) work, the Gulf has been considered to be a large evaporation basin. In fact, because the Gulf of California is located between two arid regions, for a long time it was assumed that conditions of low humidity and, consequently, of high evaporation prevailed. However, based on six years of observations, Lavín and Organista (1988) found a latent heat flux, and therefore of vapour, four times lower than that commonly accepted for the upper Gulf. These authors report that a permanent mass of maritime air with high relative humidity is found over the upper Gulf. Bray (1988) and Bray and Robles (in press) found that the maximum evap-

mente aceptado. Estos autores informan que sobre el alto golfo se encuentra confinada permanentemente una masa de aire marítimo con elevada humedad relativa. Bray (1988) y Bray y Robles (en prensa) encuentran que la máxima evaporación ocurre persistentemente en la vecindad de Puerto Peñasco, a principios de verano y finales de otoño. Roden (1958) reportó un máximo secundario en octubre en Guaymas, y lo atribuyó a un rápido descenso de la temperatura y la humedad del aire a principios de otoño, antes de la disminución de la temperatura superficial, lo que da por resultado un ascenso en el gradiente de humedad en la superficie del mar (Bray, 1988).

Organista-Sandoval (1987) sugiere que en invierno el enfriamiento de las capas superficiales (menor calor neto) es un factor importante que junto con la evaporación puede contribuir al hundimiento convectivo y a la probable formación de la masa de agua del fondo (sugerida por Sverdrup, 1941) en el alto golfo. Este mismo investigador encontró, además, que las regiones someras, profundidad menor que 50 m, exportan calor hacia las más profundas mediante advección y/o difusión.

DATOS

Para la realización de este trabajo se revisaron los resúmenes de datos meteorológicos colectados durante 30 campañas hidrográficas efectuadas en el golfo de California entre 1939 y 1986; de éstas, sólo en 11 comprendidas entre 1981 y 1986 se hicieron mediciones de las variables necesarias para nuestros fines. En la Tabla 1 se muestra resumida la información disponible en cada crucero, incluyendo su duración y fecha en que se realizó, así como también una estimación del intervalo de tiempo entre cada muestra.

METODO

El intercambio de energía entre la atmósfera y el océano puede expresarse, con una buena aproximación, en términos del balance existente entre la radiación solar de onda corta recibida por el mar, la radiación de onda larga que éste emite a la atmósfera, el flujo de calor latente de evaporación y el flujo de calor sensible. La diferencia de radiación solar de onda corta menos las otras tres componentes (consideradas positivas cuando fluyen del mar al aire) es el calor neto ganado

ration persistently occurs around Puerto Peñasco, at the beginning of summer and end of autumn. Roden (1958) reported a secondary maximum in October off Guaymas, and attributed it to a quick drop in temperature and humidity of the air at the beginning of autumn, before the decrease of surface temperature, giving rise to an increase in the humidity gradient at the sea surface (Bray, 1988).

Organista-Sandoval (1987) suggests that, in winter, the cooling of the surface layers (lower net heat) is an important factor that, together with evaporation, can contribute to downwelling and to the probable formation of the bottom mass of water (suggested by Sverdrup, 1941) in the upper Gulf. This author also found that shallow regions (less than 50 m in depth) export heat to deeper regions by advection and/or diffusion.

DATA

In order to carry out this work, summaries of meteorological data collected during 30 hydrographic cruises conducted in the Gulf of California between 1939 and 1986 were revised. Measurements of the variables needed for our work were only found in eleven of these, comprising the years 1981 to 1986. The available information for each cruise, including length and dates, is summarized in Table 1. An estimate of the time interval between each sample is also given.

METHOD

The exchange of energy between the atmosphere and the ocean can be expressed, to a good approximation, in terms of the existing balance between the short-wave solar radiation received by the sea, the long-wave radiation that the sea emits to the atmosphere, the latent heat flux of evaporation and the sensible heat flux. The difference of short-wave solar radiation minus the other three components (considered positive when they flow from the sea to the air) is the net heat gained (or lost) by the sea, that together with the surface wind effort constitutes the source of energy for processes like those mentioned previously.

The most common way of estimating heat (except short-wave solar radiation) and

(o perdido) por el mar, que junto con el esfuerzo superficial del viento constituye en última instancia la fuente de energía para procesos como los anteriormente mencionados.

La forma más común de estimar los flujos de calor (excepto la radiación solar de onda corta) y momentum consiste en hacer los cálculos para cada conjunto individual de observaciones y después promediarlos por día. Al hacerlo de esta manera, con los datos disponibles, los centros de masa de los promedios diarios tendían a quedar irregularmente distribuidos, lo cual interfería en la determinación de los patrones espaciales de los flujos. Para evitar este problema se optó por dividir el golfo en cuadrantes de aproximadamente 25 km por lado (Fig. 1) y promediar los datos contenidos en cada cuadrante. Este procedimiento tiene la desventaja de que es posible mezclar la señal diurna, por otro lado mal resuelta, con la estacional cuando el número de datos por cuadrante es reducido. En la Figura 2 se muestra la densidad de observaciones por cuadrante para cada crucero. Cabe notar que en ninguno de los cruceros se tiene una buena cobertura, no obstante se decidió utilizar toda la información disponible y basar las comparaciones en las áreas comunes a la mayor parte de los cruceros. Esto nos limita principalmente a la región de las islas y a la parte central del golfo. Las partes norte y sur son las menos cubiertas.

Las fórmulas empíricas empleadas en este trabajo son las siguientes:

momentum fluxes is to do the computations for each individual set of observations and then to average them per day. When this was done with the available data, the centres of mass of the daily averages tended to be irregularly distributed and thus, interfered with the determination of the spatial patterns of the fluxes. To avoid this problem, we opted to divide the Gulf into approximately 25 km quadrants (Fig. 1) and average the data from each quadrant. The disadvantage of this procedure is that it is possible to mix the daily signal, for the most part badly resolved, with the seasonal signal when the number of data per quadrant is reduced. The density of observations per quadrant for each cruise is shown in Figure 2. It should be noted that none of the cruises have good coverage. However, we decided to use all the available information and base the comparisons on the areas common to most of the cruises. This limited us mainly to the region of the islands and to the central part of the Gulf. The northern and southern parts are those less covered.

The empirical formulae used in this work are the following:

$$Q = Q_s(1 - \alpha) - Q_B - Q_E - Q_H \quad (1)$$

$$Q_{s0} = A_0 + A_1 \cos \phi + B_1 \sin \phi + A_2 \cos 2\phi + B_2 \sin 2\phi \quad (2)$$

$$Q_s = (1 - 0.62C + 0.0019\alpha_s)Q_{s0} \quad (3)$$

$$Q_B = \epsilon \sigma T_s^4 (0.26 - 0.005e_{10})(1 - 0.7C) \quad (4)$$

$$Q_E = \rho_a C E_{10} L_E (q_s - q_{10}) U_{10} \quad (5)$$

$$Q_H = \rho_a C_{pa} \bar{w} \bar{T} + \left[(C_{pv} - C_{pa}) \frac{T_{bs}}{L_E} \right] Q_E \quad (6)$$

$$\tau = \rho_a C D_{10} U_{10}^2 \quad (7)$$

donde Q es el flujo neto de energía a través de la superficie del océano, Q_S la radiación solar de onda corta, Q_B la radiación de onda larga, Q_E el flujo de calor latente, Q_H el flujo de calor sensible, α el albedo (considerado constante e igual a 0.06) y τ el flujo de momentum. Estas fórmulas y las variables implicadas, así como los criterios de equilibrio atmosférico que se emplearon, se explican detalladamente en Reed (1976), Gill (1982), Stevenson (1982) y Palacios-Martínez (1988).

RESULTADOS

A continuación se exponen los resultados obtenidos. En la Tabla 2 se muestran los valores extremos y el promedio de cada una de las componentes del flujo de calor, así como también la magnitud y la dirección del flujo de momentum. De las Figuras 3 a la 12, agrupados a manera de hacer evidentes las variaciones interanuales, se presenta la distribución espacial de los flujos para los cruceros de marzo de 1983 y 1984, abril de 1985 y noviembre de 1983, 1984 y 1985. Posteriormente (Tabla 3; Figs. 13 a 18), en busca de una señal estacional, se muestran los resultados por mes (promediados aquellos para los que hay más de un crucero), a saber marzo (1983 y 1984), abril (1985), mayo (1983 y 1984), octubre (1981 y 1983), noviembre (1983, 1984 y 1985) y diciembre (1986).

En la Tabla 4 se comparan los resultados de este trabajo con los de otros autores para la misma región.

Debido a que no todos los cruceros cubren la misma extensión, es necesario tener cuidado al interpretar estos resultados. Además, es claro que los datos disponibles resultan insuficientes para hacer una descripción completa de la variabilidad interanual y estacional de los flujos de calor y momentum en el golfo de California. Por otro lado, conviene aclarar que el error asociado a los cálculos es imposible de obtener dado el origen diverso de los datos, los cuales nos fueron

where Q is the net energy flux through the ocean surface, Q_S is the short-wave solar radiation, Q_B is the long-wave radiation, Q_E is the latent heat flux, Q_H is the sensible heat flux, α is the albedo (considered constant and equal to 0.06) and τ is the momentum flux. These formulae and the variables involved, as well as the atmospheric equilibrium criteria used, are explained in detail by Reed (1976), Gill (1982), Stevenson (1982) and Palacios-Martínez (1988).

RESULTS

The extreme values and average of each of the heat flux components as well as the magnitude and direction of the momentum flux are given in Table 2. Grouped in such a way as to make the interannual variations evident, the spatial distribution of the fluxes for the cruises of March 1983 and 1984, April 1985 and November 1983, 1984 and 1985 are presented in Figures 3 to 12. In order to find a seasonal signal, the results are given (Table 3; Figs. 13 to 18) per month (those that have more than one cruise are averaged), namely March (1983 and 1984), April (1985), May (1983 and 1984), October (1981 and 1983), November (1983, 1984 and 1985) and December (1986).

The results of this work are compared to those of other authors for the same region in Table 4.

Since not all the cruises covered the same area, care has to be taken on interpreting these results. Moreover, it is clear that the available data are insufficient for a complete description of the interannual and seasonal variability of the heat and momentum fluxes in the Gulf of California. On the other hand, it should be mentioned that it is impossible to determine the error associated to the calculations because of the different origin of the data, which were provided to us without measurement error estimates. In this work, we will assume an error of 10%, which is typically

Tabla 1. Cruceros y datos colectados.
Table 1. Cruises and data collected.

Crucero	Viento		T _{aire}		T _{sup}	P _{bar}	Nubo.	Inic.-Term.	Días	Int. hs
	Mag.	Dir.	T _h	T _s						
CR8110	*	*	*	*	*	*	*	2010-2410	5	2:00
CR8303	*	*	*	*	*	*	*	1003-2203	13	3:30
CR8305	*	*	*	*	*	*	*	2904-1505	17	1:00
CR8310	*	*	*	*	*	*	*	1010-1810	9	1:00
CR8311	*	*	*	*	*	*	*	0111-1011	10	1:00
CR8403	*	*	*	*	*	*	*	2003-0704	19	3:00
CR8405	*	*	*	*	*	*	*	0905-3005	22	1:30
CR8411	*	*	*	*	*	*	*	2511-1312	19	3:30
CR8504	*	*	*	*	*	*	*	3103-0904	10	3:00
CR8511	*	*	*	*	*	*	*	0511-1711	13	1:30
CR8612	*	*	*	*	*	*	*	1112-2112	11	2:00

proporcionados sin estimaciones del error en las mediciones; para nuestros fines consideraremos un error del orden del 10% que es típicamente el error asociado a las fórmulas empleadas. Sin embargo, los resultados sugieren algunas tendencias generales, las cuales se discuten a continuación.

DISCUSION

Bunker y Worthington (1976) afirman que en el Atlántico, las principales áreas de ganancia y pérdida de calor en general coinciden con las corrientes oceánicas frías y cálidas. Sin embargo, la gran influencia que en una cuenca semicerrada tienen factores como forzamiento por mareas y viento, ondas internas y configuración topográfica, modifica sensiblemente aquella tendencia general. No obstante, para tratar de descifrar esta complicada interrelación será útil buscar algunas conexiones entre los flujos de calor y momentum y algunos procesos (como convección, formación de frentes y giros), cuya ocurrencia en el golfo es conocida.

Los resultados para Q_B indican que (Figs. 3 y 4), en términos generales, este flujo presenta una señal estacional, ya que disminuye de marzo a octubre y aumenta de nuevo

the error associated to the formulae used. However, the results indicate some general tendencies, which are discussed in the following section.

DISCUSSION

Bunker and Worthington (1976) state that in the Atlantic, the main areas of heat gain and loss generally coincide with cold and hot oceanic currents. However, the strong influence exerted on semiclosed basins by such factors as tidal and wind forcing, internal waves and topographic configuration modify that general tendency. Nevertheless, to try to figure out this complicated interrelation it would be useful to look for some connection between heat and momentum fluxes and some processes (such as convection, formation of fronts and eddies) which are known to occur in the Gulf.

The results for Q_B indicate that (Figs. 3 and 4), in general terms, this flux presents a seasonal signal, since it decreases from March to October and increases again in December. Furthermore, in 1984 the patterns for March and November (winter conditions) are very similar.

It is also observed that the Gulf emits more long-wave heat to the atmosphere in

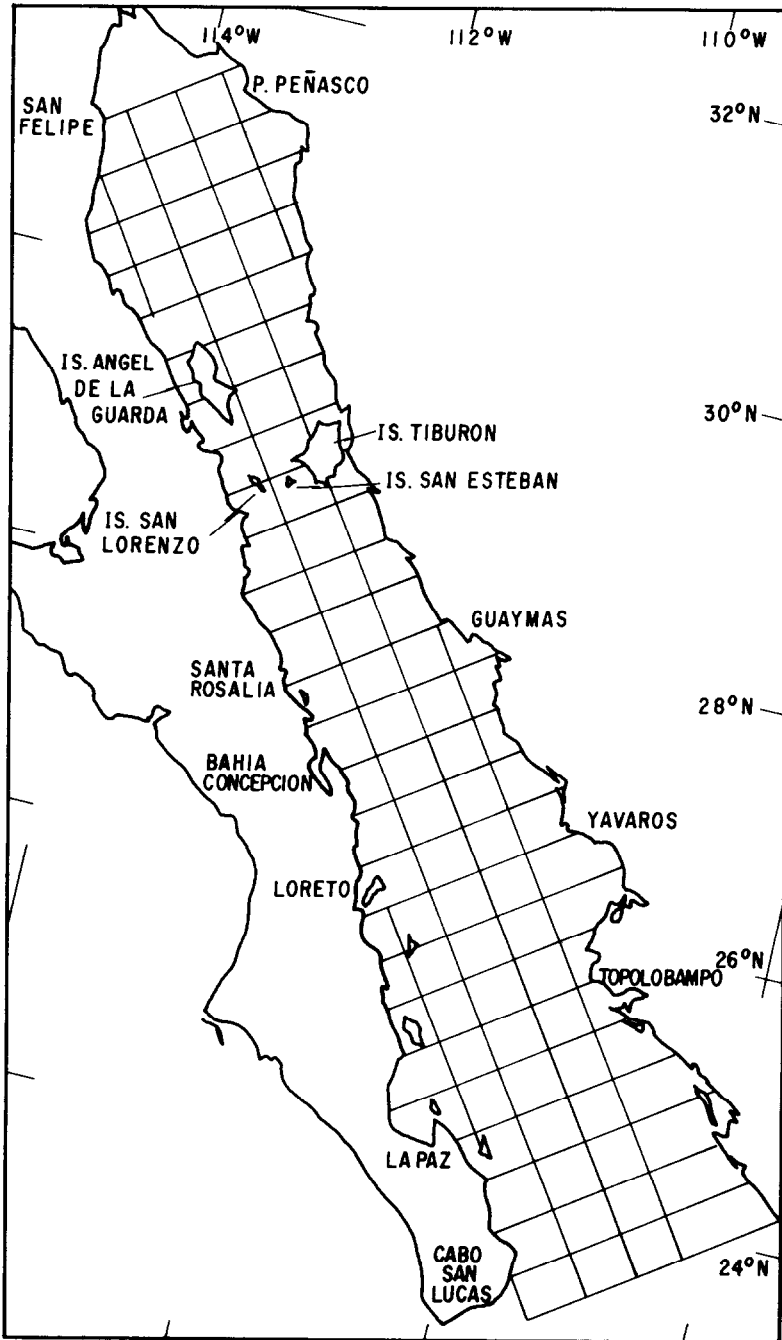


Figura 1. Localización del área de estudio. Se muestran los cuadrantes en los que se dividió el golfo de California para el cálculo de los flujos de calor y momentum.
Figure 1. Location of the study area. The quadrants into which the Gulf of California was divided for the calculation of the heat and momentum fluxes are shown.

en diciembre. Además, en 1984 los patrones para marzo y noviembre (condiciones de invierno) son muy parecidos entre sí.

Se observa asimismo que el golfo emite hacia la atmósfera más calor de onda larga en invierno que en verano, y que esa diferencia es más pronunciada en la porción sur del golfo. Esto es que el alto golfo, la región de las islas y el golfo central radian más calor que el golfo sur, exceptuando la vecindad de Topolobampo-Yávaros, donde también hay valores altos; esta diferencia es más notable en verano que en invierno.

El campo de radiación de onda larga responde básicamente al contenido de vapor de la atmósfera en sus primeros 10 m. A su vez, este contenido de humedad depende entre otras cosas de la temperatura del aire. De este modo, el incremento de Q_B hacia el norte en todo el golfo en invierno (marzo y noviembre de 1983 y 1984, abril de 1985 y diciembre de 1986) y hacia el sur en el alto golfo y la región de las islas en verano (promedio de mayo), refleja el hecho bien documentado de que en invierno la temperatura del aire disminuya hacia el interior del golfo y en verano se incrementa (Alvarez-Borrego, 1983).

Asimismo, el hecho de que la humedad relativa sea baja en todo el golfo explica que el valor de Q_B encontrado en este trabajo (ver Tabla 4) sea mayor que los informados por Roden y Emilsson (1979) y Bray (1988).

Además del gradiente de temperatura del aire, que influye tanto en el patrón espacial como en el temporal de Q_B , otro factor que influye notablemente en el patrón espacial es la topografía de la región de las islas. En general, los aumentos en la temperatura del agua tienen un menor efecto sobre Q_B comparado con el de los incrementos en la humedad atmosférica, pero las temperaturas muy bajas del agua en el umbral Salsipuedes-Tiburón, el canal de Ballenas y una franja costera al sur de este canal inhiben en alto grado la evaporación local, lo que se traduce en valores relativamente altos de Q_B . Esto se aprecia mejor en verano (promedios de mayo y octubre), cuando la evaporación en el resto del golfo es elevada, pero también se observa claramente en todos los cruceros de noviembre (el caso de noviembre de 1985 se discute más adelante por separado). El que las isóneas de Q_B tiendan a ser más perpendiculares a la costa en ciertas regiones y que los valores aumenten hacia el sur (ver Figs. 3 y 4 y Tabla 3), significan que el efecto dominante

winter than in summer, and that this difference is more pronounced in the southern part of the Gulf. That is, the upper Gulf, the region of the islands and the central Gulf radiate more heat than the southern Gulf, except around Topolobampo-Yávaros, where high values are also found; this difference is more pronounced in summer than in winter.

The long-wave radiation field mainly responds to the content of vapour in the first 10 m of the atmosphere. In turn, this humidity content depends, among other things, on the temperature of the air. In this way, the increase of Q_B towards the north throughout the Gulf in winter (March and November 1983 and 1984, April 1985 and December 1986) and towards the south in the upper Gulf and the region of the islands in summer (average of May), reflects the well-documented fact that the temperature of the air decreases towards the inner Gulf in winter and increases in summer (Alvarez-Borrego, 1983).

Likewise, the fact that the relative humidity is low throughout the Gulf explains the higher Q_B value found in this study (see Table 4) in relation to those reported by Roden and Emilsson (1979) and Bray (1988).

Besides the temperature gradient of the air, affecting both the spatial as well as the temporal pattern of Q_B , another factor that notably influences the spatial pattern is the topography of the region of the islands. In general, increases in water temperature have less effect on Q_B than increases in atmospheric humidity. However, the low water temperatures in the Salsipuedes-Tiburón threshold, Ballenas Channel and a coastal band to the south of this channel greatly inhibit local evaporation, resulting in relatively high values of Q_B . This can be better appreciated in summer (averages of May and October), when the evaporation in the rest of the Gulf is high, but it is also clearly observed in all the November cruises (the case of November 1985 is discussed further on). The fact that the Q_B isolines tend to be more perpendicular to the coast in some regions and that the values increase towards the south (see Figs. 3 and 4 and Table 3), indicates that the dominant effect on the increase in surface temperature and evaporation is exerted by the short-wave solar radiation.

The latent heat flux depends on the wind speed and on the atmospheric humidity, and it is even more influenced by the latter than the long-wave heat flux.

Tabla 2. Promedios de los flujos de calor y momentum para cada crucero. Las unidades son $W m^{-2}$ y $dinas cm^{-2} \times 10^{-2}$, respectivamente. La dirección está dada en grados de azimut.
Table 2. Averages of the heat and momentum fluxes for each cruise. The units are $W m^{-2}$ and $dynes cm^{-2} \times 10^{-2}$, respectively. The direction is given in degrees of azimuth.

Crucero		Q_S	Q_B	Q_E	Q_H	Q	τ	
							Mag.	Dir.
		$(1 - \alpha)$						
8110	Max.	248	55	70	21	179	24.8	319
	Min.	234	40	6	0	120		
	Pro.	239	50	29	10	150		
8303	Max.	306	68	77	21	255	24.8	313
	Min.	291	52	0	-11	147		
	Pro.	298	60	27	6	214		
8305	Max.	358	65	61	25	305	14.4	304
	Min.	356	52	0	-2	225		
	Pro.	357	60	18	7	278		
8310	Max.	272	41	79	40	217	10.2	79
	Min.	257	24	0	3	114		
	Pro.	263	32	31	15	179		
8311	Max.	236	57	101	50	159	38.8	326
	Min.	207	37	4	1	51		
	Pro.	221	47	42	18	107		
8403	Max.	324	70	85	44	275	12.2	325
	Min.	307	55	0	-27	150		
	Pro.	316	62	15	3	248		
8405	Max.	377	64	67	56	319	16.3	138
	Min.	356	34	1	-16	254		
	Pro.	365	53	17	2	297		
8411	Max.	203	68	81	38	140	13.0	157
	Min.	176	54	0	-9	-1		
	Pro.	189	63	19	8	95		
8504	Max.	326	70	54	4	268	16.3	281
	Min.	316	58	0	-27	211		
	Pro.	321	65	9	4	258		
8511	Max.	219	62	95	75	144	7.8	230
	Min.	209	50	2	1	-28		
	Pro.	213	55	24	12	115		
8612	Max.	181	69	56	30	112	3.6	34
	Min.	156	62	0	1	7		
	Pro.	167	66	9	6	85		

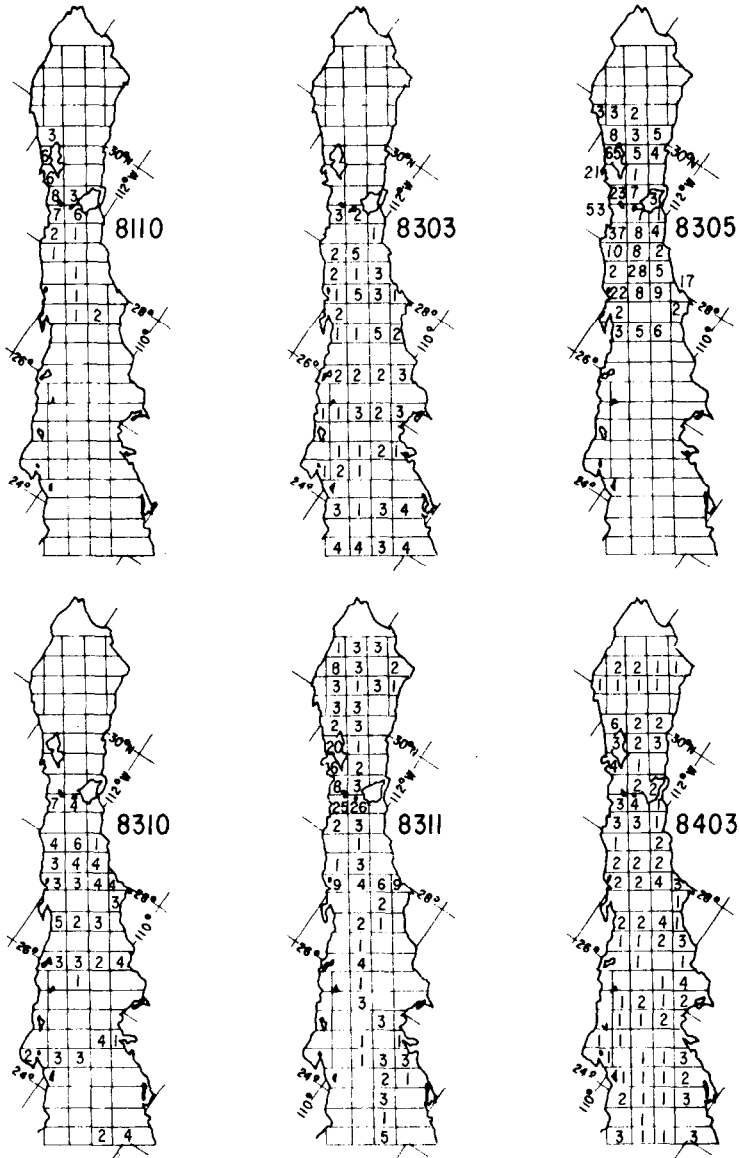


Figura 2. Número de datos de cada variable por cuadrante para cada crucero.
Figure 2. Number of data of each variable per quadrant for each cruise.

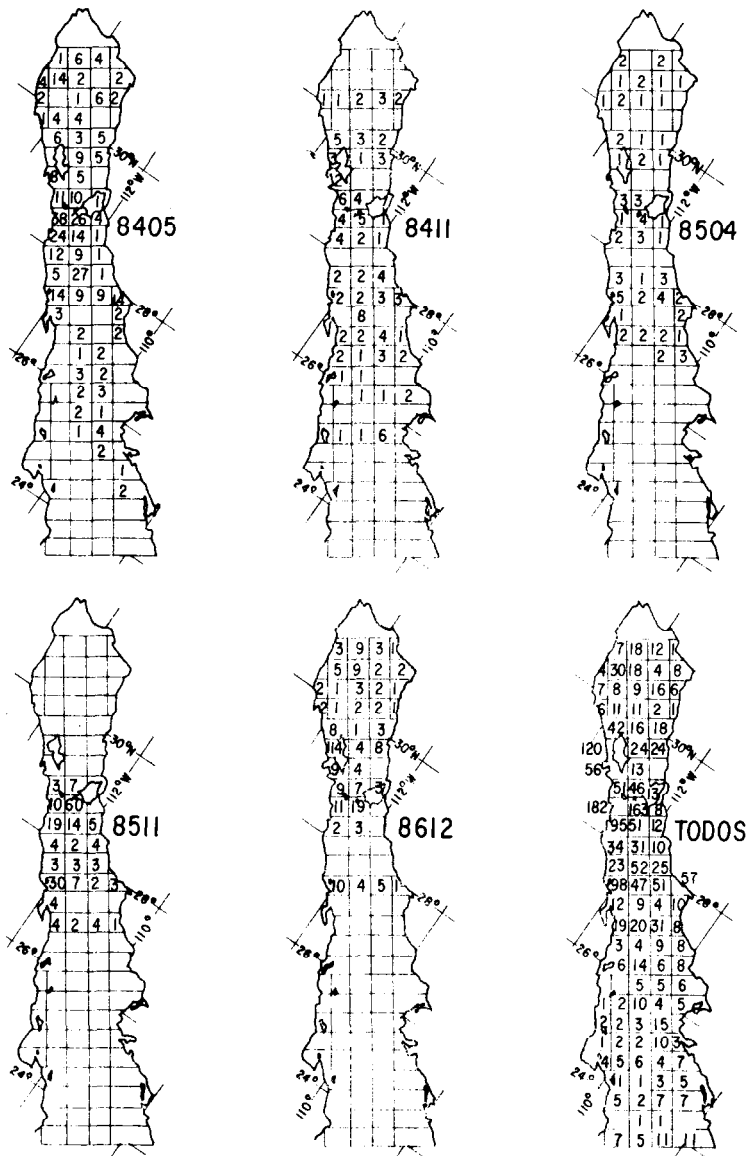


Figura 2 (Cont.)

Tabla 3. Promedio por mes de los flujos de calor y momentum. Los valores de los flujos de calor están expresados en $W m^{-2}$ y la magnitud del flujo de momentum en $dinas cm^{-2} \times 10^{-2}$. La dirección es en grados de azimut.

Table 3. Average per month of the heat and momentum fluxes. The values of the heat fluxes are expressed in $W m^{-2}$ and the magnitude of the momentum flux in $dynes cm^{-2} \times 10^{-2}$. The direction is in degrees of azimuth.

		Marzo	Abril	Mayo	Octubre	Noviembre	Diciembre	Promedio
Q_S	Max.	318	324	362	269	220	181	279
	Min.	291	310	359	233	176	156	254
	Pro.	306	318	361	251	196	167	266
Q_B	Max.	69	70	65	55	67	69	66
	Min.	64	58	34	24	37	62	45
	Pro.	62	65	55	39	54	66	57
Q_E	Max.	80	54	44	78	101	56	69
	Min.	0	0	0	0	0	0	0
	Pro.	16	9	15	29	28	9	18
Q_H	Max.	20	4	56	39	48	30	33
	Min.	-27	-27	-15	0	0	1	-11
	Pro.	3	-4	4	11	12	6	5
Q	Max.	276	258	319	210	138	112	220
	Min.	168	210	265	101	9	7	127
	Pro.	246	254	296	160	85	85	188
τ	Mag.	9.2	16.2	6.4	12.0	18.0	3.6	10.9
	Dir.	19	281	141	5	304	34	315

sobre el incremento de la temperatura superficial y la evaporación es ejercida por la radiación solar de onda corta.

El flujo de calor latente depende de la rapidez del viento y de la humedad atmosférica, y resulta aun más influido por esta última que el flujo de calor de onda larga.

La gran dependencia de Q_E respecto al viento, y la baja calidad de nuestros datos de ese parámetro, hace necesario tener cautela al intentar interpretar los resultados sobre este flujo, especialmente cuando los valores son de cero, ya que es difícil que durante un período razonable de muestreo el valor promedio de la rapidez del viento sea exactamente cero. Sin embargo, se supone que los valores obtenidos son esencialmente correctos cuando en el área de interés hay un número razonable de datos.

Los resultados para Q_E de este trabajo corroboran los informes en el sentido de que la

The high dependence of Q_E with respect to the wind, and the low quality of our data for this parameter, make it necessary to interpret the results on this flux with caution, especially when the values are zero, since it is unlikely for the average value of the wind speed to be exactly zero over a reasonable sampling period. However, the values obtained are assumed to be essentially correct when there are a reasonable number of data for the area.

The results for Q_E of this work corroborate the reports that the highest evaporation (and, therefore, highest latent heat flux) persistently occurs in the area of Puerto Peñasco at the end of summer and beginning of autumn (Bray, 1988; Bray and Robles, in press), with a secondary minimum in October off Guaymas (Roden, 1958), even though the latter is really observed in the vicinity of

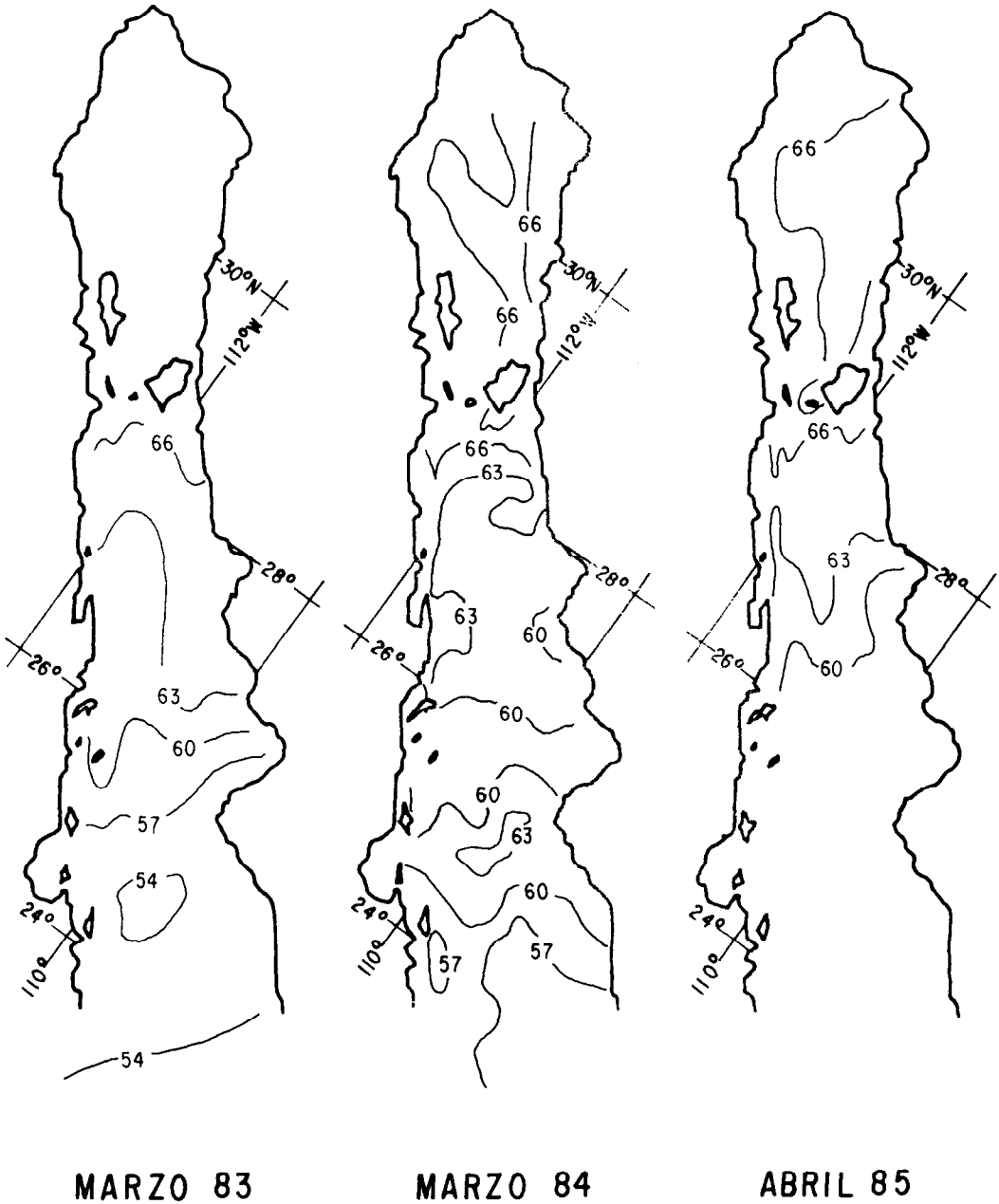


Figura 3. Radiación de onda larga (Q_B) en marzo de 1983 y 1984 y abril de 1985. Las unidades están dadas en $W m^{-2}$.
Figure 3. Long-wave radiation (Q_B) in March 1983 and 1984 and April 1985. The units are $W m^{-2}$.

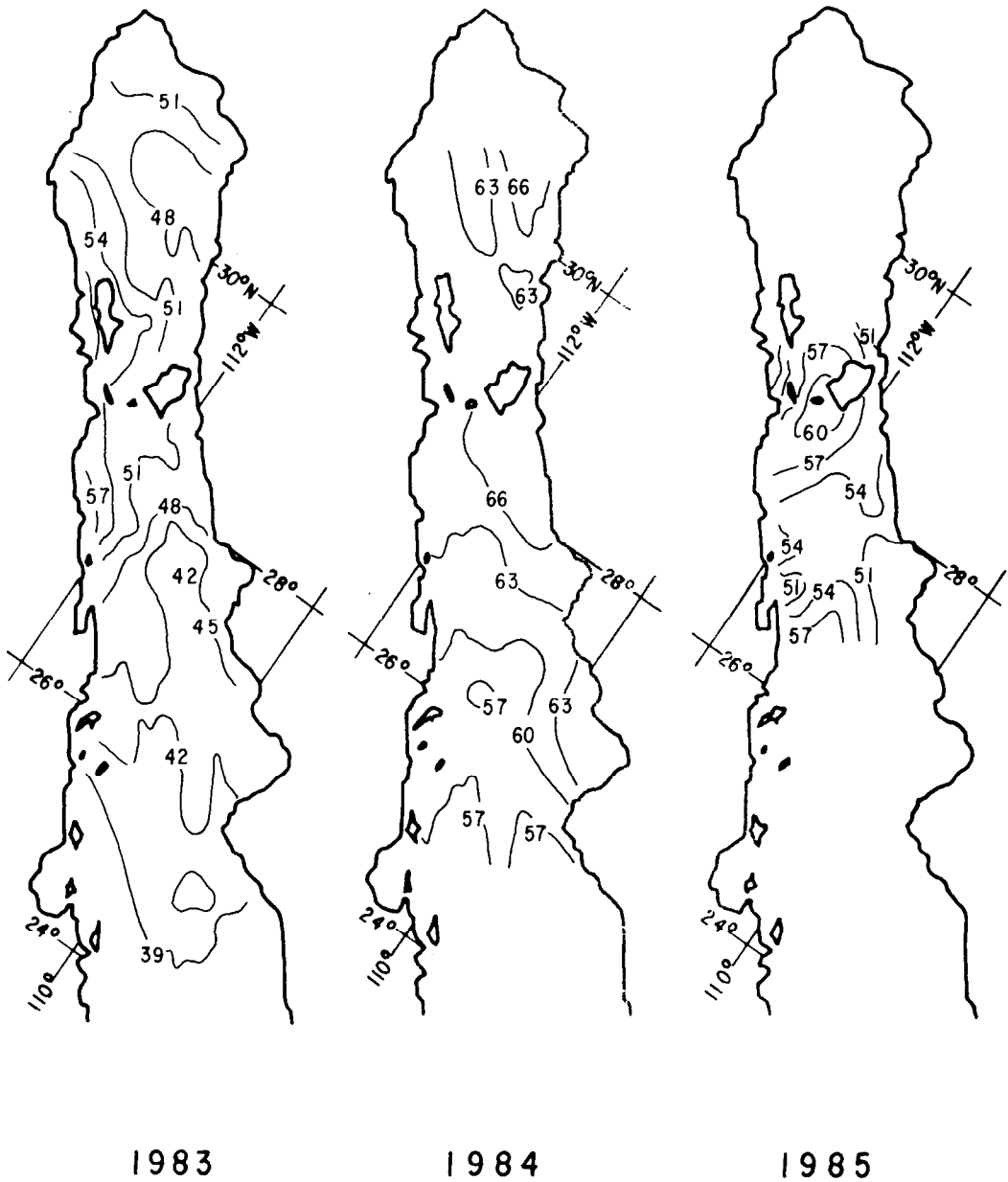


Figura 4. Radiación de onda larga (Q_B) en noviembre de 1983, 1984 y 1985. Las unidades están dadas en $W m^{-2}$.

Figure 4. Long-wave radiation (Q_B) in November 1983, 1984 and 1985. The units are $W m^{-2}$.

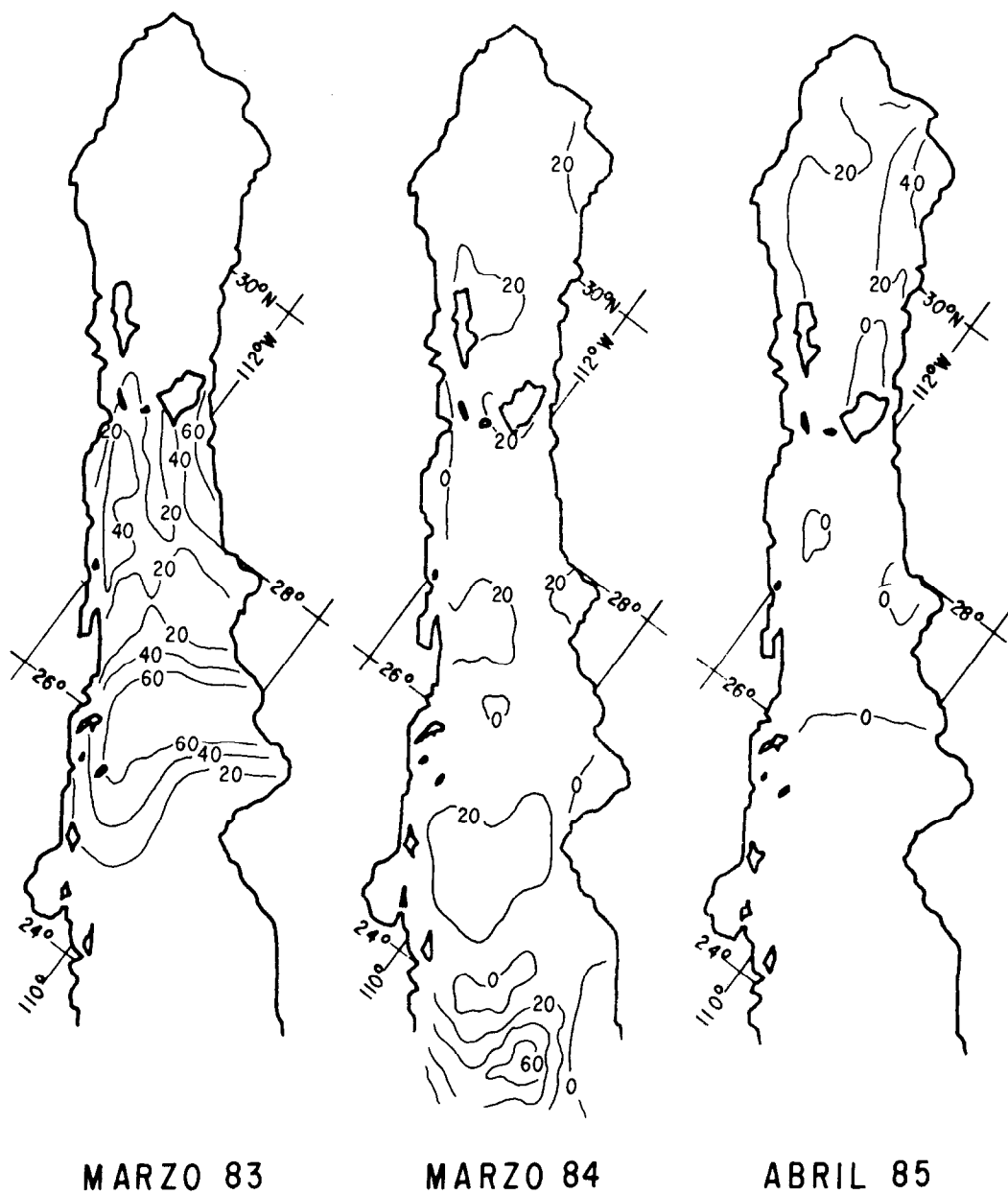


Figura 5. Flujo de calor latente (Q_E) en marzo de 1983 y 1984 y abril de 1985. Las unidades están dadas en $W m^{-2}$.

Figure 5. Latent heat flux (Q_E) in March 1983 and 1984 and April 1985. The units are $W m^{-2}$.

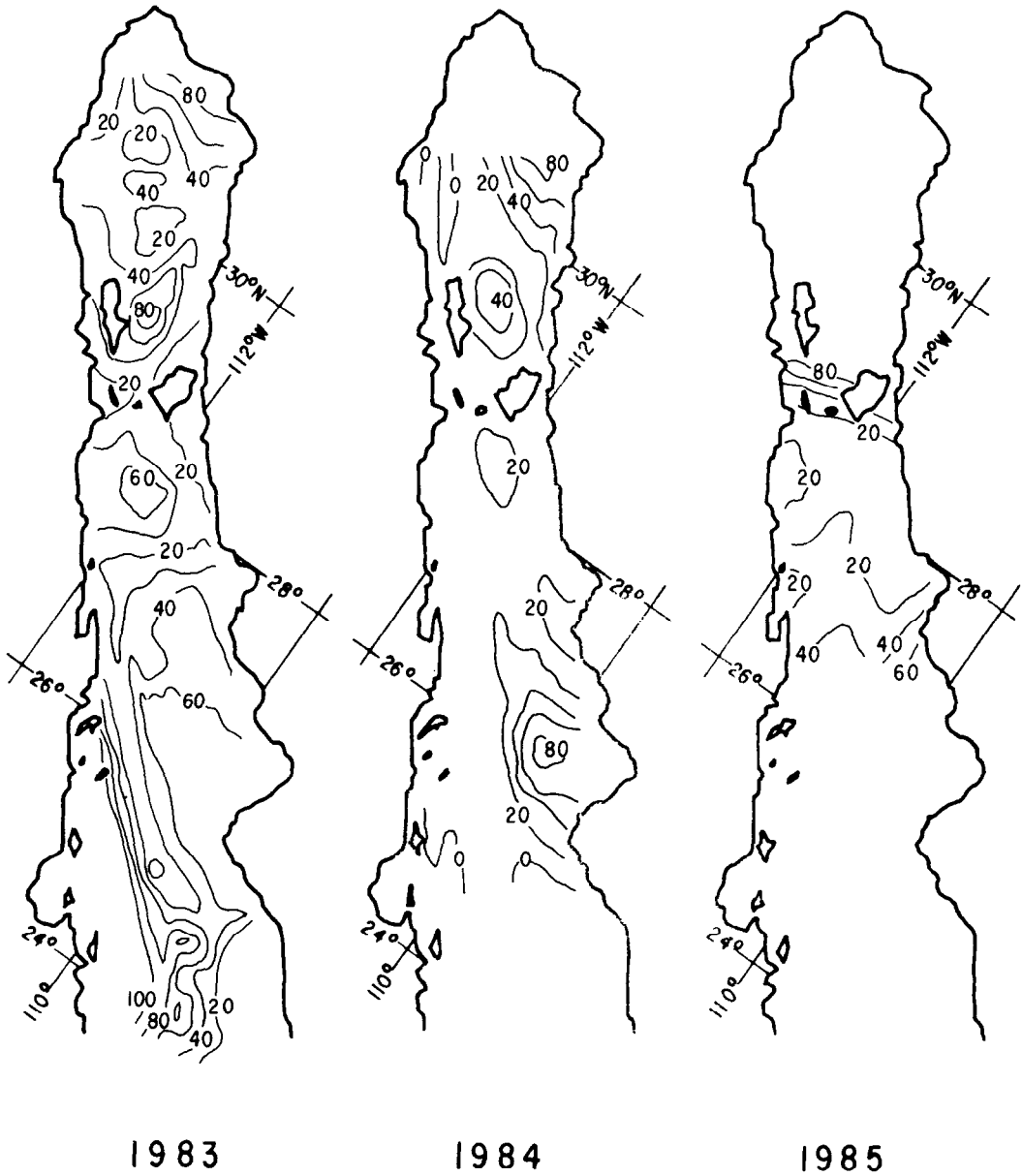


Figura 6. Flujo de calor latente (Q_E) en noviembre de 1983, 1984 y 1985. Las unidades están dadas en $W m^{-2}$.

Figure 6. Latent heat flux (Q_E) in November 1983, 1984 and 1985. The units are $W m^{-2}$.

Tabla 4. Comparación con los resultados informados por otros autores. Los valores entre paréntesis son resultados de cálculos realizados sin considerar nubosidad. Las unidades para los flujos son $W m^{-2}$ y para la nubosidad es porcentaje de cobertura.

Table 4. Comparison of the results reported by other authors. The values in parentheses are the results of calculations made without considering cloudiness. The units for the fluxes are $W m^{-2}$ and percentage of coverage for cloudiness.

Autor(es)	Región	Q	Q_S	Q_B	Q_E	Q_H	Nubosidad
Roden y Emilsson (1979)	Todo el golfo	-168 (-115)	246 (290)	71 (75)	300	30	0.26
Noriega-Echeverría (1985)	Mitad norte				400	50	
Bray (1987)	Todo el golfo	20 (50)	230 (270)	90 (95)	75	45	0.26
Organista-Sandoval (1987)	Alto golfo	85	206	53	65	3	0.37
Este trabajo	Todo el golfo	149 (188)	213 (266)	46 (57)	18	5	0.33

mayor evaporación (y por ende mayor flujo de calor latente) ocurre persistentemente en la vecindad de Puerto Peñasco a finales de verano y principios de otoño (Bray, 1988; Bray y Robles, en prensa), con un mínimo secundario en octubre frente a Guaymas (Roden, 1958), aunque este último se observa más bien en la vecindad de Yávaros. En el golfo central se observan valores intermedios de Q_E .

En cuanto al comportamiento temporal, el promedio y rango del flujo de calor latente son máximos en noviembre, de modo que los gradientes son más intensos en ese mes (ver Figs. 5 y 6 y Tabla 3).

En el caso del calor sensible también se aplican las limitaciones relativas a la confiabilidad de los datos de viento, además de que ahora se agregan las incertidumbres de los valores de calor latente.

Sin embargo, se observa que en general el efecto predominante es el de la diferencia de temperaturas; dado que en invierno la temperatura del aire disminuye hacia el norte y que en verano ese patrón se invierte, y que de octubre a junio las temperaturas superficiales del agua son mayores en la boca (Roden y Groves, 1959; Alvarez-Borrego, 1983), se

Yávaros. Intermediate values of Q_E are observed in the central Gulf.

With regard to temporal behaviour, the average and range of latent heat flux are maximum in November. Therefore, the gradients are more intense during this month (see Figs. 5 and 6 and Table 3).

Regarding sensible heat, the limitations relative to the reliability of the wind data also apply, except that the uncertainties of the latent heat values are added.

However, it is observed that, in general, the predominant effect is that of differences in temperature. Since in winter the temperature of the air decreases towards the north and in summer this pattern is reversed, and since from October to June the surface water temperatures are higher at the mouth (Roden and Groves, 1959; Alvarez-Borrego, 1983), a larger amount of sensible heat is transferred to the atmosphere in the southern Gulf than in the rest of the Gulf. For all the Gulf (Figs. 7 and 8), the highest values are observed in summer (May) and the lowest in winter (March and April).

As expected, the Gulf gains more net heat (Q) in summer than in winter (Table 3) and, in general, it can be said that it did not

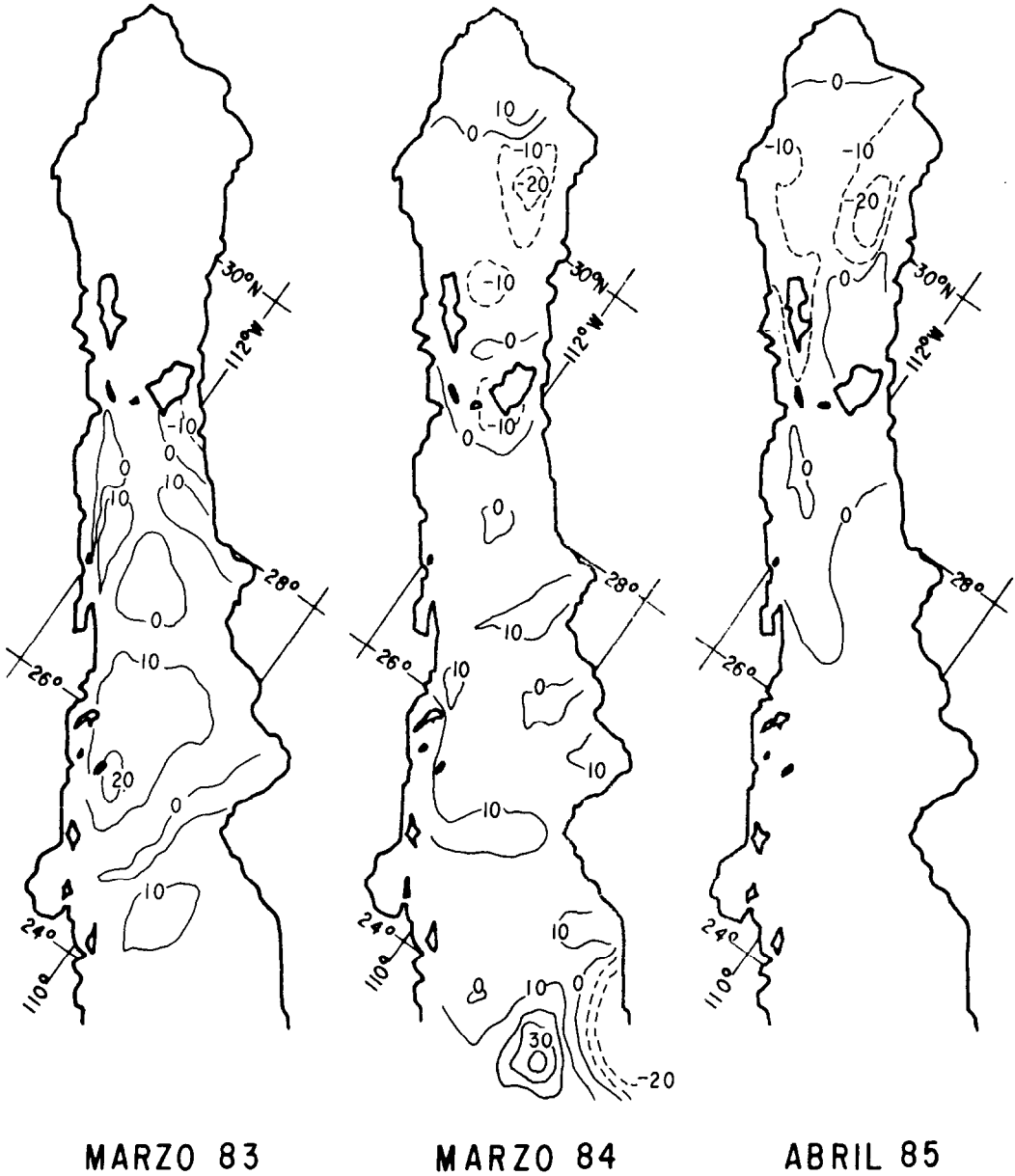


Figura 7. Flujo de calor sensible (Q_H) en marzo de 1983 y 1984 y abril de 1985. Las unidades están dadas en $W m^{-2}$.

Figure 7. Sensible heat flux (Q_H) in March 1983 and 1984 and April 1985. The units are $W m^{-2}$.

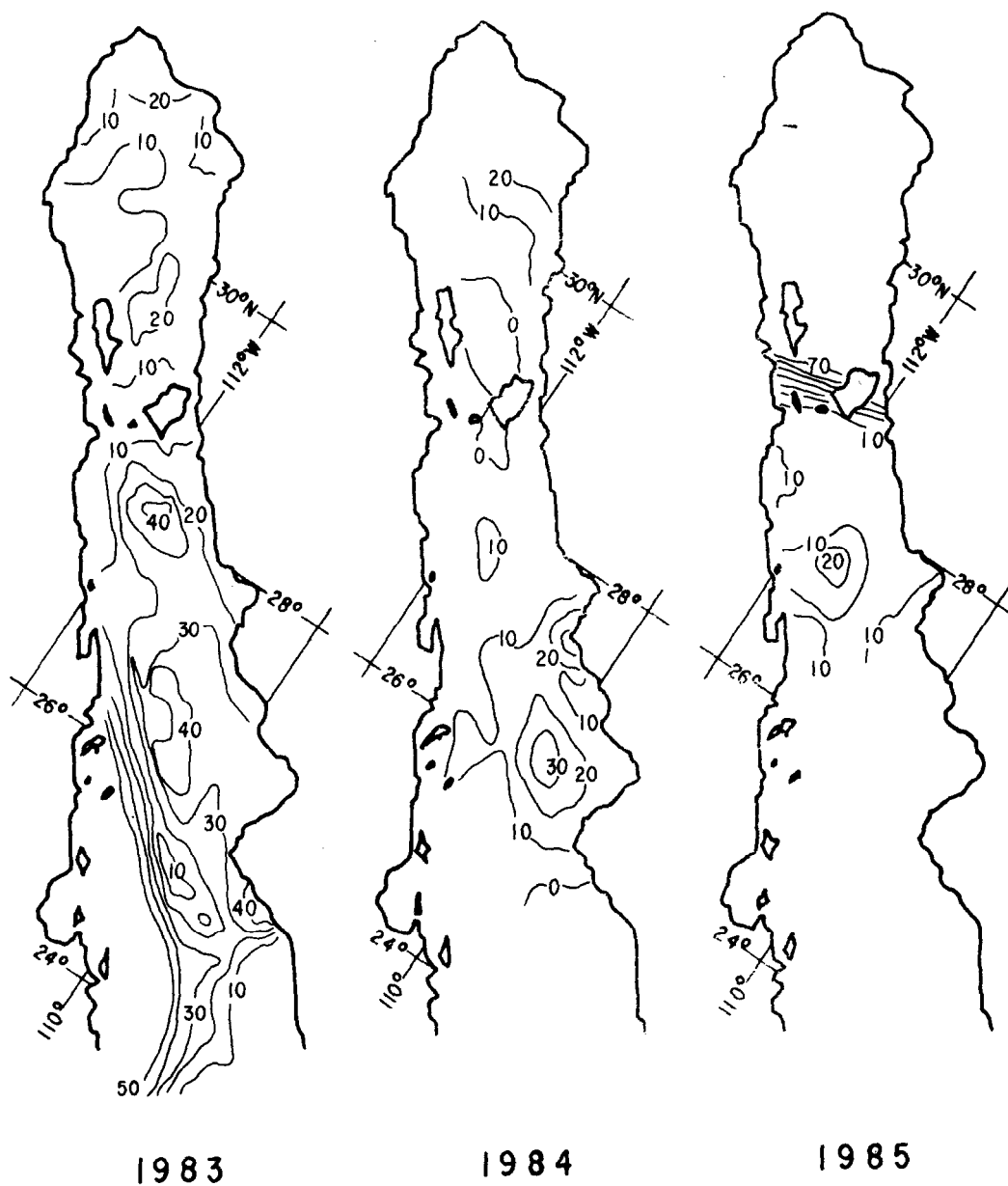


Figura 8. Flujo de calor sensible (Q_H) en noviembre de 1983, 1984 y 1985. Las unidades están dadas en $W m^{-2}$.

Figure 8. Sensible heat flux (Q_H) in November 1983, 1984 and 1985. The units are $W m^{-2}$.

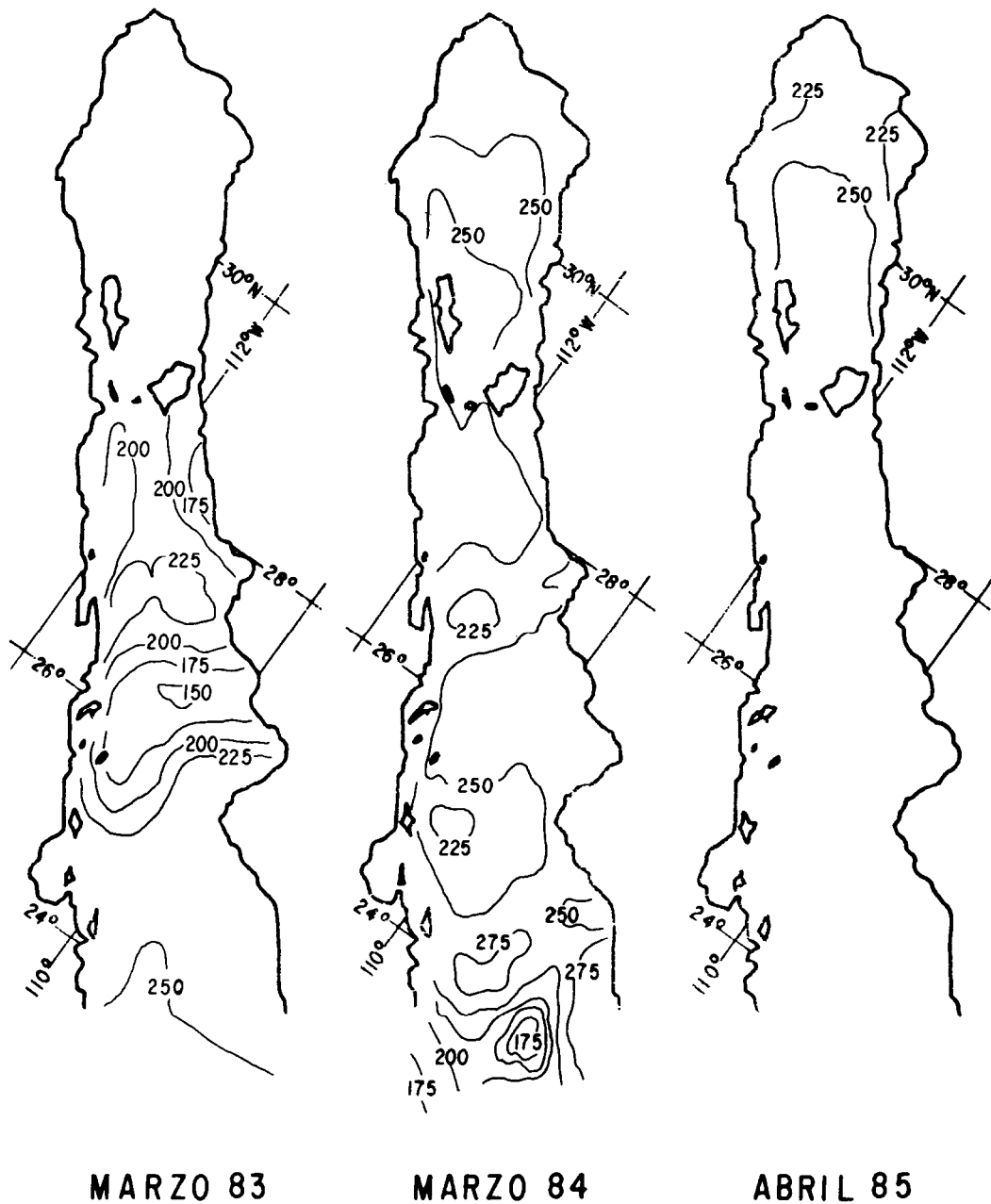


Figura 9. Flujo de calor neto (Q) en marzo de 1983 y 1984 y abril de 1985. Las unidades están dadas en $W m^{-2}$.

Figure 9. Net heat flux (Q) in March 1983 and 1984 and April 1985. The units are $W m^{-2}$.



Figura 10. Flujo de calor neto (Q) en noviembre de 1983, 1984 y 1985. Las unidades están dadas en $W m^{-2}$.

Figure 10. Net heat flux (Q) in November 1983, 1984 and 1985. The units are $W m^{-2}$.

transfiere a la atmósfera una mayor cantidad de calor sensible en el golfo sur que en el resto del golfo. Para todo el golfo (Figs. 7 y 8), los valores más altos se observan en verano (mayo) y los más bajos en invierno (marzo y abril).

Como era de esperar, el golfo gana más calor neto (Q) en verano que en invierno (Tabla 3), y en general puede decirse que no perdió calor en ninguno de los meses aquí estudiados. La distribución tiende a ser más uniforme en el golfo central, y menos en el golfo sur, especialmente en invierno en la costa oriental, donde se forman intensos gradientes. Esto guarda alguna relación con la intensidad del viento (de menor magnitud en el golfo central), a través del efecto negativo combinado de mayor calor latente y mayor calor sensible (Figs. 9 y 10).

Weare *et al.* (1981) informan para el Pacífico adyacente al golfo de California un valor promedio de calor neto de 30 W m^{-2} . Por tanto, dado que el valor encontrado en este trabajo es de 149 W m^{-2} , es de esperar que el golfo se halle permanentemente exportando calor, aunque no necesariamente por la superficie todo el tiempo.

En base a lo que se sabe sobre la formación de frentes y la generación de surgencias en el golfo, consideramos que el intenso flujo de calor neto que se observa en mayo y octubre (Fig. 17) en la región de las islas y frente a las costas de Baja California en las partes norte y central no es resultado de surgencias, sino de movimiento de agua de baja temperatura desde el lado occidental de la isla Angel de la Guarda y todo el canal de Ballenas. El avance de este frente inhibe la evaporación (es decir reduce el flujo de calor latente, Fig. 15) y reduce o anula el flujo de calor sensible, o incluso invierte su sentido (Fig. 16). En mayo, la acción del viento a través del flujo de momentum (Fig. 18) ha reunido agua fría del frente de Ballenas y plumas de surgencias de la costa oriental en la región de las islas Tiburón y San Esteban.

En noviembre, las aguas del frente de Ballenas y de las surgencias -ahora con mayor intensidad que en verano- de las costas de Sonora cubren una superficie más amplia, aunque su contenido de calor es más bajo.

Los bajos valores de calor neto en invierno (noviembre y diciembre) y la alta evaporación apoyan la hipótesis del hun-

lose heat during any of the months studied in this work. The distribution tends to be more uniform in the central Gulf and less uniform in the southern Gulf, especially along the eastern coast in winter, where intense gradients are formed. This has some relation to the intensity of the wind (lower in the central Gulf), through the combined negative effect of higher latent heat and higher sensible heat (Figs. 9 and 10).

For the Pacific adjacent to the Gulf of California, Weare *et al.* (1981) report an average value of net heat of 30 W m^{-2} . Therefore, since the value found in this study is 149 W m^{-2} , it is expected that the Gulf permanently exports heat, although not necessarily all the time through the surface.

Based on what is known on the formation of fronts and the generation of upwellings in the Gulf, we consider that the intense net heat flux observed in May and October (Fig. 17) in the region of the islands and off the coast of Baja California in the northern and central part is not the result of upwellings, but of the movement of low temperature water from the western side of Angel de la Guarda Island and from the Ballenas Channel. The advance of this front inhibits evaporation (that is, it reduces the latent heat flux; Fig. 15) and reduces or cancels the sensible heat flux, or inclusively inverts its direction (Fig. 16). In May, the wind action through the momentum flux (Fig. 18) has gathered cold water from the Ballenas front and upwelling plumes of the eastern coast of the region of Tiburón and San Esteban Islands.

In November, the waters of the Ballenas front and of the upwellings -now with more intensity than in summer- off the coasts of Sonora cover a wider surface, even though their heat content is lower.

The low values of net heat in winter (November and December) and the high evaporation support the hypothesis of downwelling in the upper Gulf as a contributing factor to the formation of the mass of water of the Gulf.

Two anomalies detected in this study, i.e. the presence of the 1983 El Niño phenomenon and a thermal front in November 1985, are analysed separately in the following sections.

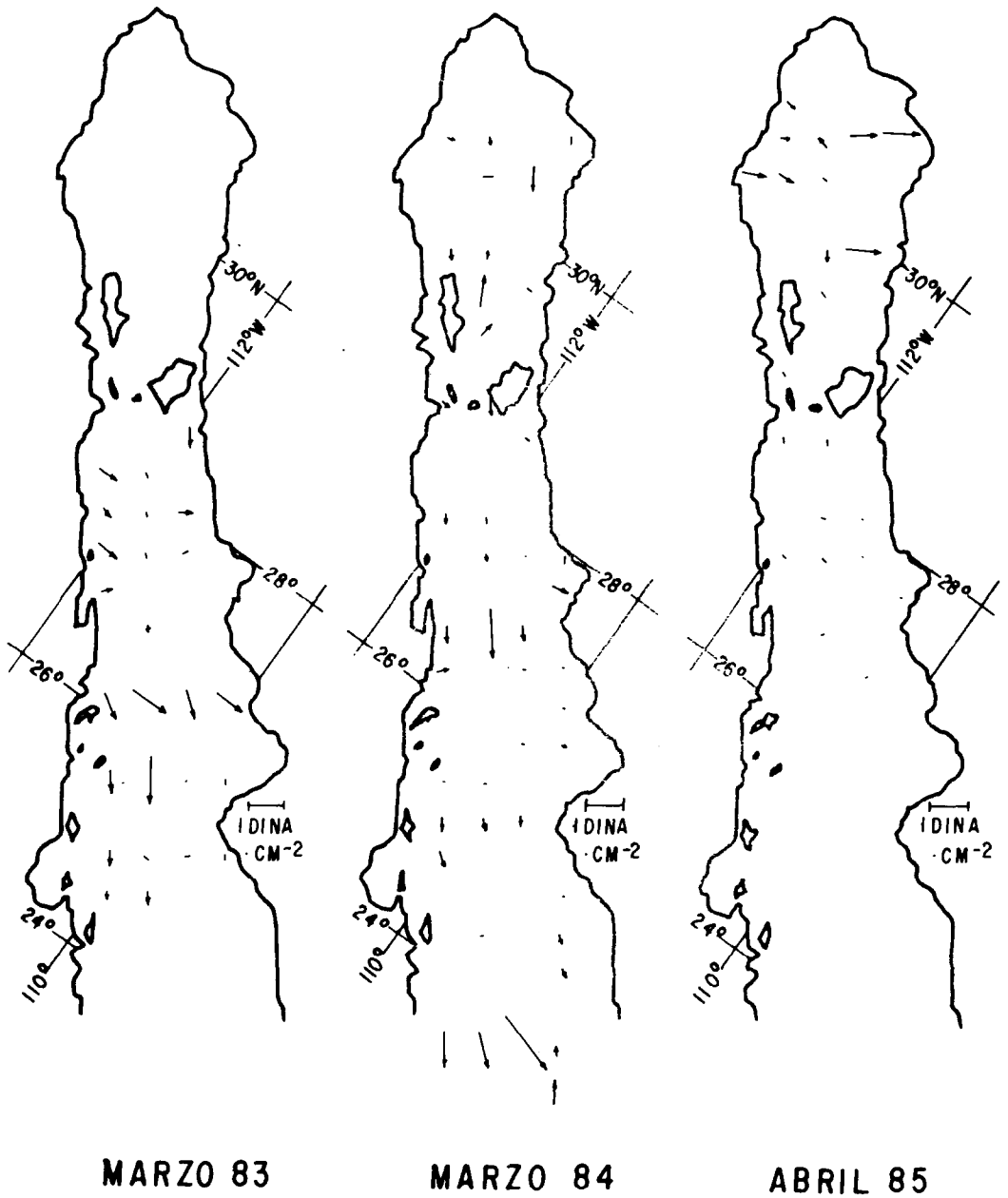


Figura 11. Flujo de momento en marzo de 1983 y 1984 y abril de 1985. Las unidades están dadas en $W m^{-2}$.

Figure 11. Momentum flux in March 1983 and 1984 and April 1985. The units are $W m^{-2}$.

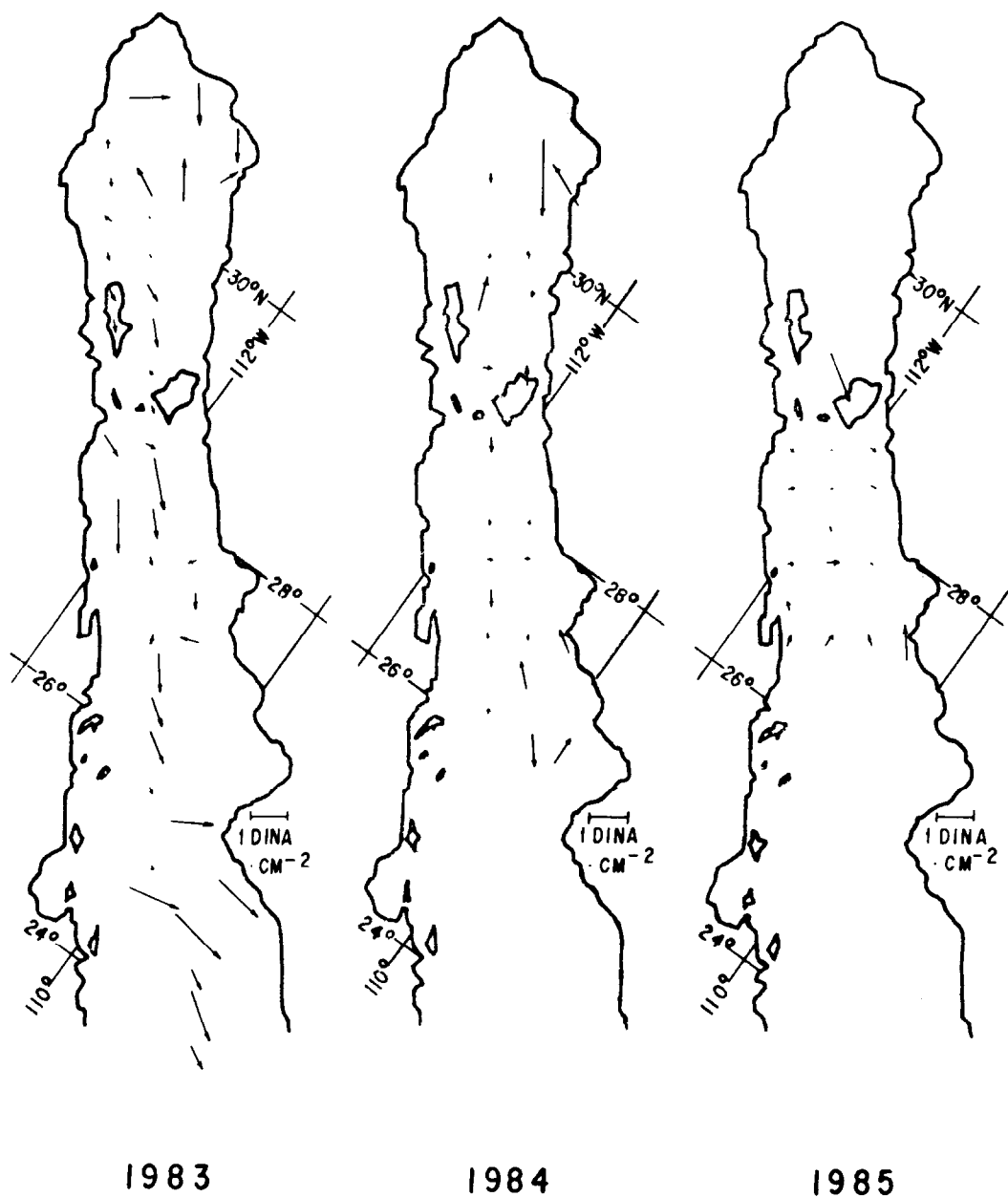


Figura 12. Flujo de momentum en noviembre de 1983, 1984 y 1985. Las unidades están dadas en $W m^{-2}$.

Figure 12. Momentum flux in November 1983, 1984 and 1985. The units are $W m^{-2}$.

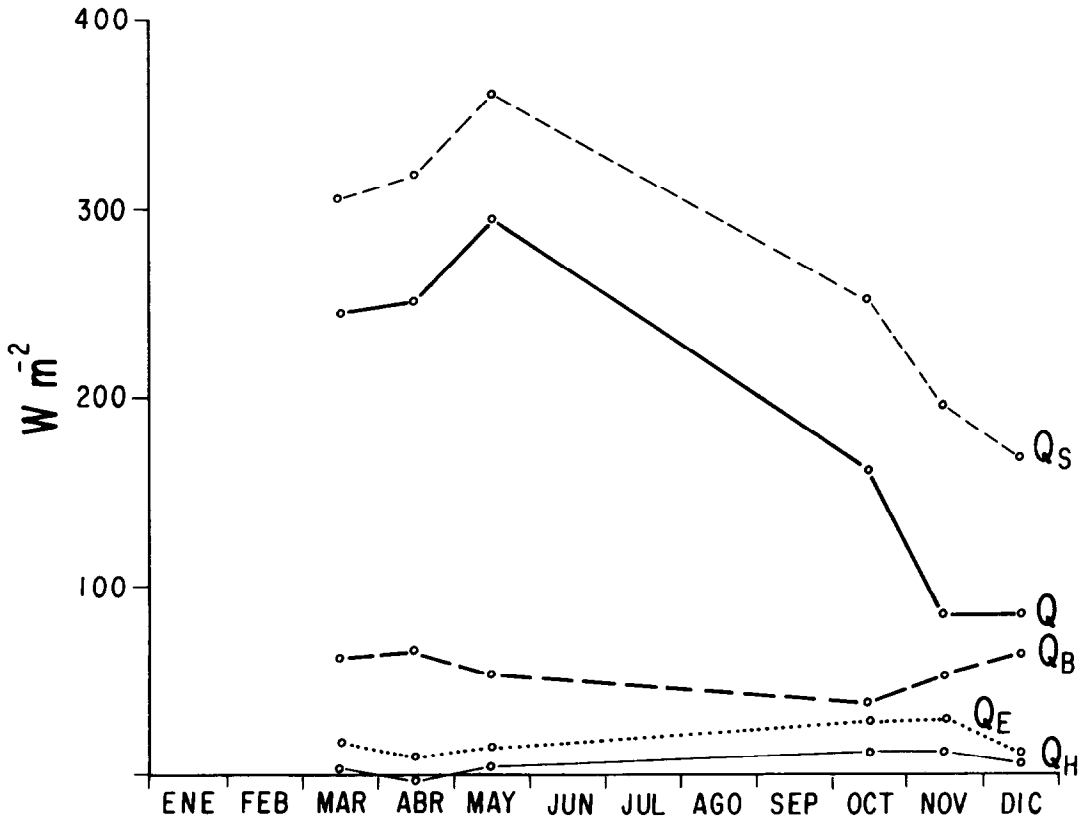


Figura 13. Valores promedio por mes de los flujos de calor.
 Figure 13. Average values per month of the heat fluxes.

dimiento convectivo en el alto golfo como factor contribuyente a la formación de la masa de agua del golfo.

Enseguida se analizan por separado dos anomalías detectadas en este trabajo, a saber la presencia del fenómeno El Niño 1983 y un frente térmico en noviembre de 1985.

El Niño 1983

El año de 1983 fue un año Niño; en los resultados obtenidos se observan patrones anómalos (ver Robles y Marinone, 1987). Las anomalías consisten en mayor magnitud del viento y mayores temperaturas superficiales del agua, así como también de bulbo húmedo y bulbo seco en noviembre y marzo.

El Niño 1983

An El Niño event occurred in 1983 and anomalous patterns are observed in the results obtained (see Robles and Marinone, 1987). The anomalies consist of stronger winds and higher surface temperatures of the water, as well as of humid bulb and dry bulb in November and March.

Perturbations of variable magnitude were observed in all the heat and momentum fluxes. However, like Bray (1988) who studied the central Gulf, it was found that these anomalies seem to be cancelled out in some cases during the course of the year (in May 1983 the three previously mentioned temperatures were lower than in May 1984, the magnitude of the wind was the same but in

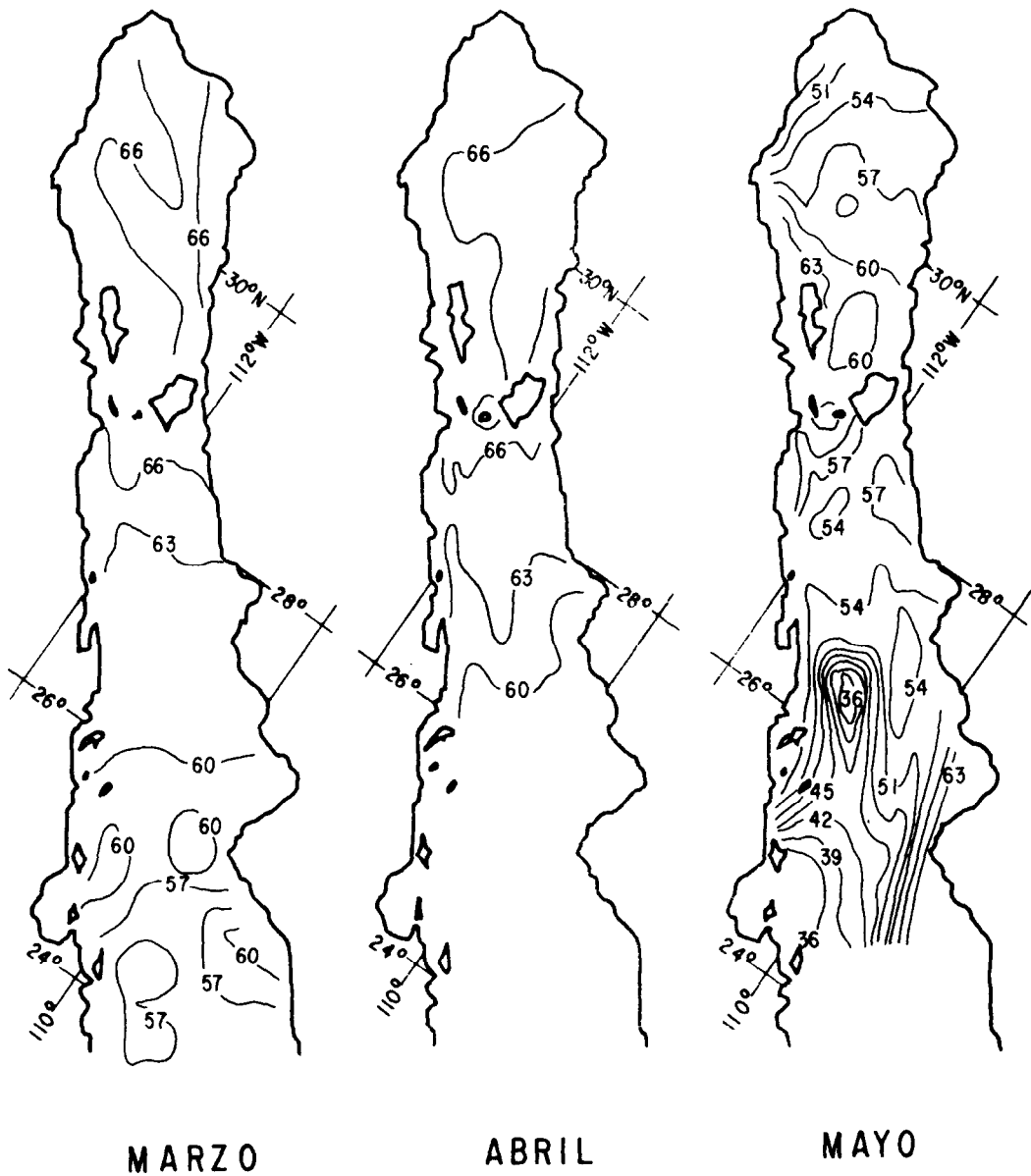


Figura 14. Radiación de onda larga promedio en marzo, abril, mayo, octubre, noviembre y diciembre. Las unidades están dadas en $W m^{-2}$.

Figure 14. Average long-wave radiation in March, April, May, October, November and December. The units are $W m^{-2}$.

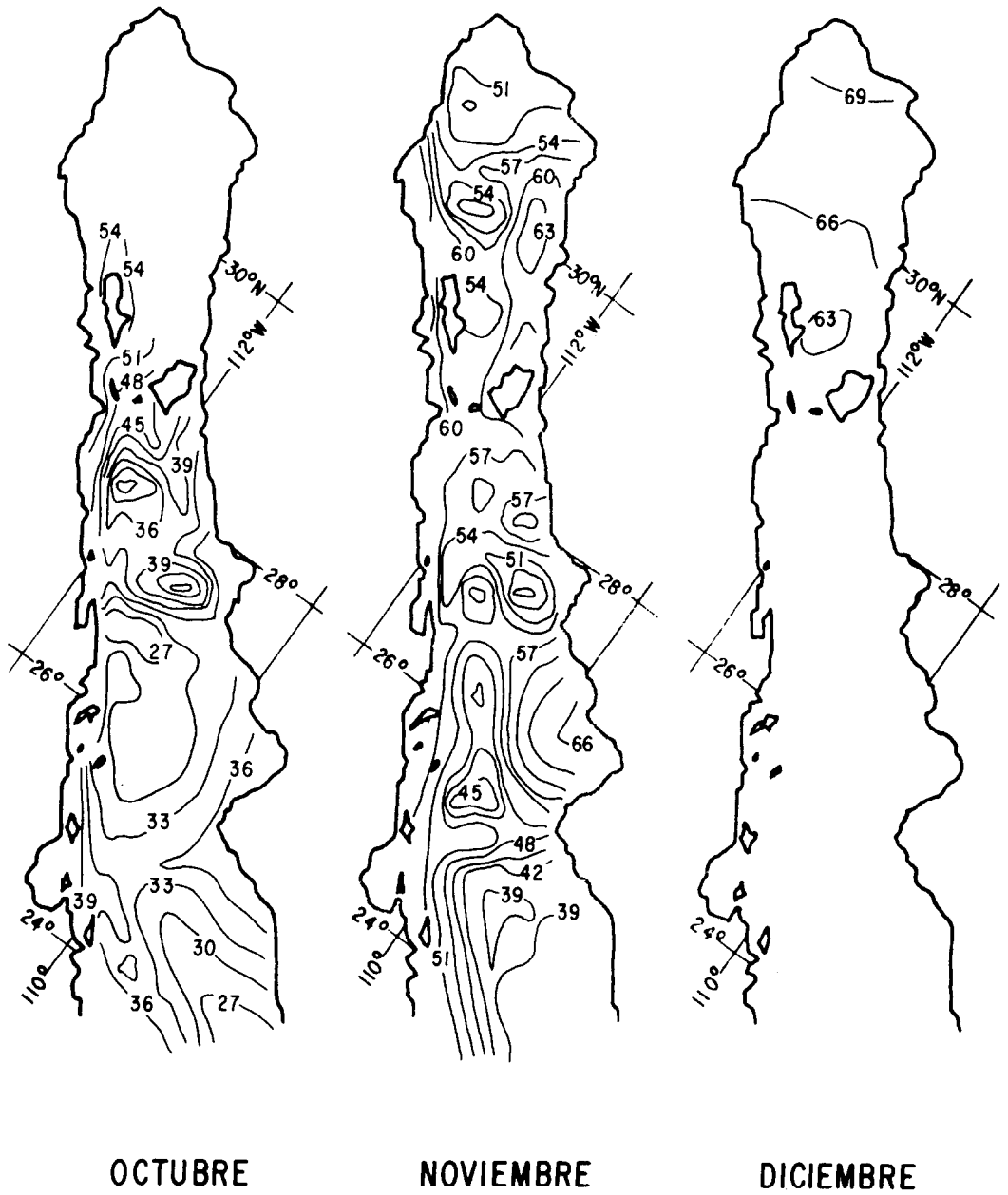


Figura 14 (Cont.)

En cuanto a los resultados, se observaron perturbaciones de magnitud variable en todos los flujos de calor y momentum. Sin embargo, al igual que Bray (1988) quien estudió el golfo central, se encontró que estas anomalías al parecer se anulan en algunos casos en el transcurso del año (en mayo de 1983 las tres temperaturas antes mencionadas fueron menores que en mayo de 1984, la magnitud del viento fue la misma pero con dirección opuesta, y la presión barométrica fue menor; debe considerarse sin embargo la diferencia de cobertura en estos dos casos). Lo anterior podría implicar que los intercambios entre el aire y el mar no resultan apreciablemente afectados a gran escala. Según esta autora, los eventos El Niño afectan la estructura de la parte superior del océano pero no influyen en los flujos a gran escala entre el aire y el mar en el golfo central. Menciona así mismo la posibilidad de una intrusión de agua superficial tropical -lo cual ha sido demostrado por Robles y Marinone, 1987- de baja salinidad pero temperatura mayor de 20° y restringida a la superficie del golfo, por lo menos para la porción central de éste.

En marzo (1983 y 1984) y abril (1985) las diferencias entre los valores de los distintos flujos fueron en general bajas. De este modo, en el caso de Q_B se observa una notable similitud de la distribución espacial y los valores para esos tres años. Para el calor latente, la configuración de marzo de 1983 difiere de la observada en marzo de 1984 y marzo de 1985, y el promedio global para 1983 resulta casi el doble que para 1984 y el triple que para 1985.

En el caso del calor sensible también hay similitud en la distribución espacial en las regiones que se superponen. En este caso no es posible comparar los promedios porque los valores más bajos de 1984 y 1985 cubren casi todo el alto golfo, que no fue muestreado en 1983. Sin embargo, considerando las áreas que se superponen se observa que los valores de calor sensible son aproximadamente iguales para los tres años.

En cuanto al calor neto Q , se observa que en las áreas muestreadas que se superponen, 1983 tiene valores más bajos (promedios de 214, 248 y 258 $W m^{-2}$, respectivamente), aun compensando la diferencia de Q_S (promedios de 298, 316 y 321 $W m^{-2}$, respectivamente) por efecto de las diferencias de fecha de realización de los tres cruceros.

the opposite direction and the barometric pressure was lower; however, the difference of coverage should be considered in these two cases). This could imply that the exchanges between the air and the sea are not significantly affected on a large scale. According to this author, El Niño events affect the structure of the upper part of the ocean but do not influence on a large scale the fluxes between the air and the sea in the central Gulf. This author also mentions the possibility of an intrusion of tropical surface water (which has been demonstrated by Robles and Marinone, 1987) of low salinity but temperature above 20° and restricted to the surface of the Gulf, at least in the central part.

In March (1983 and 1984) and April (1985) the differences between the values of the different fluxes were in general small. Thus, in the case of Q_B , a notable similarity is observed in the spatial distribution and the values for those three years. For the latent heat, the March 1983 configuration differs from that observed in March 1984 and March 1985, and the global average for 1983 is nearly double that for 1984 and triple that for 1985.

In the case of sensible heat, there is also similarity in the spatial distribution in the regions that overlap. In this case it is not possible to compare the averages since the lowest values of 1984 and 1985 cover all the upper Gulf, which was not sampled in 1983. However, considering the areas that overlap, the values of sensible heat are approximately the same for the three years.

It is observed that in the areas sampled that overlap, 1983 has lower values (averages of 214, 248 and 258 $W m^{-2}$, respectively) of the net heat Q , even allowing for the difference of Q_S (averages of 298, 316 and 321 $W m^{-2}$, respectively) by effect of the differences of dates in which the three cruises were conducted.

The most notable differences are observed in the magnitude of the momentum flux. For 1983, the average magnitude of τ was nearly double the value of 1984 and double that of 1985. In the three cases the direction is towards the southeast.

In November 1983, 1984 and 1985, the differences in the spatial configurations and in the values are more notable. Thus, in the case of Q_B the spatial configuration between the three cruises is very different. The values are considerably lower in 1983 and intermediate in 1985.

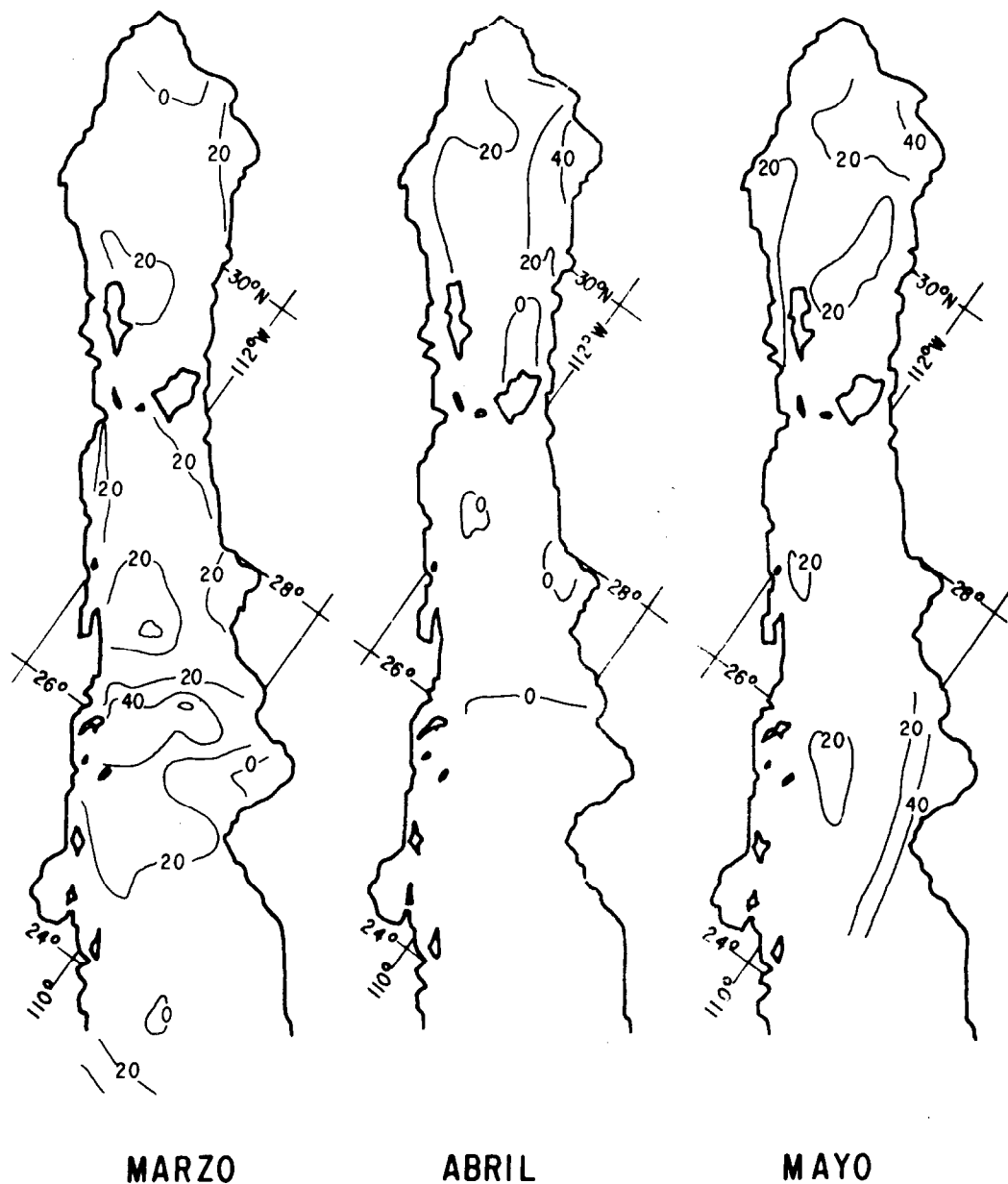


Figura 15. Flujo de calor latente promedio en marzo, abril mayo, octubre, noviembre y diciembre. Las unidades están dadas en W m^{-2} .
Figure 15. Average latent heat flux in March, April, May, October, November and December. The units are W m^{-2} .



Figura 15 (Cont.)

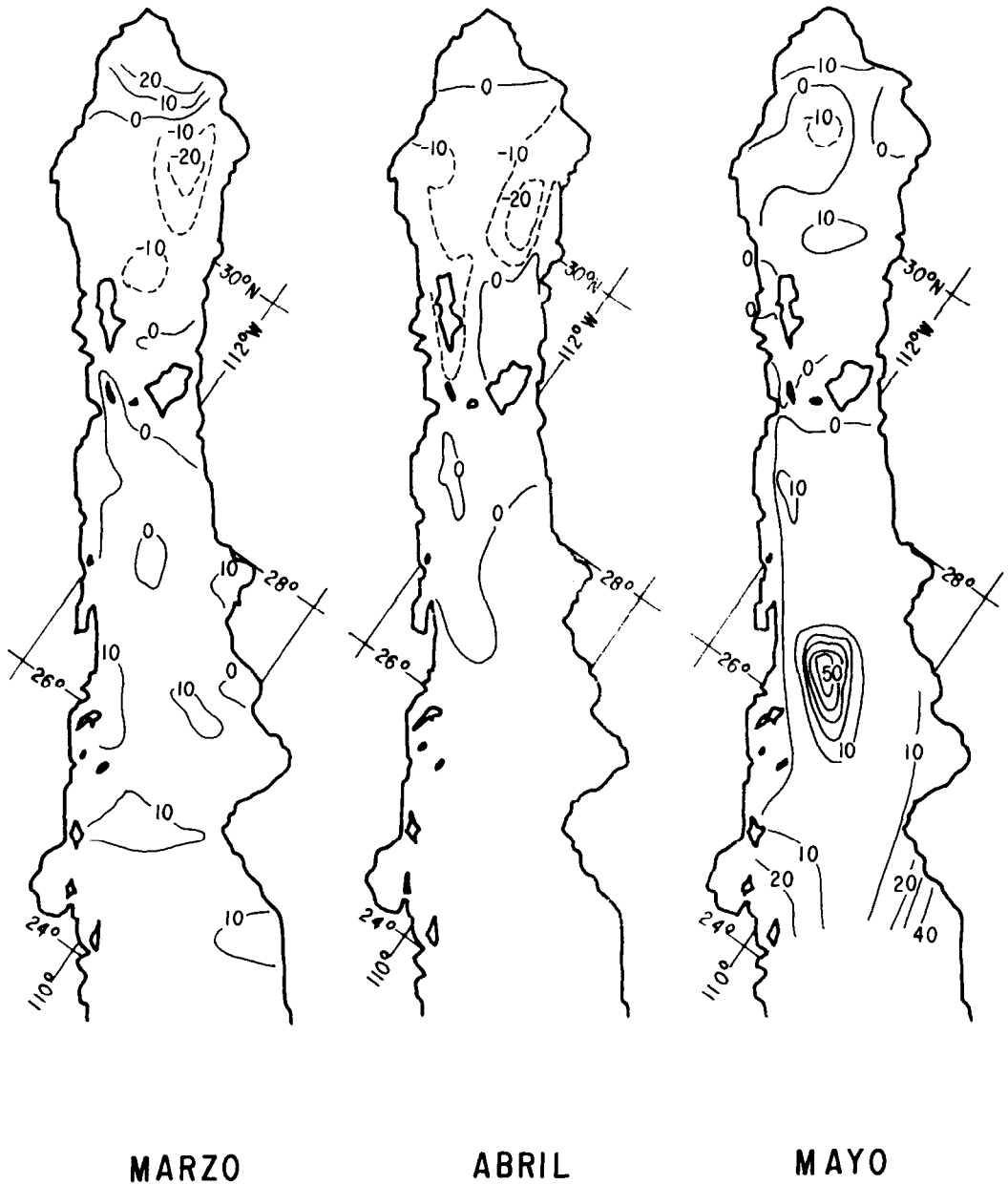


Figura 16. Flujo de calor sensible promedio en marzo, abril, mayo, octubre, noviembre y diciembre. Las unidades están dadas en $W m^{-2}$.
Figure 16. Average sensible heat flux in March, April, May, October, November and December. The units are $W m^{-2}$.

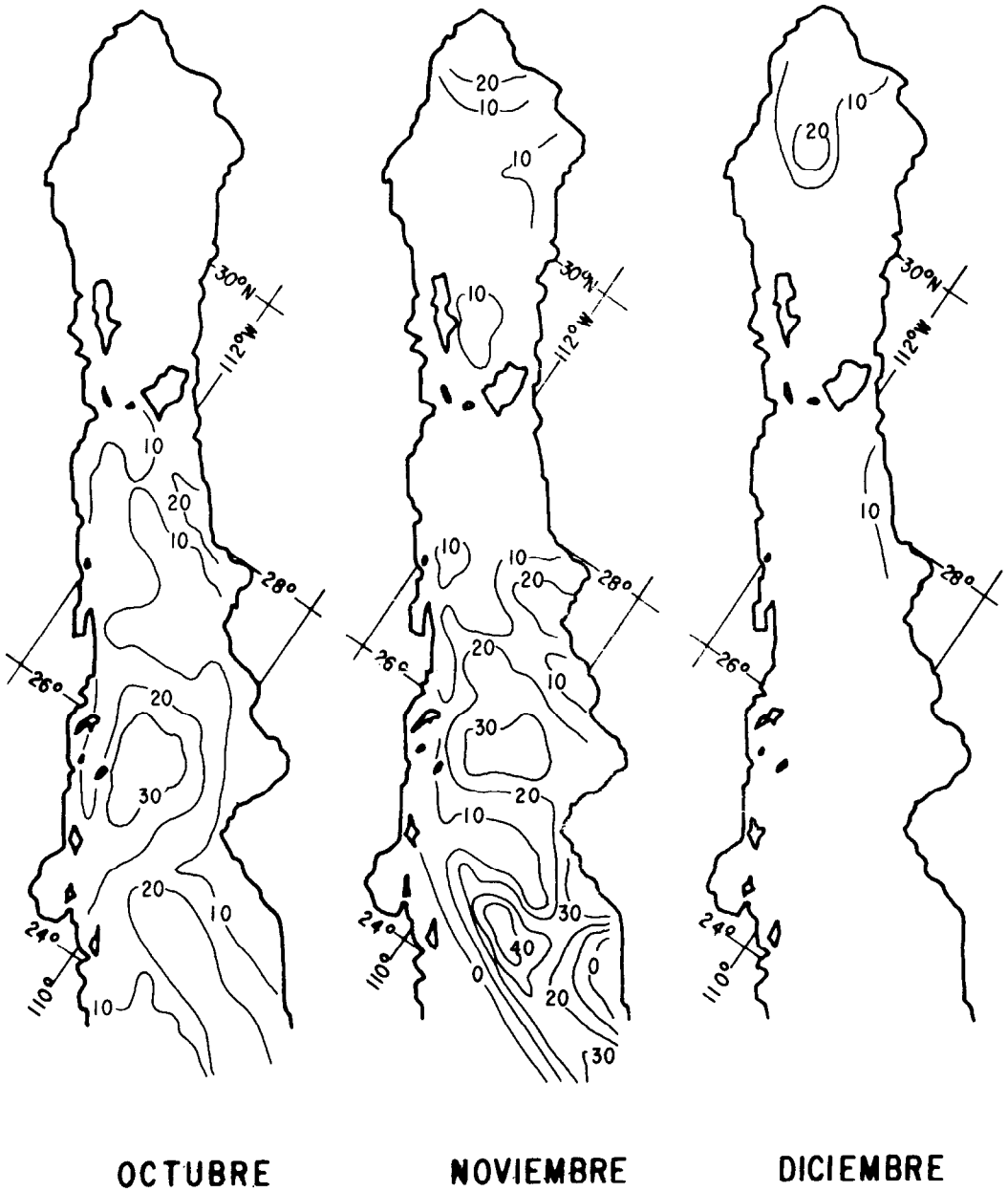


Figura 16 (Cont.)

En la magnitud del flujo de momentum se observan las diferencias más notables; para 1983 la magnitud promedio de τ es casi el doble del valor de 1984 y del doble del de 1985. En los tres casos la dirección es hacia el sureste.

En noviembre de 1983, 1984 y 1985 las diferencias en las configuraciones espaciales y en los valores son más notables. Así, en el caso de Q_B la configuración espacial es muy distinta entre los tres cruceros; los valores son considerablemente más bajos en 1983 e intermedios en 1985.

El campo de calor latente guarda cierta similitud en 1983 y 1984, con valores mayores en 1983. Para la parte central, 1985 es más parecido a 1984 que a 1983.

También en el caso del calor sensible la configuración espacial es parecida entre 1983 y 1984, pero con valores notablemente mayores en el primer caso. Con base en los valores típicos, para la parte central 1985 es más parecido a 1984.

El campo de calor neto tiene más parecido en 1983 y 1984, pero los valores son más altos en el primer caso. En ambas ocasiones se observa una lengua de agua cálida desde la boca de Bahía Concepción hacia el golfo sur mar adentro.

Igual que en el caso de la comparación de los meses de marzo de 1983 y 1984 y abril de 1985, en noviembre de 1983 se observan las mayores magnitudes de τ (del triple que en 1984 y cinco veces mayores que en 1985) y la tendencia más claramente definida (ver Figs. 11 y 12 y Tabla 3).

Con base en las dos comparaciones anteriores (y en los resultados para mayo de 1983 y 1984, no expuestos), se observan tendencias contradictorias en los flujos de Q_H y Q (en marzo son mayores para 1983 que para 1984 y 1985, y en noviembre son menores), y en los flujos de Q_B y Q_E se observan las mismas tendencias (Q_B es mayor en 1983 y Q_E es menor).

Frente térmico 1985

Como ya se dijo, el período de muestreo del crucero de 1985 comprendió un intenso frente térmico. Con el objeto de intentar inferir la causa de este frente, en la Figura 19 se presentan los campos de presión barométrica, temperatura superficial y temperatura del aire. Ahí se aprecia que la presión y la

The latent heat field has a certain similarity in 1983 and 1984, with higher values in 1983. For the central part, 1985 is more like 1984 than 1983.

In the case of sensible heat, the spatial configuration is also similar between 1983 and 1984, but with notably higher values in the former. Based on typical values, 1985 is more similar to 1984 for the central part.

The net heat field is similar in 1983 and 1984, but the values are higher in the former. On both occasions, a tongue of hot water is observed from the mouth of Concepción Bay towards the southern Gulf offshore.

As in the case of the March 1983 and 1984 and April 1985 comparisons, the highest magnitudes of τ (triple that of 1984 and five times higher than in 1985) and the most clearly defined tendency are observed in November 1983 (see Figs. 11 and 12 and Table 3).

Based on the two previous comparisons (and on the May 1983 and 1984 results, not presented), contradictory tendencies are observed in the Q_H and Q fluxes (in March they are higher for 1983 than for 1984 and 1985, and in November they are lower), and the same tendencies are observed in the Q_B and Q_E fluxes (Q_B is higher in 1983 and Q_E is lower).

1985 thermal front

As has been said, the sampling period of the 1985 cruise comprised an intense thermal front. The barometric pressure fields, surface temperature and air temperature are presented in Figure 19, where it can be appreciated that the pressure and the temperature of the air have gradients that closely follow the configuration of the threshold, and that the surface temperature to the south of Tiburón Island presents a minimum surrounded by concentric isolines, with maximum values to the north of Tiburón and to the south of Angel de la Guarda.

Pressure is inversely related to humidity and directly to air temperature. Since Q_B depends to a greater extent on atmospheric humidity, the effect of a pronounced gradient in the barometric pressure is also a pronounced gradient of Q_B but in an opposite direction. This gradient is centred to the south of Tiburón Island, an area that together with

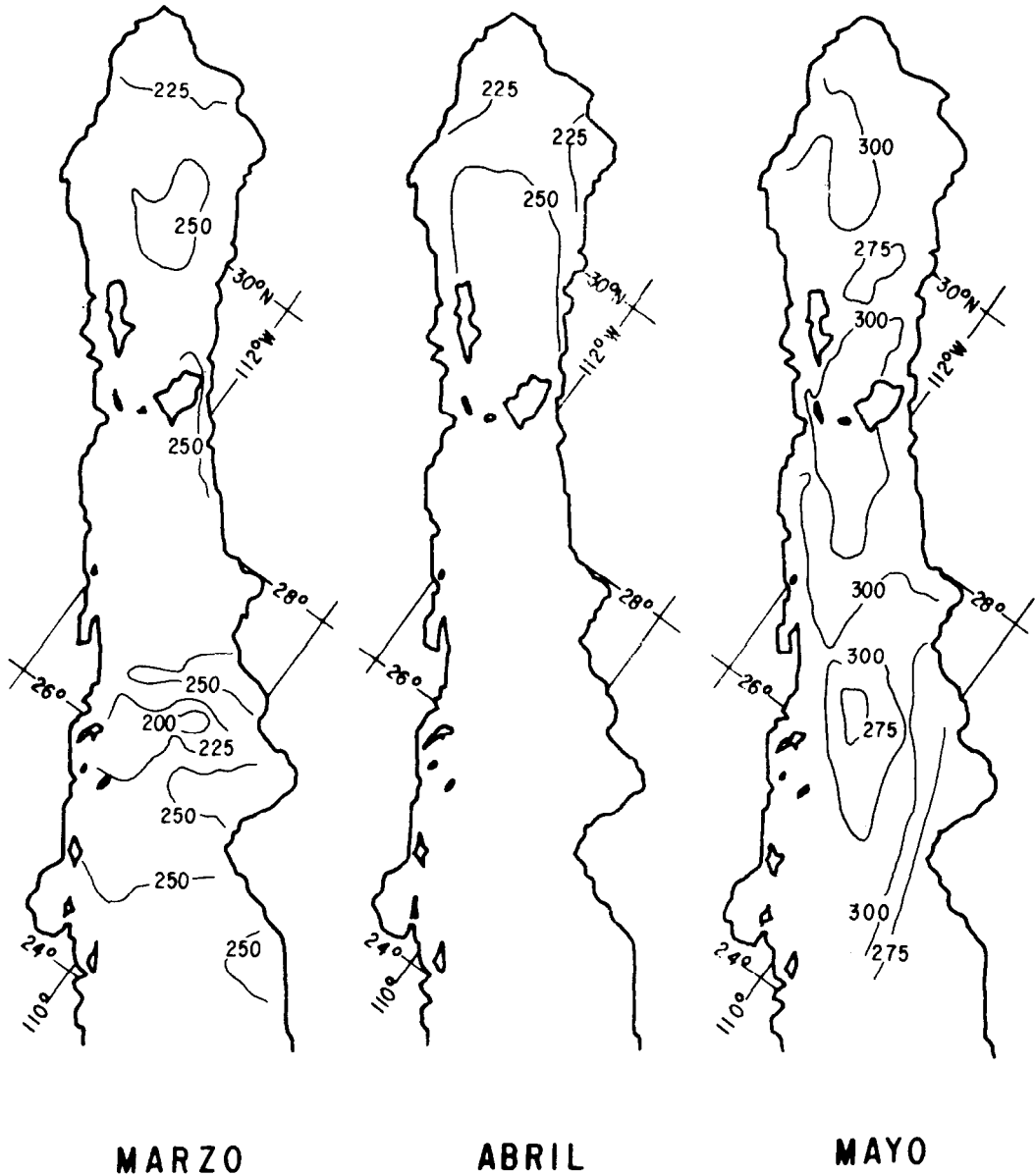


Figura 17. Flujo de calor neto promedio en marzo, abril, mayo, octubre, noviembre y diciembre. Las unidades están dadas en $W m^{-2}$.
Figure 17. Average net heat flux in March, April, May, October, November and December. The units are $W m^{-2}$.

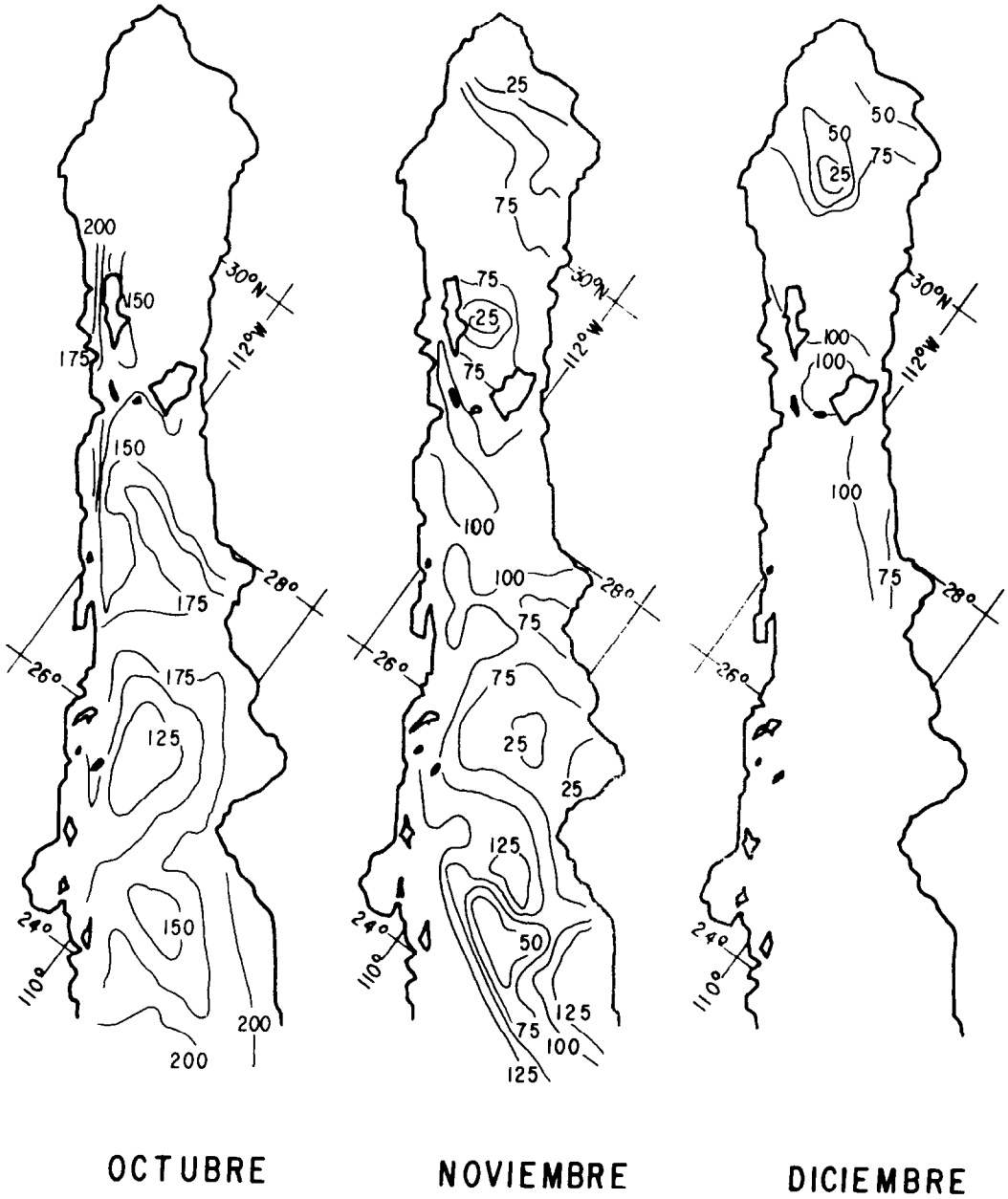


Figura 17 (Cont.)

temperatura del aire presentan gradientes que siguen muy de cerca la configuración del umbral, y que la temperatura superficial al sur de isla Tiburón presenta un mínimo rodeado por isolíneas concéntricas, con valores máximos al norte de Tiburón y al sur de Angel de la Guarda.

La presión se relaciona inversamente con la humedad y directamente con la temperatura del aire; dado que Q_B depende en mayor grado de la humedad atmosférica, el efecto de un pronunciado gradiente en la presión barométrica es un gradiente también pronunciado de Q_B pero de sentido opuesto. Este gradiente está centrado al sur de la isla Tiburón, una zona que junto con el canal de Ballenas y una franja costera al sur de éste ha sido reconocida (Argote *et al.*, 1985) por su potencial de generación de intensos frentes.

La magnitud relativamente grande del viento en la región de las islas y baja en el golfo central del lado de Sonora ejerce el efecto dominante sobre Q_E y Q_H , cuyos gradientes aumentan de sur a norte.

Como resultado, el flujo de calor neto presenta un intenso gradiente hacia el norte del umbral y un rango de más de 170 W m^{-2} (máximo de 144 W m^{-2} al sur y mínimo de -28 W m^{-2} al norte). Este es el único caso estudiado en este trabajo en que se observan valores negativos de Q (exceptuando noviembre de 1984, con mínimo de -1 W m^{-2}).

CONCLUSIONES

En el golfo de California, los flujos de calor y momentum presentan considerable estructura espacial y en cada una de las regiones -golfo norte, islas, golfo sur- el comportamiento temporal de los flujos es notoriamente diferente.

Existen regiones de transición bien delimitadas entre la región de las islas y el golfo central y entre éste y el golfo sur. Puede decirse que el golfo central es una región de transición entre el alto golfo y la región de las islas por un lado y el golfo sur por el otro.

El golfo pierde mucho menos calor por evaporación de lo que se suponía; esto implica que gana más calor neto, y determina en cierta medida que en un ciclo anual el balance sea una ganancia considerable de calor. Ese calor debe ser exportado a fin de que la temperatura

Ballenas Channel and a coastal band to the south of it, has been recognized (Argote *et al.*, 1985) for its potential of generating intense fronts.

The relatively large magnitude of the wind in the region of the islands and lower part of the central Gulf on the side of Sonora, exerts the dominant effect on Q_E and Q_H , whose gradients increase from south to north.

As a result, the net heat flux presents an intense gradient towards the north of the threshold and a range of more than 170 W m^{-2} (maximum of 144 W m^{-2} to the south and minimum of -28 W m^{-2} to the north). This is the only case studied in this work in which negative values of Q are observed (except for November 1984, with a minimum of -1 W m^{-2}).

CONCLUSIONS

In the Gulf of California, the heat and momentum fluxes present considerable spatial structure and in each of the regions (northern Gulf, islands, southern Gulf) the temporal behaviour of the fluxes is notably different.

There are well-defined transition zones between the region of the islands and the central Gulf and between the latter and the southern Gulf. It can be said that the central Gulf is a transition zone between the upper Gulf and the region of the islands on the one hand and the southern Gulf on the other.

The Gulf loses much less heat by evaporation than what has been assumed. This implies that it gains more net heat and, to a certain extent, determines that in an annual cycle the balance is of a considerable gain of heat. This heat must be exported in order for the mean annual temperature of the water to remain constant in the long run, although the exportation does not necessarily have to occur through the surface, at least not all the time.

The seasonal signal allows one to infer that 1983 (an El Niño year) presented anomalous effects with respect to heat fluxes and that, in general, November presented higher perturbations than March. However, in the case of some fluxes, the tendencies (increase and decrease) were opposite in March and November. In this general sense, the anomalies limited the magnitudes of the fluxes; the spatial pattern presented less variations.

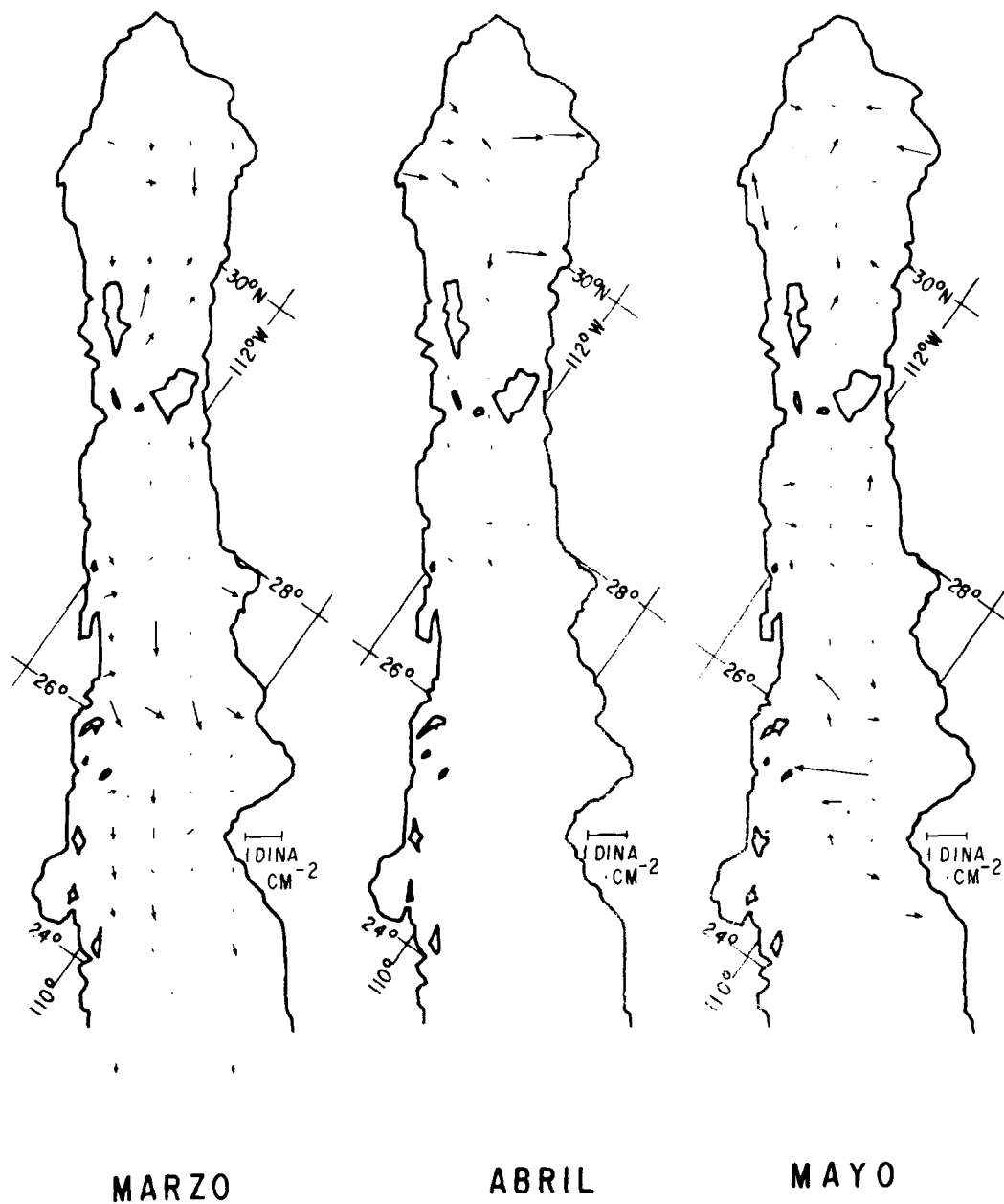


Figura 18. Flujo de momentum promedio en marzo, abril, mayo, octubre, noviembre y diciembre. Las unidades están dadas en $W m^{-2}$.
Figure 18. Average momentum flux in March, April, May, October, November and December. The units are $W m^{-2}$.

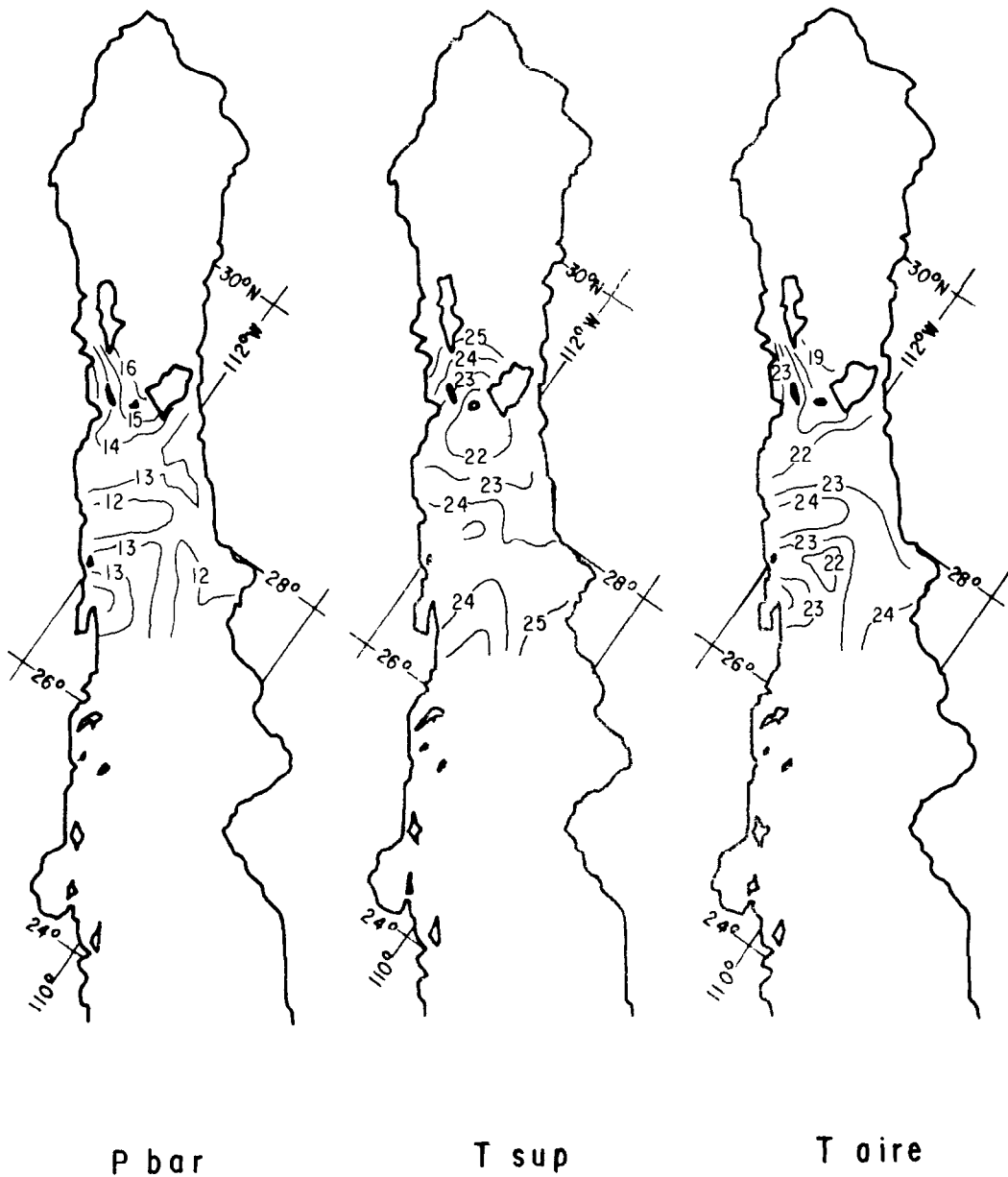


Figura 19. Presión barométrica ($+10^3$ bar), temperatura superficial y temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$) en noviembre de 1985.

Figure 19. Barometric pressure ($+10^3$ bar), surface temperature and air temperature ($^{\circ}\text{C}$) in November 1985.

media anual del agua se conserve constante a largo plazo, aunque esa exportación no necesariamente debe ocurrir por la superficie, al menos no todo el tiempo.

La señal estacional permite suponer que el año de 1983 (año El Niño) presentó efectos anómalos en cuanto a los flujos de calor, y que en general el mes de noviembre presentó mayores perturbaciones que el mes de marzo. Sin embargo, en el caso de algunos flujos, las tendencias (aumento o disminución) fueron opuestas en marzo y noviembre. Las anomalías limitaron en este sentido general las magnitudes de los flujos; el patrón espacial presentó menores variaciones.

El mes de noviembre de 1985 también fue anómalo, ya que en él se detectó un intenso frente térmico en la región de las islas. Si bien en este cruceo la cobertura espacial fue limitada, para el área cubierta la anomalía afectó principalmente la configuración espacial de los flujos y en menor grado sus magnitudes respecto a noviembre de 1984.

LITERATURA CITADA

- Alvarez Borrego, S. (1983). Gulf of California. In: B.H. Ketchum (ed.), *Estuaries and Enclosed Seas*. Elsevier Sci. Pub. Co., Amsterdam.
- Argote, M.L., Amador, A. y Morales, C. (1985). Variación estacional en la región norte del golfo de California. En: J. Urrutia-Fucugauchi y J.F. Valdés-Galicia (eds.), *Memoria de la Reunión Anual 1985*. Unión Geofísica Mexicana, A.C., México.
- Badan-Dangon, A., Koblinsky, C.J. and Baumgartner, T. (1985). Spring and summer in the Gulf of California: observations of surface thermal patterns. *Oceanol. Acta*, 8(1): 13-22.
- Bray, N.A. (1988). Thermohaline circulation in the Gulf of California. *J. Geophys. Res.*, 93: 4993-5020.
- Bray, N.A. and Robles, J.M. (en prensa). Physical oceanography of the Gulf of California. In: *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*. Memoir of the American Association of Petroleum Geologists.
- Bunker, A.F. and Worthington, L.V. (1976). Energy exchange charts of the North Atlantic Ocean. *Am. Meteor. Soc. Bull.*, 57: 6.
- November 1985 was also anomalous, since an intense thermal front in the region of the islands was detected during this month. Although the spatial coverage in this cruise was limited, for the area covered the anomaly mainly affected the spatial configuration of the fluxes and, to a lesser extent, their magnitudes with respect to November 1984.
- English translation by Christine Harris.
-
- Gill, A. (1982). *Atmospheric-Ocean Dynamics*. Academic Press, London, 662 pp.
- Lavín, M.F. and Organista, S. (1988). Surface heat flux in the northern Gulf of California. *J. Geophys. Res.*, 93: 14033-14038.
- Noriega Echeverría, F.M. (1985). Valores extremos de transferencia de calor y humedad en el golfo de California. Tesis de Licenciatura, FCM, UABC, Ensenada, B.C., México.
- Organista-Sandoval, S. (1987). Flujos de calor almacenado y energía potencial en el alto golfo de California. Tesis de Maestría, CICESE, Ensenada, B.C., México.
- Palacios-Martínez, J.R. (1988). Flujos de calor y momentum en la superficie del golfo de California. Tesis de Licenciatura, FCM, UABC, Ensenada, B.C., México.
- Reed, R.K. (1976). On estimation of net long-wave radiation from the oceans. *J. Geophys. Res.*, 81: 5793-5794.
- Ripa, P. and Marinone, S.G. (1989). Seasonal variability of temperature, salinity, velocity, vorticity and sea level in the central Gulf of California, as inferred from historical data. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 115: 887-913.
- Robles, J.M. and Marinone, S.G., (1987). Seasonal and interannual thermohaline variability on the Guaymas Basin in the Gulf of California. *Cont. Shelf. Res.*, 7: 715-733.
- Roden, G.I. (1958). Oceanographic and meteorological aspects of the Gulf of California. *Pac. Sci.*, 12(1): 21-45.
- Roden, G.I. (1964). Oceanographic aspects of the Gulf of California. In: T.H. van Andel and G.G. Shor Jr. (eds.), *Marine*

- Geology of the Gulf of California: A Symposium. Am. Assoc. Pet. Geol. Mem., 3: 30-58.
- Roden, G.I. and Emilsson, I. (1979). Physical Oceanography of the Gulf of California. Gulf of Calif. Symp. in Commemor. of the 50th Aniv. of the Nat. Univ. of Mexico.
- Roden, G.I. and Groves, G.W. (1959). Recent oceanographic investigations in the Gulf of California. J. Mar. Res., 18(1): 10-35.
- Stevenson, J.W. (1982). Computation of heat and momentum fluxes at the sea surface during the Hawaii to Tahiti shuttle experiment. Hawaii Inst. Geophysics, Univ. of Hawaii.
- Sverdrup, H.U. (1941). The Gulf of California: preliminary discussion of the cruise of the E.W. Scripps in February and March 1939. Proc. Sixth Pac. Sci. Congr., III: 161-166.
- Townsend, C.H. (1901). Dredging and other records of the U.S. Fish Commission Steamer Albatross with bibliography relative to the work of the vessel. U.S. Fish. Comm. Rep. for 1900, pp. 387-562.
- Weare, B.C., Strub, P.T. and Samuel, M.D. (1981). Annual mean surface heat fluxes in the tropical Pacific Ocean. J. Phys. Oc., 11(5): 705-717.