

*PRONOSTICO DE LOS AFLORAMIENTOS COSTEROS Y UNA
APLICACION AL BANCO DE CAMPECHE*

JUAN JOSE TAPANES*

RESUMEN

Con base en la teoría de Ertel sobre corrientes superficiales del mar en las cercanías de una costa rectilínea, se presenta un método de pronóstico de los afloramientos costeros que se aplica al Banco de Campeche con resultados positivos, de acuerdo con los trabajos de investigación de diferentes autores.

ABSTRACT

Based upon a theory from Ertel about surface currents near a rectilinear coast, a coastal upwelling forecasting method is presented and used in the Campeche Bank with positive results, in accordance with researches done by different authors thus far.

* *Centro de Investigaciones Pesqueras, La Habana, Cuba.*

INTRODUCCION

Hidrodinámicamente, puede plantearse que el afloramiento está inducido por una divergencia horizontal de la componente horizontal del flujo, la cual, en la mayoría de los casos, está generada por vientos que soplan con una cierta periodicidad sobre la superficie del mar. El movimiento vertical responde a la acción del viento en un intervalo no mayor a varios días, siendo óptima la interrelación con otros factores limitantes, por ejemplo, el sentido de la corriente.

En muchas zonas costeras, la zona de afloramiento poseerá una anchura comprendida entre los veinte y cien kilómetros y determinada, tanto por los vientos predominantes por la latitud como por la estratificación de las aguas.

Ahora bien, este trabajo se limita a explicar y aplicar un método de pronóstico de los afloramientos costeros, sin entrar a discutir las posibles causas dinámicas de los mismos. Se hará esto con base en una teoría de Ertel (1964) sobre las corrientes superficiales del mar en las cercanías de una costa rectilínea, como una especie de fenómeno de *frontera* (Yoshida, 1955), que difiere sustancialmente de aquellos casos de afloramiento producidos por el paso de un huracán tropical sobre una extensa área, el Golfo de México (Leipper, 1966, O'Brien, 1967, O'Brien y Reid, 1967).

CONDICIONES DINAMICAS SEGUN ERTEL

Tómese un punto 0 de la costa como origen de un sistema dextrógiro de coordenadas triaxiales ortogonales (O, x , y , z), cuyo eje z pase por el cenit (Fig. 1). Designaremos por f al duplo de la velocidad angular de la rotación terrestre (parámetro de Coriolis), siendo $f > 0$ para el Hemisferio Norte. Eligiendo como eje de las x la normal a la tierra firme, se logra que el eje de las y sea tangente a la costa y la normal positiva estará dirigida hacia el mar.

Ahora bien, por efecto de un campo de viento uniforme, se produce un campo uniforme de fuerzas en la superficie de un mar ilimitado, originándose una corriente uniforme en la superficie, donde las ecuaciones

$$-fv_{\infty} = X_{\infty} \quad + fu_{\infty} = Y_{\infty} \quad (1)$$

dan las relaciones existentes entre los componentes de la corriente $\{u_{\infty}$,

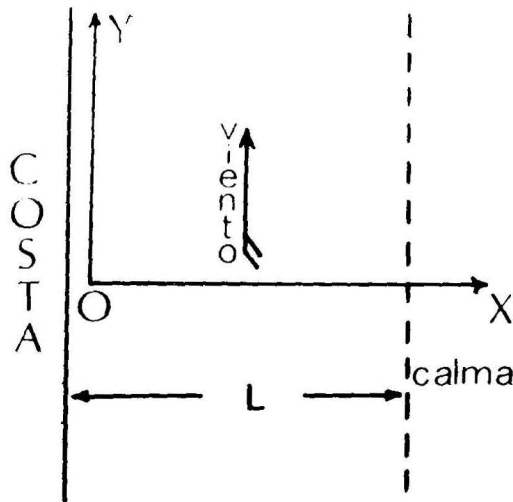


Fig. 1 - Sistema de coordenadas. L es la anchura de la zona bajo la influencia del viento.

v_{∞} } y las componentes de las fuerzas $\{X_{\infty}, Y_{\infty}\}$ suponiendo que se trate de un caso estacionario.

Investigando ahora el efecto de la presencia de una costa rectilínea sobre las corrientes del mar se encuentra que en las proximidades de una costa, la velocidad y la dirección de la corriente, en la superficie del mar, habrán variado. Tanto la corriente $\{u, v\}$ como la fuerza $\{X, Y\}$ en la zona litoral serán dependientes de las corrientes $\{x, y\}$, pero es fácil ver que no se altera la forma de las ecuaciones del movimiento

$$-fv = X, \quad +fu = Y \quad (2)$$

Se atribuyen las diferencias

$$X - X_{\infty} = -f(v - v_{\infty}), \quad Y - Y_{\infty} = +f(u - u_{\infty}) \quad (3)$$

a la acción entre toda la masa superficial y su contorno, como efecto de los impulsos diferentes, de modo que pueda escribirse aproximadamente

$$X - X_{\infty} = \mu \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \mu \quad Y - Y_{\infty} = \mu \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

donde μ es el coeficiente de mezcla horizontal, con un rango de valores entre 10 a $10^8 \text{ cm}^2 \text{ seg}^{-1}$

Conviene ahora plantear que la acción de la costa equivale a una fuerza perturbadora de la forma (4), en la corriente superficial. Las ecuaciones (3) se pueden reunir en una sola

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) S = i \frac{f}{\mu} (S - S_{\infty}) \quad (5)$$

donde $(S = u + iv)$ y $(S_{\infty} = u_{\infty} + iv_{\infty})$ son corrientes complejas; se sabe, además, que S_{∞} es un vector constante.

Si existe una costa rectilínea e infinitamente larga en el eje de las y , la estructura de la corriente S será independiente de dicho eje de coordenadas. En tal caso, deben anularse todos los términos de la ecuación (5), que consistan en derivadas con respecto a y . De este modo, ésta se reduce a una ecuación diferencial ordinaria y las condiciones de contorno son, para hacer la solución unívoca

$$S \begin{cases} S_0, \text{ para } x \rightarrow 0 \text{ (zona litoral)} \\ S_{\infty}, \text{ para } x \rightarrow +\infty \text{ (zona oceánica)} \end{cases}$$

teniendo en cuenta la condición cinemática $\text{Re} \{ S_0 \} = 0$, donde ($\text{Re} = \text{parte real}$).

Sea ahora $w = w(x, y)$ la velocidad vertical en el interior del mar. Inmediatamente debajo de la superficie ($z = 0$), la ecuación de continuidad toma la forma

$$\frac{dw}{dx} = \left(- \frac{\partial w}{\partial z} \right)_{z=0} \quad (6)$$

y ocurrirá, pues, un surgimiento de agua, inmediatamente debajo de la superficie del mar, cuando

$$\left(-\frac{\partial w}{\partial z} \right)_{z=0} > 0 \quad (7)$$

así como la desigualdad

$$\left(\frac{du}{dx} \right) > 0 \quad (8)$$

puede representar la condición cinemática de surgimiento, siendo esta forma poco susceptible de ser sometida a una comprobación inmediata para una corriente casi homogénea en las proximidades de una costa recta (Tápanes, 1963).

Ahora bien, la condición (8) se puede expresar en esta forma

$$\text{Re} \{ (S_{\infty} - S) \cdot \exp(i\pi/4) \} > 0 \quad (9)$$

donde el operador $\exp(i\pi/4) = \sqrt{i}$, conserva su validez para $x \rightarrow 0$, o lo que es lo mismo, cuando $S \rightarrow S_0$. La sencillez de la forma (9) se debe a que se ha supuesto un tensor isotrópico en las fuerzas perturbadoras (4).

Sean S y S_{∞} (= vector constante), las corrientes superficiales en un punto P de las zonas litoral y oceánica, respectivamente. Al dar la diferencia vectorial $(S_{\infty} - S)$ y dar al vector resultante un giro *contra solem* de ángulo $\pi/4$, la resultante es el vector

$$(s_{\infty} - S) \exp(i\pi/4) > 0$$

estando la componente (9) en la dirección del eje de las x cuyo valor positivo indica un surgimiento del agua inmediatamente debajo del punto P (Fig. 2).

Consideremos ahora que el viento sopla de frente al observador (Fig. 3). El punto P y los vectores S y S_{∞} permanecerán iguales, así como permanecerá invariable el sistema de coordenadas. El vector S_{∞} (corriente de deriva) se dirige ahora hacia la costa, en lugar de hacerlo hacia mar abierto, por lo que tendremos que el vector resultante tendrá sentido negativo sobre el eje de las x. Esto indica un sumergimiento de las aguas superficiales en el punto P.

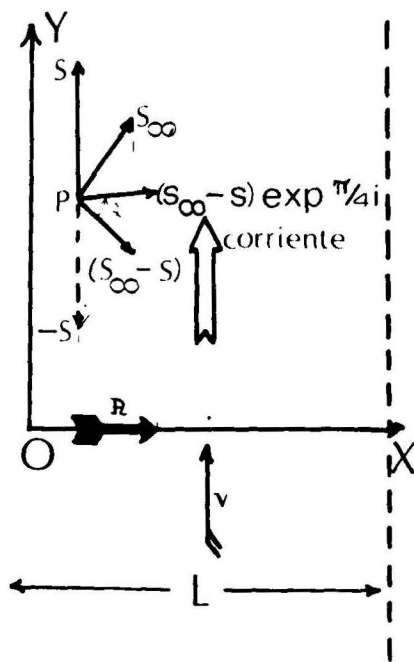


Fig. 2 - Caso en que se produce afloramiento de las aguas superficiales. La resultante tiene sentido positivo en el eje de las x.

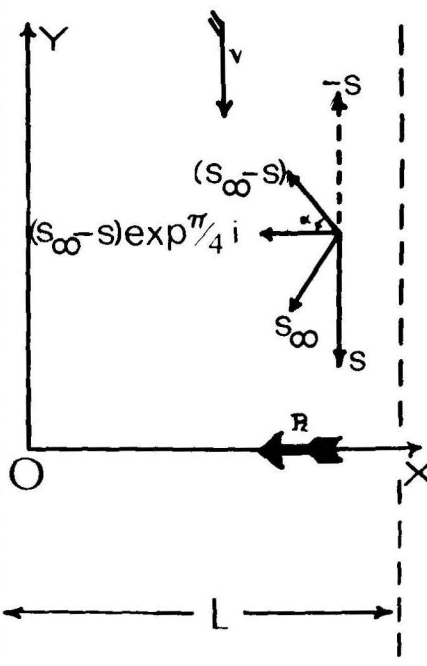


Fig. 3 - Caso en que se produce hundimiento de las aguas superficiales. La resultante tiene sentido negativo en el eje de las x.

AFLORAMIENTO EN EL BANCO DE CAMPECHE

Es posible aplicar la teoría de pronóstico expuesta al sistema general de vientos y corrientes que presenta el Banco de Campeche. Lo anterior dará un caso de afloramiento en su región norte (en ciertas épocas del año, al menos) comprobado hasta el presente por trabajos realizados por diferentes investigadores (Bogdanov, 1966, Bogdanov *et al.*, 1968, Briantsiev y Gómez, 1970a, 1970b, 1971, Elisarov *et al.*, 1968, Rossov, 1966). Sin embargo, el mecanismo de

afloramiento se ha explicado de maneras diferentes por los autores citados, no existiendo hasta el presente un acuerdo en cuanto a las causas del mismo.

Bogdanov considera que la causa principal es la circulación transversal de la Corriente de Yucatán. Elisarov y colaboradores sin desmentir esto, señalan que aquí tiene lugar un remolino ciclónico que favorece el aumento del afloramiento. Rossov interpreta esto como el efecto de la salida, con la corriente sur, de las aguas profundas del Golfo de México. Finalmente, para Briantsiev y Gómez (1971), la causa principal del afloramiento es la presencia de un torbellino ciclónico de las aguas.

Recientemente han sido realizadas secciones ortogonales a las costas del Banco de Campeche (Fig. 4), que demuestran que las isotermas, en las capas por encima de los 100-200 m se elevan

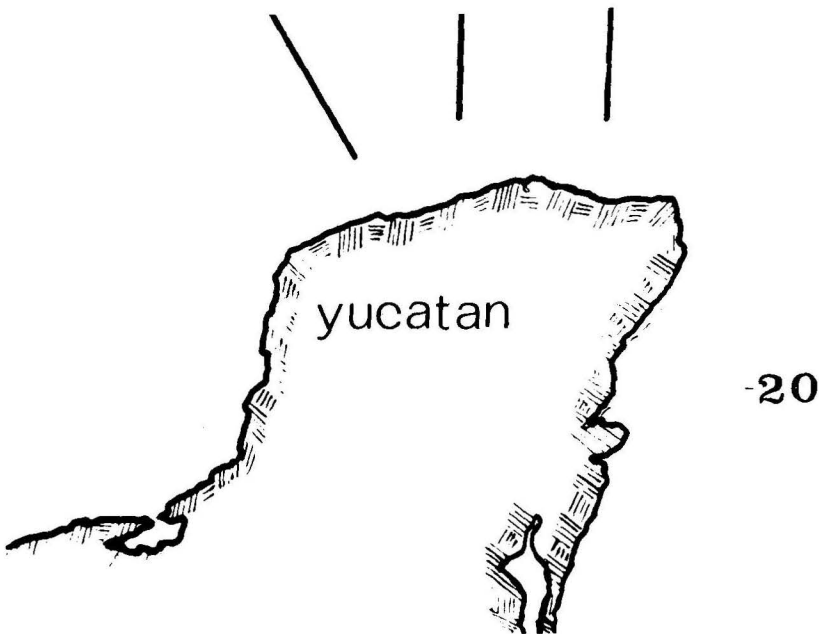


Fig. 4 - Secciones realizadas en el Banco de Campeche (Agosto de 1967)

conspicuamente hacia la superficie (Figs. 5 y 6) principalmente durante el verano, indicando esto la presencia de un afloramiento costero. No obstante, si éste no se presenta o se ve muy disminuido, durante el invierno (Elisarov *et al.*) debido principalmente a los fuertes "nortes" que azotan a la región, se produce una intensa mezcla vertical de las aguas.

Ahora bien, para aplicar nuestro método de pronóstico, sólo es necesario conocer los sentidos de la corriente y del viento durante un período de tiempo de dos semanas, digamos, anterior al pronóstico. Si han sido constantes, se puede confeccionar el pronóstico, por

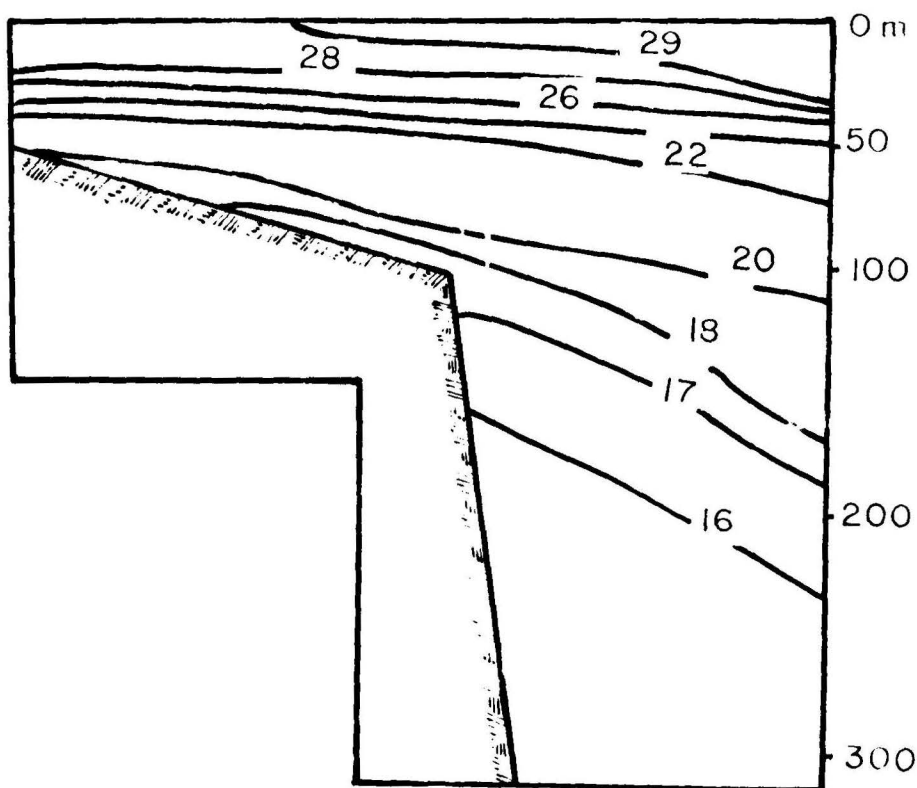


Fig. 5 - Sección "A". Isotermas de verano (Agosto de 1967)

ejemplo, al suponer (Fig. 7) que se conocen el rumbo y la intensidad de los vientos en el Banco de Campeche y que la corriente superficial tiene sentido este-oeste. Entonces puede hacerse la composición vectorial explicada en la Fig. 2, dando la resultante sobre el eje de las x un sentido positivo.

Si el sentido de la corriente o del viento hubieran sido puestos, la resultante hubiera quedado como en la Fig. 3, es decir, tendría sentido negativo sobre el eje de las x , indicando un hundimiento de las aguas superficiales.

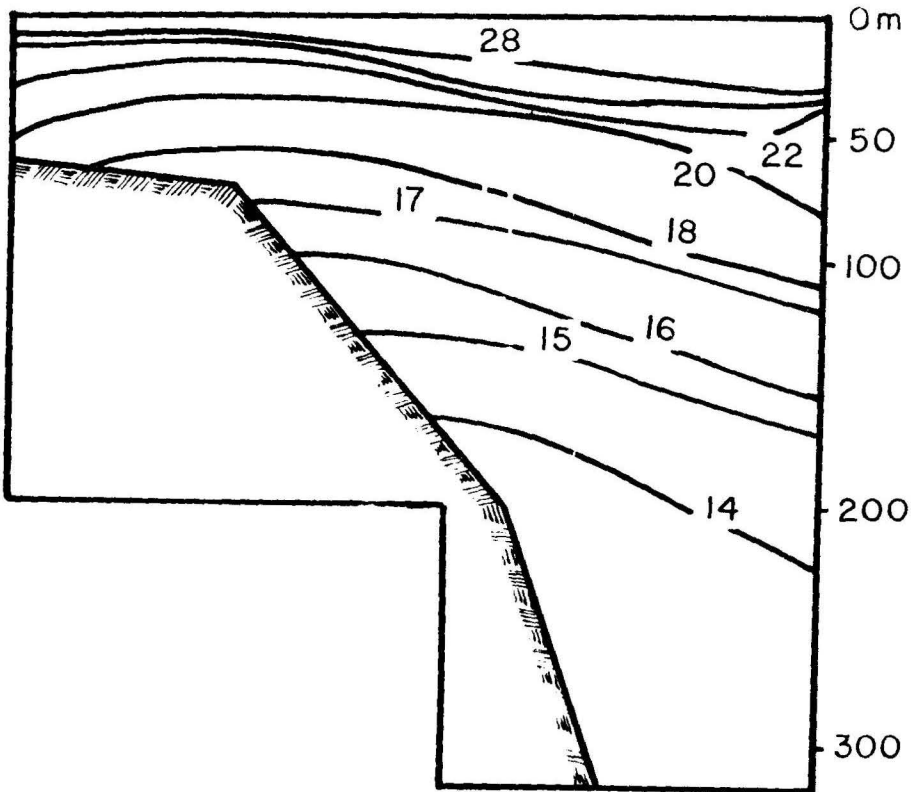


Fig. 6 - Sección "C". Isothermas de verano (Agosto de 1967)

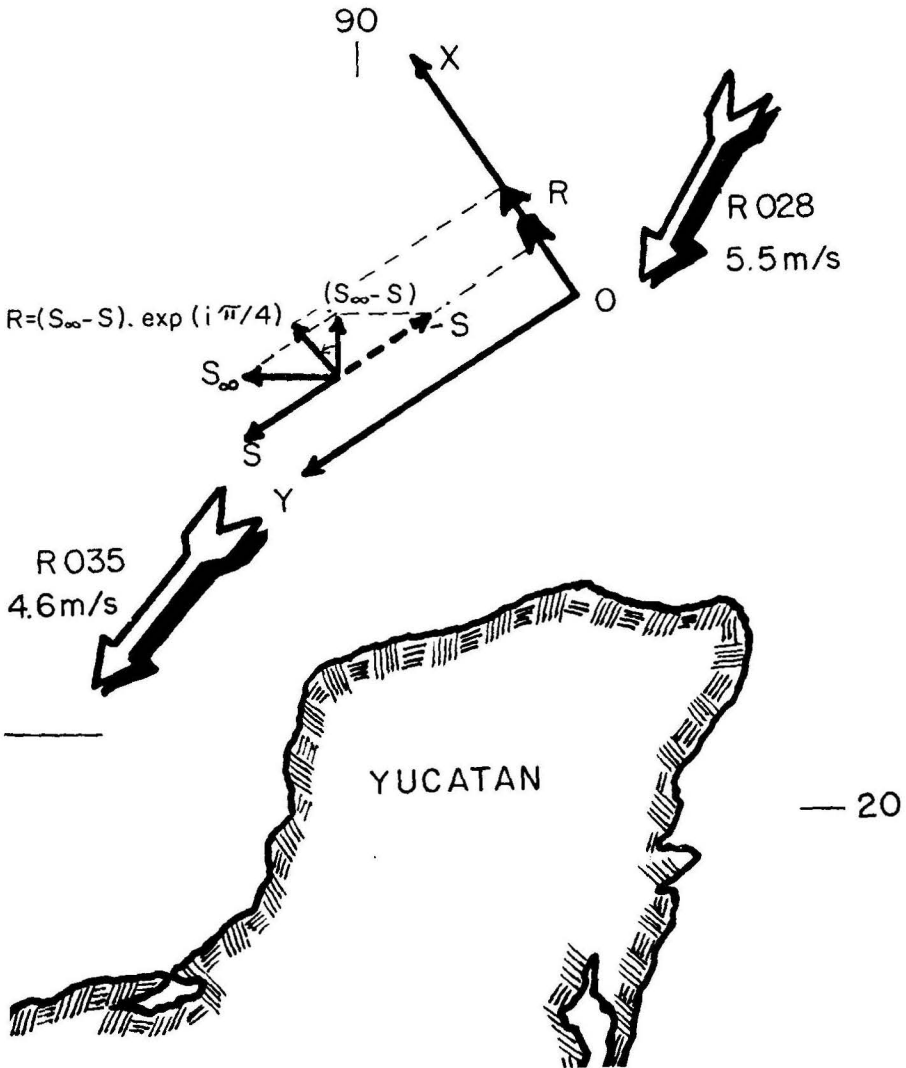


Fig. 7 - Pronóstico en el Banco de Campeche. Las flechas indican el promedio de rumbo y velocidad del viento en m/seg^{-1} . El sentido de la resultante sobre el eje de las x indica la presencia de un afloramiento

CONCLUSION

Aunque el presente método de pronóstico no permite calcular la velocidad vertical ni el transporte, sí permite hacer de manera rápida y fácil (contando solamente con los sentidos de las corrientes y los vientos) una evaluación cualitativa de la posible presencia de afloramientos o hundimientos en zonas costeras, lo cual puede redundar en gran beneficio para las pesquerías,

AGRADECIMIENTOS

Se desea expresar el más profundo agradecimiento al Prof. Dr. Hans Ertel (1904-1971) por todas las enseñanzas de él recibidas en estos últimos años, así como al Lic. Carlos García (Centro de Investigaciones Pesqueras, La Habana, Cuba) por haber suministrado los datos para confeccionar las Figs. 4, 5 y 6.

BIBLIOGRAFIA

- BOGDANOV, D. V. 1966. Informe sobre las Investigaciones Oceanográficas en el Mar Caribe y el Golfo de México. *Primera Conferencia sobre Investigaciones Pesqueras Cubano-Soviéticas* (1964-1966). (Centro de Investigaciones Pesqueras, Cuba), págs. 219-239.
- BOGDANOV, D. V., V. A. SOKOLOV y N. S. JROMOV 1968. Regiones de Alta Productividad Biológica y Pesquera en el Golfo de México y Mar Caribe. *Oceanología*, 8:3.
- BRIANTSIEV, V. y J. A. GOMEZ. 1970a. Temperatura del Agua en la Región de la Plataforma de Yucatán. *Segunda Reunión de Balance de Trabajo* (Noviembre). (Centro de Investigaciones Pesqueras, Cuba).
- 1970b. Corrientes constantes en el Banco de Campeche. *Segunda Reunión de Balance de Trabajo*, (Noviembre). (Centro de Investigaciones Pesqueras, Cuba).
- 1971. Circulación Atmosférica y Afloramiento a lo Largo de los Taludes de la Plataforma de Yucatán. Centro de Investigaciones Pesqueras (MS).
- ELISAROV, A., N. BESSONOV y O. GONZALEZ. 1968. Resultados de las Investigaciones Cubano-Soviéticas en el Banco de Campeche. *Symp. Inv. Res. Caribbean Sea and Adjacent Regions (FAO Fish. Rept. 71.1, FRm/R71.1, Curazao)*, pág. 130.
- ERTEL, H. 1964. Sobre Corrientes Superficiales del Mar en las Cercanías de la Costa. *Sonder. G. Beit. z. Geophysik* (Berlín), 73, Heft 3, págs. 184-187.

- LEIPPER, D.F. 1966. Observed Ocean Conditions and Hurricane Hilda, 1964. *Texas A. & M. Univ. Cont. Ocean. Meteor.* 11:179-193.
- O'BRIEN, J. J. 1967. The Non-linear response of a Two-layer, Baroclinic Ocean, to a Stationary, Axially-symmetric Hurricane. Part 2. *Jour. Atmospher. Sci.*, 24 (2):208-215.
- O'BRIEN, J. J. and R. O. REID. 1967. The Non-linear response of a Two-layer, Baroclinic Ocean to Stationary, Axially-symmetric Hurricane, Part I. *Jour. Atmospher. Sci.*, 24 (2):197-207.
- ROSSOV, V V. 1966. (Sobre el Sistema de Corrientes de los Mares Centroamericanos. *Investigaciones de los Mares Centroamericanos*, Kiev, URSS).
- TAPANES, J. J. 1963. Afloramiento y Corrientes Cercanas a Cuba, I. *Centro de Investigaciones Pesqueras* (Cuba), Cont. (17), 29 págs.
- YOSHIDA, K. 1955. Coastal Upwelling off the California Coast. *Rec. Ocean. Ws. Japan*, 2 (2):8-20.