

## CINEMATICA DE LA REGION SUR DE LA BAHIA DE TODOS SANTOS, BC

### KINEMATICS OF THE SOUTHERN REGION OF BAHIA DE TODOS SANTOS, BC

Reginaldo Durazo Arvizu  
Luis Gustavo Alvarez Sánchez

Centro de Investigación Científica y de  
Educación Superior de Ensenada  
Espinoza 843  
Ensenada, BC

Durazo Arvizu Reginaldo y Alvarez Sánchez, G. Cinemática de la región de la Bahía de Todos Santos, BC. Kinematics of the Southern Region of Bahía de Todos Santos, BC. Ciencias Marinas, 14(1): 95-114, 1988.

#### RESUMEN

Se usaron datos lagrangeanos de corrientes superficiales en la Bahía de Todos Santos, BC, para calcular valores de divergencia horizontal y vorticidad relativa, en una región costera con profundidades menores de 30m. Se encontró que estas propiedades cinemáticas del flujo son del orden de  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$  en regiones próximas a la costa. La región que presentó valores máximos positivos o negativos de divergencia y vorticidad es una franja localizada frente a la barra del Estero de Punta Banda, entre 1 y 2km de la costa, aproximadamente a lo largo de la isobata de 10m. Estos valores máximos indican que dicha zona tiene un activo proceso de mezcla por gradientes laterales de velocidad.

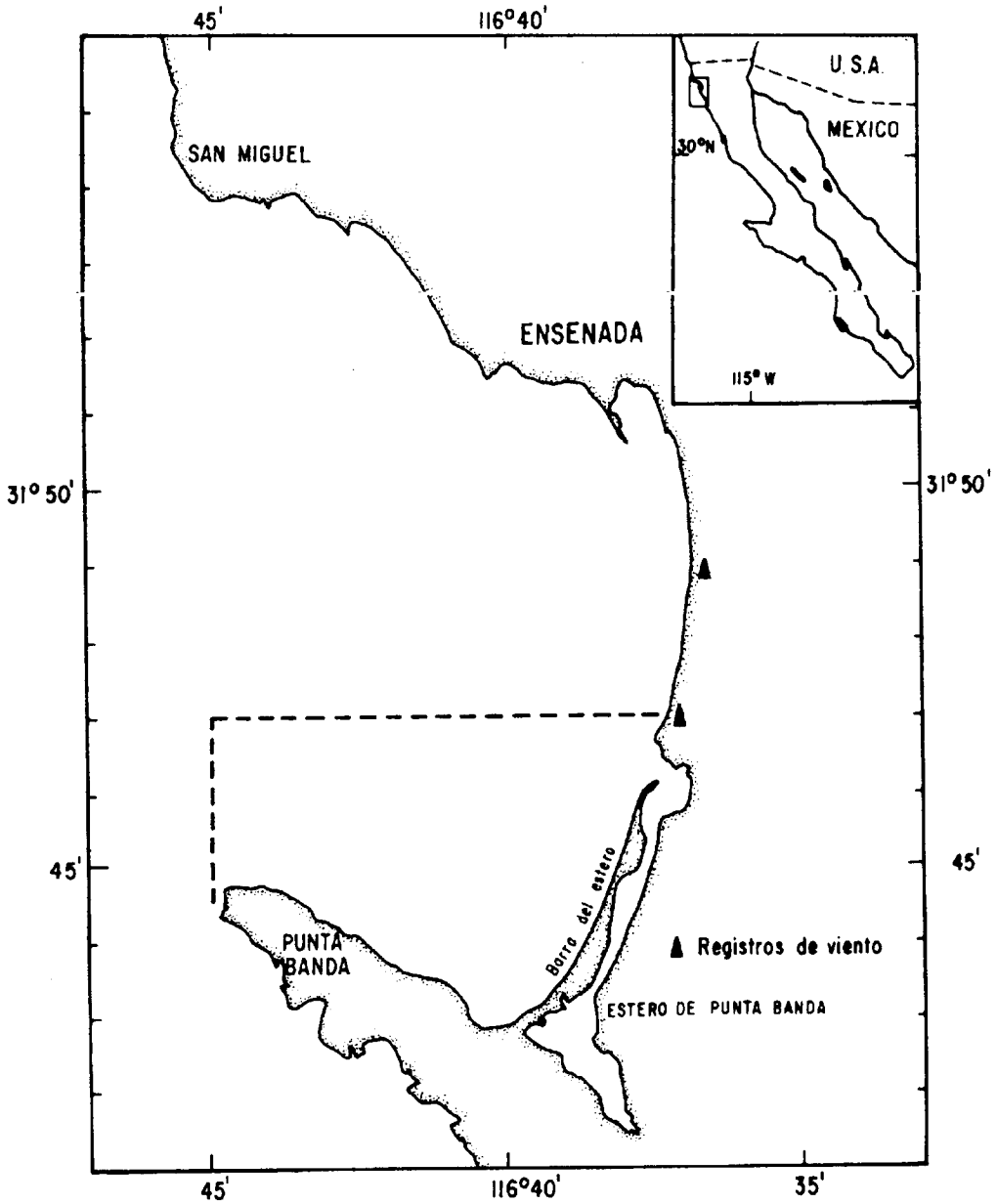
Lagrangian measurements of surface currents in Bahía de Todos Santos were used to calculate horizontal divergence and relative vorticity in a coastal region less than 30m deep. Orders of magnitude for these kinematic properties of surface flow were  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$  with maximum values of  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  near the coast. Maximum values of divergence and relative vorticity, positive or negative, were observed 1 to 2km off the Estero de Punta Banda sand bar, along the 10m depth contour. These high values indicate that the region is under active mixing due to lateral shear.

#### INTRODUCCION

Durante 1980 y 1981 el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) efectuó mediciones de corrientes superficiales en la región sur de la Bahía de Todos Santos, BC (Fig. 1). El área de estudio se localiza entre las latitudes  $31^{\circ}43'N$  a  $31^{\circ}47'N$  y longitudes  $116^{\circ}35'W$  a  $116^{\circ}45'W$ , y tiene profundidades menores de 30m. Alvarez *et al.* (1982) dan una descripción detallada del método de muestreo y discuten los rasgos sobresalientes de la circulación superficial. Los datos

#### INTRODUCTION

During 1980-1981, measurements of surface currents were taken in the southern region of Bahía de Todos Santos, BC, by the Centro de Investigación Científica y de Estudios Superiores de Ensenada (CICESE). The study area is located between  $31^{\circ}43'N$  and  $31^{\circ}47'N$ , and  $116^{\circ}35'W$  and  $116^{\circ}45'W$ , with less than 30m deep. Alvarez *et al.* (1982) provide a detailed description of the sampling method and describe the outstanding features of the surface circulation. Data gathered were used in this study to compute values of



**Figura 1.** Bahía de Todos Santos, BC, México. El área de estudio se indica por la línea punteada.  
**Figure 1.** Bahía de Todos Santos, BC, Mexico. The study area is bounded by the dotted line.

obtenidos en esas mediciones se usaron en este trabajo para calcular valores de divergencia horizontal y vorticidad relativa. Estas propiedades, definidas como combinaciones de los gradientes de velocidad, son importantes porque tienen interpretaciones cinemáticas básicas (Sanderson, 1979).

horizontal divergence and relative vorticity. These properties, defined as combinations of the velocity gradients, are important because they have basic kinematic interpretations (Sanderson, 1979).

El comportamiento y la magnitud de los gradientes de velocidad son indicadores del grado de deformación de una parcela de fluido y de los procesos de mezcla horizontal y vertical que ocurren en ella (Okubo, 1976b; Okubo *et al.*, 1983; Sanderson, 1982) y por lo tanto, su estudio es útil para estimar o prevenir efectos de contaminación por desechos que se mezclan con el agua de mar.

No existen estudios previos sobre divergencia y vorticidad en las aguas de la Bahía de Todos Santos. Varios autores han efectuado mediciones lagrangeanas y análisis cinemáticos similares a las presentadas aquí, pero en condiciones diferentes a las de esta Bahía (Tabla I). La mayoría de estos experimentos fueron realizados en regímenes de velocidades mayores que las medidas en nuestras observaciones, a distancias mayores de 50km de la costa, en profundidades y escalas espaciales al menos cinco veces mayores que las del presente trabajo. Como se muestra en la Tabla I, los valores de la divergencia y la vorticidad varían entre  $10^{-6}$  y  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ .

En particular, la magnitud de los gradientes laterales de velocidad manifiesta los efectos friccionales de la proximidad de la costa. A diferencia de las regiones oceánicas, las velocidades horizontales en aguas someras son del orden de 10 a  $100 \text{ cm s}^{-1}$ , y los gradientes de velocidad alcanzan valores de  $10^{-6} \text{ s}^{-1}$  o mayores. En el presente trabajo se plantea como propósito fundamental el obtener estimaciones de divergencia horizontal y vorticidad relativa, en una región donde la dinámica de las aguas se ve afectada por la cercanía de la costa (2 a 5km) y las profundidades menores de 30m.

## Los Datos

Se realizaron mediciones de corrientes superficiales durante los meses de marzo, junio, julio y octubre de 1980 y enero y mayo de 1981 (Fig. 2). El equipo de medición consistió básicamente de flotadores libres cuya posición se obtuvo con un radar del tipo convencional usado en navegación, con resolución mejor que 20m en las distancias radial y

The behavior and magnitude of these velocity gradients indicate the degree of deformation of a fluid parcel and its horizontal and vertical mixing processes (Okubo, 1976b; Okubo *et al.*, 1983; Sanderson, 1982). Thus, the study of kinematic properties helps to estimate and to prevent the effects of pollution by wastes mixed with coastal water.

No previous reports on divergence and vorticity exist for Bahía de Todos Santos. Several authors have taken lagrangian measurements in other regions and reported kinematic analyses similar to those presented herein; however, the conditions were different from those of this Bay (Table I). Most of those experiments were carried out under relatively fast currents, at distances of more than 50km farther from the shore, and at depths and spatial scales of at least five times greater than those presented in this study. As shown in Table I, the divergence and vorticity values vary between  $10^{-6}$  and  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ .

In particular, the magnitude of the lateral velocity gradients reflects the frictional effects of the shore proximity. Unlike the oceanic regions, the horizontal velocities in shallow waters are from 10 to  $100 \text{ cm s}^{-1}$ , and the velocity gradients reach values of  $10^{-6} \text{ s}^{-1}$  or higher. The objective of this study is to report computation of horizontal divergence and relative vorticity in Bahía de Todos Santos, a region where the dynamics of the water is influenced by the proximity of the shore (2-5km) and depths shallower than 30m.

## The Data

Measurements of surface currents were taken in March, June, July and October, 1980, and January and May, 1981 (Fig. 2). The observations were carried out releasing drifting buoys, tracked from the shore with a navigation radar. The resolution of the radar is better at 20m in the radial and tangential directions. A more detailed description of the

Tabla 1. Resumen de trabajos previos sobre el cálculo de propiedades cinemáticas. Los resultados de este trabajo, realizado en la Bahía de Todos Santos, se indican para efectos de comparación.  
 Table 1. Summary of previous works on computation of kinematic properties. Results of this work, performed in Bahía Todos Santos, are provided for comparison.

Autor	Método de medición	Propiedades cinemáticas Calculadas Est. cortantes (a) Est. vorticidad (z) divergencia (n)	Métodos de análisis	Ordenes de magnitud calculados	Características de la región de estudio
Reed (1971) Corriente de Alaska	radar	(n), (z), (a), (h)	$\eta = \frac{1}{A} \frac{dA}{dt}$ $\zeta = 2 \frac{d\theta}{dt}$ $\eta = \frac{1}{\zeta + f} \frac{d\zeta}{dt}$	10 <sup>-5</sup> -s <sup>-1</sup>	Profundidades cercanas a 900m Velocidad de la corriente de 75cm/s
Molnar y Kirwan (1975) Mar Caribe Oeste	radar	(n), (z), (a), (h)	áreas regresión	10 <sup>-5</sup> -s <sup>-1</sup>	Profundidades: 1500 a 1800m Velocidades de 60-140cm/s Experimentos a 80km de la costa
Okubo <i>et al.</i> (1976a) <i>Grandes Lagos</i>	fotografía área	(n), (z), (a), (h)	regresión	10 <sup>-5</sup> -s <sup>-1</sup>	Velocidades de 1-6cm/s 2 a 8km de la costa
Ichye <i>et al.</i> (1978)	Radar	(n), (z), (a), (h)	regresión	10 <sup>-5</sup> -s <sup>-1</sup>	Profundidades de 1000m Velocidades de 50cm/s 50km de la costa, o más
Sanderson (1979)	radiogoniometría	(n), (z), (a), (h)	regresión	10 <sup>-6</sup> -s <sup>-1</sup>	De 0 a 50km de la costa Velocidades de 15-25cm/s
Sanderson (1982)	radiogoniometría mini-rangers	(n), (z), (a), (h)	regresión	10 <sup>-5</sup> -s <sup>-1</sup>	Región característica de condiciones de tormenta Velocidades de 1-5cm/s (2) y de 15-25cm/s (1,3)
1) 12 km al sur de Long Island 2) Datos de Grandes Lagos 3) Datos de Nueva Zelanda	fotografía aérea mini-rangers	(n), (z), (a), (h)	regresión	10 <sup>-5</sup> -s <sup>-1</sup>	Velocidades de 1-5cm/s (2) y de 15-25cm/s (1,3) 1) 12km al sur de Long Island 2) 4km de la costa 3) 0-50km de la costa
Este trabajo	radar	(n), (z)	áreas regresión	10 <sup>-4</sup> -s <sup>-1</sup> 10 <sup>-3</sup> -s <sup>-1</sup>	Profundidades menores de 30m Velocidades de 5-20cm/s 1-2km de la costa

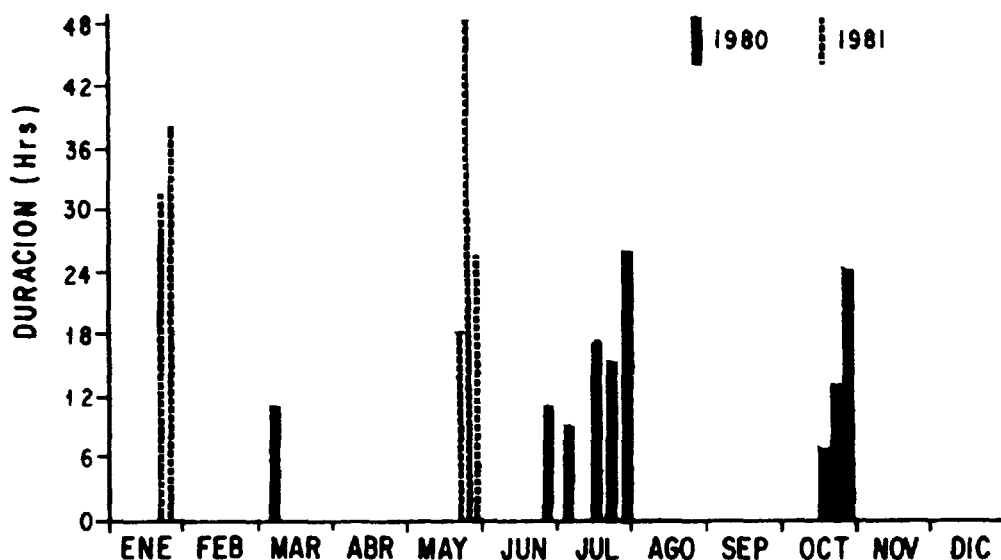


Figura 2. Calendario y duración de las mediciones lagrangeanas durante 1980 y 1981 (tomado de Alvarez *et al.*, 1982).

Figure 2. Schedule and duration of the Lagrangian measurements during 1980-81 (Alvarez *et al.*, 1982).

tangencial. Una descripción más detallada del equipo de medición se puede consultar en Alvarez *et al.* (1982) y Durazo (1983). La localización se hizo cada 15 minutos. Se midieron la distancia radial y el ángulo entre el flotador y el norte astronómico (asimut), y se consideró como origen la posición del radar.

Los datos se procesaron para situar los flotadores con posiciones equivalentes en coordenadas cartesianas. En este nuevo marco de referencia se suavizaron por separado las series de tiempo de coordenadas (x, y) usando una función "spline" cúbica. Como parámetro de suavizado se usó la desviación estándar de la posición, medida con radar ( $\pm 0.02\text{km}$ ). El suavizado permitió eliminar estructuras de las trayectorias y de las componentes de velocidad con duración cercana a media hora. Los datos suavizados se usaron para calcular las componentes de la corriente promedio cada 15 minutos y los gradientes de velocidad de primer orden, de acuerdo al método descrito por Okubo and Ebbesmeyer (1976).

measuring equipment is given by Alvarez, *et al.* (1982) and Durazo (1983). The tracking was every 15 minutes, by measuring radial distance and azimuth of each drogue, taking the radar position as the starting point.

The data were processed to obtain the drogues position in cartesian coordinates. With these new reference, time series of coordinates (x, y) were framed, computing these series separately using a cubic spline, and the standard deviation of the radar-measured position ( $\pm 0.02\text{km}$ ) was used as a smoothing parameter. The smoothing eliminated structures from the trajectories and from the velocity components, lasting about half an hour. The smoothed data were used to compute the mean current components every 15 minutes and the first-rate velocity gradients, according to Okubo and Ebbesmeyer (1976).

### Arrastre del Viento

Se considera que los flotadores libres son trazadores lagrangeanos perfectos, sin embargo, en la práctica esto no ocurre debido a las diferentes fuentes de error, entre las cuales está el arrastre producido por el viento sobre el flotador. Con el propósito de cuantificar experimentalmente este arrastre sobre los flotadores libres usados en este trabajo, se efectuaron mediciones de corrientes durante los días 14, 15 y 16 de junio de 1981. En éstas se usaron simultáneamente flotadores con área expuesta al viento (con reflector de radar) y sin área expuesta al viento. Los resultados muestran que en dichas mediciones, un arrastre de  $3\text{cm s}^{-1}$  representa un límite superior del efecto del viento casi estacionario con rapidez entre  $4.5$  y  $6.0\text{m s}^{-1}$  (Alvarez *et al.*, 1982). Debido a que los vientos con esta magnitud sólo se observaron en un 10% de las mediciones, y al efecto de las fronteras físicas (costa, fondo), no se consideró adecuado corregir trayectorias de los elementos de deriva por el arrastre del viento.

### MÉTODOS DE ANALISIS

La herramienta analítica consistió de dos métodos. Uno que considera la razón de cambio del área y de la orientación de un grupo de flotadores (llamado en adelante Método de área), y el otro que involucra una regresión lineal de las posiciones de los flotadores respecto a su centroide.

i) Método de áreas.- Reed (1971) define la divergencia horizontal como:

$$\text{div}_{hv} = \left( \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} \right)$$

donde A representa el área encerrada por el grupo de flotadores.

La componente vertical de la vorticidad relativa se expresa como:

$$\xi = 2 \frac{d\theta}{dt}$$

### Wind Drag

Drogues are frequently considered as perfect lagrangian tracers, however, in practice this does not happen due to the different sources of error, including the drag produced by the wind over the drogue. To quantify experimentally this drag over the free drogues used for the present study, current measurements were taken in June 14, 15, and 16, 1981. Drogues with areas exposed (i.e., with radar reflector) and not exposed to the wind were used simultaneously. An almost stationary wind between  $4.5$  and  $6.0\text{m s}^{-1}$  produces a maximum drag of  $3\text{cm s}^{-1}$  (Alvarez *et al.*, 1982). Since winds with such magnitude were observed in only 10% of the experiments, and bearing in mind the effect of the physical boundaries (shore, bottom), we did not consider adequate to correct the drogue trajectories by the wind drag.

### DATA ANALYSIS

The analytical tool consisted of two methods: one which considers the change rate of the area and orientation of a group of drogues (hereafter called the Method of Areas), and one which involves a linear regression of the drogues positions in relation to their centroid.

i) Method of areas.- Reed (1971) defines the horizontal divergence as:

where A represents the area surrounded by the drogue group.

The vertical component of the relative vorticity is written as:

donde  $\theta$  es el ángulo entre la horizontal y el eje mayor de la elipse que encierra los flotadores (Fig. 3), y se puede calcular con la fórmula dada por Ichiye *et al.* (1978):

$$\tan 2\theta = \frac{2\sigma_{xy}}{\sigma_y^2 - \sigma_x^2}$$

donde

where

$$\sigma_{xy}, \sigma_x^2 \text{ y } \sigma_y^2$$

son, respectivamente, la covarianza, la varianza en 'x' y la varianza en 'y' con respecto de la posición de los flotadores a su centroide.

are, respectively, the covariance, the variance in 'x' and the variance in 'y' with respect to the position of the drogues in relation to their centroid.

ii) Método de Regresión Linear.- Este método fue desarrollado por Okubo y Ebbesmeyer (1976) y parte de una expansión de Taylor de las componentes de la velocidad alrededor del centroide del grupo (Fig. 3). Al efectuar observaciones simultáneas de coordenadas (x, y) de 'n' flotadores a 'm' tiempos, se obtienen las componentes de velocidad (u, v) y datos de la forma:

ii) Linear regression method. This method was developed originally by Okubo and Ebbesmeyer (1976), starting from a Taylor's expansion of the velocity components around the centroid of the group (Fig. 3). Taking simultaneous observations of coordinates (x, y) for 'n' drogues at 'm' times, velocity components (u, v) and data are obtained of the form:

$$x_i(k), y_i(k) \\ i=1,2,3,\dots,n$$

$$u_i(k), v_i(k) \\ k=1,2,3,\dots,m$$

Efectuando la expansión de Taylor al tiempo 'k' tenemos:

Using the Taylor's expansion at the time 'k' we obtain:

$$u_i(k) = \bar{u}(k) + \frac{\partial \bar{u}(k)}{\partial x} [x_i(k) - \bar{x}(k)] + \frac{\partial \bar{u}(k)}{\partial y} [y_i(k) - \bar{y}(k)] + u_{ii}(k)$$

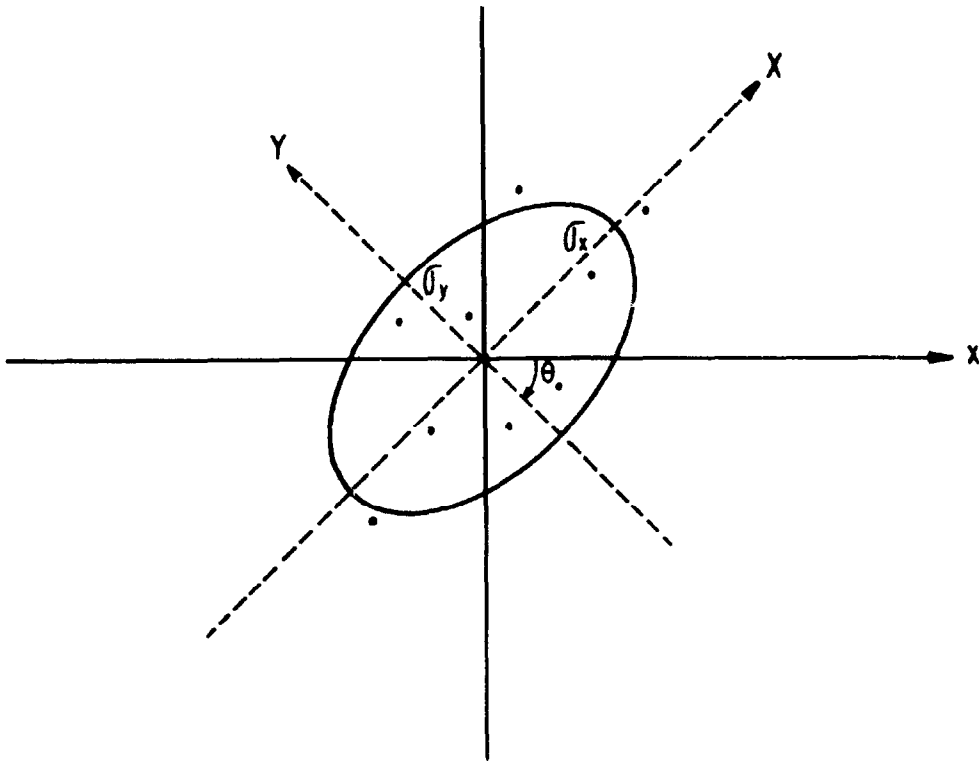
$$v_i(k) = \bar{v}(k) + \frac{\partial \bar{v}(k)}{\partial x} [x_i(k) - \bar{x}(k)] + \frac{\partial \bar{v}(k)}{\partial y} [y_i(k) - \bar{y}(k)] + v_{ii}(k)$$

donde

where

$\bar{x}(k)$  y  $\bar{y}(k)$  son las coordenadas del centroide del grupo,

$\bar{x}(k)$  and  $\bar{y}(k)$  are the coordinates of the centroid group, and



**Figura 3.** Grupo de flotadores (puntos) y su elipse características; *parcial x* y *parcial y* son el eje mayor y menor de la elipse, respectivamente (modificado de Ichiye *et al.*, 1978).

**Figure 3.** Group of drogues (dots) and their characteristic ellipse; *parcial x* and *parcial y* are the mayor and minor axes of the ellipse, respectively. (Modified from Ichiye *et al.*, 1978).

$$\frac{\partial \bar{u}(k)}{\partial x}$$

$$\frac{\partial \bar{u}(k)}{\partial y}$$

$$\frac{\partial \bar{v}(k)}{\partial x}$$

$$\frac{\partial \bar{v}(k)}{\partial y}$$

son los gradientes lineales de velocidad en el centroide, y  $u''$  y  $v''$  son las velocidades turbulentas. Esta expansión de las componentes de velocidad se representa por medio de las ecuaciones matriciales

are the linear velocity gradients at the centroid, and  $u''$  and  $v''$  are the turbulent velocities. The expansion of the velocity components is represented by the matrix equations



$$U = \tilde{R} \tilde{A} + \tilde{E}$$

$$V = \tilde{R} \tilde{B} + \tilde{F}$$

donde U, V son matrices de velocidad de la corriente en 'x' y en 'y'; A, B son las matrices de propiedades cinemáticas de la corriente; E, F son las matrices de turbulencia o términos de segundo orden o mayor, y R es la matriz de posiciones con respecto al centroide.

where U, V are the matrices of current velocity at 'x' and 'y'; A, B are the matrices of kinematic properties of the current; E, F are the matrices of turbulence or second order greater, and R is the matrix of positions in relation to the centroid.

El sistema matricial se resuelve para A y B usando métodos de regresión lineal (Draper y Smith, 1969). La divergencia horizontal y la vorticidad relativa se calculan mediante las fórmulas:

The matrix system is solved for A and B using linear regression methods (Draper and Smith, 1969). The horizontal divergence and relative vorticity are computed using the formulas:

$$\eta(k) = \frac{\partial \bar{u}(k)}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}(k)}{\partial y}$$

$$\zeta(k) = \frac{\partial \bar{v}(k)}{\partial x} - \frac{\partial \bar{u}(k)}{\partial y}$$

Este análisis se aplicó a los datos considerando únicamente grupos de tres flotadores que determinan el área de un triángulo.

This analysis was applied to the data, considering only groups of three drogues which determine a triangle area.

## RESULTADOS

## RESULTS

### Circulación Superficial

### Surface Circulation

Esta sección resume los resultados de Alvarez (1987, en preparación) y se presentan aquí para dar un marco de referencia de la corriente observada en la región sur de la Bahía Todos Santos. Los autores encontraron que las mediciones lagrangeanas indican dos patrones de circulación superficial que, cualitativamente se encontraron relacionados con las condiciones del viento. En presencia de vientos débiles (2 a 3m s<sup>-1</sup>), la corriente superficial se observó variable y lenta (5 a 8cm s<sup>-1</sup>) pero con desplazamiento neto hacia la costa. Estas características se determinaron durante las observaciones de octubre de 1980 y enero de 1981.

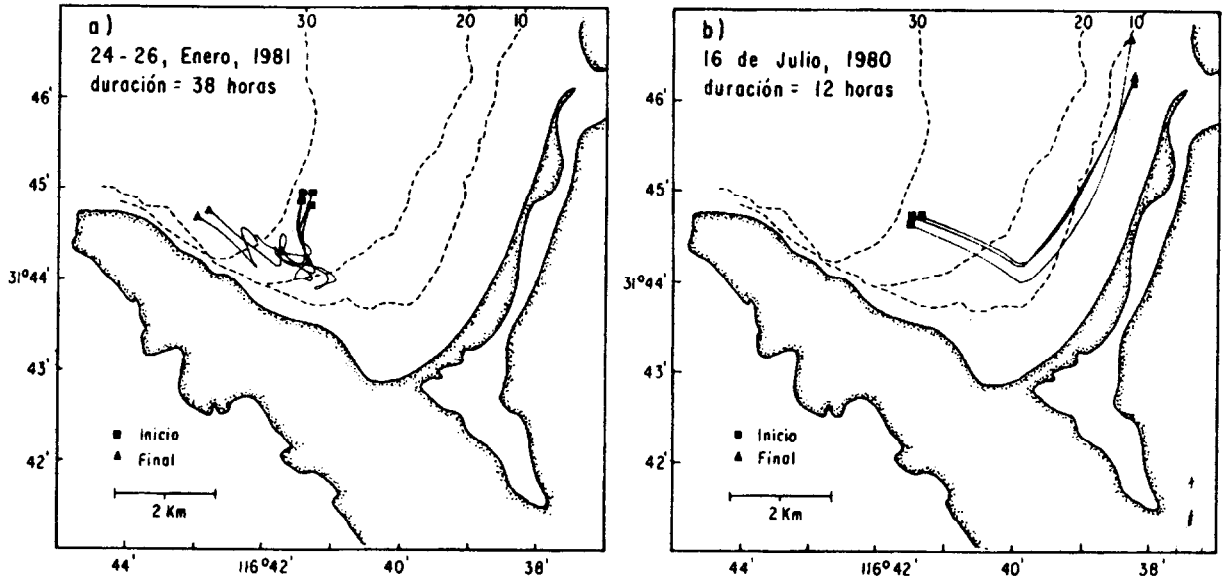
This section summarizes the results of Alvarez, *et al.* (1987, in press) and is provided as a reference frame for the current observed in the southern region of Bahía de Todos Santos. The authors found out that the lagrangian measurements reveal two surface circulation patterns which, qualitatively, turn out to be related to the wind conditions. In presence of weak winds (2-3m s<sup>-1</sup>), the surface current was observed to be variable and slow (5-8cm s<sup>-1</sup>) but with a net displacement onshore. These features were determined during the observations of October, 1980, and January, 1981.

En el resto de los períodos de observación el viento fue de mayor intensidad (5-6m s<sup>-1</sup>) y más persistente. La corriente superfi-

During the rest of the observation periods the wind had more intensity (5-6m s<sup>-1</sup>) and was more persistent. The surface

cial en estas condiciones fue a lo largo de la costa, con rapidez promedio de  $15\text{cm s}^{-1}$  y máximo de  $40\text{cm s}^{-1}$ . Alvarez *et al.* (1982) concluyen que esta condición de la corriente corresponde a la época en que los vientos de mar son de intensidad moderada ( $4\text{-}6\text{m s}^{-1}$ ) y alcanzan condiciones casi estacionarias. La figura 4 muestra ejemplos de ambos patrones de circulación, el primero en el mes de enero de 1981, y el segundo en el mes de julio de 1980.

current in such conditions was along the shore, with an average speed of  $15\text{cm s}^{-1}$  and maximum of  $40\text{cm s}^{-1}$ . Alvarez, *et al.* (1982) concluded that this condition of the current corresponds to that part of the year in which the sea breezes are of moderate intensity ( $4\text{-}6\text{m s}^{-1}$ ) and reach almost stationary conditions. Examples of both circulation patterns are shown in Fig. 4, the first one in January, 1981, and the second one in July, 1980.



**Figura 4.** Patrones de circulación en la región sur de Bahía de Todos Santos. Nótese la diferencia de desplazamiento total en relación a la duración de las observaciones. En (a) los vientos son débiles y variables y la corriente es de  $5\text{cm s}^{-1}$  en promedio. En (b) los vientos son de mar, cuasi-estacionarios y moderados ( $4\text{-}6\text{m/s}$ ), y la corriente es de  $20\text{cm s}^{-1}$  en promedio.

**Figure 4.** Circulation patterns in the southern region of Bahía Todos Santos. Note the difference in total displacement relative to the duration of observations. In (a) winds are weak and variable and current is  $5\text{cm s}^{-1}$  on the average. In (b) winds are sea-breeze, quasi-stationary, and moderate, and current is  $20\text{cm s}^{-1}$  on the average.

### Propiedades Cinemáticas

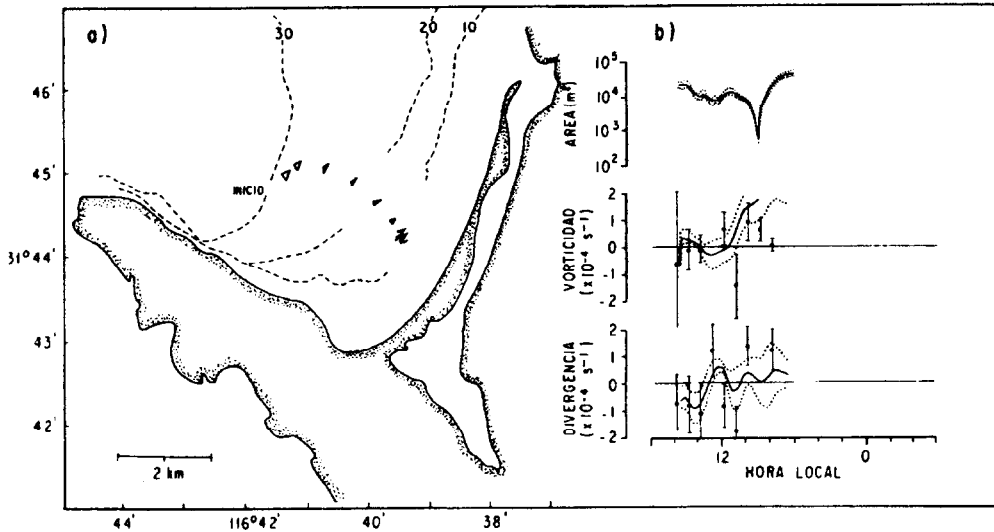
Las figuras 5a a 10a muestran las trayectorias y la evolución espacio temporal de los triángulos cuyos vértices representan los tres flotadores que se desplazan con la corriente superficial. El intervalo de tiempo entre cada triángulo es de una hora, y la separación entre triángulos sucesivos es un in-

### Kinematic Properties

Figures 5a to 10a show the paths and spatial-temporal evolution of the triangles, with vertices represented by the three drogues that travel with the surface current. The time interval between each triangle is one hour, and the separation between consecutive triangles is a measure of the current speed. Figures 5b to

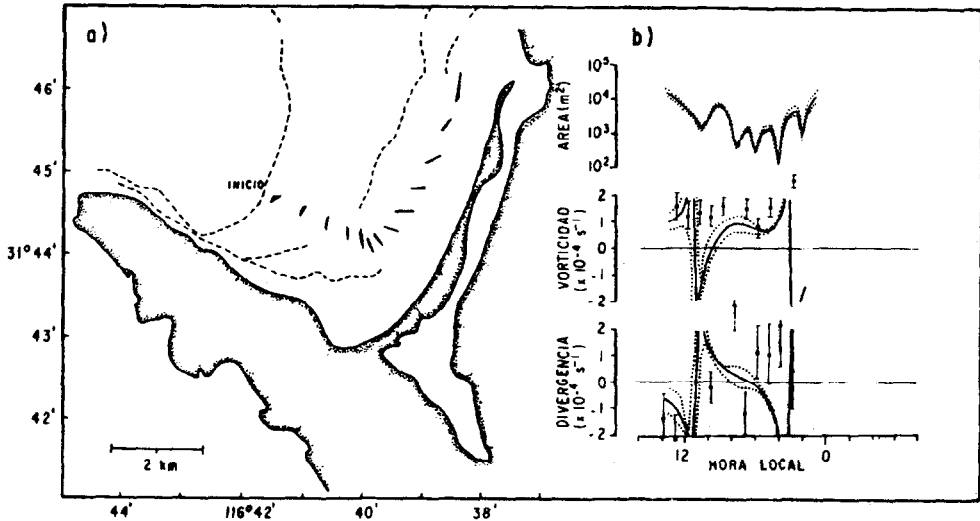
dice de la rapidez de la corriente. En las figuras 5b a 10b se muestran las series de tiempo de divergencia y vorticidad obtenidas por regresión lineal con intervalos de confianza de 80%. Los puntos representan los resultados del método de áreas. El intervalo de confianza que se indica es de 68% y resulta de propagar el error de la posición de los flotadores, el cual se supone constante e igual a  $\pm 20\text{m}$ . Para facilitar la presentación se eliminaron algunos valores que excedieron el rango de la gráfica. Al comparar cualitativamente los resultados del método de áreas con el de regresión lineal, se encuentra que las tendencias de vorticidad y divergencia difieren más cuando los grupos de flotadores definen áreas pequeñas (Fig. 5 y 6). En cambio, cuando las áreas son relativamente grandes (mayores de  $10^4\text{m}^2$ ), los resultados de ambos métodos son similares.

10b show the divergence and vorticity time series obtained by linear regression with 80% confidence intervals. The results of the method of areas are represented by dots. The confidence interval used is 68% and results from propagation of errors in the drogue position, which is assumed to be constant and equal to  $\pm 20\text{m}$ . Some of the values exceeding the range of the graph were eliminated to simplify the presentation. Comparing qualitatively the results of the method of areas and of the linear regression method, it is found that the vorticity and divergence trends differ mostly when the groups of drogues define small areas (Figs. 5 and 6). Instead, when these areas are relatively large (greater than  $10^4\text{m}^2$ ), the results of both methods are similar.



**Figura 5.** Observaciones del 29 de junio de 1980. (a) Trayectoria del grupo de flotadores (vértices). El intervalo de tiempo entre cada triángulo es de una hora. b) Series de tiempo del área del grupo y de divergencia y vorticidad calculadas por regresión lineal (líneas continuas) con intervalos de confianza de 80% (líneas punteadas). Los puntos representan los resultados del método de áreas, con intervalo de confianza de 68%.

**Figure 5.** Observations from June 29, 1980. a) Path of the drogue group (vertices). The time interval between each of the triangles is one hour. b) Group area, divergence, and vorticity time-series computed by linear regression (solid lines), with 80% confidence interval (dotted lines). Dots represent the results of the method of areas, with 68% confidence interval.



**Figura 6.** Observaciones del 16 de julio de 1980. a) Trayectoria del grupo de flotadores (vértices). El intervalo de tiempo entre cada triángulo es de una hora. b) Series de tiempo del área del grupo y de divergencia y vorticidad calculadas por regresión lineal (líneas continuas) con intervalos de confianza de 80% (líneas punteadas). Los puntos representan los resultados del método de áreas con intervalo de confianza de 68%.

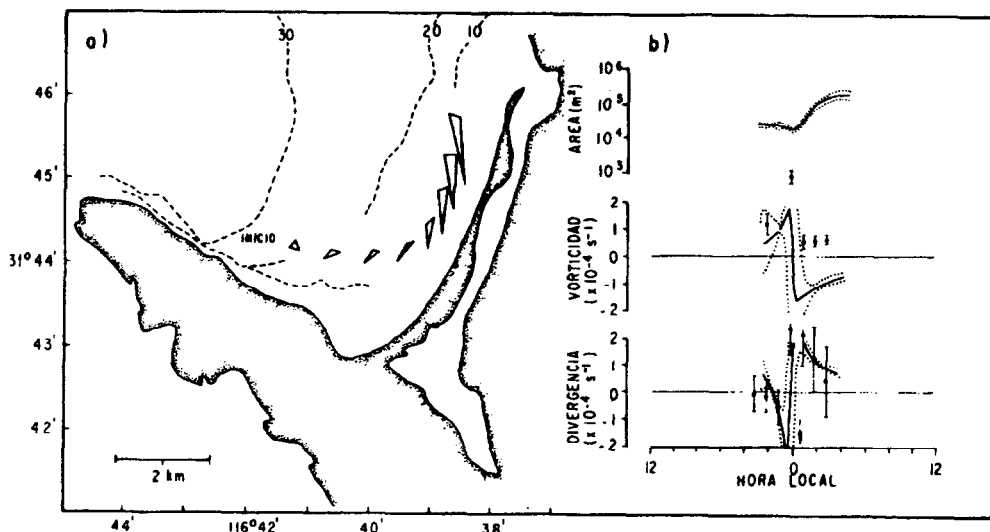
**Figure 6.** Observations from June 29, 1980. a) Path of the drogue group (vertices). The time interval between each of the triangles is one hour. b) Group area, divergence, and vorticity time-series computed by linear regression (solid lines), with 80% confidence interval (dotted lines). Dots represent the results of the methods of areas, with 68% confidence interval.

En el caso particular de la vorticidad calculada por el método de áreas, los errores son mayores cuando el triángulo de flotadores tiende a ser equilátero (Fig. 8), y menores cuando la figura es alargada (Figs. 9 y 10). La divergencia muestra errores muy grandes cuando las áreas son grandes y tienen cambios temporales pequeños.

Los valores absolutos de  $\eta$  y  $\zeta$  son muy variables a lo largo de la trayectoria de los flotadores. Estos cambios se dan dentro de dos órdenes de magnitud y ocurren en tiempos tan cortos como dos horas. Un valor promedio del orden de magnitud de  $\eta$  y  $\zeta$  es  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$  con máximos de  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ . En general, en una misma serie, los valores máximos de una propiedad están asociados a valores máximos de la otra aunque con signo distinto. Esto indica que las deformaciones rápidas de la parcela de agua afectan tanto a su dimensión horizontal como a su orientación y, desde luego, están asociadas a una misma región del recorrido de los flotadores.

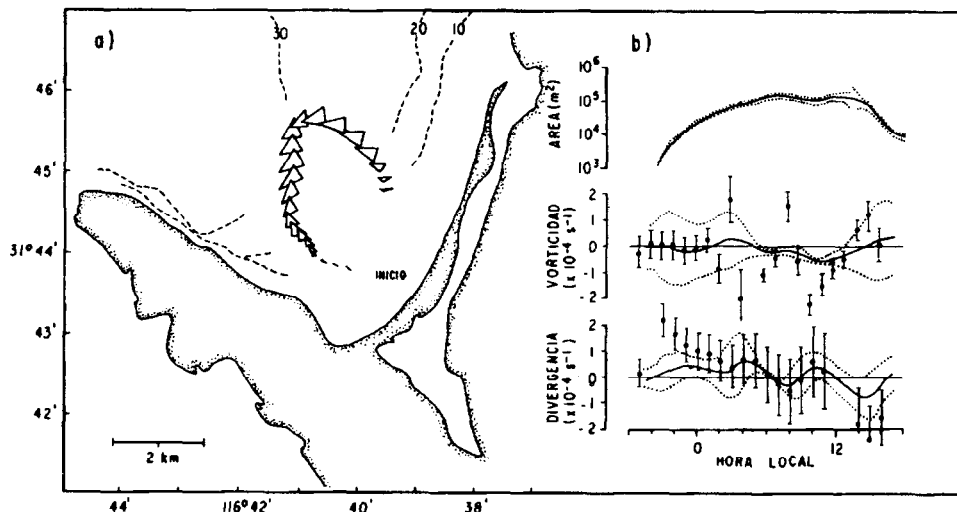
In the particular case of the vorticity computed by the method of areas, the errors are greater when the triangle of drogues tends to be equilateral (Fig. 8), and smaller when the figure is oblong (Figs. 9 and 10). The divergence reveals great errors when the areas are large and have small temporal changes.

The absolute values of  $\eta$  and  $\zeta$  are very variable along the drogue trajectories. These changes occur within two orders of magnitude and in time periods as short as two hours. A mean value of the order of magnitude of  $\eta$  and  $\zeta$  is  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ , with maxima of  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ . In general, for a given series, the maximum values of one kinematic property are associated with maximum values of the other, but different sign. This means that the rapid deformations of the water parcel affect both, its horizontal dimension and its orientation, and, of course, they are associated with the same region of the path followed by the drogues.



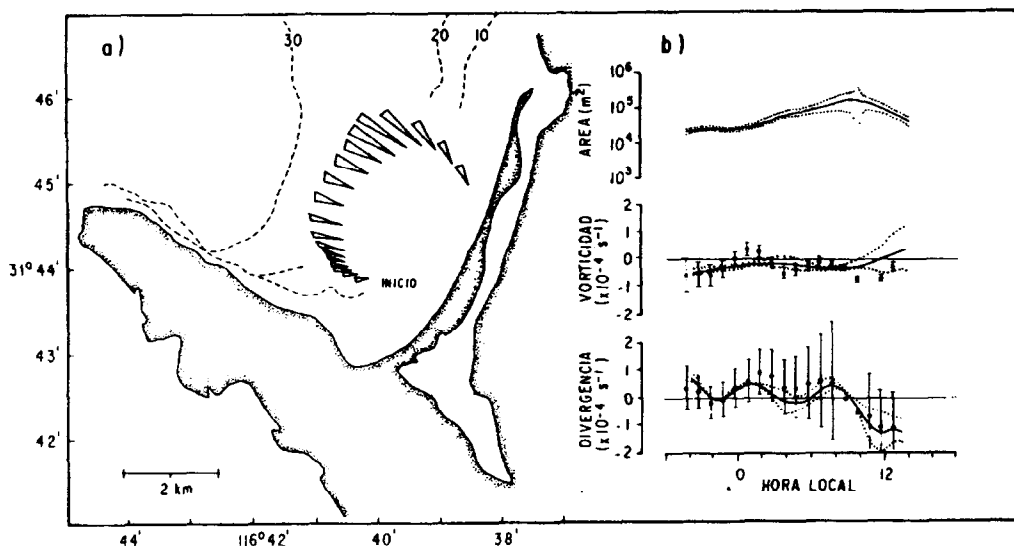
**Figura 7.** Observaciones del 17 de julio de 1980. a) Trayectoria del grupo de flotadores (vértices). El intervalo de tiempo entre cada triángulo es de una hora. b) Series de tiempo del área del grupo y de divergencia y vorticidad calculada por regresión lineal (líneas continuas) con intervalos de confianza de 80% (líneas punteadas). Los puntos representan los resultados del método de áreas, con intervalo de confianza de 68%.

**Figure 7.** Observations from June 29, 1980. a) Path of the drogue group (vertices). The time interval between each of the triangles is one hour. b) Group area, divergence, and vorticity time-series computed by linear regression (solid lines), with 80% confidence interval (dotted lines). Dots represent the results of the method of areas, with 68% confidence interval.



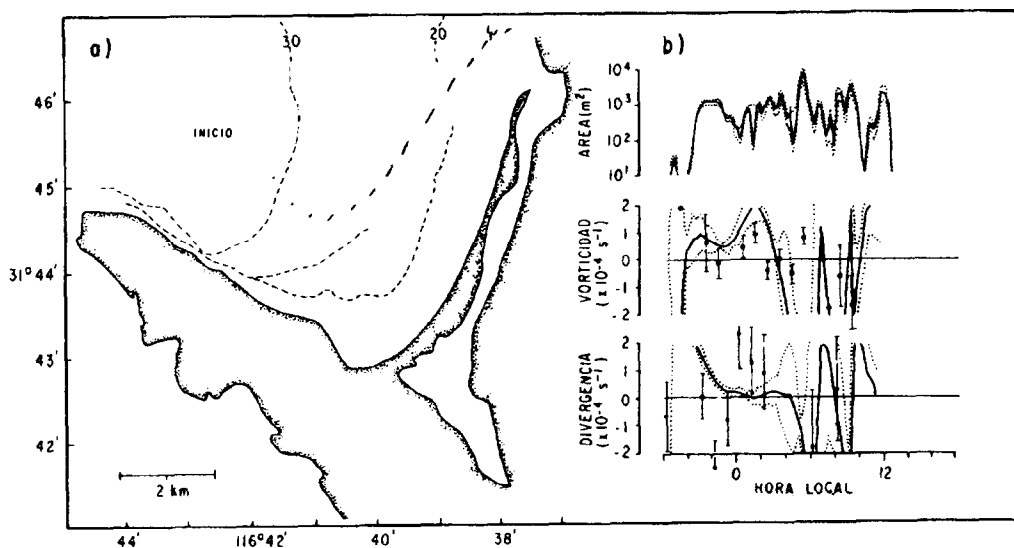
**Figure 8.** Observaciones para el 28-29 de julio de 1980 (primer grupo). a) Trayectoria del grupo de flotadores (vértices). El intervalo de tiempo entre cada triángulo es de una hora. b) Series de tiempo del área del grupo y de divergencia y vorticidad calculadas por regresión lineal (líneas continuas) con intervalos de confianza de 80% (líneas punteadas). Los puntos representan los resultados del método de áreas, con intervalo de confianza de 68%.

**Figure 8.** Observations from June 29, 1980. a) Path of the drogue group (vertices). The time interval between each of the triangles is one hour. b) Group area, divergence, and vorticity time-series computed by linear regression (solid lines), with 80% confidence interval (dotted lines). Dots represent the results of the method of areas, with 68% confidence interval.



**Figure 9.** Observaciones para el 28-29 de julio de 1980 (segundo grupo). a) Trayectoria del grupo de flotadores (vértices). El intervalo de tiempo entre cada triángulo es de una hora. b) Series de tiempo del área de grupo y de divergencia y vorticidad calculadas por regresión lineal (líneas continuas) con intervalos de confianza de 80% (líneas punteadas). Los puntos representan los resultados del método de áreas, con intervalo de confianza de 68%.

**Figure 9.** Observations from June 29, 1980. a) Path of the drogue group (vertices). The time interval between each of the triangles is one hour. b) Group area, divergence, and vorticity time-series computed by linear regression (solid lines), with 80% confidence interval (dotted lines). Dots represent the results of the method of areas, with 68% confidence interval.



**Figura 10.** Observaciones para el 26-27 de mayo de 1980. a) Trayectoria del grupo de flotadores (vértices). El intervalo de tiempo entre cada triángulo es de una hora. b) Series de tiempo del área del grupo y de divergencia y vorticidad calculadas por regresión lineal (líneas continuas) con intervalos de confianza de 80% (líneas punteadas). Los puntos representan los resultados del método de áreas, con intervalo de confianza de 68%.

**Figure 10.** Observations from June 29, 1980. a) Path of the drogue group (vertices). The time interval between each of the triangles is one hour. b) Group area, divergence, and vorticity time-series computed by linear regression (solid lines), with 80% confidence interval (dotted lines). Dots represent the results of the method of areas, with 68% confidence interval.

La dimensión característica del grupo de flotadores puede determinarse de la gráfica de área en función del tiempo, en donde se observa que las fluctuaciones rápidas del área coinciden con las correspondientes a  $\eta$  y  $\zeta$ . En las figuras 5 y 6, el área carece de una tendencia definida a lo largo de toda la serie, situación que se manifiesta con cambios de signo en divergencia y vorticidad. En las observaciones del 16 de julio (Fig. 6), los cambios de valores negativos a positivos en la divergencia corresponden a un cambio inverso en la vorticidad. Particularmente, estos cambios consistieron de un aumento del área delimitada por los tres flotadores (divergencia positiva), y un giro del grupo en el sentido de las manecillas del reloj (vorticidad negativa).

El gradiente lateral de velocidad frente a la barra del Estero de Punta Banda es de signo distinto en las figuras 6 y 7. En la figura 6, la rapidez de la corriente aumenta al disminuir la distancia a la costa y la profundidad, mientras que en la figura 7 la rapidez aumenta cuando aumentan la distancia a la costa y la profundidad. Esta situación se refleja en las deformaciones del grupo de flotadores al desplazarse a lo largo de la costa. El efecto se observa más claramente en las series de vorticidad calculadas por regresión, cuyos valores tienen signos opuestos en las últimas horas de ambas mediciones en las cuales, los últimos valores de vorticidad son positivos en la figura 6 y negativos en la figura 7. Aunque los dos grupos de flotadores no se desplazaron simultáneamente frente a la barra del Estero, es evidente que la corriente paralela a la costa fue un evento que duró por lo menos 18 horas y afectó a ambos grupos. Para mostrar la variación espacial de la corriente, se ha dibujado un tipo representación Euleriana a las 10:00 horas del 16 de julio usando datos simultáneos de las mediciones de campo (Fig. 11).

En las mediciones del 28 y 29 de julio los flotadores se separaron en dos subgrupos, en los cuales se manifiesta el efecto de la barra del Estero de Punta Banda como región de convergencia cuando el agua superficial se desplaza en forma de una corriente hacia la costa. Esto se observa en las figuras 8b y 9b como valores negativos de la divergencia,

The characteristic dimension of the group of drogues can be determined in the area versus time graph, where it shows that the rapid fluctuations of the area coincide with those corresponding to  $\eta$  and  $\zeta$ . In Figs. 5 and 6, the area lacks of a distinct trend along all the series, and this situation occurs with changes in sign of divergence and vorticity. In the observations of July 10 (Fig. 6), the changes from negative to positive in the values of divergence correspond to a reverse change in vorticity. Particularly, these changes consisted of an increase in the area bounded by the three drogues (positive divergence), and a clockwise gyre of the group (negative vorticity).

The lateral vorticity gradient in front of the Estero de Punta Banda sand bar has a different sign in Figs. 6 and 7. In Fig. 6, the current speed increases as long as both, on shore distance and depth, decrease, whereas in Fig. 7 the rate increases as long as both, distance and depth, increase. This situation reflects itself on the deformations of the group of drogues when it travels along the shore. The effect is clearly observed in the vorticity series which were computed by regression. These series have values with opposite signs at the end of both measurements, when the last vorticity values are positive in Fig. 6 and negative in Fig. 7. Although both drogue groups were not traveling simultaneously in front of the sand bar, it is evident that the alongshore current was an event which lasted at least 18 hours and affected both groups. To depict the spatial variation of the current, an Eulerian representation at 10:00 of July 16 is shown in figure 11, using simultaneous data of the field measurements.

Two drogue subgroups drifted during the measurements of July 28-29, reflecting the effect of the Estero de Punta Banda sand bar as high convergence region when surface water displaces as an onshore current. In Figs. 8b and 9b this is shown as negative values of divergence that coincide with positive vorticity for the last 3-4 hours. Remarkably, moreover, the convergent condition coincides with the drifting buoys arriving to the 10m iso-

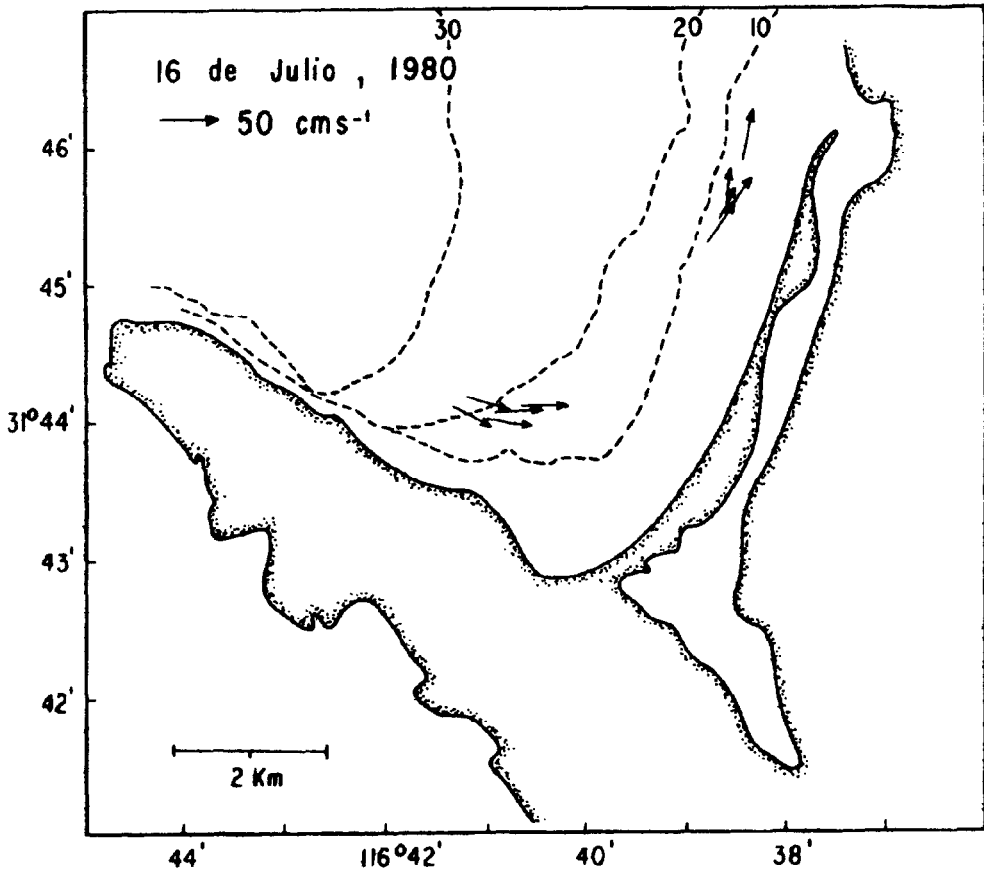


Figura 11. Representación euleriana de la corriente superficial a las 10:00 horas del 16 de julio, 1980. Las flechas indican la corriente medida por cada boya, promediada en un intervalo de 15 minutos. Este evento se midió durante aproximadamente 18 horas.

Figure 11. Eulerian representation of the surface current at 10:00, July 16, 1980. Current measured by each of the buoys, averaged on the 15 minute interval, is indicated by arrows. This event was measured during 18 hours.

asociados a valores relativamente bajos de vorticidad positiva en las últimas tres o cuatro horas. Además, es notorio que la situación de convergencia coincide con la llegada de las boyas de deriva a la isobata de 10m. En la figura 5 se observa también una disminución del área de los tres flotadores cuando el grupo llega a dicha profundidad, y corresponde de igual manera a valores positivos de vorticidad.

## DISCUSION

### Ordenes de Magnitud

In Fig. 5 it is also observed a decrease of the three drogues area when the group arrives to that depth, which similarly corresponds to positive vorticity values.

## DISCUSSION

### Orders of Magnitude

There are no reported studies on the computation of kinematic properties in regions similar to the one described here (confined, shallow waters near the shore) which allow us to provide a comparison, at least of orders of



No se han reportado trabajos previos sobre el cálculo de propiedades cinemáticas en regiones similares a las del presente estudio (aguas confinadas, someras y cercanas a la costa), tales que nos permitan establecer una comparación al menos en órdenes de magnitud. Sin embargo, varios autores reportan que los valores de divergencia horizontal y vorticidad en regiones oceánicas son del orden de  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$  a diferencia de  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$  y  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  calculados en la Bahía de Todos Santos. Entre otros resultados publicados están los que se presentan en la Tabla I con fines de comparación, en donde se muestran órdenes de magnitud obtenidos por los diferentes autores y los calculados en este trabajo. Se incluyen en esta Tabla las principales características de la zona de estudio en cada caso, así como los métodos de análisis utilizados. En general, los estudios citados en la Tabla I corresponden a regiones oceánicas, a excepción del trabajo de Okubo *et al.* (1976a) quien trabajó en los Grandes Lagos, región caracterizada por aguas someras y cercanas de la costa. El orden de magnitud de  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$  reportado por Okubo *et al.* (1976) puede estar relacionado a las bajas velocidades y a la uniformidad de la corriente en esa zona. Ichiye *et al.* (1978) encontraron gradientes de velocidad del orden de  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$  en algunas de sus observaciones, pero sin ninguna tendencia clara en el tiempo.

La diferencia en órdenes de magnitud entre este trabajo y los citados en la Tabla I, puede explicarse en función de la escasa profundidad y la cercanía a la costa en las mediciones de la Bahía de Todos Santos. En la región sur, las corrientes superficiales sufren efectos friccionales notables que producen variación espacial de la velocidad a escala de la dimensión del grupo de flotadores, y por ende valores mayores de las propiedades cinemáticas. Esta zona, en su parte más interior y somera, presenta condiciones de confinamiento tales que las distintas direcciones del viento y los efectos friccionales producen una variación grande en la corriente superficial.

#### Area del Grupo de Flotadores

Los frecuentes cambios de signo en las series de tiempo de divergencia y vorticidad pueden atribuirse a alguna o a las dos causas

magnitud. In oceanic regions, however, a number of authors reported horizontal divergence and vorticity values which have orders of magnitude of  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , in contrast to  $10^{-4}$  and  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  values computed for Bahía de Todos Santos. Other published results include those presented in Table I for comparative purposes. This table shows orders of magnitude obtained by other authors and the computation in this work, indicating also the major features of the study area for each case, and the analysis method used. In general, the works cited in Table I were made in oceanic regions, except for the study of Okubo *et al.* (1976a) who worked in the Great Lakes, a region characterized by shallow, nearshore waters. The order of magnitude of  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$  reported by Okubo *et al.* (1976a) may be related to the low velocities and to the uniform flow in that area. Ichiye *et al.* (1978) reported velocity gradients with orders of magnitude of  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$  in some of their observations, but with no distinct trend in time.

The difference in orders of magnitude between this work and those cited in Table I can be explained in terms of the low depth and the proximity to the coast for the measurements made in Bahía de Todos Santos. In the southern region, the surface currents have remarkable frictional effects producing spatial variation of the velocity at scales similar to the drogue group, and hence greater values of the kinematic properties. This zone, in its innermost, shallower part, presents such confinement conditions that a large variation in the surface current results from the different wind directions and friction with the boundaries.

#### Area of Drogue Group

Frequent sign changes in the divergence and vorticity time series can be attributed to one or both of the following reasons: First, since the statistics of the measurement error is the same for every observation, then the smallest areas will have the greatest error in estimating the kinematic properties (Molinari and Kirwan, 1975). Alvarez, *et al.* (1982) reported that, in observations for this study, a relative error greater than 40% was deter-

siguientes. Primero, dado que la estadística del error de medición es la misma en todas las observaciones, entonces las áreas más pequeñas introducen un error mayor en las estimaciones de las propiedades cinemáticas (Molinari y Kirwan, 1975). Alvarez *et al.* (1982) reportan que en los muestreos de este trabajo se determinó un error relativo mayor del 40% en el cálculo del área cuando los flotadores están a menos de 100m del centroide del grupo, comparado con un 10% de error cuando esta distancia es mayor de 350m. Segundo, si los flotadores responden a un flujo turbulento con escala similar a la del área ocupada por los flotadores, el método de medición registra, en su mayor parte, los procesos turbulentos de la parcela de agua (términos de segundo a más alto orden en la expansión de Taylor), y las series de tiempo muestran frecuentes cambios de signo en sus valores. El cálculo de divergencia tiene un error grande como resultado del error inicial de posición de los flotadores. Sin embargo, se observa que cuando las áreas de los triángulos son pequeñas, los dos métodos indican valores que son significativamente distintos para una misma propiedad. En cambio cuando las áreas son relativamente grandes, los valores calculados por ambos métodos no muestran una diferencia significativa. Se observó que la correspondencia de valores al utilizar los dos métodos de análisis existe únicamente cuando el área representada por el grupo de flotadores es mayor de  $10^4\text{m}^2$ .

### CONCLUSIONES

Los gradientes de velocidad en la región sur de la Bahía de Todos Santos son del orden de  $10^{-4}\text{ s}^{-1}$  a  $10^{-3}\text{ s}^{-1}$ . Este orden de magnitud mayor que el reportado en otros trabajos se atribuye a que en esta zona, los procesos cinemáticos están influenciados principalmente por los efectos friccionales del fondo y la costa. La región frente a la barra del Estero se comportó como región de convergencia cuando las corrientes son directamente hacia la costa; con corrientes a lo largo de la costa, la franja adyacente a la barra del Estero se identificó como región divergente. Fue en esta franja donde se determinaron los valores mayores de las propiedades cinemáticas, y por lo tanto, puede inferirse que el agua superficial tiene un mezclado más efectivo en comparación con aguas más alejadas de la costa.

mined in the computation of the area when the drogues were less than 100m away from the centroid group, compared to a 10% error when this distance exceeds 350m. Second, if the drogues respond to a turbulent flow with a scale similar to the area occupied by the drogues, then the measuring method records largely the turbulent processes of the water parcel (second to greater order terms in the Taylor's expansion), and the time series show frequent sign changes in their values. The divergence computation has a large error as a result of the initial error in the drogue positions. It is observed, however, that when the triangle areas are small, both methods yield values which are significantly different for the same property. Instead, when the area is relatively large, the values computed by both methods do not reveal any significant difference. It was observed that both methods of analysis give similar results only when the area bounded by the drogue group is greater than 10m.

### CONCLUSIONS

The velocity gradients in the southern region of Bahía de Todos Santos have order of magnitude of  $10^{-4}\text{ s}^{-1}$  to  $10^{-3}\text{ s}^{-1}$ . These magnitudes greater than those reported in other works are attributed to the fact that, in this area, kinematic processes are influenced mainly by the frictional effects of bottom and shore. The region in front of the Estero de Punta Banda sand bar behaved as a convergence region when currents flowed directly onshore or currents flowing alongshore. The coastal water adjacent to the sand bar was identified as a divergence region. It was in this region where the greatest values for the kinematic properties were determined and, thus, it can be inferred that surface water mixes more effectively if compared to waters further away from the shore.

Considering the involved errors, we can conclude that there was no difference between both methods of analysis used when the area covered by the drogues was greater than  $10^4\text{m}^2$ . For smaller areas, the measurement errors and the size of turbulent gyres intro-

Tomando en cuenta los errores involucrados, podemos decir que no hubo diferencia entre los dos métodos de análisis utilizados cuando el área cubierta por los flotadores fue mayor de  $10^4\text{m}^2$ . Con áreas menores, los errores de medición y la dimensión de los giros turbulentos en la parcela de agua introdujeron mayor error en el cálculo de las propiedades y sus series de tiempo no mostraron una tendencia clara.

#### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Instituto de Investigaciones Oceanológicas de la Universidad Autónoma de Baja California por haber facilitado el equipo de radar. También agradecemos a la sección de Cruceros Oceanográficos del CICESE por su colaboración en el trabajo de campo, y a Brian Sanderson por haber proporcionado parte de los programas de análisis, a Víctor Godínez por su ayuda en el procesamiento de datos y a Sergio Ramos y Graciela Peña por la elaboración de las figuras.

#### LITERATURA CITADA

Alvarez Sánchez, L.G., Uyeji, M.M. y Durazo, R.A. (1982) Observaciones de corrientes costeras superficiales mediante trazadores lagrangeanos. I. Bahía de Todos Santos, BC. (1980-81). Reporte Técnico OC-82-03. CICESE.

Alvarez Sánchez, L.G., Hernández, W.R. y Durazo, R.A. (1987) Patrones de movimiento de trazadores lagrangeanos en la Bahía de Todos Santos. En preparación.

Draper, N.R. and Smith, H. (1969) Applied Regression Analysis. John Wiley, 407pp.

Durazo Arvizu, Reginaldo (1983) Circulación superficial y cinemática de la región sur de la Bahía de Todos Santos, BC. Tesis profesional. UABC, 68pp.

Ichiye, T., Mungall, C., Inoue, M. and Horne, D. (1978) Gulf of Mexico Dispersion Calculations. Technical Report, Reference 78-10-T. Texas A y M University.

duced larger errors into the computation of kinematic properties. As a result, their time series did not show a different trend.

#### ACKNOWLEDGMENTS

We wish to thank to the Instituto de Investigaciones Oceanológicas de la Universidad Autónoma de Baja California for allowing us the use of the radar equipment, as well as to the Sección de Cruceros Oceanográficos of the CICESE for their help in carrying out the field work. Our gratitude to Bryan Sanderson for providing us part of the computer programs used in this study, to Víctor Godínez for his help in processing the data and Sergio Ramos and Graciela Peña for drawing the figures.

The author translated this paper into English.

---

Molinari, R. and Kirwan, A.D. Jr. (1975) Calculations of Differential Kinematics Properties from Lagrangian Observations in the Western Caribbean Sea. *J. Phys. Ocean.*, 5(3):483-491.

Okubo, A. y Ebbesmeyer, C.C. (1976) Determination of Voracity, Divergence, and Deformation Rates from Analysis of Drogue Observations. *Deep Sea Res.*, 23: 349-352.

Okubo, A., Ebbesmeyer, C.C., Helseth, J.M. and Robins, A.S. (1976a) Reanalysis of the Great Lakes Drogue Studies Data, Final Report. Technical Report, Reference 76-2. Marine Science Research Center, State Univ. of New York.

Okubo, A., Ebbesmeyer, C.C. and Helseth, J.M. (1976b) Determination of Lagrangian Deformations from Analysis of Current Followers. *J. of Phys. Ocean.* 6(4): 524-527.

Okubo, A., Ebbesmeyer, C.C. and Sanderson, B.G. (1983) Lagrangian Diffusion Equation and its Application to Oceanic Dispersion. *J. Ocean. Soc. Japan*, 39: 259-266.

Reed, R.K. (1971) An Observation of Divergence in the Alaskan Stream. *J. Phys. Ocean.*, 1: 282-283.

Sanderson, B.G. (1979) A Study of Ocean Circulation Using Radio Drogues. *W. Sc. Thesis, Univ. of Auckland*, 170pp.

Sanderson, B.G. (1982) A Lagrangian Description of Dispersion in the Ocean. *Ph. D. Thesis, State Univ. of New York at Stony Brook*, 98pp.