

CORRIENTES ORIGINADAS POR LA ACCION DEL VIENTO  
Y LA MAREA EN EL GOLFO NUEVO

Andrés L. Rivas

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas  
Centro Nacional Patagónico (CONICP - CONICET)  
28 de Julio 28. Pto. Madryn. Rca. Argentina.

**RESUMEN**

Se emplea un modelo numérico bidimensional para simular las corrientes originadas por el viento en la región del golfo Nuevo.

En las diferentes corridas efectuadas los resultados exhiben el mismo patrón general: flujos más intensos, paralelos a las isobatas y que mantienen la dirección del viento aplicado en las regiones costeras donde la profundidad varía rápidamente, los cuales; regresan atenuados por la zona central. Estos resultados son interpretados en base a las ecuaciones empleadas.

Se enuncian las posibilidades existentes para mejorar la simulación de las condiciones iniciales y de contorno impuestas.

**ABSTRACT**

A two-dimensional model is used to derive the wind driven currents in Nuevo gulf.

The different derived circulation shows the same general behavior: strong flows, following bathymetric contours in the direction of the applied wind stress in the coastal areas where depth is more variable, which return reduced by the central area. The dynamical significance of the derived circulation is discussed.

Different possibilities to improve the imposed boundary and initial conditions are given.

## INTRODUCCION.

Se emplea un modelo numérico para resolver las ecuaciones que describen el movimiento del mar bajo la acción de fuerzas de mareas y meteorológicas.

El modelo es aplicado al área del golfo Nuevo, zona que ha sido modelada por otros autores con anterioridad (Barros y Krepper, 1977; Rivas, 1977), pero por su diseño, como se verá más adelante, el mismo puede fácilmente ser aplicado a otras regiones de interés.

El objetivo de este trabajo es lograr una herramienta idónea para el estudio de la dinámica de los golfos Nuevo y San José, así como también de las aguas de plataforma adyacentes a los mismos.

## ECUACIONES.

Las ecuaciones de continuidad y momento integradas verticalmente de superficie a fondo pueden expresarse en forma vectorial:

$$\delta_z E + \nabla \cdot D U = 0 \quad (1)$$

$$\delta_z U + U \cdot \nabla U + 2 \Omega \times U = -g \nabla E - 1/\rho_a \nabla P_a - \tau_r/(\rho D) + \tau_b/(\rho D) + KH \nabla^2 U \quad (2)$$

En la Tabla I se dan las definiciones de los símbolos usados.

Considerando una componente de la corriente originada por el viento y asociada a un número de onda  $k$ , el número de Rossby,  $R_o$ , se puede expresar

$$R_o = U \cdot \nabla U / (2 \Omega \times U) \approx k U / f$$

de donde se ve que aún considerando números de onda del orden de  $0,1 \text{ km}^{-1}$  y velocidades de  $10^2 \text{ cm/s}$ ,  $R_o \approx 1$  y en consecuencia se pueden despreciar los términos no lineales debidos a la advección de momento.

En sistemas a gran escala libres de fricción, el gradiente de la presión atmosférica puede originar corrientes geostroficamente balanceadas. Por el contrario, en sistemas pequeños parcialmente rodeados por tierra, la superficie del mar se ajusta para compensar las variaciones de la presión atmosférica antes que un flujo geostrofico pueda desarrollarse. Además, si se considera que el viento que actúa sobre el mar es

geostrófico, el gradiente del campo de presión resulta proporcional a la velocidad del viento:

$$2 \Omega \times W = 1/\rho_a \nabla P_a$$

resultando de ese modo despreciable comparado con el término que tiene en cuenta la tensión del viento sobre la superficie del mar, el cual, es proporcional al cuadrado de la velocidad del viento.

Tomando el coeficiente de difusión horizontal;  $KH \approx 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$  y teniendo en cuenta las distancias elegidas entre los puntos del grillado, el término  $KH \nabla^2 U$  resulta despreciable comparado con los demás en la ecuación (2).

En base a estas consideraciones, la ecuación de momento se reduce a

$$\delta_t U + 2 \Omega \times U = -g \nabla E - \tau_r/(\rho D) + \tau_w/(\rho D) \quad (3)$$

La parametrización usual para el término que considera el efecto de la fricción en el fondo tiene la siguiente expresión cuadrática:

$$\tau_r = \rho CD U U \quad \text{con } CD \approx 2,5 \cdot 10^{-3}$$

existiendo diferentes aproximaciones lineales para la misma. Si la corriente de marea media  $UM$  es grande comparada con la corriente media generada por el viento  $U$ , Hunter (1975) y Heaps (1978) proponen:

$$\tau_r \approx \rho CD UM U = \rho CD (a D)^{1/2} \eta_a U = \rho A U$$

de donde, para el caso del golfo Nuevo, con una amplitud de marea  $\eta_a = 300 \text{ cm}$ , resulta

$$A = \begin{cases} 0,50 \text{ cm/s si } H = 20 \text{ m} \\ 0,25 \text{ cm/s si } H = 90 \text{ m} \\ 0,19 \text{ cm/s si } H = 160 \text{ m} \end{cases}$$

De acuerdo con esta variación y considerando que en general la fricción en el fondo es pequeña, se prefirió trabajar con  $A = 0,24 \text{ cm/s}$  de acuerdo a lo realizado por Heaps (1969) previamente. Esta elección es arbitraria, existiendo la posibilidad de modificar esta parametrización para, por ejemplo, ajustar los resultados que arroja el modelo a futuras observaciones que se realicen en el área.

Similarmente, la tensión del viento sobre la superficie del mar fue parametrizada como

$$\tau_w = \rho_a C W W \quad \text{con } C \approx 1,3 \cdot 10^{-3}$$

De todo lo expresado anteriormente, se concluye que el modelo finalmente adoptado es lineal, por lo cual, solo es necesario calcular las circulaciones producidas por dos vientos de direcciones normales entre sí para obtener la respuesta aproximada a la acción de un viento proveniente de cualquier otra dirección.

#### MODELO NUMERICO

Las ecuaciones (1) y (3) fueron expresadas en diferencias finitas y a partir de ellas se calcularon las variaciones del nivel del mar y las corrientes medias promediadas verticalmente.

Para esto se emplearon dos grillados cada uno de  $16 \times 22 = 352$  puntos separados entre sí por una distancia de 3600 m. En una de estas grillas se calcularon las variaciones del nivel del mar, mientras que en los puntos de la otra se computaron las corrientes medias, estando ambas redes superpuestas como se indica en la figura 1.

La línea de costa (frontera cerrada) fue ajustada mediante segmentos que unen los puntos donde se calculan las velocidades medias (puntos de corriente) y la boca del golfo (frontera abierta) se definió uniendo puntos de marea, tratando de obtener el mejor ajuste posible entre las fronteras del modelo y los límites naturales del área modelada.

En las fronteras cerradas la condición de borde impuesta es velocidad normal cero y en las fronteras abiertas se establece el nivel del mar como una función del tiempo y la posición.

Considerando un punto de corriente, el mismo puede ser interior, exterior o pertenecer a la frontera cerrada del área modelada. En el primer caso se fijó una condición inicial dando valores a las componentes de la velocidad para el instante inicial, en caso de ser exterior no es de interés pues sobre el mismo no se calcularán las componentes de la corriente media, y, finalmente, si está ubicado sobre la frontera es necesario considerar la posición que ocupa (sobre un segmento de costa orientado de Norte a Sur, de Este a Oeste, sobre un vértice de  $90^\circ$ , etc., etc.) para especificar la condición de contorno compatible con el postulado general "velocidad normal cero". Análogamente, si se considera un punto de marea existen distintas posibilidades para el mismo. Todas estas diferentes categorías de nodos fueron clasificadas en ambas grillas de acuerdo con las condiciones que surgen de la figura 1 y luego

se elaboró el programa de computación de manera que los cálculos se ejecutan recorriendo las diferentes clases de puntos y no el grillado secuencialmente. Este tipo de tratamiento matemático ofrece la ventajosa posibilidad de emplear el mismo programa de computación en diferentes zonas variando solamente la clasificación de los nodos en concordancia con las fronteras físicas de la región a modelar. Para mayores detalles sobre este tema consultar Heaps (1969).

Las profundidades representadas en la carta H-218 del Servicio de Hidrografía Naval, fueron extrapoladas a los puntos de corriente y estos valores, a su vez, fueron suavizados para evitar cambios bruscos en la topografía del fondo. Para filtrar las variaciones bruscas de profundidad se empleó la siguiente ecuación:

$$H_{i,j}^{t+\Delta t} = H_{i,j} + 1/8 [H_{i+1,j} + H_{i,j+1} + H_{i-1,j} + H_{i,j-1} - 4H_{i,j}]$$

En la figura 1 se muestran las isobatas resultantes, tanto de los valores observados como las correspondientes a los suavizados.

El incremento temporal entre cada paso fue fijado en  $t = 60$  s siguiendo los criterios de estabilidad de este tipo de esquema de diferencias finitas desarrollados por Heaps (1969).

#### RESULTADOS

El modelo fue corrido empleando como forzado un viento estacionario del Oeste con una intensidad de 20 km/h y luego con un viento del Sur de igual intensidad. Otra corrida se realizó con un viento del Sud-Oeste compuesto por la suma de los dos primeros casos (20,5 km/h de intensidad) y por último con un viento variable en dirección e intensidad hora a hora, que en la primer hora tiene una dirección desde el Oeste y una intensidad de 20 km/h y que luego de 22 horas rota hasta ponerse casi con dirección Sur y una intensidad de 6 km/h aproximadamente (ver figura 11).

En todos los casos analizados la tensión del viento era igual en cualquier punto del grillado, las condiciones iniciales se tomaron  $U = E = 0$  para  $t = 0$  y como condición de contorno en la boca del golfo se escogió  $E = 0$  en todo instante. A pesar de considerar esta condición de contorno estacionaria en la frontera abierta, en lugar de emplear sobre la misma una onda de marea de período  $T \approx 12$  horas, el programa se confeccionó de modo que los resultados corresponden a valores promediados

sobre 12 horas. De esta manera el mismo programa podrá ser utilizado cuando se establezcan condiciones de contorno más reales sin perjuicio que los resultados sean perturbados por corrientes de marea.

La convergencia fue rápida empleando alrededor de 20 horas para estabilizarse en todos los casos. Luego de estabilizado, el modelo seguía funcionando sin el forzado del viento durante 12 horas y las 720 salidas (a razón de una cada 60 s) promediadas. Cuando se corrió con viento del Oeste se realizó otra salida adicional que exhibe los resultados que corresponden a continuar aplicando el mismo viento durante las 12 horas posteriores a la estabilización.

Las figuras 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 muestran las salidas obtenidas en cada uno de los casos detallados anteriormente, tanto en lo referente a las corrientes medias como a nivel del mar. La longitud de cada flecha es proporcional a la intensidad de la corriente media calculada en su punto central, habiendo sido cada flecha ligeramente curvada en la dirección del flujo.

#### DISCUSION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Una vez alcanzado el estado estacionario, el balance de fuerzas puede ser expresado:

FC	=	GP	-	FF	+	TV
Fuerza de Coriolis		Gradiente de presión		Fricción en el fondo		Tensión del viento

De acuerdo con la parametrización empleada en el modelo, los órdenes de magnitud en estas fuerzas (en unidades cgs) son

Fuerza de Coriolis:  $FC \approx f U \approx 10^{-4} U$  (cm/s)

Fricción en el fondo:  $FF \approx A U/H \approx 24 \cdot 10^{-4} U$  (cm/s)/H (m)

Tensión del viento:  $TV \approx \tau_w/(\rho H) \approx 50 \cdot 10^{-4}/H$  (m)

Además, en la salida que se obtuvo al considerar como forzado un viento del Oeste de 20 km/h de intensidad que actuaba durante 22 horas, cuyos resultados son representativos en orden de magnitud de los obtenidos en otras corridas, se obtuvieron los siguientes valores extremos para el término que tiene en cuenta la pendiente de la superficie del mar (figura 4):

$$\text{Gradiente de presión: } GP \approx g \nabla E \approx \begin{cases} \text{máximo } 2 \cdot 10^{-4} \\ \text{mínimo } 0,5 \cdot 10^{-4} \end{cases}$$

Si bien todas las fuerzas involucradas contribuyen a determinar el flujo medio, mediante la comparación cuantitativa de los valores dados, es posible estimar la influencia relativa de cada una de ellas. Así, por ejemplo, se puede ver que solo en las regiones costeras con profundidades inferiores a 24 m la fricción en el fondo será superior al término de Coriolis. El rozamiento también será inferior a la tensión del viento, pues para superarla debería ser  $U > 2 \text{ cm/s}$ , lo cual no ocurre en ninguna parte del área modelada. Si comparamos la fricción con el término que considera el gradiente de presión, se encuentra la relación:

$$U \text{ (cm/s)/} H \text{ (m)} > \nabla E \cdot 10^7/24$$

necesaria para que el rozamiento supere al efecto originado en los cambios de nivel, tampoco se satisface en ningún punto del grillado.

En una región rodeada casi totalmente por costas se podría esperar que el nivel del mar se ajuste para compensar el efecto del viento. Es decir:

$$E \approx \tau_w / (\rho g H) \approx 5 \cdot 10^{-6} / H \text{ (m)}$$

en cuyo caso el flujo medio sería prácticamente nulo. Si bien el golfo Nuevo es una cuenca semicerrada, las rápidas variaciones de profundidad en la dirección normal al viento, aplicado en las zonas costeras, no permiten que se alcance este tipo de equilibrio, observándose que el gradiente del nivel del mar supera a la tensión del viento. Por ese motivo, la fuerza de Coriolis adquiere mayor importancia, pudiéndose explicar de ese modo los flujos relativamente intensos en la dirección del viento y paralelos a las costas, que retornan más atenuados por el centro del golfo donde las variaciones de profundidad son más suaves, así como también, las características geostólicas del flujo costero puestas de manifiesto por su tendencia a permanecer paralelo a las isobatas aun cuando el viento aplicado tenga otra dirección (ver figuras 7).

Estas características generales describen e interpretan globalmente los resultados obtenidos con las diferentes simulaciones mencionadas: flujos más intensos, paralelos a las isobatas y que mantienen la dirección del viento aplicado en

Las regiones costeras donde las variaciones de profundidad son rápidas, los cuales, regresan atenuados por la zona central.

Para concluir con el análisis de los resultados y poder describir cada uno de los casos en particular, se hace necesario interpretar el sentido de giro de las circulaciones obtenidas, en función del forzado impuesto. Para hacer esto es conveniente expresar el balance de fuerzas correspondiente al estado estacionario como:

$$\rho \nabla \times \mathbf{U} = -g \nabla E - \rho \mathbf{U} \cdot \nabla \mathbf{U} + \tau_w / (\rho H)$$

Aplicando el operador  $\nabla \times$  en ambos miembros, despreciando la vorticidad planetaria y considerando a  $\tau_w$  constante en todos los puntos o al menos  $\nabla \times \tau_w = 0$ , resulta

$$0 = -\rho H^{-2} \nabla \times \mathbf{U} = \rho H^{-2} \mathbf{U} \times \nabla H + H^{-2} \tau_w \times \nabla H$$

donde el primer término

$$\rho H^{-2} \nabla \times \mathbf{U} = \rho H^{-2} \omega \mathbf{k}$$

es interpretado como la disipación de vorticidad debida a la fricción en el fondo. El segundo término tiene en cuenta la vorticidad generada por fricción en una zona de profundidad variable y el último la vorticidad generada por el viento en una zona de profundidad variable (Párraga y Griffiths, 1980). Despreciando la vorticidad generada por el rozamiento (dado que  $\rho \mathbf{U} \cdot \nabla \mathbf{U} \approx \tau_w$  solo si  $U = 2 \text{ cm/s}$ ) puede aproximarse

$$\omega \mathbf{k} \approx (\rho H)^{-2} \tau_w \times \nabla H$$

ecuación que describe acabadamente los cambios de dirección del flujo medio encontrados, en función del viento aplicado y el gradiente de profundidad.

### CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta que el campo de densidades promediado verticalmente es relativamente homogéneo, se puede considerar que el modelo desarrollado constituye una herramienta apropiada para describir los hechos más importantes de la circulación del agua en el golfo Nuevo.

También es destacable la versatilidad lograda en la programación del mismo que, como fue explicado en el texto, permite su aplicación en otras áreas mediante la introducción de solo pequeñas modificaciones.



Como paso inmediato posterior, antes de encarar la realización de un modelo tridimensional y a fin de mejorar la simulación de las condiciones físicas del golfo, es conveniente analizar las posibilidades de introducir condiciones de contorno más reales. Este paso deberá realizarse en tres etapas:

1- Introducir un campo de viento variable en el tiempo y en el espacio.

2- Emplear como condición de contorno en la frontera abierta (boca del golfo) valores para el nivel del mar que consideren la marea en la misma y su variabilidad temporal y espacial.

3- Reemplazar la condición inicial para el nivel del mar:

El 0 por otra que tenga en cuenta alturas de marea en todo el área de trabajo.

Es probable que la parametrización empleada para considerar la fricción en el fondo no sea la más apropiada, quedando la posibilidad de cambiar la misma usando un coeficiente dependiente de la profundidad, o bien, una expresión que varíe con el cuadrado de la velocidad.

#### BIBLIOGRAFIA

Barros, V. R. y Krepper, C. M., 1977: Modelo estacionario del golfo Nuevo. Acta Oceanographica Argentina, Vol. 1 Nº 2, 11-29.

Heaps, N. S., 1969: A two-dimensional numerical sea model. Phil. Trans. R. Soc., Ser. A, Vol. 265, 93-137.

Heaps, N. S., 1978: Linearised vertically-integrated equations for residual circulation in coastal seas. Dstch. Hydrogr. 2, 5, 147-169.

Hunter, J. R., 1975: A note on the quadratic friction in the presence of tides. Estuarine Coastal Mar. Sci., 3, 473-475.

Pingree, R. D. and Griffiths, D. K., 1980: Currents driven by a steady uniform wind stress on the shelf around the British Isles. Oceanologica Acta, Vol. 3, Nº 2, 227-236.

Rivas, A. L., 1977: Evaluación numérica del transporte medio en golfo Nuevo. Informe Técnico del CENPAT (a publicar).

## TABLA I

- $t$  : tiempo
- $x, y$ : coordenadas espaciales horizontales,  $x$  hacia el Este,  $y$  hacia el Norte.
- $U = (u, v)$ : vector velocidad horizontal media.
- $E$ : elevación de la superficie del mar.
- $H$ : profundidad del mar sin perturbar.
- $D = H + E$ : profundidad total del mar.
- $P_a$ : presión atmosférica.
- $\rho$ : densidad del agua de mar.
- $\rho_a$ : densidad del aire.
- $g$ : aceleración de la gravedad.
- $\Omega$ : vector velocidad angular de la rotación terrestre.
- $f$ : factor de Coriolis.
- $\tau_w$ : tensión del viento (vector).
- $\tau_b$ : tensión en el fondo (vector).
- $W$ : vector velocidad del viento.
- $k$ : número de onda.
- $k$ : versor en la dirección vertical.
- $\cdot$ : producto vertical.
- $\nabla = (\delta_x, \delta_y)$

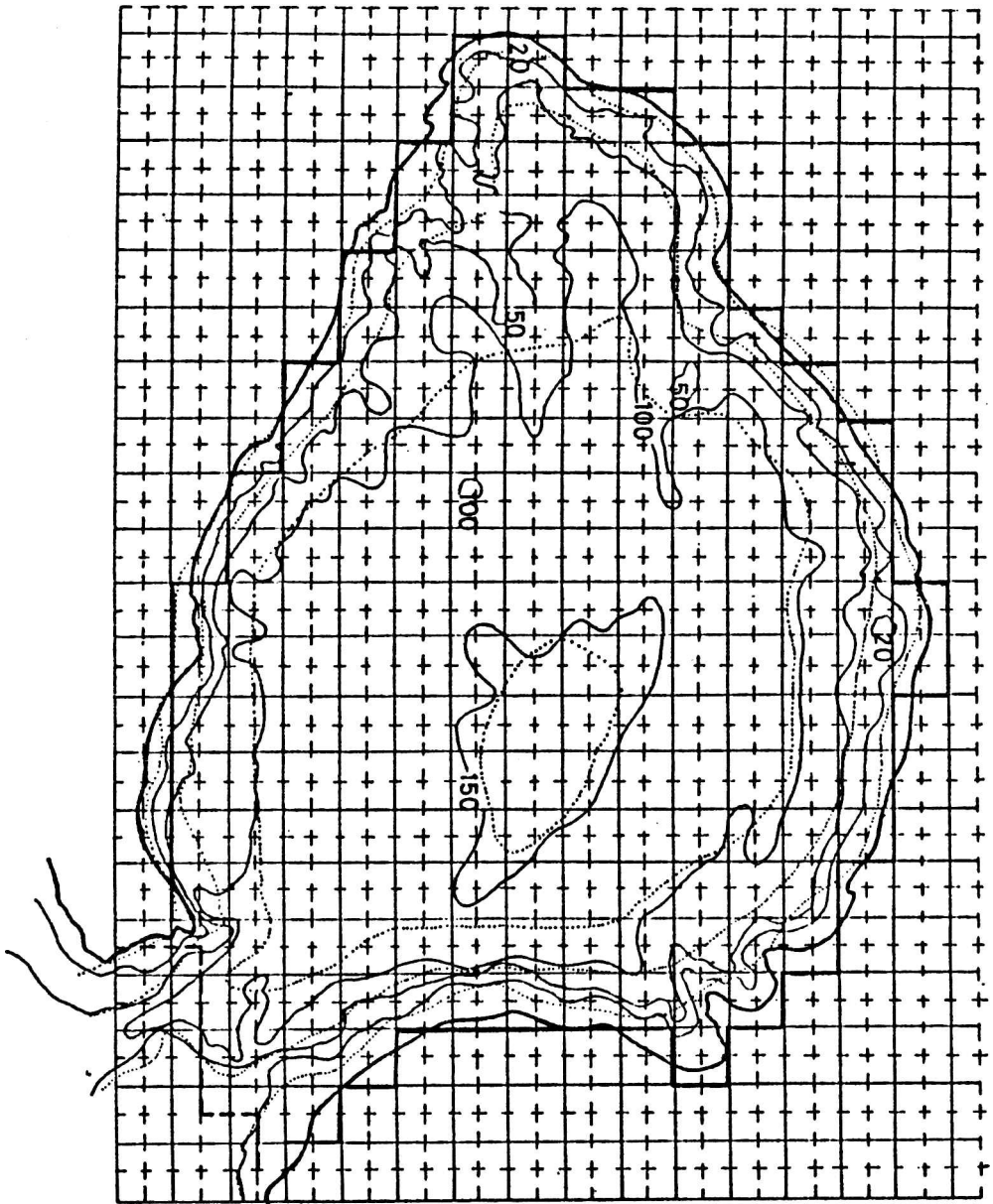


FIGURA 1



Punto de corriente

Punto de marea

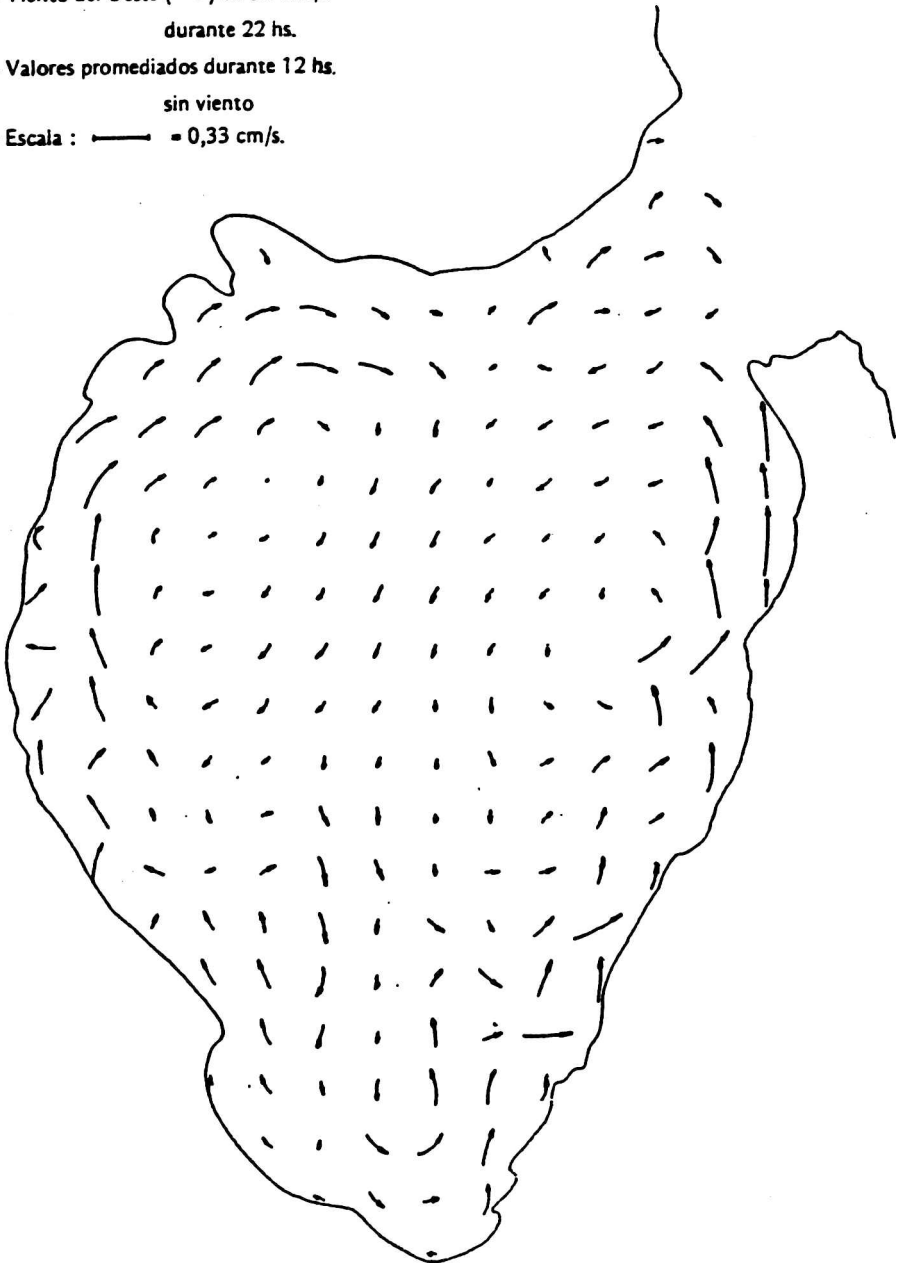


Isobata real (m)

Isobata suavizada (m)

FIGURA 2

- Viento del Oeste (→) de 20 Km/h durante 22 hs.
- Valores promediados durante 12 hs. sin viento
- Escala : — = 0,33 cm/s.



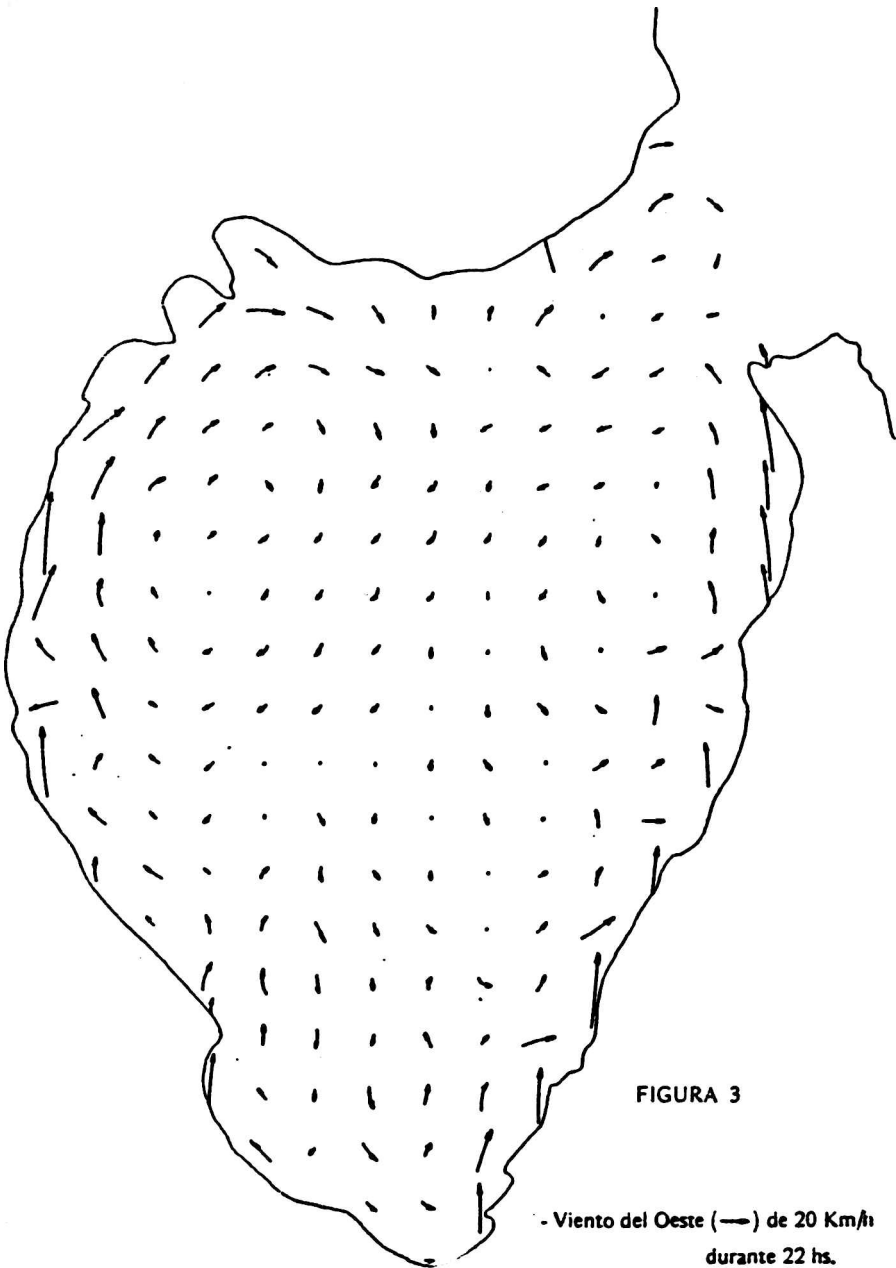


FIGURA 3

- Viento del Oeste (→) de 20 Km/h durante 22 hs.
- Valores promediados durante 12 hs. con viento.
- Escala : — = 1 cm/s

FIGURA 4

- Alturas del nivel del mar (cm)
- Viento del Oeste (→) de 20 Km/h durante 22 hs.

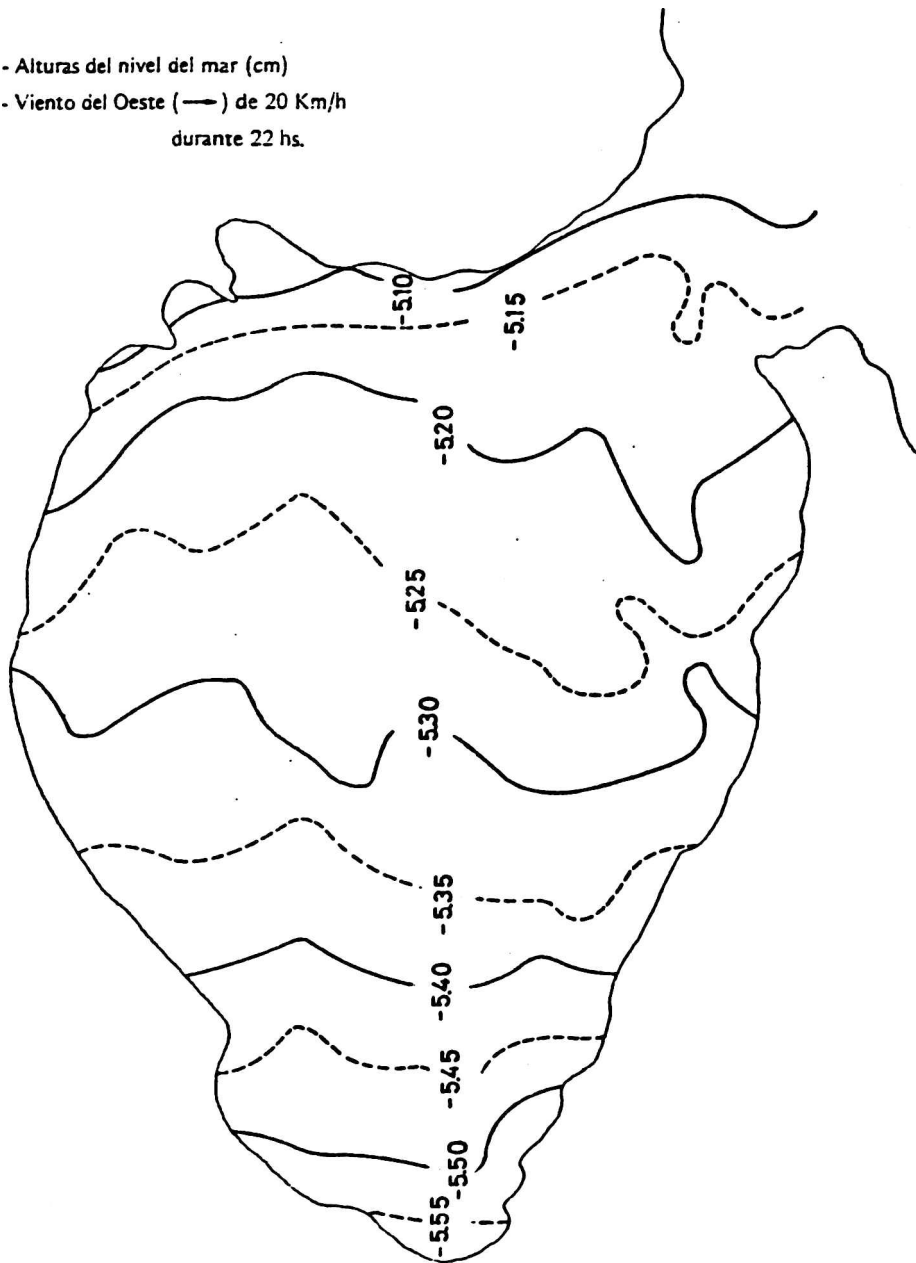
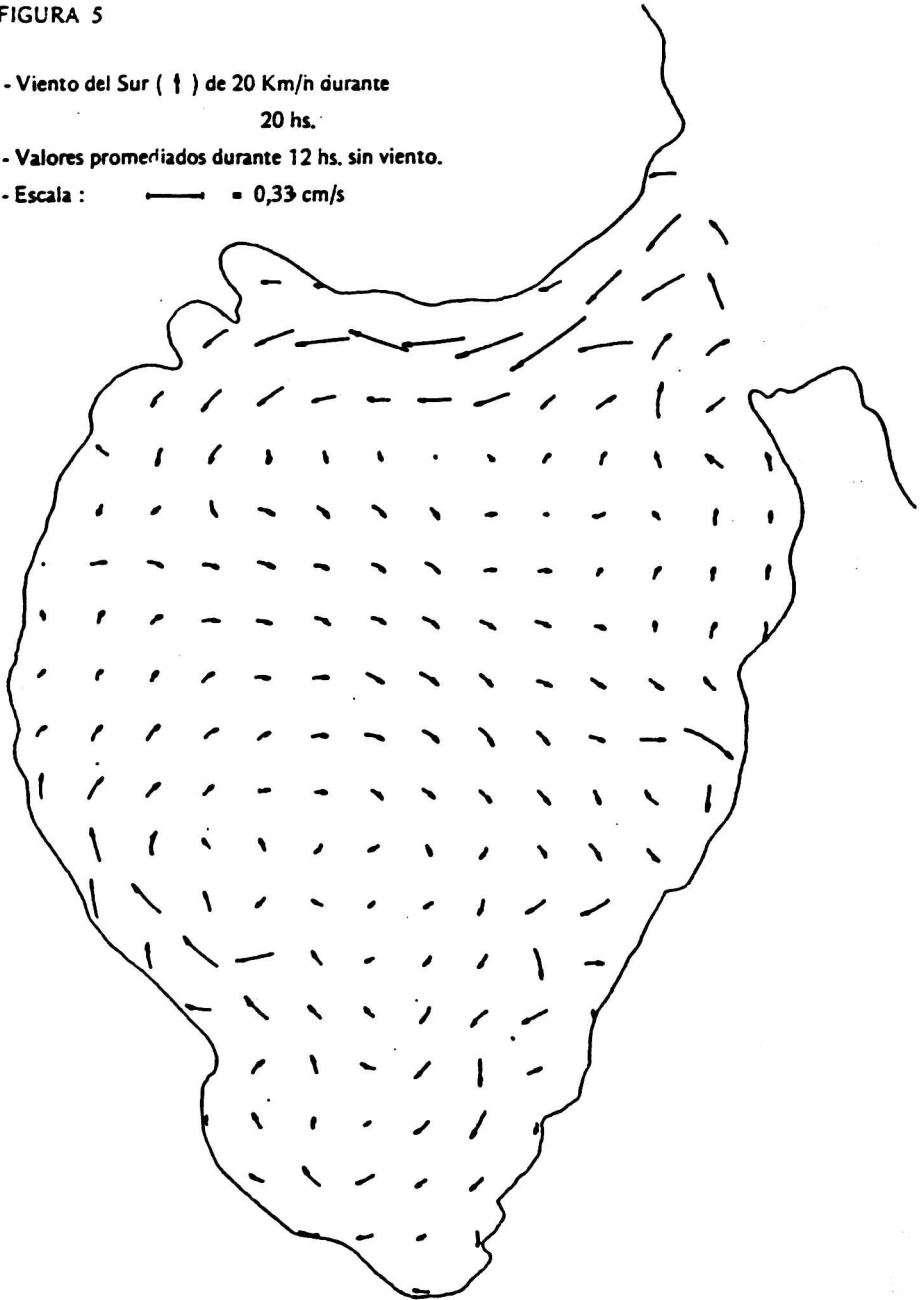


FIGURA 5

- Viento del Sur (  $\uparrow$  ) de 20 Km/h durante 20 hs.
- Valores promediados durante 12 hs. sin viento.
- Escala :  $\longrightarrow$  = 0,33 cm/s



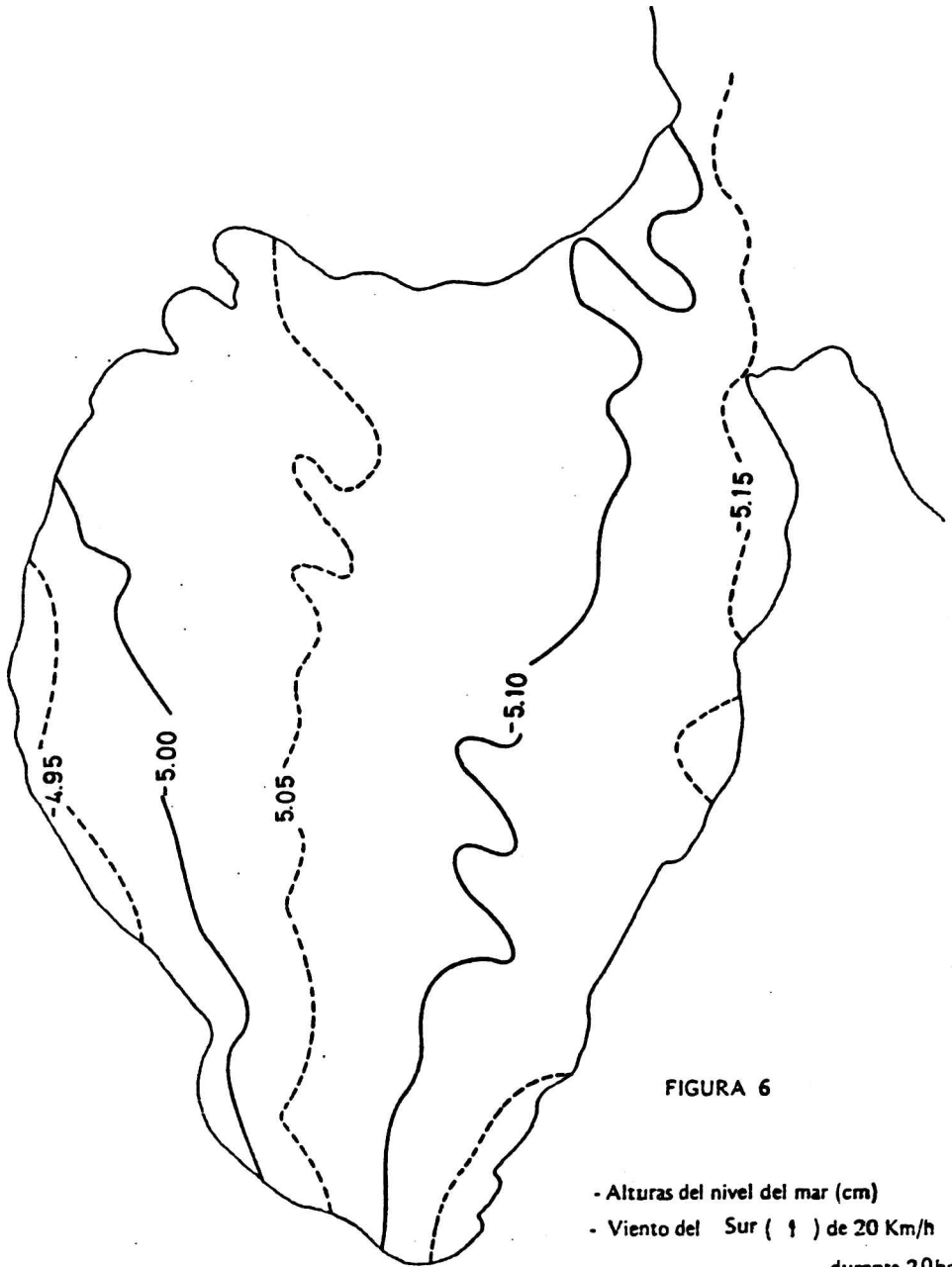



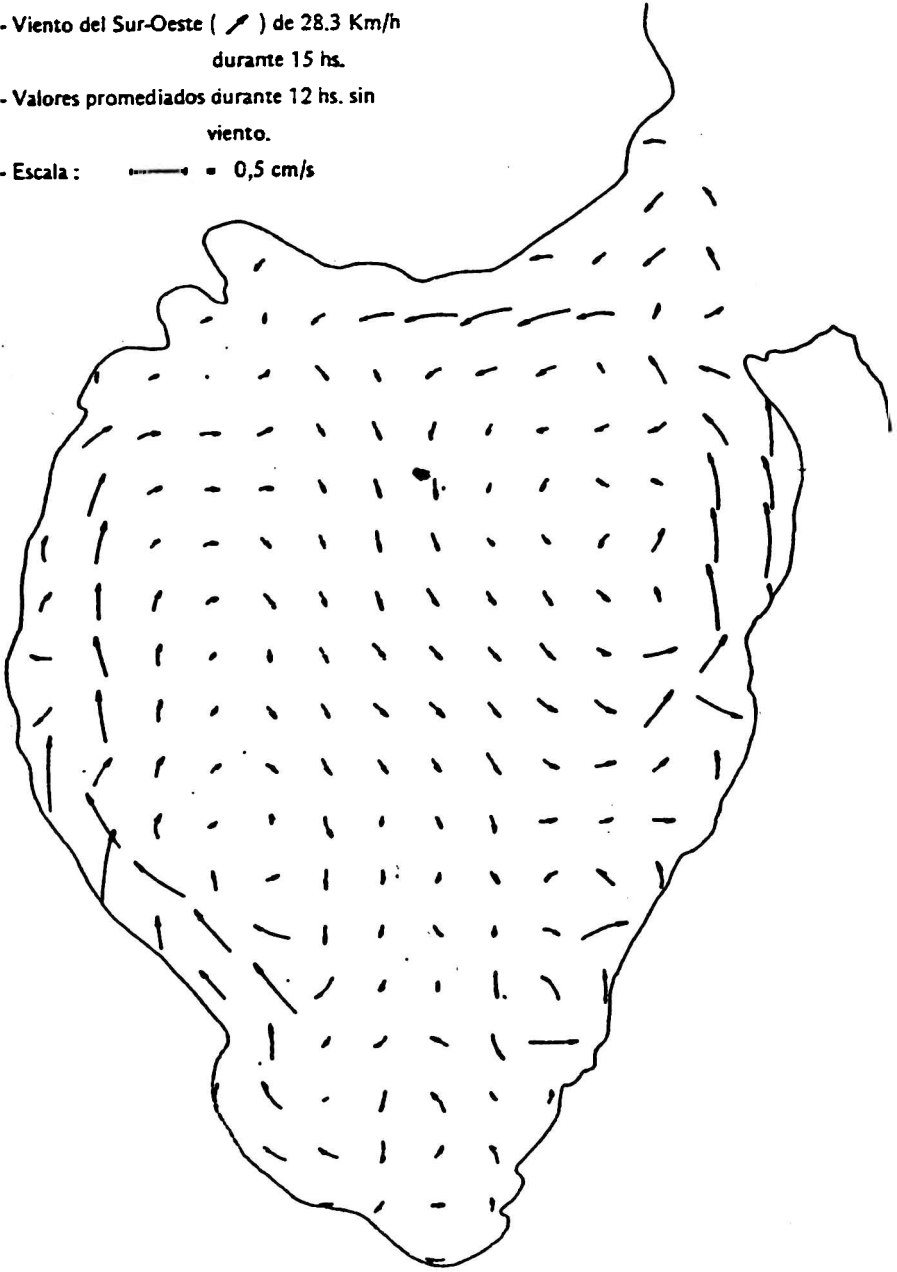
FIGURA 6

- Alturas del nivel del mar (cm)
- Viento del Sur ( ↓ ) de 20 Km/h durante 20hs.



FIGURA 7

- Viento del Sur-Oeste ( ↙ ) de 28.3 Km/h durante 15 hs.
- Valores promediados durante 12 hs. sin viento.
- Escala :  = 0,5 cm/s



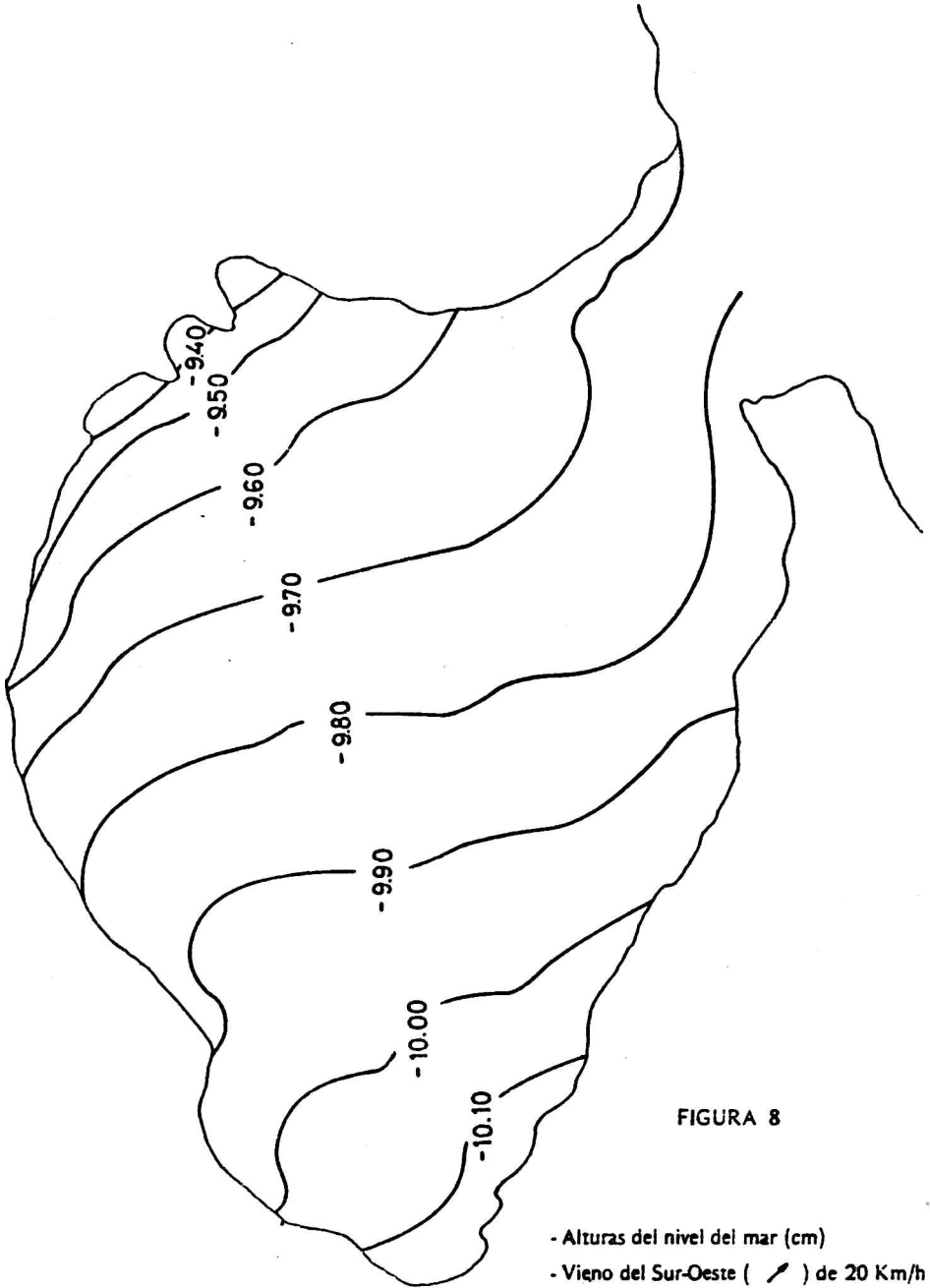


FIGURA 8

- Alturas del nivel del mar (cm)
- Viento del Sur-Oeste ( / ) de 20 Km/h durante 15 hs.

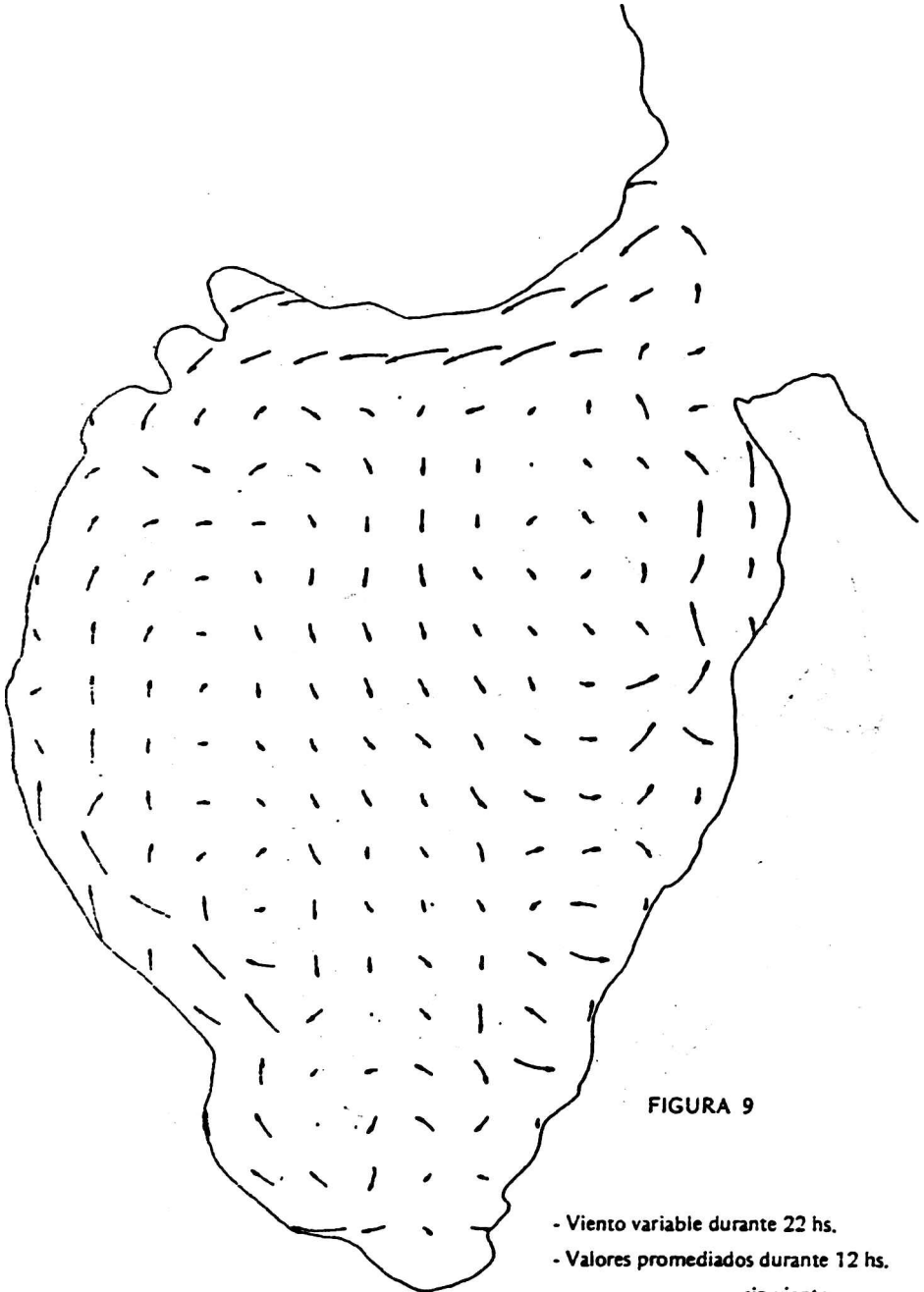



FIGURA 9

- Viento variable durante 22 hs.
- Valores promediados durante 12 hs.  
sin viento.
- Escala :  = 0,1 cm/s

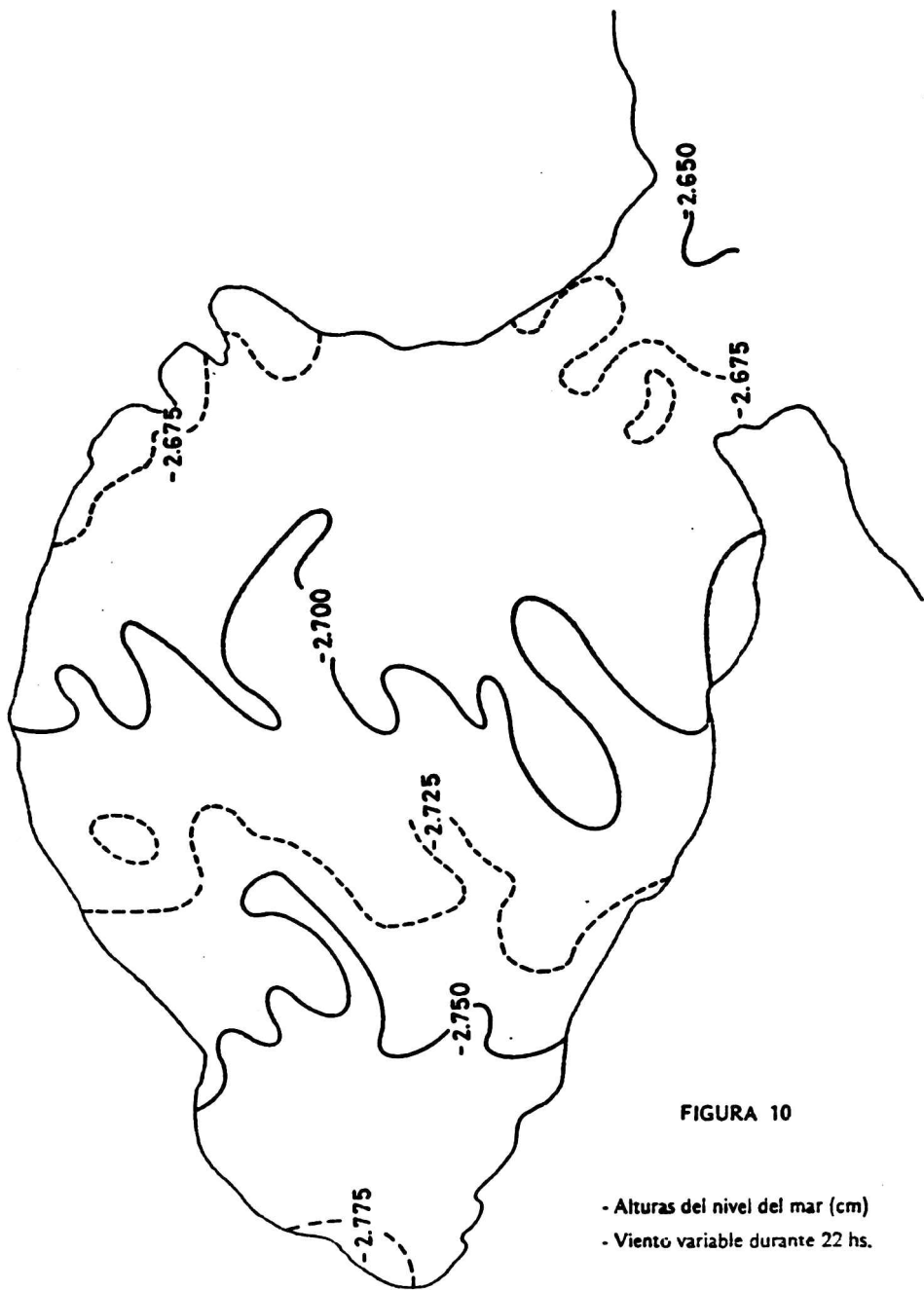


FIGURA 11

