

MODELADO NUMERICO DE LA CIRCULACION INDUCIDA POR EL VIENTO EN BAHIA DE LOS ANGELES, B.C., MEXICO

NUMERICAL MODEL OF THE CIRCULATION INDUCED BY THE WIND AT BAHIA DE LOS ANGELES, B.C., MEXICO

Alberto Amador Buenrostro
Saúl J. Serrano Guzmán
María Luisa Argote Espinoza

Centro de Investigación Científica y de
Educación Superior de Ensenada
División de Oceanología
Apartado Postal 2732
Ensenada, Baja California, México

Ciencias Marinas (1991), Vol. 17, No. 3, pp. 39-57.

RESUMEN

Se predice numéricamente la circulación inducida por la componente M2 de la marea y el viento en Bahía de los Angeles. La amplitud y la fase de la marea son prácticamente iguales en toda la bahía, las corrientes de marea son del orden de 3 cm/s y las residuales de la marea de 0.5 cm/s. En cambio las corrientes inducidas por el viento alcanzan hasta 25 cm/s en las áreas de intensificación. La configuración de la costa y la batimetría dominan las principales características de la circulación. Para cualquier dirección del viento dominante, se presenta un fuerte intercambio con el exterior, y un giro persistente en la ensenada La Gringa y con la parte central de la bahía. Las zonas de flujo más intenso son el canal sur y la zona costera al sur de la ensenada La Gringa.

ABSTRACT

The circulation induced by the M2 component of the tide and wind at Bahía de los Angeles was predicted. The tide amplitude and the phase are practically the same at the bay, the tide currents values are 3 cm/s and the tide residuals 0.5 cm/s. Otherwise, the induced currents by the wind reach until 25 cm/s at the intensification areas. The coast configuration and the bathymetry dominate the main characteristics of the circulation. There is a strong interchange with the exterior to any dominant direction of the wind, and a persistent gyre at the inlet of La Gringa and at the middle of the bay. The most intensens flux zones are the southern channel and the coastal zone to the south of La Gringa inlet.

INTRODUCCION

Bahía de Los Angeles está situada en la costa oriental de Baja California frente a la isla Angel de la Guarda, a los 29°00'N y los 113°30'O (Fig. 1). Es una bahía abierta hacia el Golfo de California, con amplia comunicación con el Canal de Ballenas. Las dimensiones son de 16 km de largo por 6.4 km en su parte más ancha y tiene una orientación

INTRODUCTION

Bahía de los Angeles is located at the eastern coast of Baja California in front of the island Angel de la Guarda, at 29°00'N and 113°30'W (Fig. 1). It is an open bay to the Gulf of California, with a wide communication to the Canal de Ballenas. The dimensions are 16 km length and 6.4 km at the broader portion and it has a NW-SE orienta-

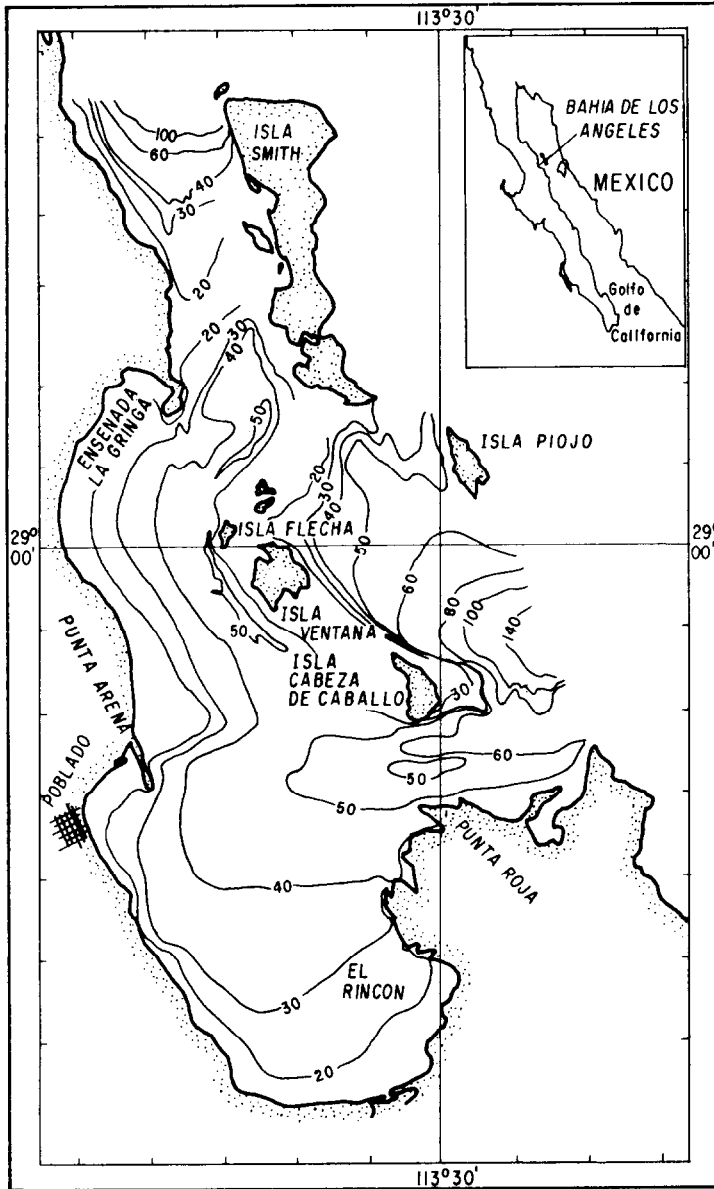


Figura 1.- Mapa batimétrico de Bahía de los Angeles y su localización en la región.
Figure 1.- Bahía de los Angeles bathymetric map and its location at the region.

NO-SE, muy similar a la orientación general del golfo. El fondo es de pendiente suave, con profundidades de 50 m en el centro de los canales que la comunican con el Canal de Ballenas. Bahía de Los Angeles se encuentra en un área de clima desértico con escasa precipitación y gran evaporación durante todo el año. Tiene un sistema de vientos dominantes con una marcada variación estacional.

Los estudios oceanográficos realizados en la bahía son escasos, y siempre han sido efectuados como complemento de trabajos de tipo biológico. Bernard y Grady (1968) realizaron varias campañas con mediciones de salinidad y temperatura en una red de estaciones en la bahía, pero reportan los resultados de sus mediciones en forma muy generalizada, como parámetros estadísticos. Ayala-Sánchez y Michel-Sánchez (1980) colectaron datos de fitoplacton, los cuales complementaron con datos de temperatura, salinidad y oxígeno en superficie y a 10 m. Ibarra Sañudo (1988) analizó series de tiempo de temperatura, salinidad y oxígeno tomadas durante el verano en la ensenada La Gringa. Las series tienen una duración de 20 días y son datos en superficie y a 10 m de profundidad.

En general se conoce poco de la hidrología de Bahía de Los Angeles y se desconoce por completo la dinámica de sus aguas. Estos conocimientos son indispensables para entender el comportamiento de las especies que en ella se desarrollan, y pueden además ayudar a la elección de zonas para cultivos marinos que se pretendan establecer en este cuerpo de agua. Para cubrir esta falta de información oceanográfica de la región sería necesario realizar estudios hidrodinámicos completos en el área. Una solución a corto plazo es el modelado numérico, lo cual motivó que se desarrollara este trabajo.

Con el fin de analizar la circulación inducida por los vientos en este cuerpo de agua, se adaptó un modelo numérico hidrodinámico de dos dimensiones a esta zona. Los resultados proveen una descripción de la circulación de la bahía para las diferentes condiciones de viento que se presentan en la zona.

METODO

Se hace una predicción de la armónica M2 de la marea, utilizando un modelo numérico desarrollado por Hunter (1980), el cual

tion, very similar to the general orientation of the gulf. The bottom has a soft slope, with depths of 50 m in the middle of the channels that communicate this with the Canal de Ballenas. Bahía de los Angeles weather is desertic with scarce rainfall and strong evaporation during the whole year. The dominant winds system has a markedly seasonal variation.

The oceanographic studies carried out at the bay are scarce, and these have always been a complement of other biological studies. Bernard and Grady (1968) made several campaigns of salinity and temperature measurements in a stations web at the bay, but the reported results of their measurements are shown in a very generalized way as statistical parameters. Ayala-Sánchez and Michel-Sánchez (1980) collected phytoplankton data; these were complemented with temperature, salinity and oxygen data at the surface and at 10 m depth. Ibarra Sañudo (1988) analyzed the temperature, salinity and oxygen time series that were taken during the summer at La Gringa inlet. The series are 20 days duration and these are surface and 20 m depth data.

Bahía de los Angeles hydrology is not very well known and the dynamic of the waters is completely unknown. This knowledge is essential for understanding the species behaviour that develop in this. Also, this information could be helpful for the election of aquacultural zones to be established in this water body. To accomplish the lack of oceanographic information, hydrodynamic studies should be carried out in the area. A short term solution is the numerical modeling, which is the main reason for this study development.

In order to analyze the induced circulation by the winds in this water body, a two dimensional hydrodynamic numerical model has been adapted for the area. A circulation description is provided for the different wind conditions that occur at the zone.

METHOD

The prediction of the tide M2 harmonic has been done, using the numerical model developed by Hunter (1980), which solves the vertically integrated hydrodynamic equations. For this case, the X coordinate is perpendicular to the bay mouth, and the Y coordinate is oriented with the longitudinal axis (315 de-

resuelve las ecuaciones hidrodinámicas verticalmente integradas. Para este caso la coordenada X es perpendicular a la boca de la bahía y la coordenada Y está orientada con el eje longitudinal (315 grados); se usa una malla de 658 celdas de 400 metros por lado cada una (Fig. 2).

Las ecuaciones se resuelven por el método de diferencias finitas:

$$\frac{\delta u}{\delta t} = -u \frac{\delta u}{\delta x} - v \frac{\delta u}{\delta y} - g \frac{\delta \eta}{\delta x} + fv + \frac{\tau_{xw} - \tau_{xb}}{\rho_w(H + \eta)} + K_h(\nabla_h^2 u) \quad (1)$$

$$\frac{\delta v}{\delta t} = -u \frac{\delta v}{\delta x} - v \frac{\delta v}{\delta y} - g \frac{\delta \eta}{\delta y} - fu + \frac{\tau_{yw} - \tau_{yb}}{\rho_w(H + \eta)} + -K_h(\nabla_h^2 v) \quad (2)$$

$$\frac{\delta \eta}{\delta t} = -\frac{\delta(H + \eta)u}{\delta x} - \frac{\delta(H + \eta)v}{\delta y} \quad (3)$$

El significado de cada uno de los símbolos utilizados en las ecuaciones de este trabajo se describe en la Tabla 2.

Para garantizar la estabilidad numérica se utilizó un paso de tiempo $dt=9.0$ s, obtenido del criterio CFL (Courant *et al.*, 1928).

En las fronteras cerradas, la velocidad normal a la costa es nula ($u_n=0$) y la velocidad paralela a la costa, no tienen cambio normal ($\frac{du_n}{dn}=0$). En la frontera abierta se establece una cooscilación con la componente M2, para $t>0$ de la forma:

$$\eta = \eta_o \cos(ut - \delta_o)$$

El coeficiente de viscosidad cinemática utilizado fue $k_h=10$ m²/s, en el fondo se utiliza el coeficiente de fricción con valor de 3.7×10^{-3} y en la superficie se usa un coeficiente de arrastre por el viento $\gamma=1.6 \times 10^{-11} N m^{-2}$ el cual se hizo paramétrico por medio de la relación $\gamma=d_a C_w W|W|$ en donde W es la velocidad del viento (10 m/s), d_a =densidad del aire y C_w = coeficiente de fricción = 1.3×10^{-2} (Phillips, 1977).

Este modelo ya ha sido utilizado por

grees); a 658 cells mesh of 400 meters by side has been used (Fig. 2).

Equations have been resolved by the finite differences method:

Table 2 describes the meaning of the symbols used in the equations employed for this study.

To warrant the numerical stability, a time step $dt=9.0$ s was used, obtained from the criterion CFL (Courant *et al.*, 1928).

The normal velocity to the coast is null ($u_n=0$) at the closed frontiers, and the longshore velocity does not have a normal change ($\frac{du_n}{dn}=0$). A cooscillation with the M2 component has been established at the open frontier, for $t>0$:

The kinematics viscosity coefficient used was $k_h=10$ m²/s, the friction coefficient used for the bottom has the value 3.7×10^{-3} and the wind drag coefficient $\gamma=1.6 \times 10^{-11} N m^{-2}$ was used at the surface, this became parametric by means of the relation $\gamma=d_a C_w W|W|$ where W is the wind velocity (10 m/s), d_a =air density and C_w =friction coefficient = 1.3×10^{-2} (Phillips, 1977).

This model has been used in other studies with very good results (Hunter *et al.*,

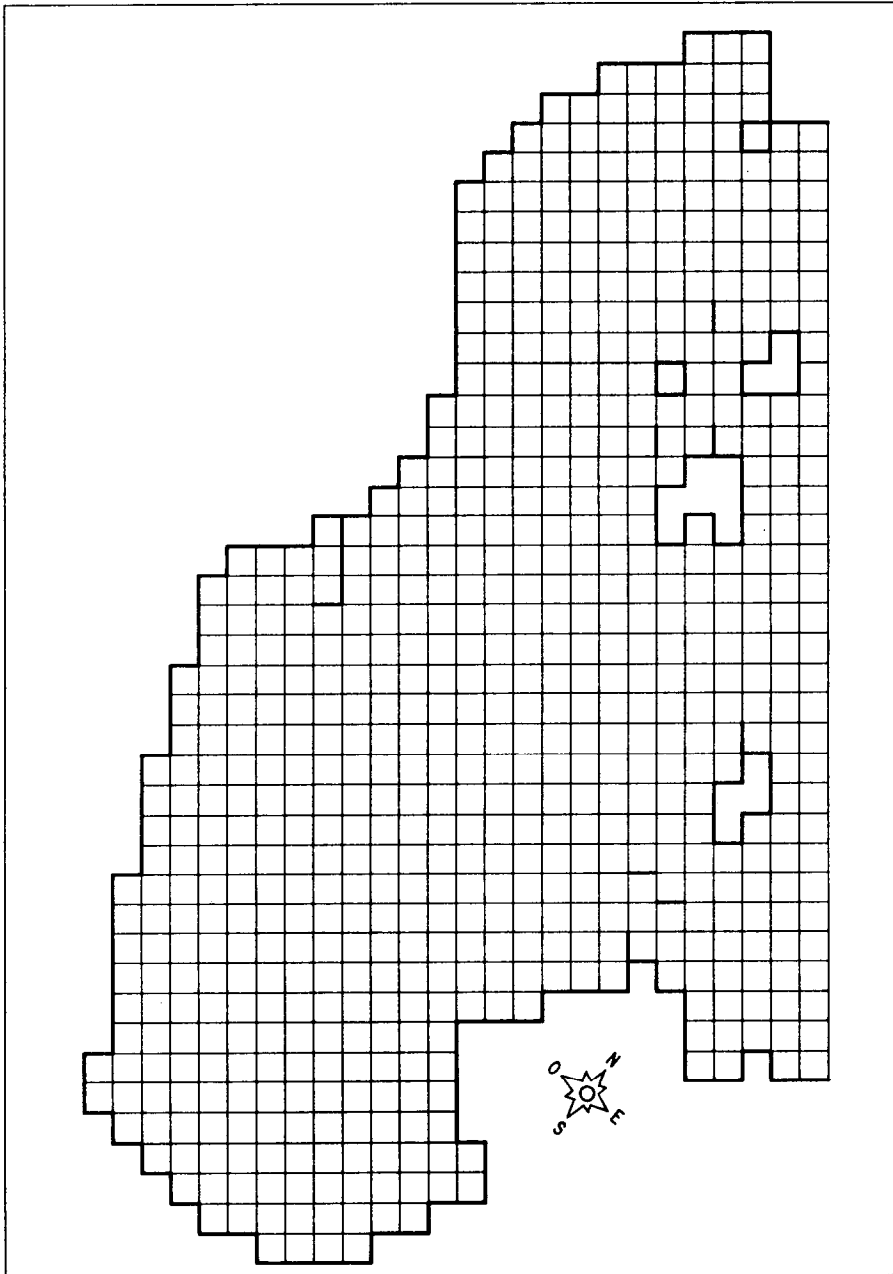


Figura 2.- Celdas de 400 m x 400 m empleadas en la malla del modelo.
Figure 2.- 400 x 400 m cells used in the model mesh.

Tabla 1.- Parámetros de la componente M2 de la marea.
Table 1.- Parameters of the M2 tide component.

Parámetro	Valor Mínimo	Valor Máximo
Amplitud	0.651 m	0.652 m
Fase	284	284
$ U $	0.0 m/s	0.03 m/s
$ V $	0.0 m/s	0.01 m/s
Residuales	0.0 m/s	0.005 m/s
Excentricidad de las elipses de marea (*)	0	0.3

* El 95% de los valores de la excentricidad se encuentran entre 0 y 0.2.

Tabla 2.- Símbolos empleados en el texto.
Table 2.- Text used symbols.

f	=	Parámetro de Coriolis
g	=	Aceleración de la gravedad
H	=	Profundidad del fondo bajo la superficie de referencia
$H + \eta$	=	Profundidad total
K_h	=	Coficiente de viscosidad cinemática
t	=	Tiempo
u, v	=	Velocidad verticalmente integrada en las direcciones x, y
x, y	=	Coordenadas horizontales
∇_h^2	=	El operador gradiente bidimensional
η	=	Elevación de la superficie
τ_{xw}	=	Esfuerzo del viento en la dirección x
τ_{yw}	=	Esfuerzo del viento en la dirección y
τ_{xb}	=	Fricción del fondo en la dirección x
τ_{yb}	=	Fricción del fondo en la dirección y
ρ_w	=	Densidad del agua de mar

varios investigadores con muy buenos resultados (Hunter *et al.*, 1983; Pingree *et al.*, 1985). En particular en nuestro grupo de trabajo se ha aplicado con éxito en el Golfo de California, tanto para toda el área como para zonas particulares (Argote-Espinoza *et al.*, 1987; Durazo-Arvizu, 1989). En todos los casos se contó con mediciones directas para comprobar que se había hecho una buena predicción. En este estudio no se tienen mediciones directas, por lo tanto la comprobación se hará con la circulación inferida de datos hidrográficos.

El Viento

Para establecer las direcciones y magnitudes características del viento en las diferentes épocas del año en la zona de interés, se utilizaron datos de viento obtenidos en estudios anteriores. Los mejores registros fueron realizados en isla Piojo durante 1984 y publicados por Merrifield *et al.* 1987. De los datos de viento disponibles se establecieron cuatro situaciones típicas: la situación de invierno, la cual está caracterizada por vientos dominantes del N-NO, con eventos frecuentes de cuatro a cinco días de duración y de magnitud típica de 10 m/s. En esta época incluso las variaciones diurnas (brisas) se manifiestan como variaciones de la intensidad pero conservando casi siempre el sentido. Esta situación es la más prolongada ya que prevalece desde el mes de noviembre hasta el mes de marzo.

La situación de verano se tipifica con vientos dominantes del E-SE. Aquí también se presentan eventos de varios días con magnitudes altas (10 m/s), pero son más esporádicos que en el invierno, y los intervalos con brisas muestran muy claras inversiones en la dirección del viento.

La tercera situación característica del viento en Bahía de Los Angeles es la ocurrencia de eventos de dirección oeste con magnitudes mayores de 10 m/s. Estos eventos se pueden presentar durante todo el año en forma esporádica, aunque ocurren principalmente en primavera y en otoño durante los meses de marzo-abril y octubre-noviembre. Estos vientos, conocidos por los lugareños como "westes", son los más intensos de la zona y representan un gran peligro para las embarcaciones pequeñas, ya que se pueden presentar con gran intensidad de manera imprevista.

La cuarta situación del viento que hemos tipificado es la ocurrencia de brisas

1983; Pingree *et al.*, 1985). This has been applied successfully by our research group for the whole Gulf of California as well as for other particular areas (Argote-Espinoza *et al.*, 1987; Durazo-Arvizu, 1989). Direct measurements have been used for all of these cases to prove the prediction done. This study do not have direct measurements, therefore the proving will be done with the inferred circulation by hydrographic data.

The Wind

Wind magnitude and directions for the different seasons of the year at the zones of interest were established by means of the wind data obtained from previous studies. The best records were carried out at Isla Piojo during 1984 and these were published by Merrifield *et al.* 1987. From wind data available, four typical situations were established: the winter situation, which is characterized by N-NW dominant winds, with frequent events of four to five days duration and with a typical magnitude of 10 m/s. Including the diurnal variations (breeze) for this season, these are shown as intensity variations but almost always keep the direction. This is the most prolonged situation, since it prevails from november until March.

The summer situation has typical E-SE dominant winds. This also shows daily events with high magnitudes (10 m/s), but these are more sporadic than they are during the winter, and the breeze intervals show very clear inverted directions of the wind.

The third characteristic situation of the wind at Bahía de los Angeles is the occurrence of west direction events higher than 10 m/s in magnitude. These are sporadic and could be seen during the whole year, even when they mainly occur in the spring and autumn, throughout the months of March-April and October-November. The most intense winds are known by the villagers as "westes", and they represent a great danger for minor boats because these suddenly could reach high intensities.

The fourth wind situation that has been typified is the breeze occurrence during prolonged periods (in the order of weeks). These are shown between the transition of winter to summer (May, June) situations and vice versa (September), hence, a circulation prediction provoked by the wind was not made.

durante periodos prolongados (del orden de semanas). Estas se presentan en las épocas de transición entre la situación de invierno y la de verano (mayo, junio) y viceversa (septiembre). Para este caso no se hizo una predicción de la circulación provocada por vientos.

RESULTADOS

Con el modelo numérico se predicen los parámetros de marea, las corrientes residuales inducidas sólo por la marea y las corrientes residuales inducidas por el viento. Los resultados de la predicción de marea (Tabla 1) muestran muy poca variación en toda la bahía. La fase se mantiene prácticamente igual mientras que la amplitud varía 2 cm como máximo en toda el área. Esto es debido a la gran amplitud de la boca y a la distribución batimétrica que varía con una pendiente suave de la boca al interior de la bahía. La amplia comunicación de la bahía con el Golfo de California origina también que las corrientes provocadas por la marea dentro del cuerpo de agua sean muy pequeñas, de 1 a 3 cm/seg, del interior hacia la boca. Esto se refiere exclusivamente a las corrientes originadas por la variación del nivel del mar dentro de la bahía, no a las corrientes de marea en el Canal de Ballenas.

Las corrientes residuales inducidas por la marea en Bahía de Los Angeles son muy débiles, ($v_1 < 0.005$ m/s), ésto, es debido a la velocidad tan baja de las corrientes de marea y a que la batimetría presenta pendientes suaves; por otra parte, las corrientes forzadas por el viento local muestran magnitudes altas, hasta de 25 cm/s en algunas zonas. Basándose en los registros de viento disponibles para la zona, se calcularon tres tipos de circulación para diferentes épocas del año según el viento dominante. Los resultados del modelo representan condiciones estacionarias, la cual es alcanzada en un período del orden de $2\pi / \omega \sin \phi$ (un día sidereal entre el seno de la latitud), para una latitud de 30° . El estado estacionario se alcanza en 48 horas (Bowden, 1983).

Condición de Invierno

Durante esta época los vientos dominantes son del norte y el noroeste. Para esta situación (Fig. 3) se tienen una circulación con

RESULTS

The tide parameters, the residual currents induced only by the tide and the residual currents induced by the wind can be predicted by the numerical model. The tide prediction results (Table 1) show very few variation for the whole bay. The phase remains practically the same, whilst the amplitude varies as much as 2 cm for the whole area. This is due to the great amplitude of the mouth and, to the bathymetric distribution that varies from a soft slope at the mouth to the inner bay. The currents provoked by tides within the water body will be very low, 1 to 3 cm/seg, from the interior to the mouth, due to the wide communication of the bay with the Gulf of California. This exclusively refers to the currents originated by sea level variations within the bay, and these are not referred to the tide currents at the Canal de Ballenas.

The residual currents induced by the tide at Bahía de los Angeles are very weak ($v_1 < 0.005$ m/s), this is due to the very low velocities of the tide currents and to the soft slopes that shows the bathymetry; otherwise, the forced currents by the local winds show high magnitudes, up to 25 cm/s in some areas. Based on available wind records for the zone, three types of circulation were calculated for the different seasons of the year according to the dominant wind. The model results represent stationary conditions, which reach a period order of $2\pi / \omega \sin \phi$ (a sidereal day divided by the sine of the latitude), for a 30° latitude. The steady state can be reached in 48 hours (Bowden, 1983).

Winter Condition

The dominant winds travel north to northeast direction during this season, therefore, there is a circulation (Fig. 3) with a main entry by the northern channel between La Gringa point and, the Ventana island with a SW longshore flux, that is extended to El Rincón and has an exit off the bay along the southern channel, between the Cabeza de Caballo island and Punta Roja. This prediction also shows three zones where the transport is weak: La Gringa inlet, the middle of the bay, to the west of Cabeza de Caballo island and, El Rincón. These are associated

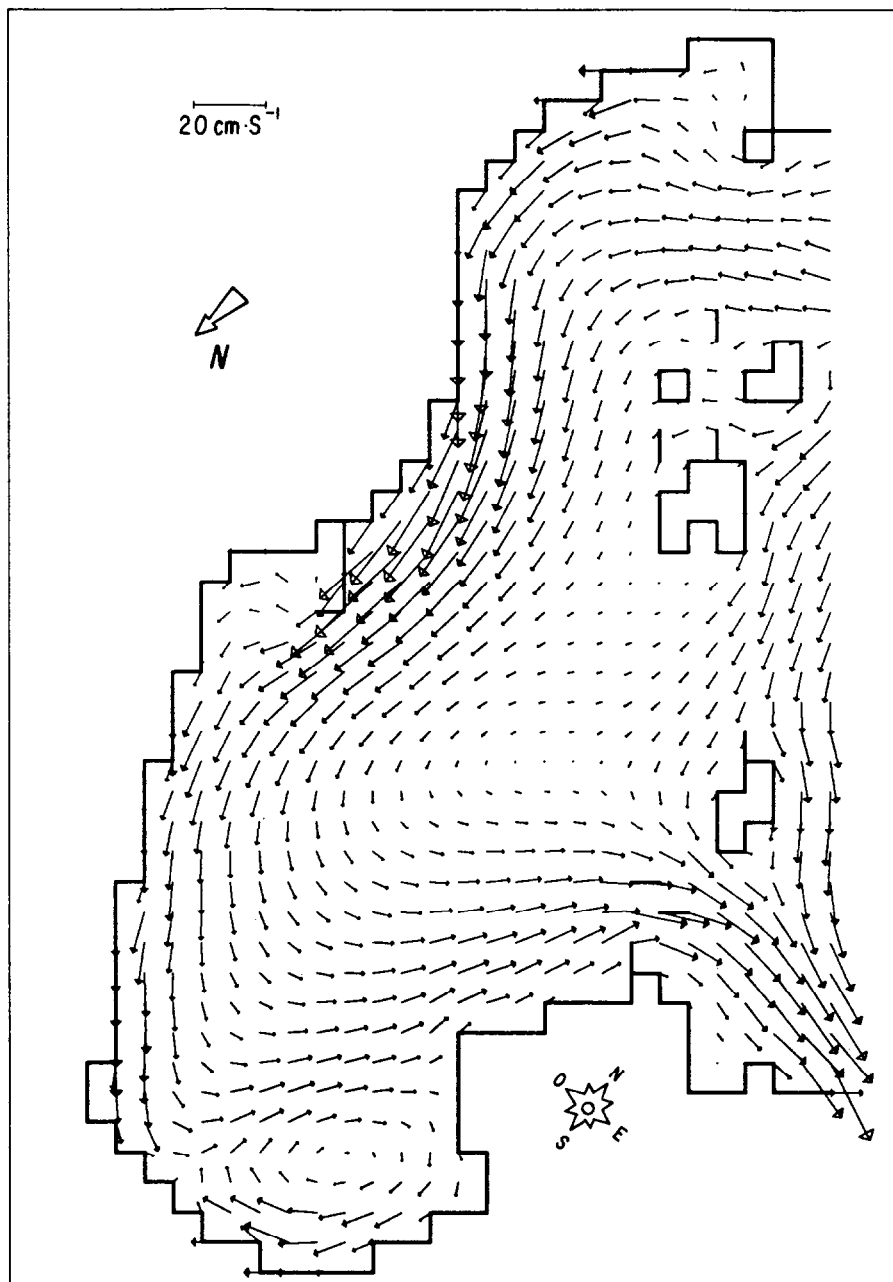


Figura 3.- Corrientes residuales inducidas por viento del norte.
Figure 3.- Residual currents induced by the northern wind.

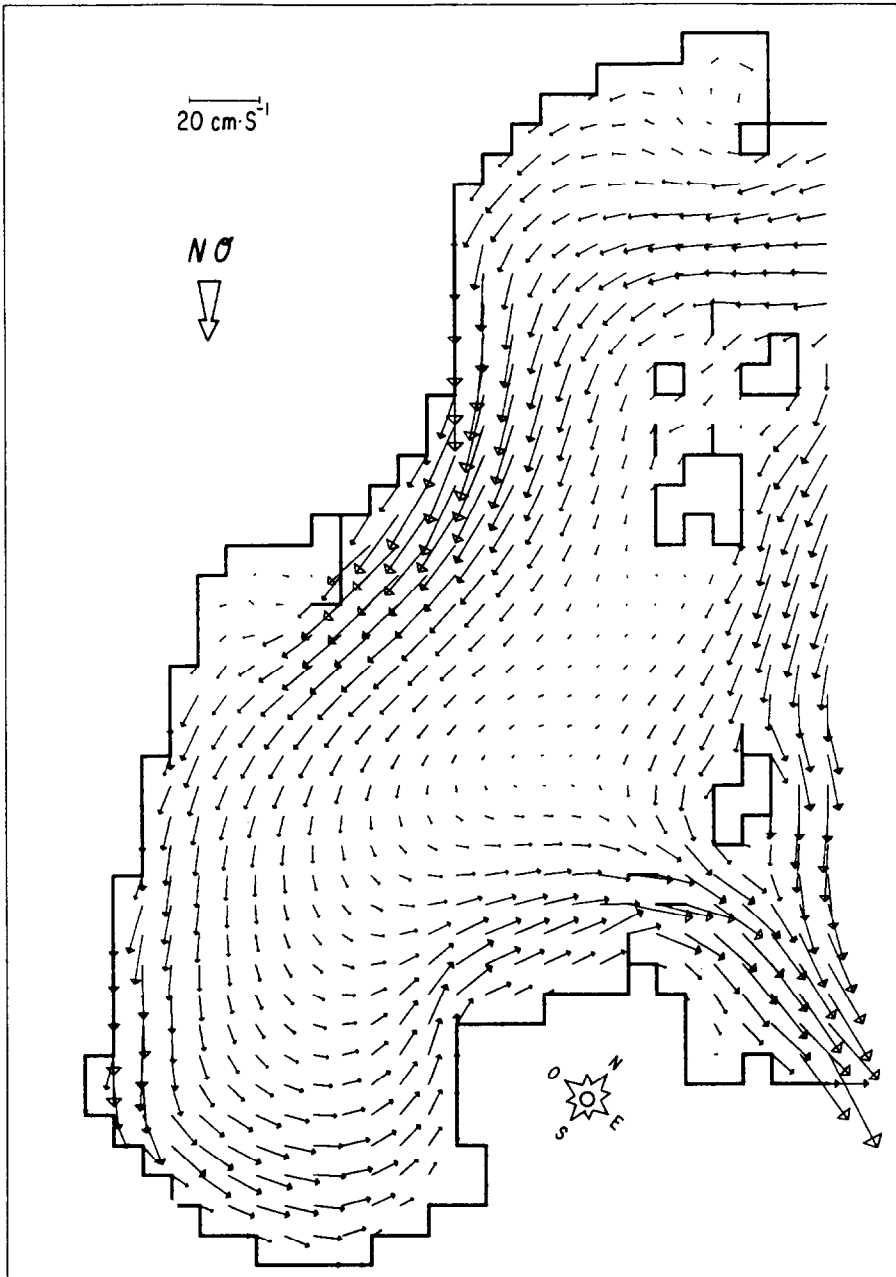


Figura 4.- Corrientes residuales inducidas por viento del noroeste.
Figure 4.- Residual winds induced by the northwestern wind.

entrada principal por el canal del norte entre punta La Gringa e isla Ventana con flujo hacia el SO paralelo a la costa, que se extiende hasta El Rincón y tiene salida de la bahía por el canal sur, entre la isla Cabeza de Caballo y Punta Roja. Esta predicción muestra además tres zonas donde el transporte es débil, en la ensenada La Gringa, en la parte central de la bahía al oeste de la isla Cabeza de Caballo y en El Rincón. Las tres zonas están asociadas a giros en las corrientes. Cuando la dirección del viento se hace más NO el giro de la zona del Rincón desaparece (Fig. 4) y ocupa su lugar una amplia corriente paralela a la costa. Las corrientes más intensas se presentan en la parte occidental de la bahía y en el canal sur.

De los datos hidrográficos históricos, reportados para la zona, sólo se encuentra un muestreo en el invierno, y ocupa únicamente la parte sur de la bahía. En esta época se espera que las temperaturas más bajas se encuentren en las áreas cercanas a la costa con un gradiente positivo hacia aguas más profundas, donde el enfriamiento es más lento. En la Figura 5 se puede apreciar que el gradiente de la distribución horizontal de temperatura en forma de lengua penetra al centro de la parte sur de la bahía lo cual sugiere la presencia de un flujo en esa dirección, como se predice por el modelo. La salinidad, aunque en forma menos clara, también sugiere este tipo de flujo.

Condición de verano

Para esta época, con vientos dominantes del E y el SE, se predice una circulación con entrada en el canal sur la cual se divide en dos ramas, una que se dirige hacia el oeste y la otra hacia el sur dándole vuelta a toda la bahía. Del ramal que se dirige hacia el oeste gran parte del agua vuelve a salir por el canal entre las islas y la otra parte se junta con la otra rama para salir por el canal norte (Fig. 6). Este tipo de circulación induce un flujo prácticamente invertido con respecto al de invierno, con intensificaciones en las zonas de entrada y salida de la bahía, y en la parte central norte entre isla Ventana y la costa. Este patrón de circulación muestra dos áreas donde la corriente tiene baja intensidad, un área sigue siendo la ensenada La Gringa y la otra es la parte central al SO de la isla Cabeza de Caballo. En ambos sitios existe la presencia

to current gyres. When the direction of the wind is NW, the gyre of El Rincón zone disappears (Fig. 4) and a wide longshore current substitutes it. The most intense currents are shown at the western portion of the bay and at the southern channel.

According to the historical hydrographic data reported for the zone, there is only one winter sampling, this belongs to the southern portion of the bay, and is during this season when the lowest temperatures could be found at the coast with a positive gradient, toward deeper waters, where the cooling is slower. The temperature horizontal distribution gradient (Fig. 5) has a tongue shape and this goes into the middle of the bay to the southern portion which suggest the presence of a flux in this direction, as is predicted by the model. The salinity also suggests this kind of flux, but less clearly.

Summer Condition

For this season, with dominant winds from E and SE, a circulation has been predicted with an entry along the southern channel which is divided in two branches. First is directed to the west and the second to the south, surrounding the whole bay. From the western branch there is a lot of water that goes out along the channel located between the islands, and the second branch unites with the first one going out along the northern channel (Fig. 6). This kind of circulation induces an inverted flux with respect to the winter season, with intensifications at the inlet and outlet of the bay and at the northern middle portion between Isla Ventana and the coast. This circulation pattern shows two areas where the current has low intensity, one is still towards La Gringa inlet and the second one is the central portion to the SW of Cabeza de Caballo island. There are gyres for both sites, a cyclonal at La Gringa and anticyclonal at the central zone.

There are two sets of hydrographic data for the summer, the first was obtained in August of 1976 and the second in July of 1986 (Figs. 7 and 8). The gradients are shown at the graphs, which make more obvious the colder and less saline waters along the southern channel, and also show that these have a displacement partially to the NW along the coastal fringe, as it was predicted by the model.

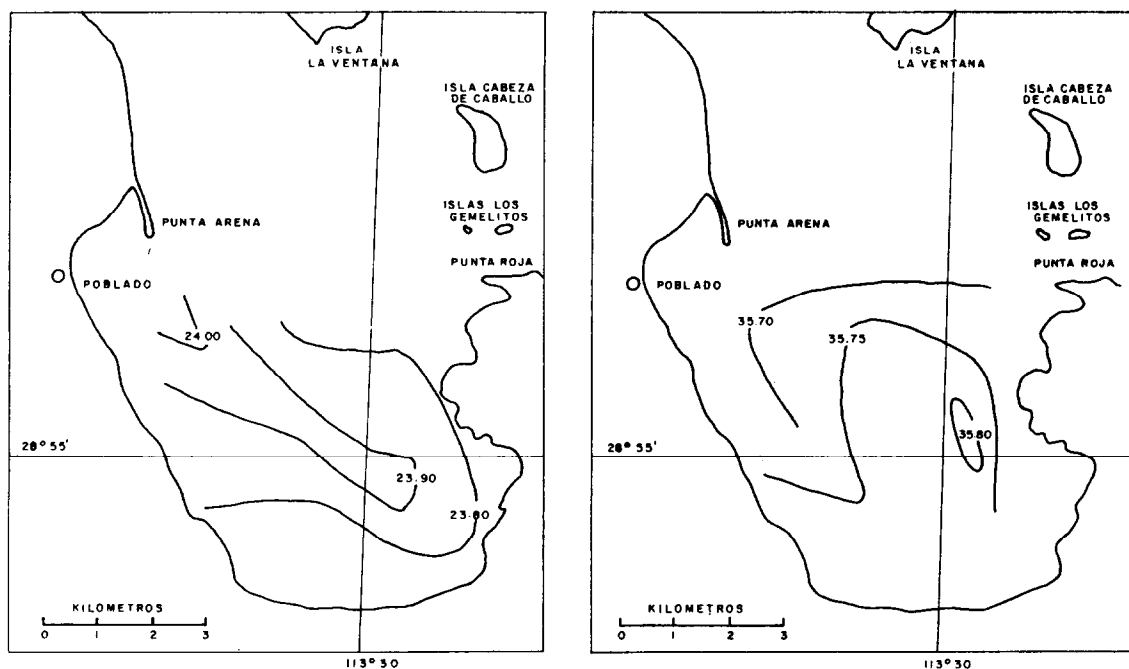


Figura 5.- Distribución de temperatura y salinidad a 10 m de profundidad en la parte sur de Bahía de los Angeles en noviembre de 1976. (Según Ayala-Sánchez y Michel-Sánchez 1980).
Figure 5.- Temperature and salinity distribution at 10 m depth for the southern portion of Bahía de los Angeles in November of 1976. (According to Ayala-Sánchez and Michel-Sánchez 1980).

de giros, ciclónico en La Gringa y anticiclónico en la parte central.

Para el verano existen dos juegos de datos hidrográficos, uno obtenido en agosto de 1976 y el otro en julio de 1986 (Figs. 7 y 8). En estas gráficas se observan gradientes que ponen en evidencia la entrada de aguas más frías y menos salinas por el canal sur y que en parte muestran un desplazamiento hacia el NO por la franja costera, como lo predice también el modelo.

Condición de Primavera y Otoño

Son épocas con grandes variaciones en la dirección e intensidad del viento, con largos períodos de calmas dominados por brisas. Para esta época se consideró importante modelar la circulación producida por los vientos de dirección oeste, que son los más intensos del año, pero se presentan en forma esporádica. La

Spring and Autumn Conditions

Great variations are shown for these seasons in terms of the intensity and direction of the wind, with prolonged calm periods dominated by breeze. For this season, it was very important to model the western circulation produced by the winds, which are the most intense of the year, but also these are sporadic. The forced circulation by western winds is similar to the winter, where water goes in along the northern channel and goes out along the southern one. The difference is based on the position of weak circulation zones, which are also the most extensive. In this currents diagram, there are three low intensity flux areas: the first at La Gringa inlet, with a very wide cyclonal gyre, the second also shows a cyclonal gyre and is located in front of the village, which is

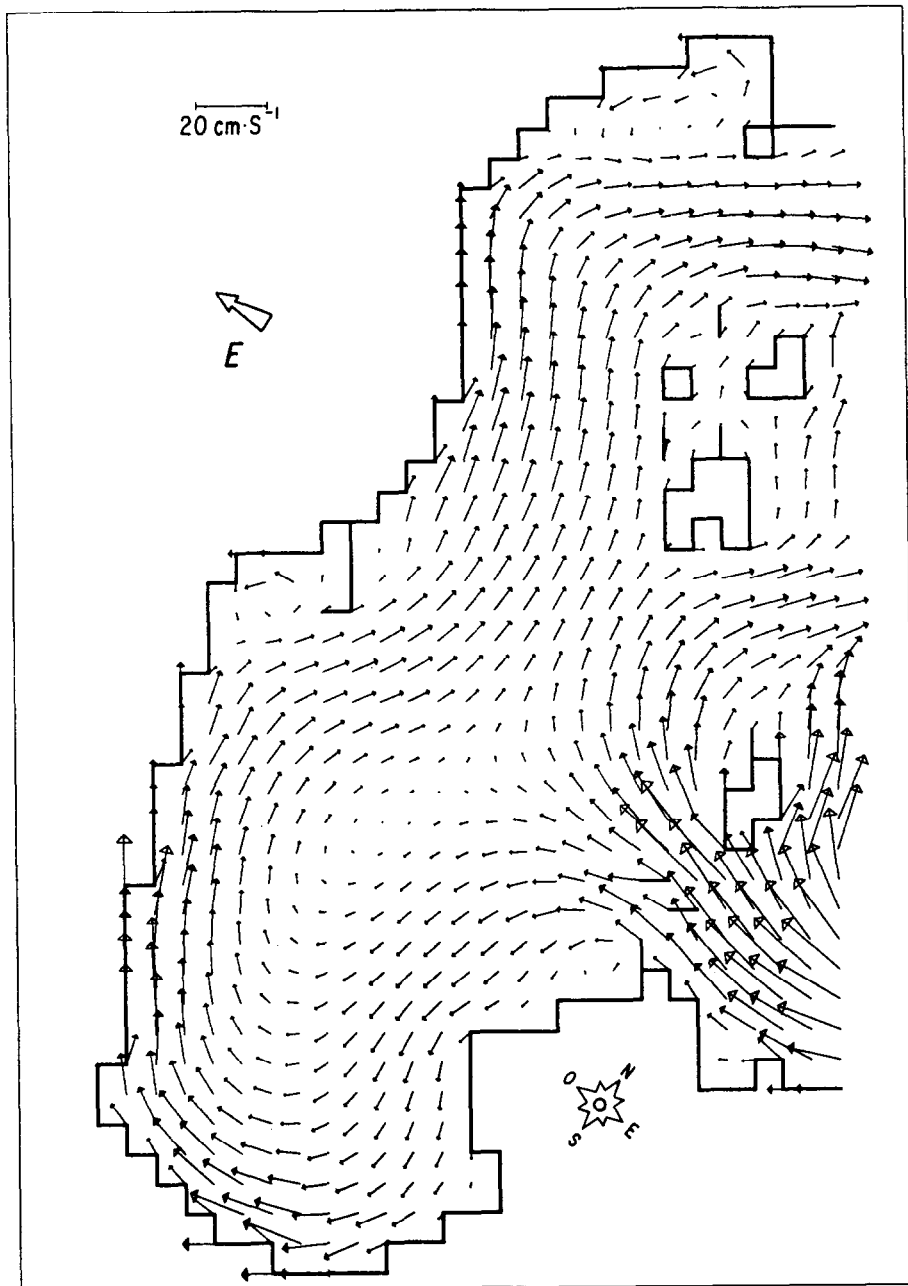


Figura 6.- Corrientes residuales inducidas por viento del este.
Figure 6.- Residual currents induced by the eastern wind.

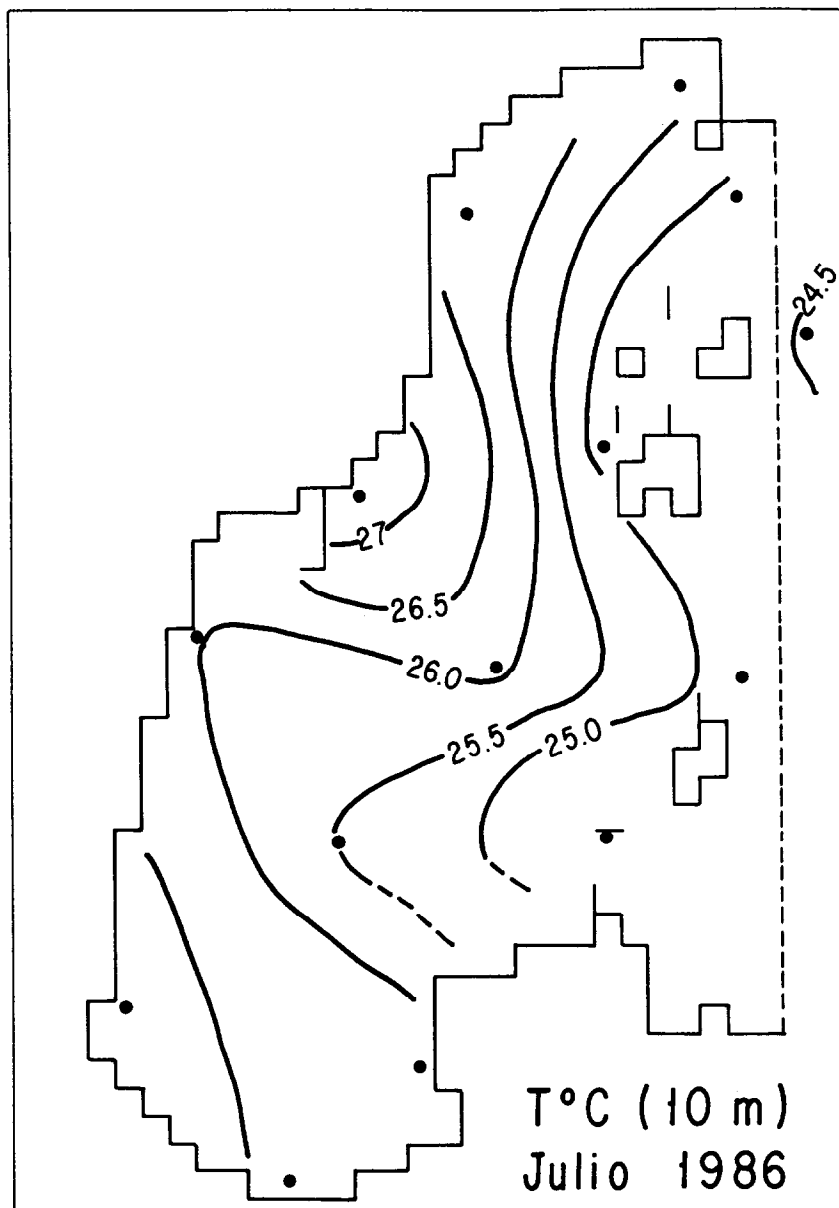


Figura 7.- Distribución de temperatura y salinidad en la parte sur de Bahía de los Angeles en agosto de 1976. (Según Ayala-Sánchez y Michel-Sánchez 1980).

Figure 7.- Temperature and salinity distribution at the southern portion of Bahía de los Angeles in August of 1976. (According to Ayala-Sánchez and Michel-Sánchez 1980).

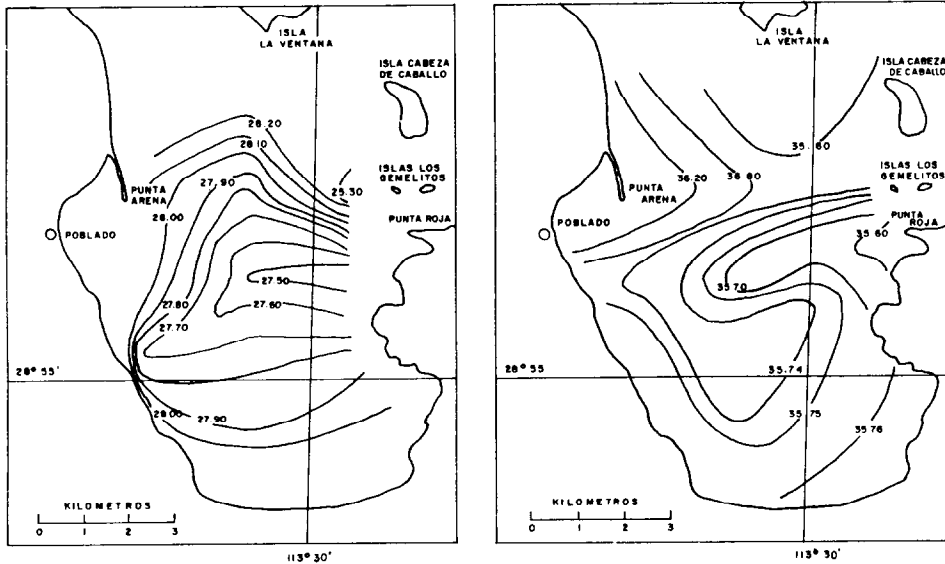


Figura 8.- Distribución de temperatura superficial en Bahía de los Angeles en julio de 1986 (Según Serrano-Guzmán 1990).

Figure 8.- Surface temperature distribution at Bahía de los Angeles, July of 1986 (According to Serrano-Guzmán 1990).

circulación forzada por el viento del oeste es similar a la encontrada en el invierno, con la entrada del agua por el canal norte y la salida por el canal sur. La diferencia estriba en la posición de las zonas de circulación débil las cuales son además más extensas. En este esquema de corrientes se presentan tres áreas de flujo de baja intensidad, una en la ensenada La Gringa, con un giro ciclónico muy amplio, otra, con giro también ciclónico, frente al poblado del lugar, protegido por una barra arenosa, y la última ocupa una gran franja desde la isla Ventana hasta la mitad de la bahía. Las corrientes más intensas las encontramos en el canal sur y en la franja costera central del oeste (Fig. 9).

Características Generales de la Circulación

Bahía de los Angeles es un cuerpo de agua con una amplia comunicación con el Canal de Ballenas. Las corrientes forzadas por el viento producen un fuerte intercambio de aguas. La circulación para los vientos dominantes en las diferentes épocas del año,

protected by a sandy bar, and the last occupies a large fringing portion from Isla Ventana to the middle of the bay. The most intense currents are found at the southern channel and at the middle western coastal fringe (Fig. 9).

General aspects of the Circulation

Bahía de los Angeles waters have wide communication with the Canal de Ballenas. The forced currents by wind produce a strong waters interchange. The dominant wind circulation for the different seasons of the year, allows that a great part of the flux travel a high percentage of the bay and this improves the waters interchange with the exterior. The flux in general has a main entrance at the northern or southern channel, based on the dominant winds, hence, a big gyre is carried out by the currents, which travel almost longshore along the whole bay. This gyre creates a low velocity zone at the inner portion, which shows characteristic dimensions according to the wind direction (Figs. 3, 4, 6,

permite que gran parte del flujo, recorra un porcentaje alto de la bahía mejorando de esta manera el intercambio de aguas con el exterior. En general el flujo tiene una entrada principal, bien sea el canal norte o el sur, según el viento dominante, después la corriente, o parte de ella, realiza un gran giro recorriendo toda la bahía en forma casi paralela a la costa. Este giro forma una zona de bajas velocidades en su parte interna, la cual tiene dimensiones características según la dirección del viento (Figs. 3, 4, 6 y 9). En la ensenada La Gringa siempre se observa la presencia de un giro, para cualquiera de las tres direcciones dominantes de viento en la localidad. Este giro es más amplio para la dirección de viento del oeste (Fig. 9).

Transporte de Masa

Se realizó un análisis del transporte a través de la boca y se encontró que la dirección del viento del este es más eficiente en intercambiar agua entre el interior y el exterior, con este viento se obtuvo un flujo de 22,200 m³/s; en cambio, para la dirección norte fueron 13,800 m³/s y para la dirección oeste 16,000 m³/s. Estos números, sin embargo, sólo reflejan el intercambio a través de la sección transversal de la entrada, sin cuantificar la penetración del flujo en toda la bahía. Para la circulación con viento este, gran parte del flujo de entrada vuelve a salir inmediatamente por el canal entre las islas. Analizando el transporte en una sección transversal frente al poblado, se observa que las direcciones norte y NO son las más eficientes, ya que transportan más masa a través del gran giro que cubre casi toda la bahía.

CONCLUSIONES

La configuración costera de Bahía de los Angeles con una amplia comunicación con el canal de Ballenas, su orientación y una batimetría de pendiente suave sin variaciones bruscas, domina en forma general la respuesta a los efectos de la marea y de los vientos de la zona. De esta interrelación podemos enumerar lo siguiente: La variación del nivel del mar debido a las mareas, induce corrientes de poca

and 9). The gyre presence has always been observed at La Gringa inlet, for any of the three wind dominant directions at the locality. This gyre is wider for the western wind direction (Fig. 9).

Mass Transport

A transport analysis through the mouth was carried out and it was found that the eastern wind direction was the more efficient for water interchange between the inner and outer zones, a flux of 22,200 m³/s was obtained, whilst, for North direction the values were 13,800 m³/s and 16,000 m³/s for the West. These values, however, only reveal the interchange throughout the transversal section of the inlet, and the flux penetration for the whole bay has not been quantified. For the wind of the eastern circulation, a great portion of the flux that goes in immediately goes out along the channel located between the islands. The transport of a transversal section located in front of the village has been analyzed, and the North and NW directions was observed to be the most efficient, since they transport more water throughout the great gyre that covers almost the whole bay.

CONCLUSIONS

The coastal configuration of Bahía de los Angeles, which shows a wide communication with the Canal de Ballenas, its orientation and a soft slope bathymetry without any sharp variations, dominates in general the tide and wind effects on the zone. Hence, it can be said that the sea level variation due to tides, induces low magnitude currents, ($u < 5$ cm/s) this as a consequence of the wide transversal section of the mouth and due to the tide elevation amplitudes which are in the order of one meter. The residual currents due to tides are practically null ($u < 0.6$ cm/s), this is due to the low magnitude of the tide currents and to the bathymetric distribution with very soft slopes. There is a wide interchange with Canal de Ballenas, originated by the mouth amplitude and by the orientation of the bay with respect to the dominant winds, which provoke longshore fluxes that travel a great portion of the bay.

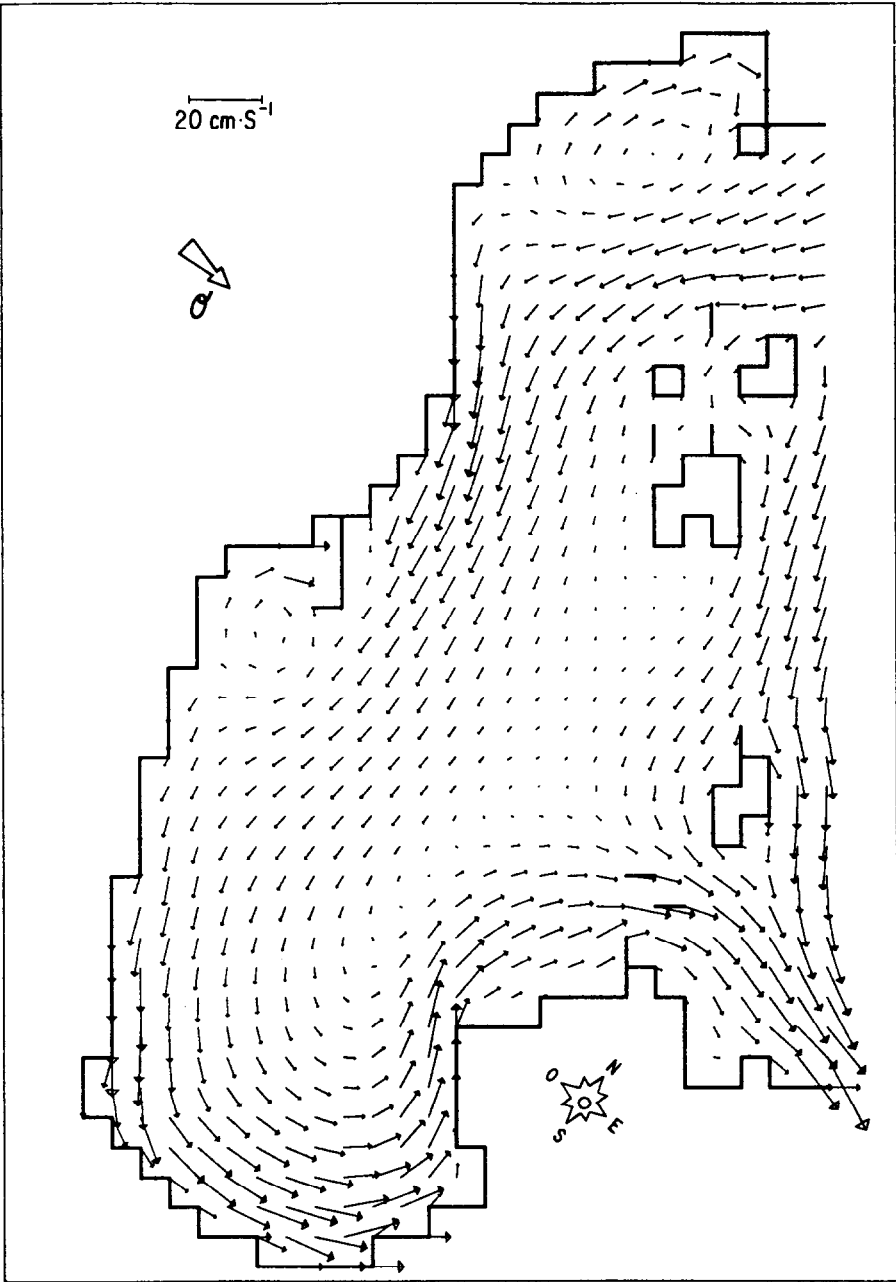


Figura 9.- Corrientes residuales inducidas por viento del oeste.
Figure 9.- Residual currents induced by the western wind.

magnitud, ($u < 5$ cm/s), ésto es consecuencia de la amplia sección transversal de la boca y que las amplitudes de la elevación de marea son del orden de un metro. Las corrientes residuales causadas por la marea, son prácticamente nulas ($u < 0.6$ cm/s), ésto es debido a la poca magnitud de las corrientes de marea y a la distribución batimétrica con pendientes muy suaves. Existe un amplio intercambio de agua con el Canal de Ballenas, originado por la amplitud de la boca y la orientación de la bahía con respecto a los vientos dominantes, los cuales provocan flujos paralelos a la costa que recorren gran parte de la bahía.

Otra característica importante es la presencia de zonas de corrientes de poca magnitud donde suponemos mayor tiempo de residencia de las aguas y sus parámetros hidrográficos y biológicos. Estas áreas fueron, la ensenada La Gringa, la parte central de la bahía, en el centro del giro mayor, la ensenada El Rincón y la pequeña ensenada frente al poblado. De estas zonas, la más persistente para las diferentes condiciones de viento tratadas, fue la ensenada La Gringa; después se encuentra la parte central de la bahía. Esta zona de corrientes débiles varía grandemente en ubicación y cobertura según la dirección del viento.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a Miguel Lavín y Carolina Morales su ayuda en la revisión del manuscrito, así como al Centro de Cálculo del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) por el apoyo otorgado.

LITERATURA CITADA

- Argote-Espinoza, M.L., Amador, A. y Morales, C. (1985). Variación estacional de la estratificación en la región norte del Golfo de California. Memorias Reunión Anual 1985, Unión Geofísica Mexicana, pp. 334-338.
- Ayala-Sánchez, N.E. y Michel-Sánchez, R.D. (1980). Relación entre abundancia, distribución de plancton y el comportamiento de parámetros hidrológicos en Bahía de los Angeles, B.C. Segundo Simposio Latinoamericano de Acuicultura., Tomo 1: 393-446.
- Other important characteristic is the presence of low magnitude currents zones, where it has been supposed that the water stay for longer periods, maintaining their hydrographic and biological parameters. These areas were: La Gringa inlet, the middle portion of the bay, at the center of the biggest gyre, El Rincón inlet and the small inlet located in front of the village. From these areas, the most persistent to different wind conditions was La Gringa; the second was the middle bay zone. This low currents zone varies in terms of the location and covering according to the wind direction.

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank Miguel Lavín and Carolina Morales for helping us reviewing the manuscript, as well as to the Centro de Cálculo del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) for supporting this study.

Translation by Ana Luz Quintanilla M.

-
- Barnard, J.L. and Grady, J.R. (1968). A biological survey of Bahía de los Angeles, Gulf of California, México. I General Account. San Diego Soc. Nat. Hist. Trans., 15(6): 51-66.
- Bowden, K.F. (1983). Physical Oceanography of Coastal Waters. Ellis Horwood Series in Marine Science., 302 pp.
- Durazo Arvizu, R. (1990). Frentes térmicos de verano en el Alto Golfo de California. Tesis de Maestría. CICESE, 66 pp.
- Hunter, J.R. (1980). User's manual for two dimensional numerical hydrodynamic model. Report U80-5. UCES, Marine Sciences Laboratories. Menai Bridge, Anglesey, UK.
- Hunter, J.R. (1983). Numerical simulation of currents in Koombana Bay and the influence of the proposed new power station. The University of Western Australia. Environmental Dynamics Report, ED-83-049.
- Ibarra-Sañudo, S. (1988). Serie de tiempo de variables hidrológicas al norte de Bahía de los Angeles, B.C., condiciones de verano. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, UABC.

- Merrifield, M.A., Badan-Dangón, A. and Winant, C.D. (1987). Temporal behaviour of lower atmospheric Variables over the Gulf of California. 1983-1985 A Data Report.
- Phillips, O.M. (1977). The dynamics of the upper ocean. Cambridge at the University Press, 261 pp.
- Serrano-Guzmán, S. J. (1990). Abundancia y distribución de larvas del mejillón *Modiolus capax* (Conrad) (Mollusca: Bivalvia) en Bahía de los Angeles, B.C. México. Durante el período primavera-verano de 1986. Tesis de Maestría.