

**DISPERSION EN LA FRANJA COSTERA DE TIJUANA,
BAJA CALIFORNIA**

**NEAR-SHORE DISPERSION OFF TIJUANA,
BAJA CALIFORNIA**

Luis G. Alvarez
V́ctor M. God́nez
Miguel F. Lavín

Centro de Investigación Científica y de
Educación Superior de Ensenada
Espinoza 843,
Ensenada, Baja California, México

Alvarez, L.G., God́nez, V.M. y Lavín, M.F. (1990). *Dispersión en la franja costera de Tijuana, Baja California. Near-shore dispersion off Tijuana, Baja California. Ciencias Marinas*, 16(4): 87-109.

RESUMEN

Se estudia la capacidad de dispersión de las aguas superficiales frente a la costa de Tijuana, Baja California, con observaciones hechas en cinco campañas entre 1985 y 1986. Se midieron las corrientes superficiales y la dispersión con 20 grupos y 20 líneas de flotadores; las corrientes subsuperficiales se midieron con un corrent́metro a 15 m de profundidad.

Las corrientes fueron variables, con inversiones de flujo, pero orientadas principalmente a lo largo de la costa y con rapidez promedio de 0.19 m s^{-1} . El coeficiente de difusión horizontal varía dentro de un intervalo de dos órdenes de magnitud, con promedio de $11.5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. La difusión a lo largo de la costa es, en promedio, diez veces mayor que la difusión normal a la costa. Estos resultados se usaron para modelar la distribución de partículas provenientes de una descarga casi continua en la costa y a 1 km mar adentro. La simulación se hizo con un modelo de movimiento al azar, homogéneo en la vertical, con corriente a lo largo de la costa y con corte horizontal de velocidad. Cuando la descarga se hace a 1 km, la concentración máxima es cinco veces menor que cuando se hace en la costa.

ABSTRACT

The near-shore capacity of dispersion of the surface waters off Tijuana, Baja California (Mexico), is studied with data collected in five experiments made in 1985 and 1986. Surface currents and dispersion were measured with 20 patches and 20 lines of drogues; currents 15 m below the surface were measured with a current meter.

The currents were variable, with flow inversions, but oriented mainly along the coast, with a mean speed of 0.19 m s^{-1} . The horizontal eddy diffusivity coefficient varied within two orders of magnitude, with an $11.5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ average. In the mean, long-shore diffusion is ten times larger than that cross-shore. The results were used to model the distribution of particles released quasi-continuously at the coast and 1 km offshore. A vertically homogeneous random-walk model with horizontally sheared long-shore currents was used. The off-shore discharge produces maximum concentrations five times lower than that at the coast.

INTRODUCCION

En ambos lados de la frontera entre México y los Estados Unidos existen fuentes reales y potenciales de contaminación marina. En 1988, el emisor submarino de Point Loma, a 15 km al norte de la frontera, descargaba aguas residuales al mar a razón de $8.2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, con una proyección de aumentar a $10.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para el año 2005 (Engineering Science, 1988). En México, a 10 km al sur de la frontera, se descargan en la playa cerca de $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de aguas residuales procedentes de la ciudad de Tijuana (Fig. 1). A 10 km más al sur existe una terminal marítima que descarga combustibles hacia la costa mediante monoboyas y tuberías submarinas. Dado el desarrollo de esta región, es posible que a corto plazo se incremente el uso del mar como cuerpo receptor de desechos y, por lo tanto, es urgente evaluar su capacidad para dispersarlos.

La región de estudio es una franja costera de 7 km de ancho que comprende los primeros 20 km al sur de la frontera México-Estados Unidos (Fig. 1). La batimetría presenta una plataforma con profundidades menores de 40 m, la cual se extiende al oeste hasta las Islas Coronado. La costa tiene una orientación aproximadamente NNW entre la frontera y Punta Descanso, Baja California (Fig. 1). En un marco más amplio, esta región se ubica en la parte sur de una gran bahía abierta llamada "Southern California Bight", cuyo extremo norte es Punta Concepción, en California. Su extremo sur no está bien definido: Dorman (1982) lo sitúa cerca de la frontera México-Estados Unidos, pero Jones (1971) considera que se extiende hasta Punta Colonett, en Baja California.

Frente a las costas de California se han realizado varios programas de investigación sobre circulación en la plataforma continental y, como se verá más adelante, algunos resultados son similares a los que se describen en este trabajo. Con observaciones hechas 70 km al norte de nuestra zona de estudio, Winant y Bratkovich (1981) reportan que la corriente superficial promediada sobre seis semanas es a lo largo de la costa y hacia el sur durante todo el año, con rapidez de 0.10 m s^{-1} . Reportan, además, que la columna de agua está estrati-

INTRODUCTION

Urban growth on both sides of the US-Mexico border has created real and potential sources of marine pollution. In 1988, the Point Loma submarine outfall, 15 km north of the border, discharged into the sea residual water at a rate of $8.2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, with an expected increase to $10.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ for the year 2005 (Engineering Science, 1988). In Mexico, 10 km south of the border, about $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ of residual water from Tijuana (Fig. 1) is discharged at the beach. Ten kilometers further south, there is an off-shore fuel terminal that discharges to the coast through submarine pipelines. Considering the rate of development of this area, a short-term increase in the use of the sea as a waste receptacle is likely; therefore, an assessment is urgently needed of the capacity of dispersion of the coastal sea.

The study area is a 7 km wide coastal band comprising the first 20 km south of the US-Mexico border (Fig. 1). The bathymetry presents a platform less than 40 m deep, which extends west to the Coronado Islands. The shoreline is oriented approximately NNW between the border and Punta Descanso, Baja California (Fig. 1). In a wider frame, the region is located in the southern part of the great open bay called the "Southern California Bight", whose northern limit is Point Conception, in California. The southern limit is not well-defined: Dorman (1982) sets it near the US-Mexico border, but Jones (1971) extends it to Punta Colonett, Baja California.

Off the California coast, several research programs on the continental shelf circulation have recently taken place and, as we shall see, some results are similar to those described in this work. With observations made 70 km north of our study zone, Winant and Bratkovich (1981) report that the six-week average surface current is along the coast and to the south throughout the year, with 0.10 m s^{-1} mean speed. They also report stratified conditions in spring and summer; a mean flow south between 0 and 20 m, and in the opposite direction at 60 m, near the bottom.

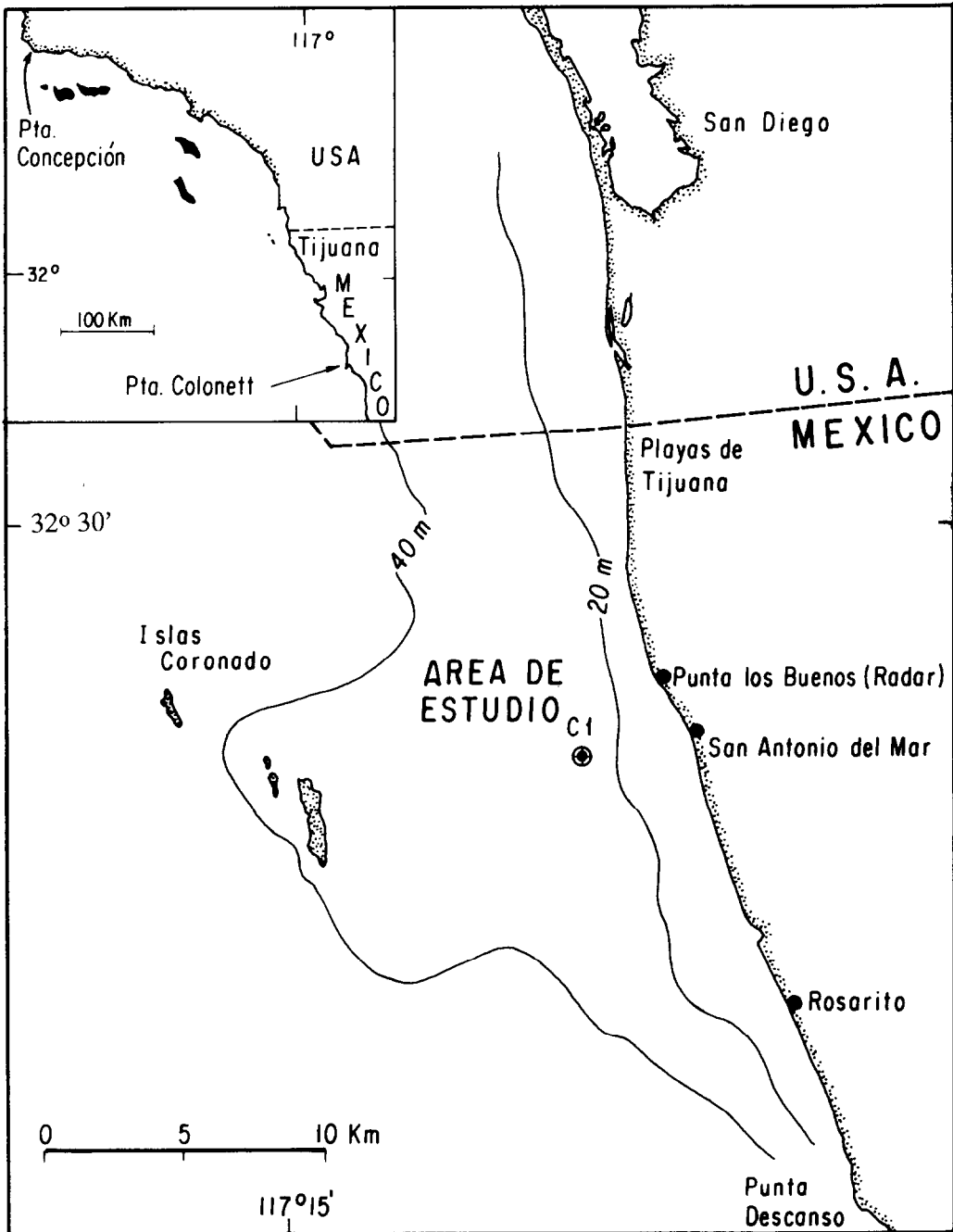


Figura 1. Area de estudio mostrando las posiciones del radar y del anclaje del correntímetro (C1).
Figure 1. The area of the study, showing the position of the radar and the current meter (C1).

ficada en primavera y verano, flujo promedio hacia el sur entre 0 y 20 m, y en sentido opuesto a 60 m, cerca de fondo.

Más recientemente, el programa CODE (Coastal Ocean Dynamics Experiment), realizado a 200 km al norte del área de interés, reveló nuevas características del régimen costero de corrientes. Se encontró que el patrón general de circulación es sumamente complejo: existen chorros hacia el polo cuando no hay viento (Winant *et al.*, 1987), y las corrientes superficiales no se asemejan a la forma clásica de corrientes inducidas por el viento durante una surgencia. Kosro (1987) determinó que la circulación está relacionada con estructuras térmicas superficiales que se observan en imágenes de satélite y con la presencia de regiones de flujo hacia mar adentro, giros y contracorrientes.

En contraste, hay únicamente tres trabajos relativos al régimen costero de corrientes o a la dispersión en la región de estudio. Hernández-Walls (1986) reporta corrientes hacia el SE frente a Playas de Tijuana en marzo de 1985, con rapidez de 0.20 m s^{-1} en la superficie y 0.10 m s^{-1} a 14 m de profundidad. Morales-Chávez (1989) presenta distribuciones de bacterias coliformes fecales provenientes de las aguas residuales que se descargan a la playa cerca de San Antonio del Mar. Las bacterias forman una mancha superficial de 5 a 8 km de largo y de 2 a 3 km de ancho. El trabajo de Godínez-Sandoval (1986) es una fase preliminar de los experimentos reportados en el presente artículo.

El objetivo de este trabajo es aportar conocimientos de utilidad práctica acerca de la capacidad de dispersión de sustancias en el mar: una estadística de los coeficientes de dispersión horizontal, una descripción del campo de corrientes (intensidad, dirección, inversiones, corte horizontal), y un modelo simple de dispersión, que demuestra el uso de la información presentada.

METODOLOGIA

Se hicieron cinco campañas de observación: en marzo, julio y septiembre de 1985, y en enero y junio de 1986, como se indica en la Tabla I. Las mediciones se hicieron con flotadores libres superficiales que se localiza-

Recently, the CODE program (Coastal Ocean Dynamics Experiment), 200 km north of our study area, revealed new features of the coastal current regime. The general circulation pattern was found to be quite complex, with poleward jets when the wind stops (Winant *et al.*, 1987), and the surface currents do not resemble the classical pattern of wind-driven upwelling. Kosro (1987) found that the circulation is related to surface thermal structures revealed by satellite, and with the presence of regions of offshore flow, eddies and counter-currents.

By contrast, there are only three published reports on the coastal current regime or on dispersion in our study area. Hernández-Walls (1986) reports currents to the SE off Playas de Tijuana in March 1985, with a mean speed of 0.20 m s^{-1} in the surface and 0.10 m s^{-1} at 14 m. Morales-Chávez (1989) reports distributions of fecal coliform bacteria associated to residual water discharged at the beach in San Antonio del Mar. The spreading of the surface patch of bacteria is 5 to 8 km long and 2 to 3 km wide. The work of Godínez-Sandoval (1986) is a preliminary stage of the experiments reported here.

The objective of this article is to provide practical knowledge of the capacity of dispersion of substances in the sea: a statistics of the horizontal dispersion coefficients, a description of the field of currents (speed, direction, inversions, horizontal shear), and a simple model of dispersion, which shows the use of the information presented.

METHODOLOGY

The data were obtained in five observation campaigns: in March, July and September 1985, and in January and June 1986 (see Table I). The measurements were made with free surface drogues, located every 15 minutes with a land-based X-band marine radar (for more details, see Alvarez *et al.*, 1989). Two types of initial distribution of the drogues were made: (a) grouped, in patches with initial areas between 10^4 and 10^5 m^2 , released between 1 and 3 km offshore, for measuring the rate of growth of the patch size; (b) in

Tabla I. Rapidez promedio de la corriente y coeficientes de difusividad en componentes normal (K_x) y paralela (K_y) a la costa. IC es el intervalo de confianza (95%) de la regresión lineal.

Table I. Mean current speed and diffusivity coefficients normal (K_x) and parallel (K_y) to the coast. IC is the confidence interval (95%) of the linear regression.

Fecha	Número de boyas	Duración (h)	Rapidez $m\ s^{-1}$	$K_x \pm IC$ $m^2\ s^{-1}$	$K_y \pm IC$ $m^2\ s^{-1}$
Marzo 1985					
22-23	10	9.50	0.26 (S)	16.90 ± 3.09	4.75 ± 1.07
24	8	8.75	0.21 (S)	8.15 ± 1.58	10.16 ± 0.91
Julio 1985					
2-3	6	5.75	0.21 (N)	2.39 ± 1.11	1.53 ± 0.96
5	10	6.75	0.18 (N)	4.85 ± 3.35	4.82 ± 0.54
6	7	12.75	0.21 (N)	-0.22 ± 0.31	4.15 ± 1.24
10-11	6	12.00	0.13 (N)	2.21 ± 0.43	0.78 ± 0.73
Septiembre 1985					
25-26	14	18.75	0.15 (S,N)	13.19 ± 2.01	7.13 ± 0.85
26-27	8	19.50	0.07 (S,N)	-0.09 ± 0.21	0.65 ± 0.08
26-27	6	18.50	0.07 (S,N)	5.54 ± 0.58	19.17 ± 3.61
27	12	5.00	0.26 (S)	-8.20 ± 1.43	2.75 ± 1.05
28	6	3.75	0.23 (S)	-0.75 ± 1.30	1.37 ± 0.49
29-30	8	9.50	0.17 (S)	4.48 ± 2.80	-0.36 ± 0.26
30	14	8.00	0.35 (S)	-1.57 ± 0.62	1.19 ± 0.40
Enero 1986					
25-26	8	21.75	0.08 (S)	0.34 ± 0.24	3.21 ± 0.81
25-26	8	21.50	0.11 (S)	-0.54 ± 0.28	3.69 ± 0.23
Junio 1986					
4	14	8.00	0.15 (S)	-0.61 ± 0.71	3.35 ± 3.06
4-5	14	16.50	0.26 (S)	0.28 ± 0.36	0.07 ± 0.28
10	8	8.00	0.14 (S)	0.75 ± 4.94	59.82 ± 13.94
11	8	8.25	0.26 (S)	-1.45 ± 1.20	55.30 ± 9.92
15	8	4.00	0.32 (S)	-0.52 ± 0.80	2.24 ± 0.85

ron cada 15 minutos, desde la costa, mediante un radar marino de banda X (ver detalles en Alvarez *et al.*, 1989). Se hicieron dos tipos de distribución inicial de los flotadores: (a) agrupados, formando manchas con áreas iniciales entre 10^4 y 10^5 m², colocados a distancias entre 1 y 3 km de la costa, con objeto de medir su tasa de expansión; (b) en líneas perpendiculares a la costa, con cuatro a ocho flotadores separados entre sí de 200 a 500 m, a fin de medir la variación de la velocidad con respecto a la distancia de la orilla.

Los datos de cada experimento consisten de una serie de posiciones de cada flotador, entre su liberación inicial y su recuperación al final del experimento. Las coordenadas del flotador i al tiempo k son $x_i(k)$, $y_i(k)$ en donde x , y están orientadas en dirección normal y paralela a la costa, respectivamente. Para un grupo de n flotadores,

$$\bar{x}(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i(k), \quad \bar{y}(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i(k)$$

son las coordenadas del centroide, que representa la posición media del grupo. La velocidad de la corriente superficial se estima a partir del desplazamiento del centroide.

La varianza de la posición de n flotadores con respecto al centroide, en componentes normal y paralela a la costa, y la varianza total son, respectivamente:

$$V_x(k) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [x_i(k) - \bar{x}(k)]^2, \quad V_y(k) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [y_i(k) - \bar{y}(k)]^2,$$

$$V(k) = V_x(k) + V_y(k).$$

Los coeficientes de difusión en componentes normal y paralela a la costa y el coeficiente de difusión total se definen, respectivamente, como (ver, por ejemplo, Csanady, 1980):

$$K_x = \frac{1}{2} \frac{\Delta V_x}{\Delta t}, \quad K_y = \frac{1}{2} \frac{\Delta V_y}{\Delta t}, \quad K = \frac{1}{2} \frac{\Delta V}{\Delta t}.$$

lines perpendicular to the shoreline, with four to eight drogues separated by 200 to 500 m, for measuring the current shear with respect to distance from the shore.

The data from each experiment is a series of positions for each drogue, from the initial release to its recovery at the end of the experiment. The coordinates of drogue i at time k are $x_i(k)$, $y_i(k)$, where (x, y) are normal and parallel to the coast, respectively. In the case of a patch of n drogues,

are the coordinates of the centroid, which represents the mean position of the patch. The velocity of the surface current is estimated from the displacement of the centroid.

The variance of the position of n drogues with respect to that of the centroid, in components normal and parallel to the coast, and the total variance are, respectively:

The horizontal diffusion coefficients in components normal and parallel to the coast and the total diffusion coefficient are defined by (see e.g., Csanady, 1980):

En general, los coeficientes obtenidos experimentalmente se denominan "coeficientes de difusividad aparente", o simplemente "difusividad". En este trabajo el cambio temporal se calculó con un ajuste lineal de varianza en función de tiempo, usando el método de cuadrados mínimos.

La velocidad de arrastre del viento sobre la porción expuesta de los flotadores se considera pequeña comparada con la velocidad de la corriente, tomando en cuenta que Murray (1975) y Alvarez *et al.* (1982) usaron flotadores con áreas en proporción de 1:8 y 1:11 (área expuesta : área sumergida) y estimaron un exceso de velocidad menor de 0.03 m s^{-1} , bajo la acción de vientos de 5 a 6 m s^{-1} . Como los flotadores usados en el presente trabajo tuvieron menor área expuesta al viento, con áreas en proporción de 1:21, y la rapidez de los vientos persistentes no fue mayor de 6 m s^{-1} , las trayectorias y velocidades que se reportan en este trabajo no se corrigieron para compensar este efecto.

En las últimas cuatro campañas se midió la corriente subsuperficial con un correntímetro Endeco 174, colocado a 15 m de profundidad y 5 m sobre el fondo, a 4 km de la costa (Fig. 1). La precisión nominal del instrumento es de 0.01 m s^{-1} en rapidez y de 1.4° en dirección. Durante los experimentos se midió la rapidez y dirección del viento con un anemógrafo instalado en la costa. Además, durante las observaciones de enero y junio de 1986 se obtuvieron 13 perfiles verticales de temperatura distribuidos en el área de estudio. Los resultados gráficos de estos muestreos se presentan en Alvarez *et al.* (1989).

RESULTADOS

En total se obtuvieron 20 series con grupos de flotadores y 20 series con líneas. De estas últimas, sólo tres dan información acerca de la corriente a menos de 1 km de la costa, y las series restantes cubren a partir de 2 o 3 km. La duración promedio de las series es doce horas. Algunas duraron sólo cuatro horas debido a que los flotadores quedaron fuera del alcance del radar o porque se acercaron demasiado a la costa. Por lo general, estas series cortas coincidieron con vientos provenientes del cuarto cuadrante, con inten-

Generally, the coefficients obtained experimentally are called "coefficients of apparent diffusivity", or simply "diffusivity". In this paper, the temporal rate of change was calculated with a least squares linear fit of variance vs. time.

The wind drag over the exposed part of the drogues is considered small in comparison to the current speed. Using drogues with 1:8 and 1:11 area proportions (exposed : submerged), Murray (1975) and Alvarez *et al.* (1982) estimated a current excess less than 0.03 m s^{-1} , for 5 to 6 m s^{-1} wind speeds. We assume that the drogues in our experiments had an even smaller wind drag, because the area of the radar reflector was reduced to obtain a 1:21 area proportion, and the persistent wind speeds never exceeded 6 m s^{-1} during the experiments. Therefore, the trajectories and velocities reported below are not corrected for wind drag.

In the last four campaigns, current velocity was measured continuously with an Endeco 174 recording current meter located 15 m below the surface (5 m above the bottom), and 4 km from the coast (Fig. 1). The nominal accuracy of this instrument is 0.01 m s^{-1} in speed and 1.4° in direction. Also, in January and June 1986, vertical profiles of temperature were obtained at 13 stations. Graphic results of these observations are reported in Alvarez *et al.* (1989).

RESULTS

A total of 20 series of patches and 20 series of lines were obtained. Of the latter, only three provide information on the currents within 1 km of the coast; the rest start 2 or 3 km offshore. The average length of the series is twelve hours. Some series lasted only four hours because the drogues either went out of range of the radar or they went too close to shore. In general, these short series occurred under winds from the fourth quadrant, with speeds between 2 and 6 m s^{-1} . A 97-hour series was obtained under exceptional conditions of slow current and weak winds, with variable direction and intensity less than 2 m s^{-1} .

sidad entre 2 y 6 m s⁻¹. Se obtuvo una serie de 97 horas bajo condiciones excepcionales de corriente lenta y vientos débiles con dirección variable e intensidad menor que 2 m s⁻¹.

(a) Corrientes

La rapidez de la corriente superficial fue variable dentro de cada serie y también entre distintas campañas. La rapidez promedio de las series tuvo un intervalo de 0.07 a 0.35 m s⁻¹.

En la Figura 2 se muestran las 20 trayectorias de centroides de los grupos de flotadores superficiales. El desplazamiento fue principalmente a lo largo de la costa pero con distintos sentidos de circulación: hacia el sur durante las campañas de enero, marzo y junio (promedio de 0.21 m s⁻¹ y desviación estándar de 0.08 m s⁻¹), y hacia el norte en las de julio y parte de septiembre (promedio de 0.18 m s⁻¹ y desviación estándar de 0.04 m s⁻¹).

Los datos del correntímetro (Fig. 3) indican que a 15 m de profundidad la corriente invirtió su sentido durante varios días: en los nueve días de medición de julio la corriente fue al NW; en septiembre, los primeros ocho días muestran corriente al NW, y en sentido opuesto durante los siguientes tres días; enero y febrero muestran inversiones alternadas, con duración de dos a cuatro días, mientras que en mayo y junio se observó flujo al sur durante los doce días de medición.

La corriente superficial a lo largo de la costa, obtenida a partir de los centroides, es 1.5 a 2 veces más rápida que la observada a 15 m pero, en general, ambas tienen el mismo sentido de flujo, como se aprecia en la Figura 3. En las series obtenidas con el correntímetro se distinguen oscilaciones con frecuencia aparentemente semidiurna. Con series temporales de tres meses, obtenidas posteriormente, se calculó que esta frecuencia tiene amplitud de 0.05 m s⁻¹.

Las 20 series de líneas de flotadores indican que la corriente fluyó en el mismo sentido entre 1 y 7 km de la costa. Las 17 series obtenidas entre 2 y 7 km muestran un gradiente de velocidad pequeño; en cambio, en tres series próximas a la costa se observó corriente más lenta cerca de la orilla. La

(a) Currents

The speed of the surface current was variable within each series, and also between campaigns. The mean speed of the series ranged from 0.07 to 0.35 m s⁻¹.

Figure 2 shows the 20 centroid trajectories of the patches of surface drogues. The displacement was mainly along the coast, but with different directions: toward the south in the January, March and June campaigns (mean 0.21 m s⁻¹, standard deviation 0.08 m s⁻¹), and toward the north in July and part of September (mean 0.18 m s⁻¹, standard deviation 0.04 m s⁻¹).

The current meter data (Fig. 3) indicate that 15 m below the surface, the current reversed its direction for several days: in the nine days of the July observations the current was to the NW; in September, the first eight days the current was to the NW, and in the opposite direction for the next three days; in January and February there were alternating inversions, lasting from two to four days. In May and June, there was flow to the south for the twelve days of observation.

The long-shore surface current, as measured by the centroids, was 1.5 to 2 times faster than that observed by the current meter at 15 m, with the sense of the flow in general agreement, as shown by Figure 3. The current meter time series show oscillations apparently semidiurnal. Harmonic analysis of a three-month current meter record, obtained in a subsequent experiment, revealed that this frequency has an amplitude of 0.05 m s⁻¹.

The 20 series of lines of drogues indicate that the current flowed in the same direction between 1 and 7 km from the coast. The 17 series obtained between 2 and 7 km show a small gradient; by contrast, in three series obtained nearer to the coast, slower current was observed near the shore. Two of the three series (July 1985 and June 1986) are presented in Figure 4, which show the near-shore shear, under conditions of relatively fast currents. Taking into account the three experiments, and assuming zero speed at the shore, the spatial variation is approximately parabolic, with maximum horizontal gradient ($2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) inside the first kilometer, and

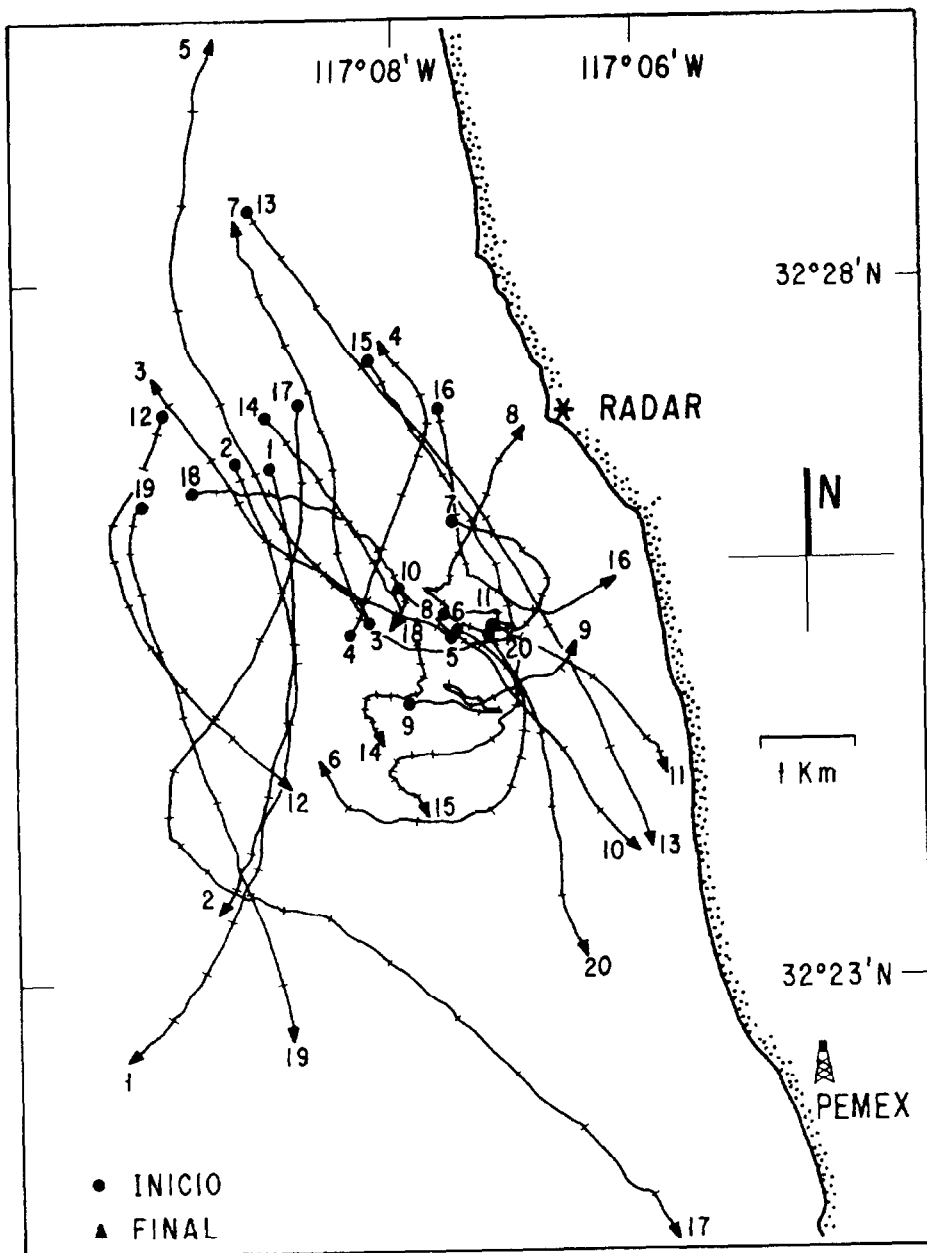


Figura 2. Trayectorias de los centroides de grupos de flotadores, en los 20 experimentos realizados.
Figure 2. Trajectories of the centroids of the 20 experiments with groups.

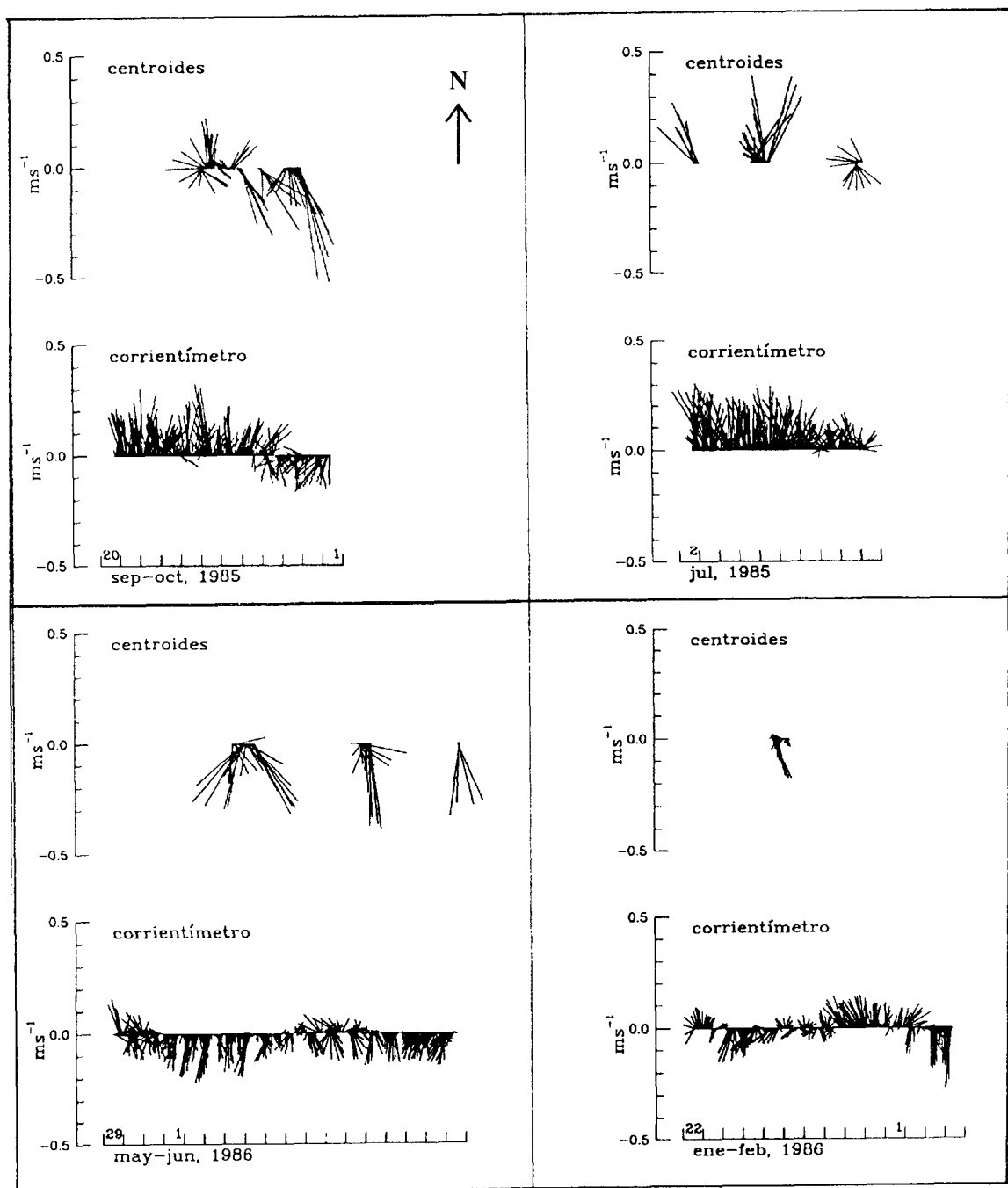


Figura 3. Series temporales de velocidad de la corriente obtenidas frente a San Antonio del Mar. Los vectores representan promedios horarios, obtenidos del movimiento de los centroides de flotadores superficiales y de un corrientímetro a 15 m de profundidad.
Figure 3. Time series of current velocity obtained off San Antonio del Mar. The vectors represent hourly means, obtained from the centroids of groups of surface drogues, and from the current meter.

Figura 4 presenta dos de las tres series (julio de 1985 y junio de 1986) que muestran el corte cercano a la costa, en condiciones de corriente relativamente rápida. Tomando en cuenta los tres experimentos, y suponiendo velocidad cero en la orilla, la variación espacial de velocidad es aproximadamente parabólica, con gradiente horizontal máximo de $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ dentro del primer kilómetro, y de 10^{-5} s^{-1} o menor, a más de 2 km de la costa. En otras palabras, la rapidez de la corriente cambió hasta 0.20 m s^{-1} en el primer kilómetro, pero fue casi uniforme más allá de 2 km de la costa.

(b) Dispersión

En los experimentos con flotadores agrupados se observó que además del desplazamiento producido por la corriente, hubo dispersión con respecto al centroide de cada grupo. En general, los grupos que inicialmente ocupaban áreas de cerca de 0.7 km^2 se extendieron horizontalmente hasta cubrir áreas casi dos veces mayores, en tiempos de 4 a 16 horas (ver los ejemplos de la Fig. 5). Si suponemos áreas circulares equivalentes, estas cifras indican que las manchas tuvieron una tasa de crecimiento radial entre 0.003 y 0.013 m s^{-1} por efecto de la difusión horizontal. Esta tasa de crecimiento radial es dos órdenes de magnitud menor que la advección promedio.

En 16 de los 20 experimentos con grupos de flotadores se observó un notable incremento de la varianza con el tiempo; en tres casos el incremento fue pequeño, y en un caso se observó una tendencia opuesta, es decir, una disminución de la varianza al aumentar el tiempo. Sólo siete experimentos muestran un cambio aproximadamente lineal, mientras que en los restantes la razón de cambio de la varianza se incrementa conforme aumenta el tiempo, indicando una dependencia no lineal entre estas variables. Cuatro experimentos muestran oscilaciones de la varianza superpuestas a la tendencia general de crecimiento, indicando que el coeficiente de difusividad fue variable en intervalos de tiempo de pocas horas.

La Tabla I contiene los resultados de los experimentos con flotadores agrupados. Se incluyen la rapidez promedio de la corriente, el

with a gradient of 10^{-5} s^{-1} or less, beyond 2 km from the coast. That is, the current speed changed by up to 0.20 m s^{-1} inside the first kilometer, and was almost uniform beyond 2 km from the coast.

(b) Dispersion

In the experiments with patches, or grouped drogues, dispersion with respect to the centroid was apparent, in addition to the advection produced by the current. In most of these experiments, the groups covering initial areas of $\sim 0.7 \text{ km}^2$ spread horizontally, covering up to twice the initial area in four to six hours (see examples in Fig. 5). Assuming equivalent circular areas, these figures indicate that the patches had a radial growth rate between 0.003 and 0.013 m s^{-1} due to horizontal eddy diffusion. This rate of radial growth is two orders of magnitude smaller than the mean advection velocity.

In 16 of the 20 experiments with groups, a notable increase of the variance with time was observed; in three cases the increase was small, and in one case the variance diminished with time. Only seven experiments exhibit an approximately linear change: in the rest, the rate of change of the variance increases with time, indicating a nonlinear dependence of variance with time. Four experiments show oscillations of the variance superimposed on the general growth pattern, showing that the diffusivity coefficient varied in time intervals of a few hours.

Table I shows the results of the experiments with patches of drogues; it includes the mean current speed, the diffusivity coefficient in components normal (K_x) and parallel (K_y) to the coast, and the confidence interval obtained from the linear regression.

In 13 cases with southward flow the mean speed was 0.21 m s^{-1} , ranging between 0.08 and 0.35 m s^{-1} ; under these conditions, the diffusivity coefficients along and perpendicular to the coast (K_y and K_x) had averages of 11.3 and $1.3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, respectively. For both components the standard deviation is at least twice the average. In four experiments with northward current the mean speed was 0.18 m s^{-1} , and ranged from 0.13 to 0.21 m s^{-1} . The diffusivity coefficients along

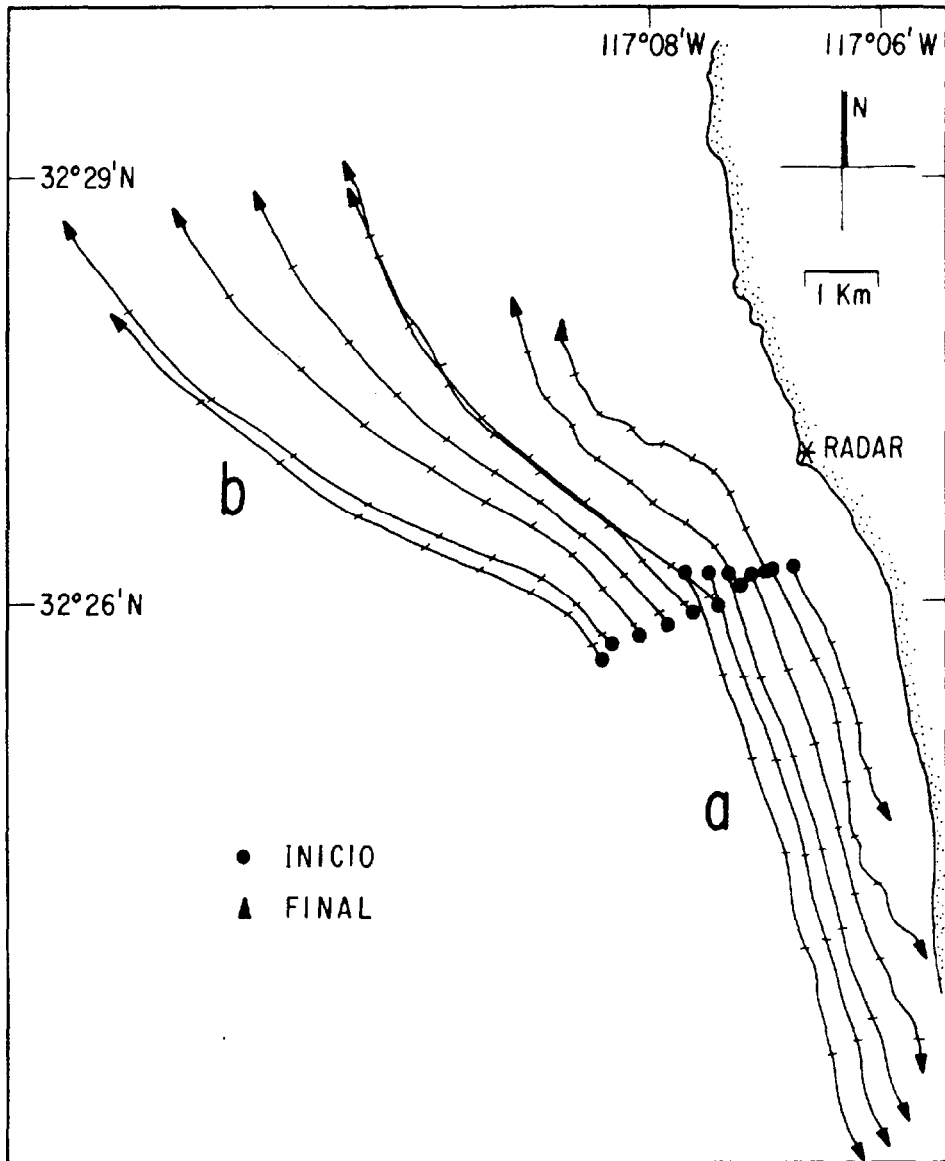


Figura 4. Trayectorias de flotadores superficiales: (a) con flujo al sur en junio 3 de 1986 (17:00-23:15); (b) con flujo al norte en julio 4-5 de 1985 (22:45-07:45). Las marcas sobre las trayectorias indican una hora.

Figure 4. Trajectories of surface drifters: (a) with southward flow, June 3 1986 (17:00-23:15); (b) with northward flow, July 4-5 1985 (22:45-07:45). The ticks in the trajectories indicate one-hour intervals.

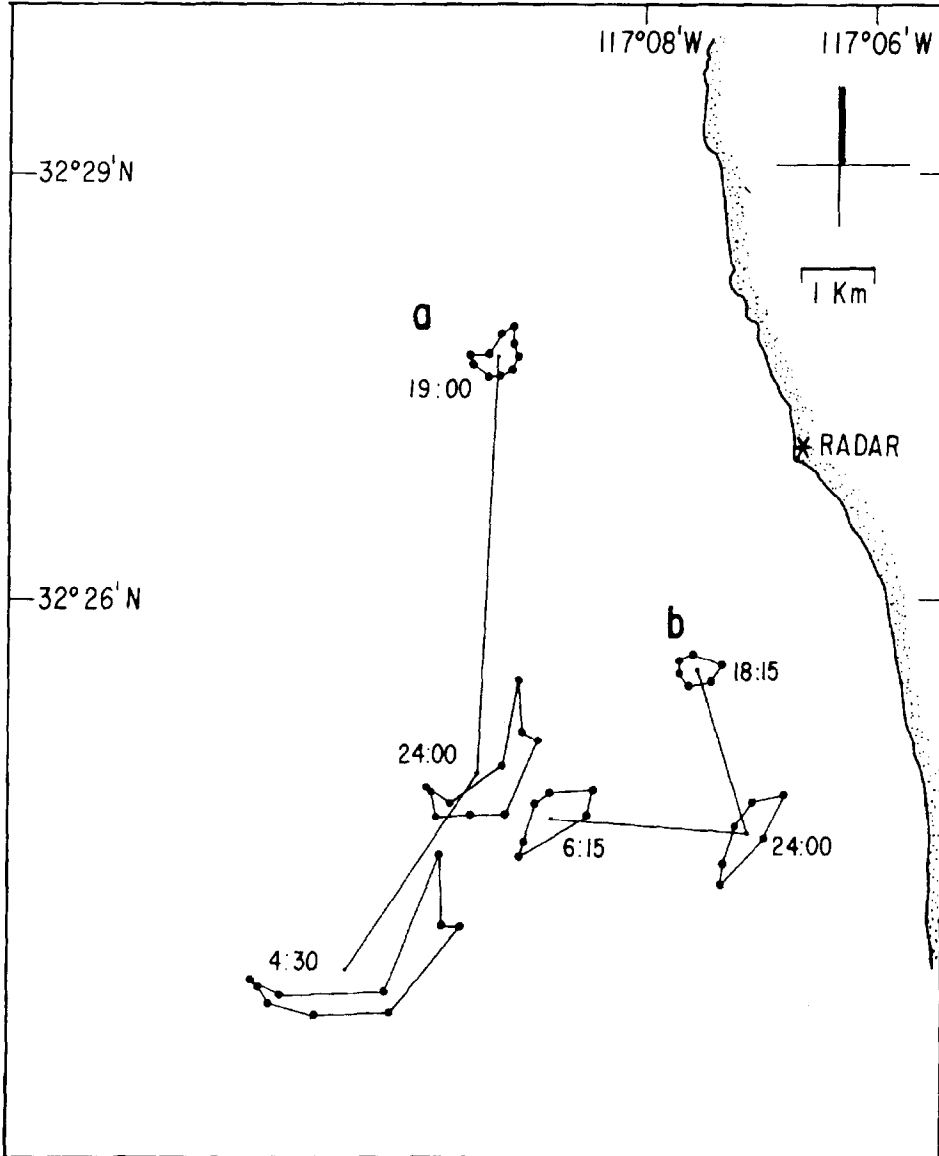


Figura 5. Desplazamiento de dos grupos de flotadores: (a) el 22-23 de marzo de 1985 (19:00-04:30); (b) el 11-12 de julio de 1985 (18:15-06:15).

Figure 5. Trajectories of two groups of drogues: (a) March 22-23 1985 (19:00-04:30); (b) July 11-12 1985 (18:15-06:15).

Tabla II. Coeficientes de difusividad total obtenidos por regresión lineal (K) y por el incremento total de la varianza (K'). IC es el intervalo de confianza (95 %), ϵ es el error de K' debido al error de posición de los flotadores.

Table II. Total diffusivity coefficients obtained by linear regression (K) and by the total increase in variance (K'). IC is the confidence interval (95%), ϵ is the error in K' due to the error in positioning the drogues.

Fecha	$K \pm IC$ $m^2 s^{-1}$	Error porcentual	$K' \pm \epsilon$ $m^2 s^{-1}$	Error porcentual
Marzo 1985				
22-23	21.65 ± 2.36	22	21.34 ± 0.97	9
24	18.31 ± 1.90	21	15.44 ± 1.00	12
Julio 1985				
2-3	3.93 ± 1.97	100	3.93 ± 0.62	19
5	9.68 ± 3.62	74	11.4 ± 1.13	19
6	3.93 ± 1.47	75	2.14 ± 0.40	37
10-11	2.99 ± 1.04	70	2.49 ± 0.40	32
Septiembre 1985				
25-26	20.23 ± 2.72	27	17.84 ± 0.77	8
26-27	0.56 ± 0.25	90	0.27 ± 0.13	96
26-27	24.71 ± 3.29	27	29.06 ± 0.13	5
27	-5.45 ± 1.52	56	-3.45 ± 1.36	79
28	0.63 ± 0.63	200	0.78 ± 0.78	200
29-30	4.12 ± 2.88	139	1.88 ± 0.72	87
30	-0.38 ± 0.98	515	0.28 ± 0.57	407
Enero 1986				
25-26	3.55 ± 0.86	48	2.65 ± 0.27	20
25-26	3.15 ± 0.38	24	4.42 ± 0.32	14
Junio 1986				
4	2.73 ± 2.72	199	4.20 ± 0.70	33
4-5	0.35 ± 0.35	200	0.88 ± 0.23	52
10	60.5 ± 9.52	31	64.0 ± 1.97	6
11	53.8 ± 11.06	41	52.9 ± 1.67	6
15	1.71 ± 0.56	65	2.29 ± 0.79	68

coeficiente de difusividad en componentes normal (K_x) y paralela (K_y) a la costa y los intervalos de confianza que se obtienen de la regresión lineal.

En 13 experimentos con corriente al sur la rapidez promedio fue $0.21 m s^{-1}$ y varió entre 0.08 y $0.35 m s^{-1}$. Bajo estas condiciones, los coeficientes de difusividad a lo largo (K_y) y perpendicular a la costa (K_x), tuvieron promedios de 11.3 y $1.3 m^2 s^{-1}$, respectivamente. En ambos casos la desviación estándar es al menos dos veces el promedio. En cuatro experimentos con corriente hacia el

(K_y) and normal (K_x) to the coast had averages of 2.8 and $2.3 m^2 s^{-1}$, respectively. In this case the standard deviation is similar to the mean. In 13 of the 20 experiments, the long-shore diffusivity coefficient was larger than that perpendicular to the coast.

Among the total diffusivity coefficients K (Table II), there are three significant values that deviate markedly from the mean: one negative ($-5.5 m^2 s^{-1}$), and two positive (60.6 and $53.8 m^2 s^{-1}$); all of them were obtained with southward current, with speeds 0.26 , 0.14 and $0.26 m s^{-1}$, respectively.

norte la rapidez promedio fue de 0.18 m s^{-1} , con intervalo de 0.13 a 0.21 m s^{-1} . Los coeficientes de difusividad a lo largo (K_y) y perpendicular a la costa (K_x), tuvieron promedios de 2.8 y $2.3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, respectivamente. En este caso la desviación estándar es similar al promedio. En 13 de los 20 experimentos, el coeficiente de difusividad a lo largo de la costa fue mayor que el perpendicular a la costa (Tabla I).

Entre los coeficientes de difusividad total K (Tabla II) hay tres valores significativos que se apartan notablemente del promedio. Uno, negativo, con valor de $-5.5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, y dos positivos, con valores de 60.6 y $53.8 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Los tres se obtuvieron bajo condiciones de corriente al sur, con rapidez de 0.26 , 0.14 y 0.26 m s^{-1} , respectivamente.

Se examinaron dos fuentes de error en el cálculo del coeficiente de difusividad total. Una se debe al error de localización de los flotadores y la otra resulta de la falta de ajuste en la regresión lineal de varianza vs. tiempo. Esta última se reporta en la Tabla II como un intervalo de confianza para el coeficiente de difusividad total K . Además, se calculó el efecto del error de localización ($\epsilon = 20 \text{ m}$) sobre un coeficiente de difusividad K' , obtenido a partir de los valores inicial y final de la varianza total. En la Tabla II se dan los errores porcentuales de K y K' : los cuatro coeficientes con valor menor que $1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ tienen errores porcentuales mayores de 50% , mientras que en los coeficientes mayores de $10 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ estos errores son menores de 20% . En el ajuste de la recta de varianza contra tiempo, los intervalos de confianza de la pendiente son generalmente más anchos que la banda del error que resulta del posicionamiento. Por lo tanto, la falta de ajuste produce una incerteza mayor que el error de localización de los flotadores.

(c) Un modelo lagrangeano de dispersión

En esta sección presentamos un modelo sencillo de dispersión a fin de enfatizar la utilidad de los parámetros de dispersión medidos.

La solución numérica de la ecuación de advección-difusión puede obtenerse con aproximaciones de diferencias o elementos

Two sources of error in the calculation of the total diffusivity coefficient (K) were examined. One is the error in the positioning of the drogues, and the other is the lack of fit in the variance vs. time linear regression. The latter is reported in Table II as a confidence interval for the diffusivity coefficient K . The effect of the positioning error ($\epsilon = 20 \text{ m}$) over a diffusivity coefficient K' , obtained from the initial and final values of the variance, was also investigated. Table II shows the percent errors of K and K' : the four coefficients less than $1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ have relative errors over 50% , while the coefficients larger than $10 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ have errors under 20% . In the variance vs. time linear fit, the confidence intervals of the slope are generally wider than the error bar due to positioning. This means that the lack of fit produces more uncertainty than that from the drogue positioning.

(c) A lagrangian model of dispersion

In this section we present a simple dispersion model in order to emphasize the usefulness of the observed dispersion parameters.

The numerical solution of the advection-diffusion equation can be obtained by approximations by finite differences or finite elements, or by simulating a patch of contaminant as a large number of particles. The latter procedure deals better with the advective terms, and has been used successfully to simulate dispersion in turbulent boundary layers, plumes and contaminant patches (Ahlstrom, 1975; Bork and Maier-Reimer, 1978; Allen, 1982; Hunter, 1980, 1983, 1987).

The model used here is based on the work of Hunter (1980, 1983, 1987), and uses as input the results described above. The substance whose dispersion is to be simulated is represented by a certain amount of particles, which move according to a specified current field. A random movement which simulates the process of fickian diffusion is superimposed on the advection of the particles.

Fickian diffusion in one dimension produces gaussian distributions, with variance $V = 2Kt$ (see, e.g., Csanady, 1980), where t is time and K is the diffusion coefficient. On the

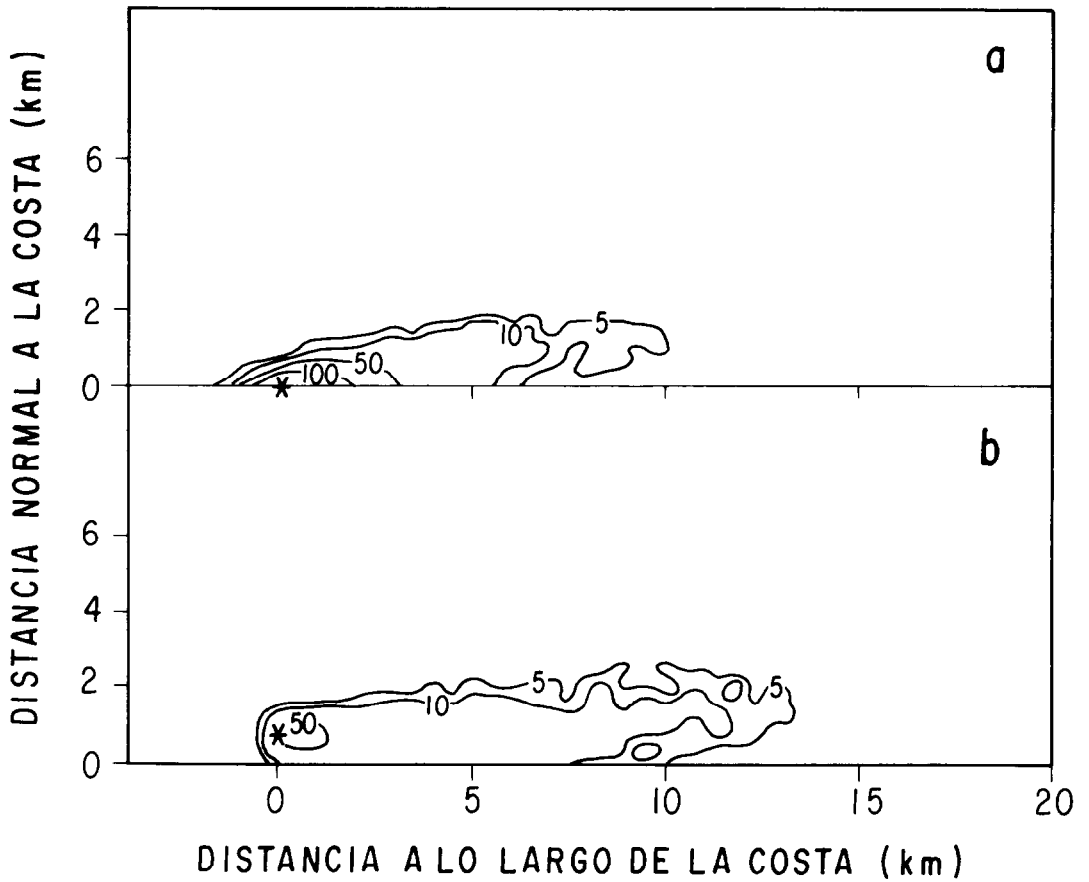


Figura 6. Simulación de la dispersión de partículas después de 24 horas del inicio de una descarga casi continua *. Coeficiente de difusividad: $5.3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$; velocidad a 2 km de la costa: 0.19 m s^{-1} ; número total de partículas: 2,405. (a) Descarga en la costa (concentración máxima: 354 partículas). (b) Descarga a 1 km de la costa (concentración máxima: 57 partículas).

Figure 6. Simulation of the dispersion of particles 24 hours after initiating the release of particles; * indicates the position of the outfall. Diffusivity coefficient: $5.3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$; velocity 2 km offshore: 0.19 m s^{-1} ; total number of particles: 2,405. (a) Coastal outfall (maximum concentration: 354 particles). (b) Outfall 1 km offshore (maximum concentration: 57 particles).

finitos, o bien simulando una mancha de contaminante mediante un gran número de partículas. Con este último procedimiento se pueden tratar con mayor exactitud los términos advectivos y se ha logrado simular adecuadamente la dispersión en capas límite turbulentas, en plumas y en manchas de

other hand, if one makes a particle jump randomly in one dimension, after n jumps its distance to the starting point will be given by $x = L(2p - n)$, where L is the length of the jump and p comes from a binomial symmetric probability distribution, with zero mean and variance $V' = L^2n$. Therefore, the variance of

contaminantes (Ahlstrom, 1975; Bork y Maier-Reimer, 1978; Allen, 1982; Hunter, 1980, 1983, 1987).

En nuestro caso, el modelo se basa en el trabajo de Hunter (1980, 1983, 1987) que usa como datos de entrada los resultados antes descritos. La substancia cuya dispersión se desea simular se representa como una cierta cantidad de partículas que se mueven de acuerdo con un campo de corrientes especificado. A la advección de partículas se superpone un movimiento aleatorio que simula el proceso de difusión fickiana.

La difusión fickiana produce distribuciones de forma gaussiana, con varianza $V = 2Kt$ (ver, por ejemplo, Csanady, 1980), donde t es el tiempo y K es el coeficiente de difusión. Por otra parte, si se hace saltar una partícula en una dimensión en forma aleatoria, después de n pasos su distancia al punto original estará dada por $x = L(2p - n)$, donde L es el tamaño del salto y p viene de una distribución de probabilidad binomial simétrica, con promedio cero y varianza $V' = L^2n$. Por lo tanto, la varianza de un conjunto (ensamble) de partículas varía linealmente con el tiempo, como en el caso fickiano. Igualando V y V' :

$$2 K n \delta t = L^2 n \quad (1)$$

donde δt es el intervalo de tiempo entre saltos. Así, para simular el proceso de difusión fickiana con coeficiente de difusión K , se requiere que las partículas salten una distancia L , cada δt . Este procedimiento puede extenderse a dos o tres dimensiones con resultados similares (Hunter, 1980).

El modelo utilizado es de dos dimensiones, verticalmente homogéneo, con una corriente paralela a la costa y un coeficiente de difusión constante. La velocidad de la corriente tiene un perfil parabólico entre 0 y 2 km de la costa, y lineal entre 2 y 10 km; además, se especifica una componente constante (o residual) y una componente oscilatoria con frecuencia semidiurna. Estas condiciones pueden ser hipotéticas o provenir de observaciones de campo, como en este caso, e introducirse en forma interactiva al operar el modelo.

an ensemble of particles varies linearly with time, like in the fickian case. Equating V and V' :

$$2 K n \delta t = L^2 n \quad (1)$$

where δt is the time interval between jumps. Thus, in order to simulate the process of fickian diffusion with coefficient K , it is required for the particles to jump a distance L every δt . This procedure can be extended to two or three dimensions with similar results (Hunter, 1980).

The model presented here is two-dimensional, vertically homogeneous, with a current (residual plus semidiurnal) parallel to the coast and a constant diffusion coefficient. The current velocity has a parabolic profile between 0 and 2 km and linear between 2 and 10 km from the coast. These conditions may be hypothetical or, like in this case, they can be based on field observations.

The diffusive part of the model was verified against the analytical fickian solution, by running the model without advection or boundaries, for 24 hours with 100 particles. The proportional error, defined as $(m-f)/m$, where m is the standard deviation of the distribution of particles and f is the standard deviation of the fickian solution, varied between 3% and 9%, which is in agreement with the 7% estimated by Hunter (1980) for the same number of particles.

A quasi-continuous discharge is simulated by releasing five particles every three minutes, which are then dispersed by the combination of diffusion and sheared advection. A parabolic profile was specified for the current speed (based on the three near-shore lines of drogues), increasing from zero at the coast to 0.19 m s^{-1} at 2 km; thereafter, speed increases by $6 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$ per kilometer. The oscillatory current has a similar profile, but with amplitude 0.05 m s^{-1} at 2 km. To simulate horizontal diffusion we used the average of the positive values of diffusivity normal to the coast, $\bar{\kappa} = 5.3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. The time interval between jumps, δt , was chosen as three minutes, the size of the jump was calculated from equation (1); the direction of the jump is

El funcionamiento de la parte difusiva del modelo se verificó haciendo corridas sin advección y sin fronteras para comparar las simulaciones con los de la solución analítica fickiana. Después de simular la difusión de 100 partículas durante 24 horas, se calculó el error proporcional, definido como $(m-f)/m$, donde m es la desviación estándar de la distribución de partículas dada por el modelo, y f es la desviación estándar de la solución fickiana. El error varió entre 3% y 9%, porcentaje similar al 7% citado por Hunter (1980) para el mismo número de partículas.

Se simuló una descarga casi continua soltando cinco partículas cada tres minutos, las cuales se dispersan en el mar bajo el efecto de difusión y de advección con corte horizontal. Usando los resultados de tres experimentos con líneas de flotadores cercanas a la costa, se definió un perfil lateral parabólico de velocidad que aumenta desde 0 m s^{-1} en la orilla, hasta 0.19 m s^{-1} a 2 km de la costa; más allá se especifica un incremento a razón de $6 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$ cada kilómetro. La componente oscilatoria tiene un perfil lateral similar, pero con amplitud de 0.05 m s^{-1} a 2 km de la costa. Para simular la difusión horizontal se usó el promedio de los valores positivos del coeficiente de difusividad normal a la costa, $\bar{\kappa}_x = 5.3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. El intervalo de tiempo entre saltos, δt , se escogió igual a tres minutos, la longitud del salto se calculó con la ecuación (1); la dirección del salto se determinó seleccionando aleatoriamente un ángulo entre 0 y 360° . La costa se comporta como una frontera reflejante.

En la Figura 6a se muestra la distribución 24 horas después del inicio de una descarga en la costa (para entonces la distribución es estacionaria); se muestra un área de $10 \times 20 \text{ km}$, con contornos que representan el número de partículas en cuadrados de $0.5 \times 0.5 \text{ km}$. Con un total de 2,405 partículas, se tiene una concentración máxima de 354 y la isolénea de cinco partículas define una mancha que se extiende cerca de 8 km a lo largo de la costa y 2 km mar afuera. En contraste, si la descarga se hace a 1 km de la costa (Fig. 6b), el máximo es de sólo 57 partículas, y la isolénea de cinco partículas define una mancha que se distribuye 12 km a lo largo de la costa y 3 km hacia mar afuera. En este caso, las concentraciones de partículas en la costa disminuyen notablemente.

determined randomly, with angle between 0 and 360° . The coast behaves as a reflecting boundary.

Figure 6a shows the distribution of particles 24 hours after a coastal release was initiated (by this time the distribution is stationary); an area of $10 \text{ km} \times 20 \text{ km}$ is shown, and the contours represent the number of particles in squares of $0.5 \text{ km} \times 0.5 \text{ km}$. A total of 2,405 particles were released; the maximum concentration is 354 particles, and the contour of five particles defines a patch stretching 8 km along the coast and 2 km offshore. By contrast, if the discharge is moved 1 km offshore (Fig. 6b), the maximum concentration is only 57 particles, and the five particle contour defines a patch 12 km along the coast and 3 km normal to it. The concentration of particles at the coast is notably reduced in the latter case.

DISCUSSION

Most previous studies on coastal currents have been made more than 70 km north and more than 100 km south of the area, with observations lasting several months (Winant, 1980, 1983; Winant and Bratkovich, 1981; Barton, 1984; Lentz and Winant, 1986). Common features in these observations are a dominant subinertial flow parallel to the isobaths (almost parallel to the coast) over the entire water column, and a marked variability in time. Current inversions were observed in events lasting from two days to over one week.

Our data also show a marked variability, and the occurrence of flow inversion events in scales similar to those described by other authors. However, in order to relate these two types of events, it is necessary to sample a wider area, taking into account that the longshore coherence scale in southern California is from 25 to 100 km, and that the flow inversions occur in times of the order of 10 days. It is also important to study the relationship between the variability of the coastal currents and the filaments and eddies of the mesoscale circulation that have been observed further offshore. These structures have been detected by detailed hydrography, drogues and satellite imagery off California and Baja California (Davis, 1985; Niiler *et al.*, 1989; Poulain and Niiler, 1989).

DISCUSION

La mayoría de los trabajos previos sobre corrientes costeras se han hecho a más de 70 km al norte y a más de 100 km al sur de la región de Tijuana, con observaciones durante varios meses (Winant, 1980, 1983; Winant y Bratkovich, 1981; Barton, 1985; Lentz y Winant, 1986). Los rasgos comunes en esas observaciones son un flujo subinercial dominante paralelo a las isobatas (casi paralelo a la costa) en toda la columna de agua, y una marcada variación temporal. Se observaron inversiones de la corriente en eventos cuya duración varía desde dos días hasta más de una semana.

Los datos reportados aquí, también muestran una variación temporal notable, y la ocurrencia de eventos de inversión del flujo en las escalas descritas por otros autores. Sin embargo, para poder correlacionar los dos tipos de eventos, deben hacerse muestreos en una región más amplia, tomando en cuenta que las escalas de coherencia a lo largo de la costa son entre 25 y 100 km en el sur de California, y que las inversiones de flujo se dan en tiempos del orden de 10 días. Además, es importante estudiar la relación entre la variabilidad de las corrientes cercanas a la costa y los filamentos y remolinos de la circulación a mesoescala que se han observado más lejos de la costa. Estas estructuras se han detectado mediante hidrografía detallada, cuerpos de deriva e imágenes de satélite frente a las costas de California y Baja California (Davis, 1985; Niiler *et al.*, 1989; Poulain y Niiler, 1989).

La polarización de la corriente en dirección paralela a la costa es una característica notable que coincide con lo observado en la costa del sur de California. En nuestro caso, este flujo alineado con la costa se observó con trayectorias de boyas superficiales a distancias entre 1 y 7 km de la costa y con un correntímetro situado a 4 km de la misma, a 15 m de profundidad. Existe una notable coherencia en la dirección del flujo dentro de los primeros 5 km y un gradiente lateral de rapidez dentro de los primeros 2 km fuera de la costa.

Los 20 coeficientes de difusividad total K varían dentro de un intervalo de dos órde-

The polarization of the current in the direction parallel to the coast is a notable feature and agrees with the observations made off southern California. In our case, this flow was observed with surface drogues located between 1 and 7 km offshore and with a current meter moored 4 km offshore, 15 m below the surface. There is a notable coherence in the flow direction in the first 5 km, and a lateral gradient of speed inside the first 2 km.

The 20 total diffusivity coefficients vary within two orders of magnitude, with a mean of $11.5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. This variation is large, compared with that in the Okubo (1971) diffusion diagrams, which summarize the results of some 20 experiments with scales between 0.1 and 100 km. The mean coefficient is also larger than that calculated from the diffusion diagrams, both for the ocean (Okubo, 1971) and for lakes (Lam *et al.*, 1984). In our experiments, the mean diffusion scale "l" (defined as three times the standard deviation of the drogue distributions) is 10^3 m . A diffusion coefficient of $0.58 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ is predicted by the Okubo diagrams; i.e., one order of magnitude smaller than that observed. Okubo (1971) points out that the variance varies, depending presumably upon the oceanographic conditions, by an order of magnitude or more for the same diffusion time. In our case, the experiments were made near the coast, where the current had a marked horizontal shear. In contrast, the observations analyzed by Okubo (1971) were made far from boundaries in order to avoid this effect, and they were made with dye tracers, not with drogues.

In a comparative experiment of scale similar to ours, Yanagi *et al.* (1982) found that the rate of change of the variance of a patch of fluorescent tracer was larger than that of a group of surface drogues. This suggests that the diffusivity coefficients are underestimated in experiments with drogues, probably because the vertical shear has an effect on dye tracers but not on drogues. We observed diffusivity coefficients larger than expected, and we assume it is due to horizontal shear effects in the near-shore current.

Two of the total diffusivity coefficients are negative, although only one is significant. This can happen when observing only the

nes de magnitud y tienen un promedio de $11.5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Esta variación es grande, comparada con la de los diagramas de difusión de Okubo (1971), quien resume los resultados de 20 experimentos hechos en escalas entre 0.1 y 100 km. El coeficiente promedio es también mayor que el calculado con los diagramas de difusión, tanto para el océano (Okubo, 1971) como para lagos (Lam *et al.*, 1984). En nuestros experimentos, la escala promedio de difusión "l", es 10^3 m (definida como tres veces la desviación estándar de la distribución de flotadores), y de acuerdo a los diagramas de Okubo le corresponde un coeficiente de difusión de $0.58 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$; esto es, un orden de magnitud menor que la difusividad observada. Este autor señala que para un mismo tiempo de difusión la varianza puede cambiar hasta en un orden de magnitud, supuestamente como resultado de las condiciones oceanográficas. En nuestro caso, los experimentos se hicieron cerca de la costa, en donde se observó un gradiente lateral de velocidad de la corriente. En contraste, las observaciones analizadas por Okubo (1971) se hicieron lejos de las fronteras para evitar este efecto y se usaron manchas de tinta, en vez de flotadores.

En un experimento comparativo realizado en escala similar a la del presente estudio, Yanagi *et al.* (1982) determinaron que la razón de cambio de varianza de una mancha de tinta fluorescente fue mayor que la de un grupo de flotadores superficiales. Esto sugiere que el coeficiente de difusividad se subestima en los experimentos con flotadores, probablemente porque los efectos de corte vertical afectan la difusión horizontal de la tinta pero no la de los flotadores. En el presente trabajo se observaron coeficientes de difusividad mayores que lo esperado y se supone que es debido a los efectos de corte horizontal en la corriente próxima a la costa.

Dos de los coeficientes de difusividad total resultaron negativos, aunque sólo uno es significativo. Esto es factible cuando se mide únicamente el campo bidimensional de corrientes, en el cual el movimiento de partículas flotantes puede estar afectado por singularidades del campo de velocidad, tales como convergencias. Estos procesos son importantes para la difusión horizontal y han sido estudiados teóricamente por Okubo (1970). En un estudio experimental similar al nuestro,

two-dimensional field of currents, in which the movements of floating particles may be affected by singularities of the current field, such as convergences. This is an important process to horizontal diffusion, and has been studied theoretically by Okubo (1970). In an observational experiment similar to ours, Murthy (1975) observed contractions in the dimension of a group of 10 free surface drogues, in a time scale of about ten hours. He points out that the convergent and divergent fields act like antidiffusive agents which counteract the dispersive action of turbulence. Near boundaries, currents with a component toward the coast can produce regions of convergence, where floating matter tends to concentrate. We assume that these agents acted in some cases to counteract the component of diffusion normal to the coast and produced coefficients K_x near zero, and even negative (Table I).

The observed diffusivity coefficients include the shear effect, especially K_y , which on average, is ten times larger than K_x . Therefore, in the simulation, the mean of the positive K_x was used. By excluding the negative K_x we avoid, in part, the influence of near-shore convergences.

A notable result of the simulation is that the maximum concentration in the patch is reduced by a factor of 5 when the discharge is made 1 km offshore, instead of directly at the coast. This is because at that distance, the reflecting effect is notably reduced, allowing a more efficient diffusion in all directions, and because the particles are removed faster from the source, due to the larger advection velocity.

By assuming a fickian diffusion process, we were able to apply the dispersion parameters obtained in the field, using a statistical model which is simple but consistent with the pragmatic objectives of the theory of diffusion. According to Morales-Chávez (1989), the coliform bacteria discharged into the sea in the area of this study form an elongated path which hugs the coast for several kilometers. This is in qualitative agreement with the patch obtained in the simulation; however, there is evidence of a notable vertical variation (stratification, vertical shear, coliform concentration) which is not included in the

Murthy (1975) observó contracciones en las dimensiones de un grupo de 10 flotadores libres superficiales, en escala temporal cercana a 10 horas. El autor señala que los campos de flujo divergentes y convergentes actúan como agentes antidifusivos que anulan la acción dispersiva de la turbulencia. Especialmente cerca de las fronteras, las corrientes con una componente hacia la costa pueden producir regiones de convergencia en donde la materia flotante tiende a concentrarse. Suponemos que estos procesos actuaron en algunos casos para contrarrestar la difusión normal a la costa y produjeron coeficientes K_x cercanos a cero, e incluso negativos (Tabla I).

Los coeficientes de difusividad observados incluyen el efecto de corte, sobre todo los coeficientes K_y que, en promedio, son diez veces mayores que K_x . Por lo tanto, en la simulación se usó el promedio de los coeficientes K_x positivos. Al excluir los valores negativos de K_x se evita, en parte, la influencia de posibles convergencias cercanas a la orilla.

Un resultado notable de la simulación es que la concentración máxima de partículas se reduce por un factor de 5 cuando la descarga se hace a 1 km de la orilla, en vez de hacerla directamente en la costa. Esto se debe a que a esa distancia el efecto reflejante se reduce en forma notable, permitiendo una difusión más eficiente en todas direcciones, y a que las partículas se alejan más rápidamente de la fuente, a causa de mayor velocidad de advección.

El suponer un proceso de difusión fickiana permitió aplicar los parámetros de dispersión obtenidos en el campo, usando un modelo estadístico simple pero consistente con los propósitos pragmáticos de la teoría de difusión. Según Morales-Chávez (1989), las bacterias coliformes que se descargan al mar en la región de estudio forman una mancha alargada que permanece junto a la costa por varios kilómetros. Esta característica es cualitativamente similar a la de la mancha obtenida con la simulación; sin embargo, hay evidencias de una variación notable en la vertical (estratificación, corte vertical, concentración de coliformes) que no se resuelve con este modelo. Esa variación debe tomarse en

model. More complex models than that described here are needed in order to make realistic predictions of this discharge.

CONCLUSIONS

In five measurement periods of ~10 days each, coastal currents of variable speed were observed, with mean $\sim 0.20 \text{ m s}^{-1}$. The most consistent feature of the different experiments is the orientation of the flow in a direction almost parallel to the coast, but with inversions in the flow direction, lasting several days.

The long-shore current was found to be sheared, with maximum gradient within the first 2 km, and almost uniform flow beyond 3 km from the coast.

The values of the diffusivity coefficient span two orders of magnitude, and in general are larger than those obtained from oceanic diffusion diagrams. The long-shore coefficient of diffusivity is, in the mean, larger than the cross-shore coefficient.

Despite the diversity of values, the dispersion parameters presented here are, to date, the only data available on the local diffusion processes. The extreme values of current speed, of the current shear and of the diffusivity coefficient, set bounds on the intensity of these processes.

ACKNOWLEDGEMENTS

The Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tijuana y Tecate (CESPTT) permitted the use of their facilities at San Antonio del Mar during the field work. The Centro Regional de Investigaciones Pesqueras of El Sauzal supplied part of the material used in the drogues. We thank the help of technicians and students of CICESE in the field work. Drawings by J.M. Domínguez. This research was supported by CONACYT (Contract No. PCECBNA-021263).

English translation by the author.

cuenta en modelos más complejos que el descrito en este trabajo, si se requiere hacer predicciones realistas de la descarga.

CONCLUSIONES

En cinco períodos de medición de ~10 días cada uno, se observaron corrientes costeras de rapidez variable, con promedio cercano a 0.20 m s^{-1} . La característica más consistente entre los experimentos es la alineación del flujo en dirección casi paralela a la costa, pero con inversiones de sentido con duración de varios días.

Se observó un corte lateral de la corriente a lo largo de la costa, con gradiente máximo dentro de los dos primeros kilómetros, y flujo casi uniforme más allá de 3 km de la costa.

Los valores del coeficiente de difusividad horizontal están comprendidos dentro de dos órdenes de magnitud, y en general son mayores que los obtenidos a partir de los diagramas de difusión oceánica. En promedio, el coeficiente de difusividad en dirección paralela a la costa es mayor que el coeficiente en dirección normal.

No obstante la diversidad de valores, los parámetros de dispersión que se reportan aquí son, a la fecha, los únicos datos sobre los procesos difusivos locales. Los valores extremos de advección, del corte de velocidad y del coeficiente de difusividad permiten acotar la intensidad de estos procesos.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tijuana y Tecate (CESPTT) las facilidades otorgadas en la estación de bombeo de San Antonio del Mar, durante los trabajos de campo. El Centro Regional de Investigaciones Pesqueras de El Sauzal, B.C., proporcionó parte del material de construcción de los flotadores. Agradecemos al personal técnico y estudiantes del CICESE su participación en el trabajo de campo. El trabajo de dibujo fue hecho por José María Domínguez. Este trabajo fue financiado por el CONACYT (Proyecto No. PCECBNA-021263).

LITERATURA CITADA

Ahlstrom, S.W. (1975). A mathematical model for predicting the transport of oil slicks in marine waters, Battelle, Pacific Northwest Laboratories, Washington.

Allen, C.M. (1982). Numerical simulation of contaminant dispersion in estuary flows. Proc. of the Royal Society of London, A381: 179-194.

Alvarez, L.G., Uyeji, M. y Durazo, R. (1982). Observaciones de corrientes costeras superficiales mediante trazadores lagrangeanos. Informe Técnico OC-82-83, CICESE, Ensenada, B.C., 64 pp.

Alvarez, L.G., Godínez, V.M. y Bravo, Ch.A. (1989). Trayectorias de corrientes y ejes de difusión frente a la costa de Tijuana, B.C. (1985-1986). Informe Técnico OC-89-03, CICESE, Ensenada, B.C., 113 pp.

Barton, E.D. (1985). Low-frequency variability of currents and temperatures on the Pacific continental shelf off northern Baja California, 1978 to 1979. Continental Shelf Research, 4(4): 425-443.

Bork, I. and Maier-Reimer, E. (1978). On the spreading of power plant cooling water in a tidal river applied to the River Elbe. Advances in Water Resources, 1(3): 161-168.

Csanady, G.T. (1980). Turbulent Diffusion in the Environment. D. Reidel Publishing Co., Holland, 248 pp.

Davis, R.E. (1985). Drifter observations of coastal surface currents during CODE: The method and descriptive view. J. of Geophysical Research, 90(C3): 4741-4772.

Dorman, C.E. (1982). Winds between San Diego and San Clemente Island. J. of Geophysical Research, 87(C12): 9636-9646.

Engineering Science (1988). Tijuana Ocean Engineering Study. Executive Summary. June 1988. Reporte no publicado.

Godínez-Sandoval, V.M. (1986). Dispersión frente a la costa de Rosarito, B.C. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, UABC, 69 pp.

- Hernández-Walls, R. (1986). Circulación inducida por el viento en la zona costera. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, UABC, 73 pp.
- Hunter, J.R. (1980). An interactive computer model of oil slick motion. *Oceanology International* 80, Brighton, U.K.
- Hunter, J.R. (1983). Numerical simulation of currents in Koombana Bay and the influence of the proposed new power station. *Environmental Dynamics Report ED-83-049*, Univ. of Western Australia.
- Hunter, J.R. (1987). The application of Lagrangian particle-tracking techniques to modelling of dispersion in the sea. In: J. Noye (ed.), *Numerical Modelling - Applications to Marine Systems*. North-Holland, Amsterdam, pp. 257-269.
- Jones, J. (1971). *General Circulation and Water Characteristics in the Southern California Bight*. Southern California Coastal Water Research Project.
- Kosro, P.M. (1987). Structure of the coastal current field off northern California during the coastal ocean dynamics experiment. *J. of Geophysical Research*, 92(C2): 1637-1654.
- Lam, D.C.L., Murthy, C.R. and Simpson, R.B. (1984). *Effluent Transport and Diffusion Model for the Coastal Zone*. Springer-Verlag, New York, 168 pp.
- Lentz, S.J. and Winant, C.D. (1986). Subinertial currents on the Southern California Shelf. *J. of Physical Oceanography*, 16: 1737-1750.
- Morales Chávez, R. (1989). Evaluación de la contaminación en la porción marina frente a Tijuana y Rosarito, B.C. Estación de Investigación Oceanográfica de Ensenada, Secretaría de Marina. Reporte no publicado, 9 pp.
- Murthy, C.R. (1975). Dispersion of floatables in lake currents. *J. of Physical Oceanography*, 5: 193-195.
- Murray, S.P. (1975). Trajectories and speeds of wind-driven currents near the coast. *J. of Physical Oceanography*, 5: 347-360.
- Niiler, P.P., Pierre-Marie, P. and Haury, L.R. (1989). Synoptic three-dimensional circulation in an onshore-flowing filament of the California Current. *Deep-Sea Research*, 36(3): 385-405.
- Okubo, A. (1970). Horizontal dispersion of floatable particles in the vicinity of velocity singularities such as convergences. *Deep-Sea Research*, 18: 445-454.
- Okubo, A. (1971). Ocean diffusion diagrams. *Deep-Sea Research*, 18: 789-802.
- Poulain, P.M. and Niiler, P. (1989). Statistical analysis of the surface circulation in the California Current System using satellite-tracked drifters. *J. of Physical Oceanography*, 19(10): 1588-1603.
- Winant, C.D. (1980). Downwelling over the Southern California Shelf. *J. of Physical Oceanography*, 10(5): 791-799.
- Winant, C.D. (1983). Longshore coherence of currents on the Southern California Shelf during the summer. *J. of Physical Oceanography*, 13(1): 54-64.
- Winant, C.D. and Bratkovich, A.W. (1981). Temperature and currents on the Southern California Shelf: A description of the variability. *J. of Physical Oceanography*, 11(1): 71-86.
- Winant, C.D., Beardsley, R.C. and Davis, R.E. (1987). Moored wind, temperature, and current observations made during coastal ocean dynamics experiments 1 and 2 over the Northern California Shelf and Upper Slope. *J. of Geophysical Research*, 92(C2): 1569-1604.
- Yanagi, T., Murashita, K. and Higuchi, H. (1982). Horizontal turbulent diffusivity in the sea. *Deep-Sea Research*, 29(2A): 217-226.