

# SURGENCIA COSTERA EN LAS PROXIMIDADES DE LA PENINSULA COLOMBIANA DE LA GUAJIRA

Gustavo E. Fajardo\*

## ABSTRACT

Oceanographical observations were made along the Colombian coast, in the Caribbean Sea, aboard the R/V ARC San Andres of the Colombian Navy, in September 1972, as part of the national contribution to CICAR program. This paper analyze the surface sea water physical properties distribution off the Colombian Guajira Peninsula between meridians  $71^{\circ}-75^{\circ}W$  and the vertical section crossing the upwelling main area during summer time.

Anomalies in the surface distribution of temperature, salinity and density near La Guajira coast, in the vicinity of  $72^{\circ}W$  were observed; waters with low temperatures ( $T \approx 25.50^{\circ}C$ ) associated with high salinities ( $S > 36,50\text{‰}$ ) were recorded in this region.

It has been possible to determine that these anomalies are due to upward motions, the intensity of which was calculated by means of a mathematical Model, to be about  $11.4 \text{ m/month}$ .

The continuity of the upward motions was confirmed by the occurrence of drift currents, which made transport of "upwelled" waters to NW and W, extending its influence along the Colombian coast.

## RESUMEN

En Septiembre de 1972 se hicieron observaciones oceanográficas a lo largo de la costa Colombiana en el Mar Caribe, como parte de la contribución nacional al programa CICAR, utilizando el B/O ARC San Andrés de la Armada de Colombia. Este trabajo analiza la distribución superficial de las propiedades físicas del agua de mar durante el verano, en el área adyacente a la Península Colombiana de la Guajira entre los meridianos  $71^{\circ} - 75^{\circ} W$  y la sección vertical que corta la zona de surgencia.

Se observaron anomalías en las distribuciones superficiales de temperatura, salinidad y densidad en las proximidades de la costa de la Guajira cerca del meridiano  $72^{\circ}W$ , encontrándose en esta región aguas de baja temperatura ( $T \approx 25,50^{\circ}C$ ) asociadas con altas salini-

---

\* Tte de Navío - Armada República de Colombia - Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas - Cartagena.

dades ( $S > 36,50^{\circ} / \text{‰}$ ).

Fue posible determinar que tales anomalías se deben a movimientos ascendentes, calculándose su intensidad, por medio de un modelo matemático, en aproximadamente  $114 \text{ m/mes}$ . La continuidad de los movimientos ascendentes fue confirmada por la existencia de corrientes de deriva, que transportan las aguas que afloran hacia el *NW* y el *W*, extendiendo su influencia a lo largo de la costa Colombiana.

## 1. INTRODUCCION

La ocurrencia de fenómenos de surgencia en el área Sur del Mar Caribe ha sido mencionada por varios Oceanógrafos: Gordon (1967), al analizar la distribución de salinidad superficial encontró, durante el invierno, valores altos de salinidad ( $> 36,50^{\circ} / \text{‰}$ ) en el área Sur del Caribe, mencionando la posibilidad de dos zonas de surgencia frente a la costa Norte de Sur-América, la primera entre Long.  $74^{\circ} - 75^{\circ} \text{ W}$  y la segunda entre Long.  $65^{\circ} - 69^{\circ} \text{ W}$ ; Perloth (1968), basado en el análisis histórico de las temperaturas superficiales del Caribe, para los meses de Agosto y Enero reportó también dos zonas de surgencias, la primera frente a la costa de Venezuela entre Long.  $67^{\circ} - 67^{\circ} \text{ W}$  con un núcleo de máxima surgencia próxima a la Long.  $64^{\circ} \text{ W}$  en las cercanías de Punta Piedras, y una segunda zona de surgencia que se extiende desde Punta Gallinas en la Península de la Guajira frente a la costa de Colombia a lo largo y adyacente a ésta hasta  $75^{\circ} \text{ W}$ ; Febres Ortega (1972), en el análisis isanostérico del Caribe, para los meses de invierno, verificó que la superficie isanostérica de  $400 \text{ cl/t}$  intercepta la superficie del mar en dos grandes regiones del Sur del Caribe, la primera en la costa de Venezuela entre Long.  $64^{\circ} - 68^{\circ} \text{ W}$  y la segunda en la costa de Colombia entre Long.  $70^{\circ} - 79^{\circ} \text{ W}$ , evidenciando de ésta forma la localización de dos grandes zonas de surgencia; Fajardo (1975), al estudiar las condiciones oceanográficas de las aguas adyacentes a la costa Colombiana en el Mar Caribe, encontró anomalías en las distribuciones de temperatura, salinidad y densidad que evidencian la ocurrencia de un fenómeno de surgencia costera en las proximidades de la Península de la Guajira entre Cabo de la Vela y Punta Gallinas, a la altura del meridiano  $72^{\circ} \text{ W}$ .

En este trabajo se hace una descripción en gran escala del fenómeno de surgencia costera en las proximidades de la Península de la Guajira, durante el verano, siendo analizada la distribución superficial de las propiedades físicas del agua de mar, los vientos predominantes en el área, las corrientes generadas por éstos vientos y la sección vertical que corta el núcleo de la surgencia.

Los datos utilizados fueron obtenidos a partir de una red de estaciones oceanográficas, realizadas a lo largo de la costa y regiones insulares de Colombia en el Mar Caribe, a bordo del B/O ARC San Andrés de la Armada de Colombia, durante el crucero oceanográfico exploratorio Océano II (Fases I, II y III) (16 de Agosto a 31 de Octubre de 1972), siendo parte de la contribución de Colombia a nivel regional para el programa CICAR; del cual fueron



utilizadas 50 estaciones de la Fase II (Septiembre de 1972) que cubren el área estudiada (Fig. 1).

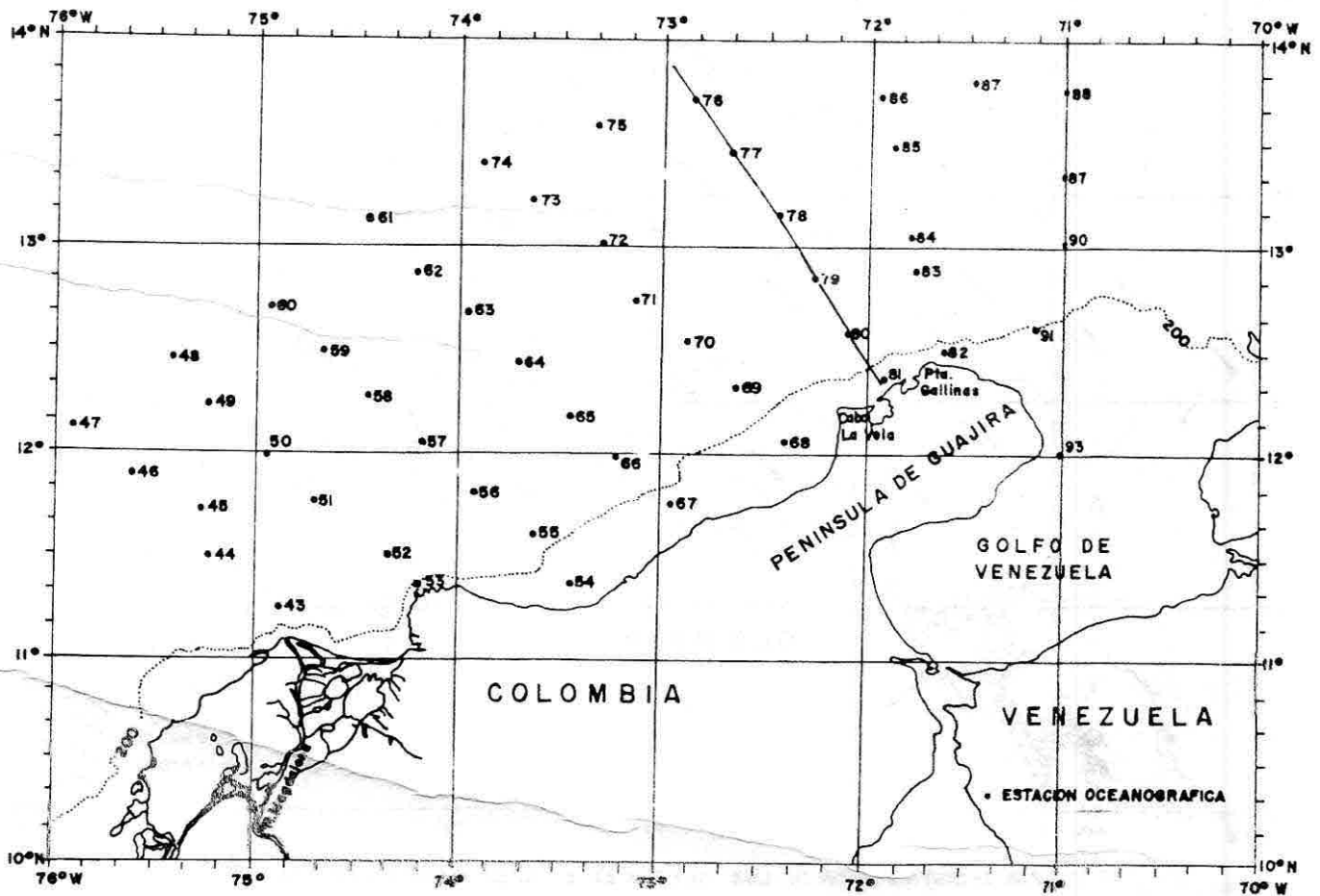


FIG. 1-LOCALIZACION DE LAS ESTACIONES OCEANOGRAFICAS

## 2. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los resultados experimentales aquí analizados permiten inferir desde el punto de vista cualitativo, la influencia de las corrientes oceánicas generadas por el viento sobre la distribución de las propiedades físicas del agua de mar, en las capas superficiales del área estudiada. Aunque los datos analizados corresponden al mes de Septiembre, son considerados representativos para el verano debido a la localización de dicha área en la zona tropical.

*Análisis de los factores que afectan las distribuciones superficiales de Temperatura, Salinidad y  $\Sigma-t$ .* Durante el transcurso del crucero fueron registrados vientos predominantes del NE; entre los meridianos  $71^\circ - 73^\circ W$ , en una faja próxima a la costa, los vientos

son predominantes del Este (Fig. 2). En la zona de surgencia los vientos alcanzaron valores

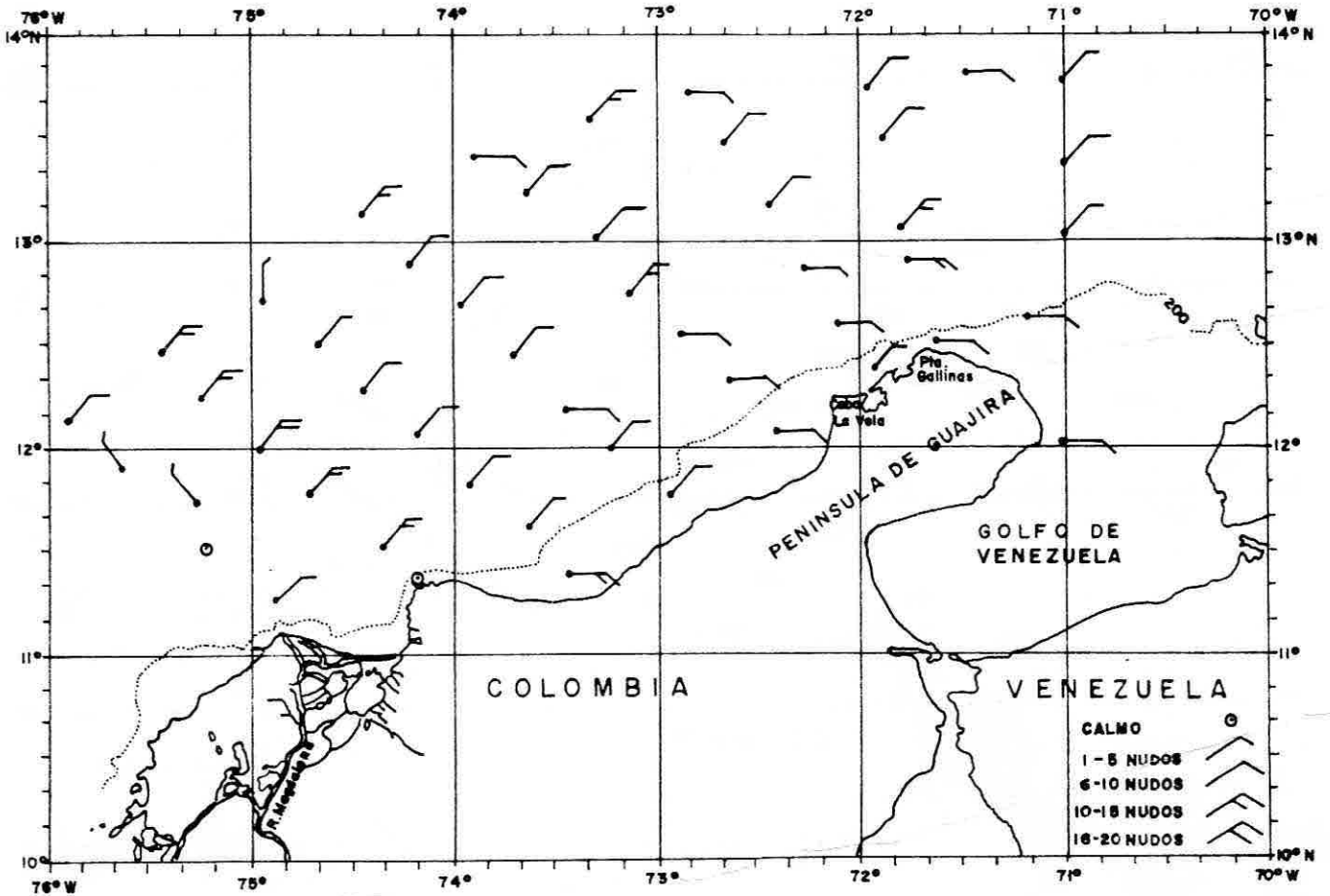


FIG. 2- DISTRIBUCION DE LOS VIENTOS EN EL AREA (SEPTIEMBRE /72)

de 15 nudos generando corrientes de deriva hasta de 0,22 m/seg. ocasionando un desplazamiento de las aguas superficiales próximas a la costa para el W, en dirección a alta mar (Fig. 3).

En las figuras 4, 5 y 6 son representadas las distribuciones de Temperatura, Salinidad y Sigma-t en la superficie a partir de observaciones discretas; observándose los siguientes intervalos de variación de esas propiedades:  $25,50 < T(^{\circ}C) < 28,20$ ;  $22,50 < \sigma_t (g/1) < 24,50$   $735,00 < s(\sigma_{\theta}) < 36,90$  respectivamente.

Las isotermas muestran un fuerte gradiente horizontal a lo largo del meridiano  $72^{\circ} W$ , notándose una variación en temperatura desde  $T \approx 25,50^{\circ} C$  en la zona de surgencia, aumentando a medida que se apartan de la costa hasta alcanzar  $T \approx 28,20^{\circ} C$  a aproximadamente 90 Millas Náuticas al Norte del Cabo de la Vela. Siguiendo las isotermas en dirección NW del Cabo de la Vela se observa una menor variación de temperatura, encontrándose un nú-

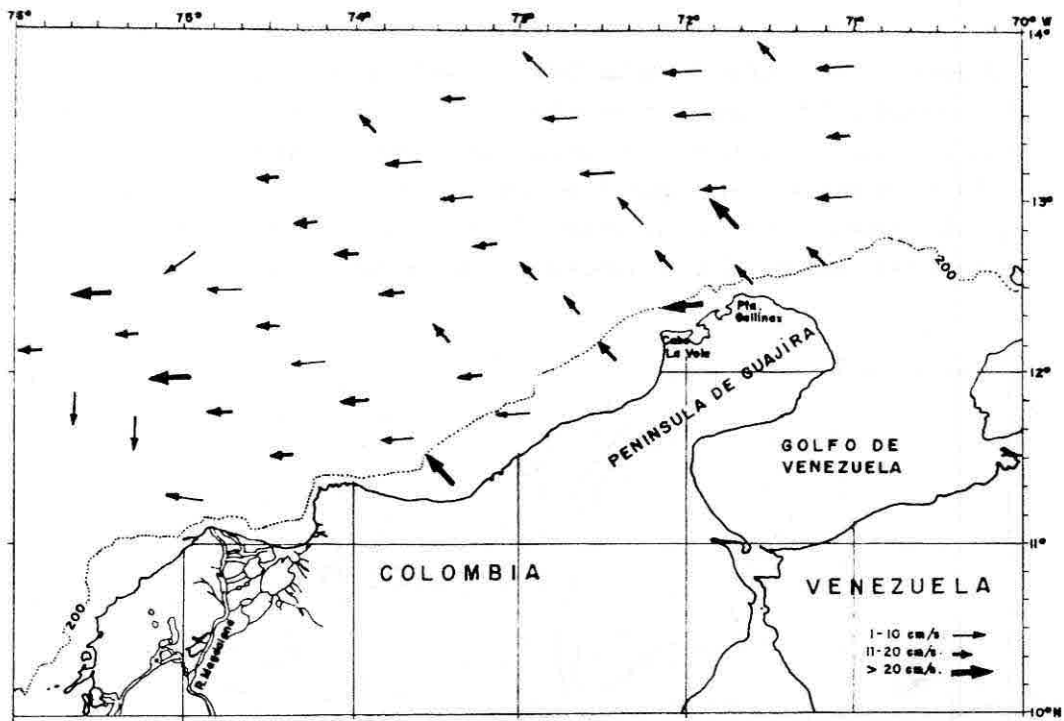


FIG. 3- CORRIENTES DE DERIVA EN LA SUPERFICIE (SEPTIEMBRE/72)

cleo de baja temperatura  $T = 27,00^{\circ}C$  a aproximadamente 80 Millas Náuticas.

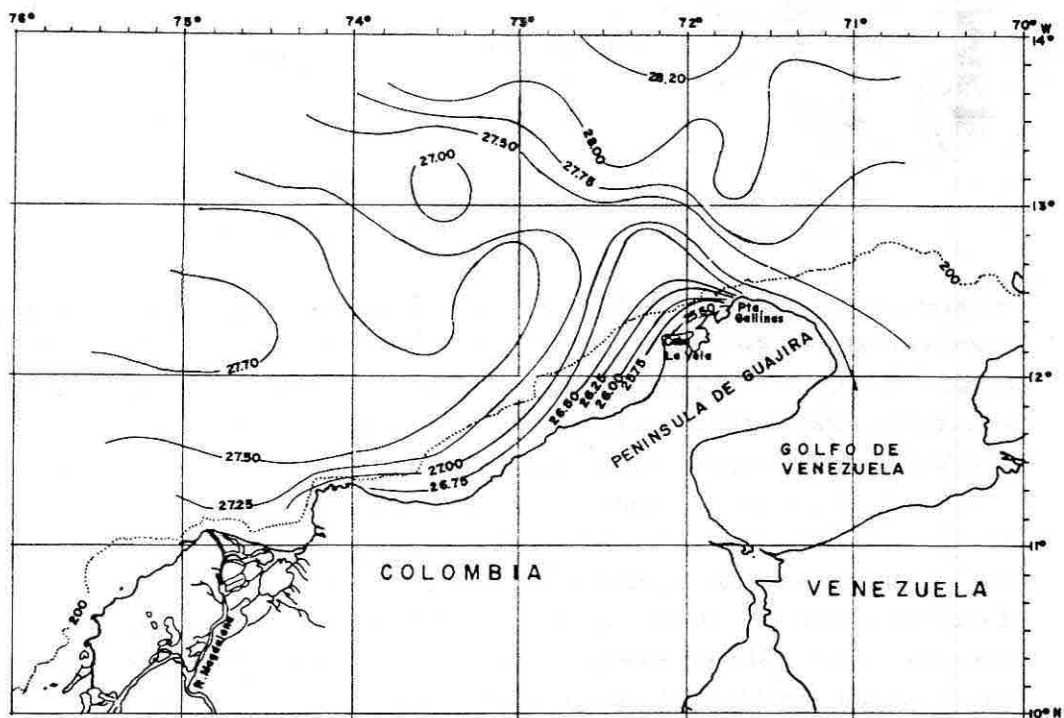


FIG. 4- DISTRIBUCION SUPERFICIAL DE TEMPERATURA ( $^{\circ}C$ ) (SEPTIEMBRE/72)



En la distribución de salinidad superficial (Fig. 5) se observa un máximo de salinidad ( $S \approx 36,90\text{‰}$ ) en la zona de surgencia, coincidente con el mínimo de temperatura. Esta propiedad disminuye en dirección Norte del Cabo de la Vela hasta alcanzar salinidades de  $S \approx 35,25\text{‰}$  en Lat.  $13^{\circ}15'N$ . Siguiendo las isohalinas en dirección NW del Cabo de la Vela se observa una menor variación de la salinidad en esa dirección. Estas aguas de salinidades  $S > 36,50\text{‰}$ , encontradas en la superficie en la zona de surgencia, tienen características de Agua Subtropical Sumergida (Subtropical Underwater), que corresponden a una masa de agua que se localiza en el Caribe, según Wust (1963) a profundidades entre 100 y 200 m.

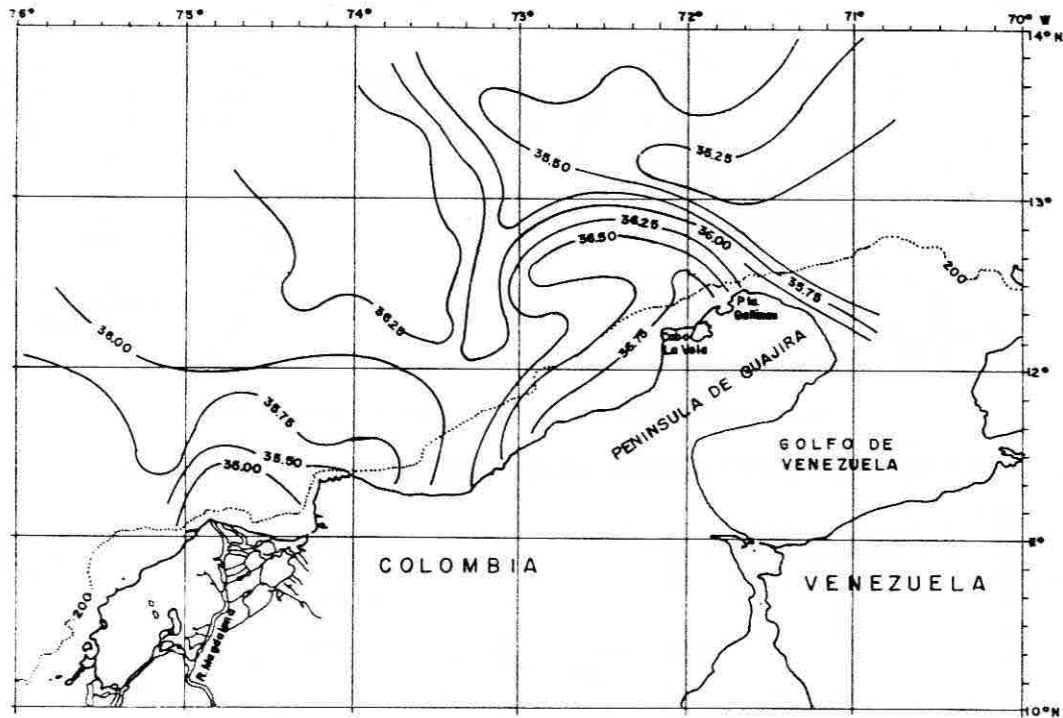


FIG 5-DISTRIBUCIÓN SUPERFICIAL DE SALINIDAD (‰) (SEPTIEMBRE/72)

Estas aguas de relativa baja temperatura y alta salinidad, que se encuentran en la zona de surgencia, muestran coherencia con la distribución de densidad en el área (Fig. 6); observándose en la superficie las aguas de mayor densidad  $\sigma_T \approx 24,50 \text{ kg/m}^3$  en la misma zona donde se encuentran las aguas de baja temperatura y alta salinidad, lo que evidencia el afloramiento de aguas procedentes de capas subsuperficiales, las cuales extienden su influencia en dirección NNW debido al transporte de masa producido por las corrientes de deriva, ocasionando la redistribución de las propiedades físicas en la superficie y como consecuencia la ocurrencia de procesos advectivos y difusivos en la región.

*Estructura vertical de Temperatura, Salinidad y Sigma-t en el núcleo de Surgencia.* Las estructuras térmica y halina de esta sección vertical (Fig. 7), presentan una acentuada inclinación de las isolíneas hacia la superficie desde profundidades entre 150 y 200 m; obser-

vándose la presencia de la masa de agua subtropical sumergida ( $S > 36,50^{\circ}/_{\infty}$ ) entre la costa y las proximidades de la Estación 79 donde prácticamente la haloclina es inexistente. Se nota también claramente en esta sección, una atenuación del gradiente vertical de tem-

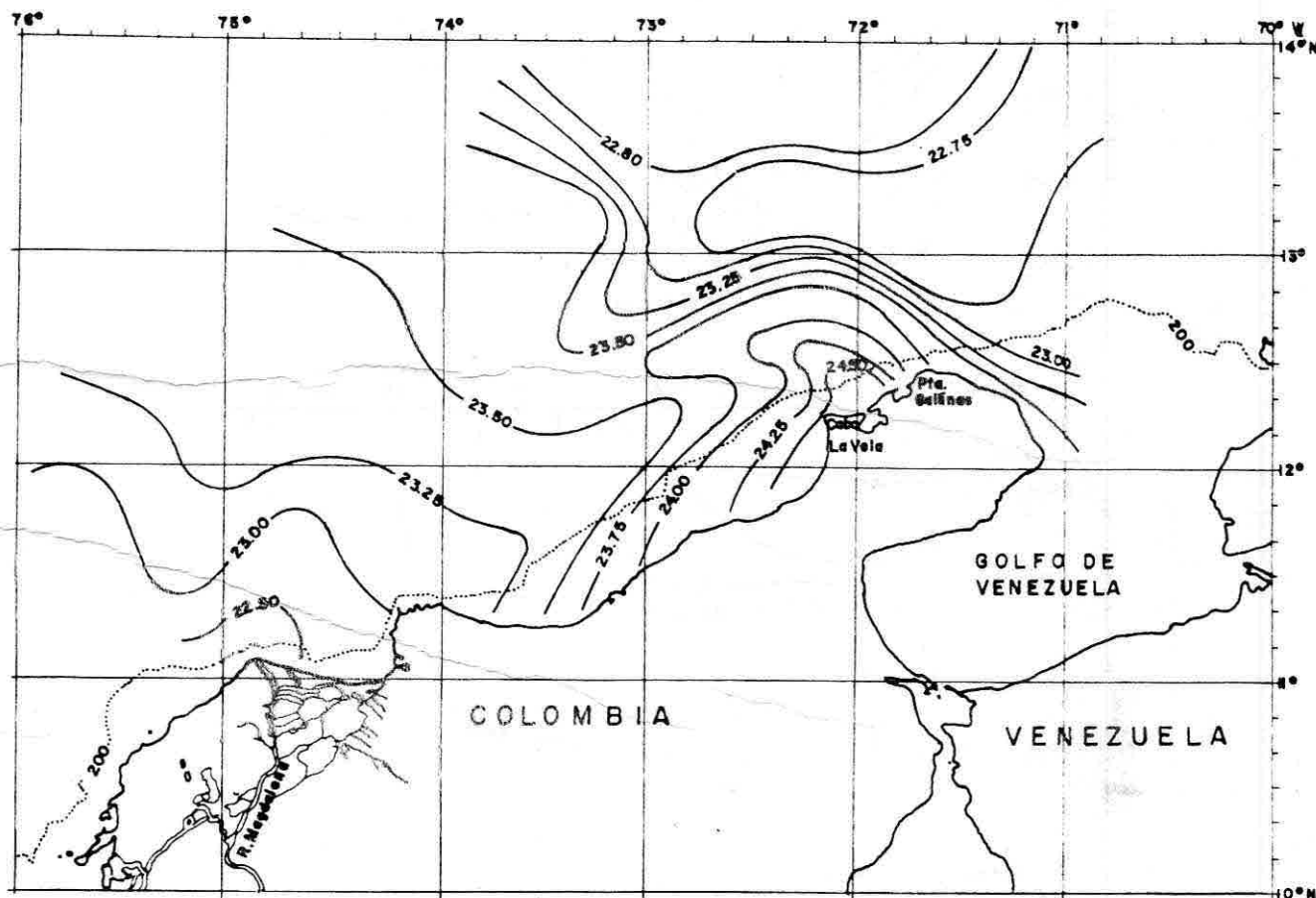


FIG. 6-DISTRIBUCION SUPERFICIAL DE SIGMA-T (g/l) (SEPTIEMBRE/72)

peratura en dirección a la costa y la presencia en la zona costera de aguas con temperatura  $T < 25,50^{\circ}\text{C}$ , observándose una diferencia de temperatura de 3 a 4  $^{\circ}\text{C}$  entre las aguas próximas a la costa y las de alta mar.

La distribución vertical de Sigma-t (Fig. 7), muestra también una inclinación de las isopíneas hacia la superficie, desde profundidades entre 150 y 200m, interceptándola entre la costa y la Estación 78; este hecho confirma la presencia de aguas más densas en la superficie ( $\sigma \approx 24,50 \text{ g/l}$ ), en la zona de surgencia próxima a la costa.

Las estructuras verticales de Temperatura, Salinidad y Sigma-t en esta sección, evidencian la ocurrencia de movimientos ascendentes, con afloramiento de aguas más densas entre la costa y las proximidades de la Estación 78; la continuidad de estos movimientos ascendentes es caracterizada en las distribuciones superficiales de estas propiedades, así co-

mo también el transporte de las aguas más densas ocasionado por las corrientes de deriva en dirección NW y W.

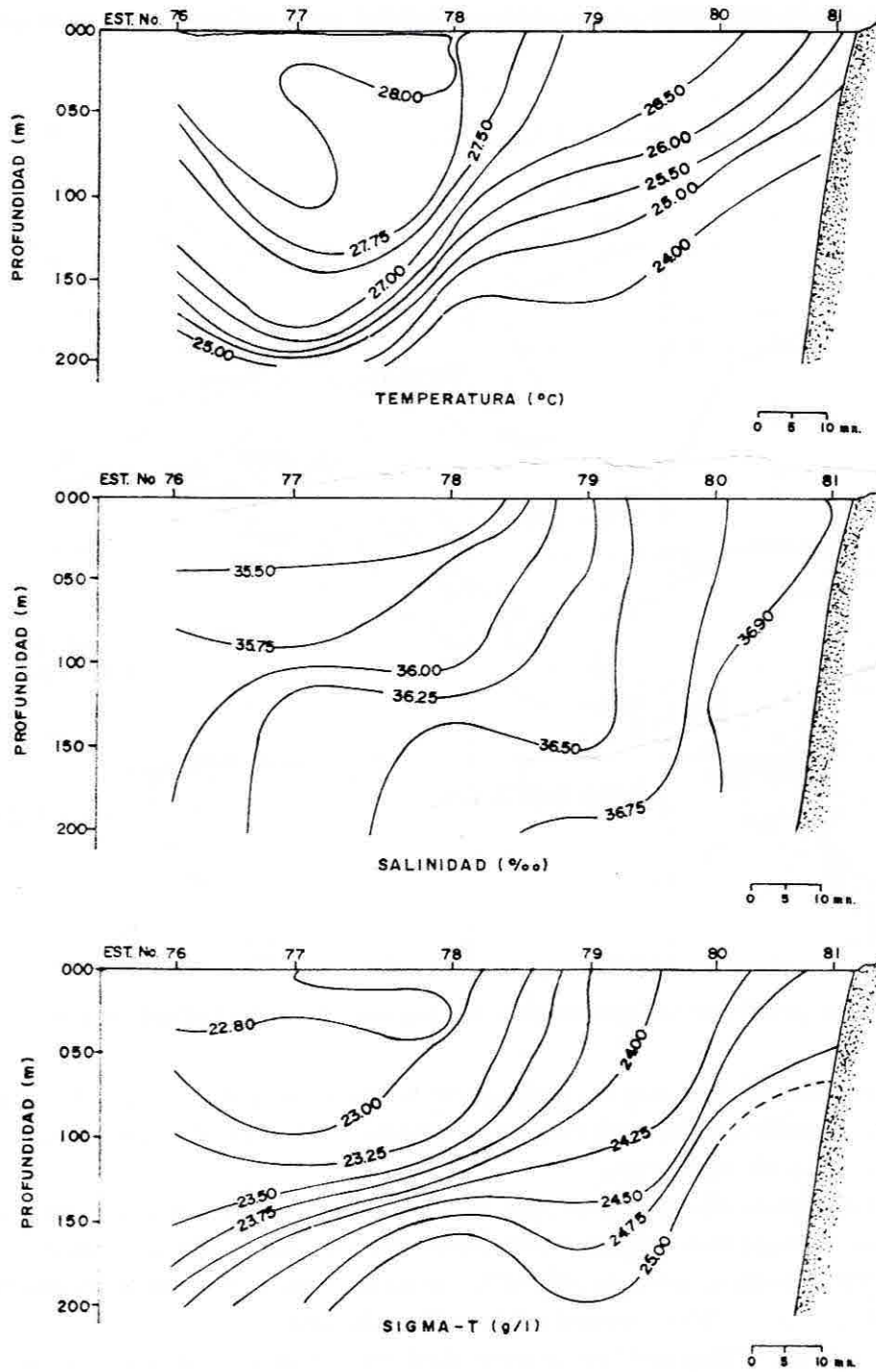


FIG. 7- ESTRUCTURAS VERTICALES DE TEMPERATURA (°C), SALINIDAD (‰) Y SIGMA-T (g/l) EN NUCLEO DE SURGENCIA.



### 3. CALCULO DE LOS MOVIMIENTOS ASCENDENTES

Partiendo de las componentes horizontales de la ecuación hidrodinámica del movimiento medio y orientando el sistema coordenado de tal forma que los ejes sean positivos: Ox para el Este, Oy para el Norte y Oz para abajo; suponiendo como primera aproximación que la costa Norte de Sur-América, que limita al Sur el Mar Caribe, se extiende aproximadamente en dirección Este-Oeste; y asumiendo las siguientes hipótesis simplificadoras:

- Condiciones uniformes a lo largo de la costa, luego las variables dependientes no son funciones de x,
- Admitida despreciable la aceleración advectiva de las ecuaciones de movimiento,
- Cambios turbulentos de la cantidad de movimiento solamente debido a la tensión de corte vertical del viento son considerados,
- Predominancia en el Caribe de la componente zonal del viento, de acuerdo con Hidaka (1958),

se obtienen las siguientes ecuaciones simplificadas de movimiento:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - fv = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \left( A_{xz} \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$fu = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}$$

Imponiendo como condiciones generales de contorno que:

$$\tau_x = -A_{xz} \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad (2)$$

$$\tau_y = -A_{yz} \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=0}$$

Suponiendo un océano en dos capas y eliminando la variable independiente z, el sistema de ecuaciones (1) puede ser reescrito:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - fv \approx \frac{1}{\rho} \frac{\tau_x}{H} \quad (3)$$

$$fu = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}$$

Donde  $H$  es la profundidad de la base de la capa de mezcla y  $\tau_x$  es la componente zonal de la tensión de corte del viento ( $\tau$ ).

Teniendo en cuenta que durante el estado transiente del fenómeno existen variaciones del gradiente de presión con relación al tiempo, es posible asumir de acuerdo con Yoshida (1955) la condición de ajuste "cuasi-isostático"; con esta hipótesis se relacionan; la componente vertical del movimiento en la base de la capa de mezcla ( $w_H$ ) y la variación local de presión ( $\partial p / \partial t$ ) por la siguiente ecuación:

$$w_H \approx \frac{1}{g \Delta \rho} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (4)$$

Combinando las ecuaciones (3) y (4), se elimina la variable tiempo ( $t$ ), obteniéndose la ecuación:

$$\frac{\partial w_H}{\partial y} + \frac{f^2 \rho}{g \Delta \rho} v = - \frac{f}{g \Delta \rho H} \tau_x \quad (5)$$

Introduciendo en el sistema la ecuación de continuidad simplificada bajo la hipótesis de que no hay variación de las condiciones en la dirección Este-Oeste y teniendo en cuenta que  $\partial w / \partial z \approx w_H / H$ , resulta:

$$v(y) \approx - \frac{1}{H} \int_0^y w_H dy \quad (6)$$

Sustituyendo la ecuación anterior en la ecuación 5 se elimina la variable  $v(y)$  obteniéndose

$$\frac{\partial w_H}{\partial y} - k^2 \int_0^y w_H dy = - \frac{k^2}{f\rho} \tau_x \quad (7)$$

donde:

$$k^2 = \frac{f^2 \rho}{g \Delta \rho H} \quad (7a)$$

Imponiendo como condiciones de contorno:

a) que a lo largo de la costa ( $y = 0$ ),  $v(0) = 0$  y como consecuencia:

$$\left. \frac{\partial w_H}{\partial y} \right|_{y=0} = - \left. \frac{k^2}{\rho f} \tau_x \right|_{y=0}$$

b) que para  $y \rightarrow \infty$ ,  $w_H \rightarrow 0$

se obtiene en base a la solución de Yoshida (op. cit.) la siguiente solución para la ecuación (7):

$$w_H(y) = \frac{k^2}{\rho f} \int_y^\infty \tau_x e^{-ky} dy \quad (8)$$

Suponiendo un viento Este uniforme, o sea  $\partial \tau_x / \partial y = 0$ , la ecuación anterior se reduce a:

$$w_H(y) = \frac{k}{\rho f} \tau_x e^{-ky} \quad (9)$$



A partir de la ecuación anterior y asumiendo como representativo el valor medio de los vientos registrados en la zona de surgencia se obtiene una velocidad vertical ( $w_H$ ) en las proximidades de la costa de  $4.4 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$  que da en media un movimiento ascendente de  $114 \text{ m/mes}$ . Este movimiento decrece exponencialmente con la distancia meridional desde la costa alcanzando valores mínimos de velocidad a aproximadamente 80 Millas Náuticas de ella.

#### 4. CONCLUSIONES

Los resultados experimentales analizados, indican la ocurrencia de un fenómeno de surgencia costera en las proximidades de la Península de la Guajira a la altura del meridiano  $72^\circ \text{W}$ , que ocasiona anomalías en las distribuciones superficiales de temperatura y salinidad en la zona mencionada, evidenciadas por el apareamiento de aguas de baja temperatura ( $t \approx 25,50^\circ \text{C}$ ), asociadas con salinidades mayores que  $36,50^\circ/00$  característica de la masa de agua subtropical sumergida que se encuentra en el Caribe a profundidades entre  $100 - 200 \text{ m}$ . Estas anomalías causan la redistribución de las propiedades físicas en la superficie, extendiendo su influencia a lo largo de la costa Colombiana hasta el meridiano  $74^\circ \text{W}$  debido al transporte de masa efectuado por las corrientes de deriva para el NW y W, y como consecuencia la ocurrencia de procesos advectivos y difusivos en la región. Fue posible estimar la intensidad de los movimientos ascendentes en las proximidades de la costa en  $4,4 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$  ( $114 \text{ m/mes}$ )

## BIBLIOGRAFIA

- DIRECCION GENERAL MARITIMA Y PORTUARIA.  
1976 Informe datos oceanográficos Océano II. (Areas 2 y 3). - Documento DIVOC - CECOLDO - DO - 13.
- FAJARDO, G.E.  
1975 Contribucao ao estudo das condicoes oceanográficas das aguas adjacentes á costa Colombiana no Mar do Caribe. (Long. 71° -75° W).- Dissertacao de Mestrado em Oceanografia Fisica - Instituto Oceanografico Universidade de Sao Paulo.
- FEBRES ORTEGA, G.  
1972 Isanosteric analysis of the eastern Caribbean waters during winter. Boln. Inst. oceanogr. Univ. Oriente, 11 (1): 19-34.
- GORDON, A.L.  
1967 Circulation of the Caribbean Sea. J. geophys. Res., 72 (24): 6207-6223.
- HIDAKA, K.  
1958 Computation of the wind stresses over the oceans. Rec. oceanogra. Wks Japan, 4 (2): 77-123.
- PERLROTH, I.  
1968 Distribution of mass in the near surface waters of the Caribbean. Prog. Rep. natn. oceanogra. Data Center, p. 72 Nov. 1-15.
- WUST, G.  
1963 On the stratification and the circulation in the cold water sphers of the Antillean Caribbean basins. Deep Sea Res., 10 (3): 165-187.
- YOSHIDA, K.  
1955 Coastal upwelling off the California coast. Rec. oceanogra. Wks Japan, 2 (2): 8-20.