

COMUNICACIONES

HIDROLOGIA DE ECOSISTEMAS LIMITADOS: ESTUARIOS DE CUÑA SALINA

JUAN JOSE TAPANES*

RESUMEN

Se presenta un estudio realizado en el estuario del río Zaza, durante el año 1973, en el cual se determinaron las condiciones hidrológicas generales del mismo, tales como temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, densidad y estabilidad de las aguas, así como procesos de circulación, mezcla y estancamiento.

Estas investigaciones nos han permitido clasificar este estuario, y además, inferir que las condiciones encontradas pueden ser extrapoladas a otros estuarios similares que presenten la construcción de represas, aguas arriba de sus desembocaduras.

ABSTRACT

A study carried out in the estuary of the Zaza river during the year 1973 is presented, in which the general hydrological conditions, such as temperature, salinity, dissolved oxygen, density and stability of the waters, as well as processes of circulation, mixing and stagnation are determined.

These investigations allow us to classify this estuary and, furthermore, to conclude, that the conditions that were found can be extrapolated to other similar estuaries that exist associated with the construction of dams, waters above their outlets.

* Centro de Investigaciones Pesqueras, La Habana, Cuba.

INTRODUCCION

El desarrollo acelerado de los planes agrícolas en Cuba conlleva un mayor y mejor aprovechamiento de nuestros recursos hídricos, ya que éstos son fundamentales para el avance económico. Este aprovechamiento —uno de cuyos pasos principales es la construcción de represas en determinados ríos— debe ir precedido de un estudio ecológico de la región ya que, de no ser así, se corre el riesgo de introducir modificaciones peligrosas e irreversibles en el medio.

Definamos, primeramente, qué entendemos por *ecología*. La clasificación de la ecología como un campo especial de la Biología, no es más que la aceptación de la necesidad de conocer y entender mejor cómo los animales y plantas interaccionan con su medio, quedando así determinadas sus distribuciones y ocurrencias. La ecología —de la cual la ecología marina es parte singularmente importante— fue en su origen concebida como el estudio de los “hogares” (oikos) o hábitáculos de los seres vivos (Dickie, 1970).

Luego, podemos plantear que uno de los propósitos a largo plazo de la ecología marina es tener una comprensión cabal de una situación natural dada y así poder hacer pronósticos cuantitativos confiables acerca de las consecuencias que puede acarrear la intervención del hombre dentro del medio, por ejemplo, cambiando algunas de las condiciones físicas al represar las aguas de un río determinado.

El presente trabajo es parte de un estudio general sobre la ecología del estuario y lagunas adyacentes al río Zaza (Figura 1), con fines biológicos específicos que no entraremos a discutir. Para su consecución se realizaron varios viajes a la zona, durante el año 1973, en los cuales se determinó la estructura hidrológica general de los ecosistemas mencionados en la época de “seca” (noviembre a abril), así como en la de “lluvias” (mayo a octubre). Presentamos en la Figura 2 una vista general del estuario, y en la Figura 3 la sección central del mismo.

MATERIAL Y METODOS

En nuestro primer levantamiento de campo (abril) se determinó la homogeneidad lateral horizontal en el estuario, por lo que se decidió trabajar posteriormente sólo en la sección central (Figura 3). Las determinaciones fueron efectuadas en superficie y fondo en todos los casos, y donde la profundidad lo permitió, a los niveles de 1, 3 y 5 metros, siendo éstas: temperatura ($^{\circ}\text{C}$), salinidad (partes por mil), oxígeno disuelto (ml l^{-1}), obteniéndose de las dos primeras la densidad (σ_t), así como la estabilidad ($\text{E} \cdot 10^5$) de las diferentes capas.

El trabajo de campo se llevó a cabo desde un bote motor, lo que permitió que no se requirieran más de dos horas en cada levantamiento. Esto nos permite suponer que los datos pueden ser considerados como simultáneos y sinópticos, sin introducir por ello un error apreciable.

Las determinaciones llevadas a cabo fueron:

a) *Temperatura*: se obtuvo en superficie por medio de una capa isotérmica provista de un termómetro calibrado, y con una apreciación de $0,1^{\circ}\text{C}$; y en las profundidades subsiguientes con un par de termómetros reversibles protegidos oceanográficos, montados en un marco reversible, y con una apreciación de $0,02^{\circ}\text{C}$.

b) *Salinidad*: las muestras superficiales se obtuvieron directamente en frascos color ámbar de 250 ml de capacidad, y las de diferentes niveles por medio de una botella toma-muestras diseñada y construida en el CIP, determinándose la densidad por medio de un hidrómetro de gravedad específica, con una apreciación de $0,0005 \text{ g cm}^{-3}$. La salinidad se calculó gráficamente, a partir de la temperatura y la densidad, por medio de las Tablas de los Gráficos de Densidad Condicional del Agua de Mar, publicados por la Editora Hidrometeorológica, Leningrado, 1962.

c) *Oxígeno*: se determinó la cantidad de oxígeno disuelto, en ml l^{-1} , por el método idométrico de Winkler. No obstante, éste se determinó sólo en la superficie y en el fondo, no habiéndose realizado determinaciones a niveles intermedios.

d) *Densidad*: se calculó gráficamente, a partir de los valores de temperatura in situ y salinidad calculada por el método gravimétrico, usando las Tablas anteriormente mencionadas, de suficiente exactitud en nuestro caso.

e) *Estabilidad*: fue calculada según la relación (Sverdrup et al, 1942)

$$E = \frac{d\sigma_t}{dz} \cdot 10^5 \quad (1)$$

dado que esta fórmula es lo suficientemente exacta para profundidades inferiores a los 200 metros.

ECOSISTEMAS LIMITADOS: ESTUARIOS, SU ESTRUCTURA Y CIRCULACION

Consideramos como ecosistemas limitados a todos aquellos rodeados por fronteras tan próximas entre sí que cualquier modificación que se introduzca a través de alguna de ellas, afecte a la totalidad del mismo en un tiempo mínimo de algunas horas (Tápanes, 1973a). Definiremos, dentro de la clasificación de ecosistemas limitados, un estuario como un sistema hidrográfico semicerrado que tiene una comunicación libre con el mar y en el cual el agua de mar se encuentra apreciablemente diluida con agua dulce proveniente del río o de los escurrimientos de tierra firme (Cameron y Pritchard, 1963; Tápanes, 1970).

A su vez, los estuarios pueden ser clasificados de acuerdo a diferentes criterios, aunque ninguno de ellos está hoy día universalmente aceptado. Podemos plantear, sin lugar a dudas, que una característica esencial de los estuarios es la mezcla, en mayor o menor grado, del agua de mar con agua dulce proveniente del escurrimiento de tierra firme, produciendo esta mezcla una variación, tanto vertical como horizontal, del contenido en sales de las aguas (Tápanes, 1971a).

Para una mayor sencillez vamos a clasificarlos en: (a) estuarios completamente mezclados u homogéneos verticalmente, (b) estuarios

parcialmente mezclados o moderadamente estratificados, y (c) estuarios de cuña salina o fuertemente estratificados (Cameron y Pritchard, 1963). Esta clasificación se basa en las magnitudes de la estratificación relativa en el estuario, así como en los parámetros de circulación asociados con los cambios en los mecanismos del balance salino (Hansen y Rattray, 1966).

Las investigaciones llevadas a cabo en el estuario del río Zaza nos llevaron a incluir dicho aparato hidrográfico dentro del grupo (c); o sea, el de estuario de *cuña salina* o fuertemente estratificado (Figura 4). Como se ve en la figura, el agua salada se extiende río arriba en forma de cuña de fondo. Está muy marcada la interfase entre el agua dulce y la salada, formándose ocasionalmente olas internas que pueden romper y atravesar la estratificación.

Ahora bien, los métodos de la ciencia han dependido, tradicionalmente, de la estructuración de hipótesis que puedan ser llevadas a pruebas críticas en ciertos sistemas simplificados, sujetos a una “manipulación” deliberada. Ejemplo de ello son los métodos experimentales de la Física y de la Química. No obstante, en el medio marino encontramos escalas tan grandes y complejas de fenómenos naturales que en él los métodos tienen que sufrir una drástica modificación, siendo la obtención del *dato de campo* el primer paso, imprescindible y a veces único, que es posible dar antes de tratar de explicar un fenómeno o situación dados. O sea, que en el caso de ciertos fenómenos geofísicos —y consideramos que la oceanografía es parte de la geofísica en su más amplio sentido (Dietrich, 1963; Howell, 1969)— no es posible pasar de la observación al experimento sino que es necesario saltar a la racionalización del fenómeno, sin poder hacer uso de aquél.

Por todo lo anterior, hasta el presente han sido pocos los trabajos puramente “experimentales” acerca de la circulación en los estuarios, estando basados la mayoría en un estudio empírico de los mismos. Por ejemplo, las propiedades básicas de la circulación estuarina así como su relación con los procesos de mezcla han sido estudiados por una serie de investigadores, entre ellos Bowden (1967), Pritchard (1967), Hansen (1967), Bowden y Gilligan (1971). Además, ya

Hansen y Rattray (1966) habían propuesto un esquema teórico basado en una clasificación bi-paramétrica, siendo éste muy útil, ya que ofrece la ventaja de poder comparar diferentes estuarios, unos con otros de forma cuantitativa, así como estimar los posibles efectos que producen los cambios en cualquiera de las variables, gastos del río, por ejemplo.

Possible contaminación del ecosistema: la industrialización creciente nos obliga a instrumentar, y mantener, una vigilancia constante sobre la posible contaminación de nuestros ecosistemas, tales como estuarios, lagunas costeras y bahías (Tápanes, 1970, 1971a,b,c, 1973a,b,c), ya que son estas zonas costeras las que primero reciben el impacto del desarrollo industrial.

En este sistema dado, un afluente contaminado puede ser de tres clases: (a) más ligero que el medio que lo recibe (*hipopicnal*), como ejemplo, agua calentada o petróleo, (b) de la misma densidad que el líquido receptor (*isopicnal*), y (c) más denso que el líquido receptor (*hiperpicnal*), presentando estos tres tipos de contaminante formas muy distintas de circulación dentro del sistema. También son muy diversas las formas de disponer de los mismos, según deseemos su dilución completa dentro de la cuenca, o su eliminación con la menor dilución posible.

Vemos que cualquiera que sea el tipo de afluente y cualquiera que sea la solución adoptada en su descarga, el contaminante se mezclará con el agua de mar en la boca del estuario (Figura 5) y retornará al sistema, o bien se quedará en el fondo del estuario (Figura 6) demorando quizás meses en ser desalojado y siendo absorbido, mientras tanto, por los organismos del bentos.

CARACTERISTICAS HIDROLOGICAS

Presentamos solamente los datos obtenidos en los viajes de abril a julio (Figuras 7 a 11) por ser éstos representativos de las condiciones imperantes en el estuario, y con vista a no hacer demasiado extensa esta exposición.

Viaje de abril.

a) Temperatura: en la Figura 7a encontramos que las aguas más frías son las provenientes del río, con valores menores a 28°C , siendo las más calientes las que se encuentran en el fondo del río, pero cuya procedencia es el mar, y que presentan temperaturas superiores a 29°C . Existe una zona intermedia, con valores entre 28 y 29°C hacia la desembocadura del río, formada por la mezcla de las dos aguas anteriormente citadas. Lo anterior confirma la triple relación existente en ciertos casos entre las temperaturas del agua de mar (más caliente), el agua de río (más fría) y el agua de plataforma, con una temperatura intermedia (Tápanes, 1972a).

b) Salinidad: en la Figura 7b es fácil notar la presencia de agua de río, con salinidades inferiores a diez partes por mil, así como la zona de mezcla con salinidades que van entre 20 y 35‰. Esta zona de mezcla indica una salida de agua de río hacia el mar, así como una entrada de agua de mar hacia la cuenca. Podemos apreciar, finalmente, una masa de alta salinidad prácticamente “estancada” en el fondo del estuario y un poco alejada de la desembocadura, habiéndose provocado un fenómeno de *bloqueo* que explicaremos posteriormente. Estos valores, algo altos de salinidad, concuerdan con Tápanes (1972b).

c) Densidad: en la Figura 7c vemos que, en términos generales, la distribución de las densidades da origen a una configuración estable del sistema.

d) Estabilidad: en la Figura 7d vemos que los valores de $E.10^5$ son, por lo general, altos, presentándose, no obstante, dos puntos de inestabilidad. Uno, en la boca del río, debido a la mezcla de las aguas de mar y río, y otro en el fondo, subyacente de la estación No. 2, debido a condiciones propias de la columna de agua.

Viaje de mayo

a) Temperatura: en la Figura 8a vemos que esta vez también el agua caliente proviene del mar, con valores mayores a 32°C , siendo el agua

de río más fresca, con valores que oscilan alrededor de los 30°C.

b) Salinidad: en la Figura 8b encontramos una distribución muy parecida a la anterior, o sea, salinidades menores a 10‰ hacia el interior del estuario, aumentando hacia la desembocadura y debido a la mezcla inevitable con el agua de mar. Sin embargo, es conveniente notar que esta vez la mezcla de aguas cuya salinidad resultante se encuentra entre 30 y 35‰, sí penetra en el estuario, lo cual no ocurría en el caso anterior. Es posible encontrar un comienzo de fenómeno de bloqueo de la isohalina de 35 partes por mil, entre las estaciones 3 y 4.

c) Densidad: la distribución de densidades varía con respecto al caso anterior (compárense las Figuras 7c y 8c), ya que parece acusada la penetración de agua de mar dentro del aparato hidrográfico.

d) Estabilidad: en la Figura 8d puede verse que las capas de agua son estables, salvo en dos puntos, uno de ellos en la estación No. 4, donde encontramos un valor nulo, y otro en el fondo, subyacente a la estación No. 1, donde también la columna de agua presenta valor cero, siendo en ambos casos la distribución “indiferente” y pudiendo producirse el “volteo” de las masas de agua en cuestión en cualquier momento que surja una causa dada.

Viaje de junio

a) Temperatura: la Figura 9a nos muestra que el agua más fría también aquí es la proveniente del río, con valores menores a 29°C, mientras que el agua de mar sobre la plataforma tiene valores mayores a 30°C, y se encuentra subyacente a las estaciones Nos. 1, 2 y 3.

b) Salinidad: en la Figura 9b vemos que la salinidad ha aumentado un poco, no encontrándose valores iguales o menores a 10‰. Encontramos el agua de menor salinidad (ca 20‰) en el interior del estuario, pero mezclándose fuertemente con el agua de mar, dando origen a una zona con salinidades entre 30 y 35‰. Esta masa de salinidades entre 30 y 35‰ bloquea por completo la entrada al estuario (estaciones Nos. 5, 6 y 7), dejando embolsadas aguas con

salinidades entre 35 y 37‰. Estas últimas también presentan la característica de hallarse estancadas o casi estancadas en el fondo del estuario.

c) Densidad: como en los casos anteriores (Figura 9c), las isopícnas toman prácticamente la misma distribución de las isohalinas, de lo que podemos inferir que aquéllas dependen, principalmente, de éstas.

d) Estabilidad: en la Figura 9d es posible ver la distribución más regular posible de los valores de estabilidad, y corriendo casi en líneas horizontales y paralelas. Esta distribución es, pues, la más estable de las que hemos visto hasta el momento.

Viaje de julio

a) Temperatura: en la Figura 10a presentamos el panorama de la temperatura en el estuario. Es fácil ver que éstas se diferencian completamente de los casos anteriores, ya que las temperaturas más altas pertenecen a las aguas del río (hasta 34°C), mientras que las aguas del mar presentan temperaturas entre 31 y 32°C. No intentaremos, por el momento, dar una explicación de este hecho.

b) Salinidad: presentamos en la Figura 10b las salinidades de la sección. La misma presenta los valores menores a 10‰ río arriba, así como una zona de mezcla en la desembocadura del mismo. Es posible ver claramente la entrada de agua de mar, con salinidades entre 30 y 35 partes por mil, así como valores mayores a 35‰ por sobre el fondo del estuario. No se presenta el fenómeno de bloqueo tratado anteriormente (ver isóclina de 35 partes por mil).

c) Densidad: la distribución de densidades (Figura 10c) indica claramente la penetración de agua de mar dentro del estuario, y es similar al caso ya presentado en la Figura 8c, por ejemplo. Compárese también con las Figuras 7c y 9c, y se comprobará la diferencia entre ellas.

d) Estabilidad: los valores de estabilidad presentados en la Figura 10d son, en general, altos. Vemos que la mayor estabilidad se encuentra en la capa de un metro de profundidad, con valores iguales o superiores a 10^6 , descendiendo éstos hasta alcanzar un valor de 10^5

o algo menor por sobre el fondo del estuario. Estos valores de junio y julio son los más altos del sistema, ya que no descienden hasta cero, ni alcanzan condiciones de estabilidad neutra o inestabilidad, como se presenta en las Figuras 7d y 8d.

Este breve análisis nos ha mostrado la condición de estuario de cuña salina que presenta este aparato hidrográfico, condición que creemos agravada por la presencia de la presa del río Zaza, situada alrededor de 12 km aguas arriba de la desembocadura.

BLOQUEO EN FLUJOS ESTRATIFICADOS

El fenómeno de *bloqueo* en flujos estratificados, al pasar éstos por sobre un obstáculo, se caracteriza por la generación de zonas *estancadas* separadas de la región fluente por bandas de discontinuidad en la velocidad (Kao, 1965).

La zona estancada se forma frente al obstáculo y es causada por su presencia. El parámetro que modifica el flujo es el número de Froude modificado, y se ha encontrado por Kao (1965) que si el número de Froude es mayor que π^{-1} ; o sea, $F > 0,32$, el flujo no forma ondas ni se bloquea en el canal. No obstante, si $F < \pi^{-1}$, se forman ondas y remolinos, y el flujo se ve bloqueado por la presencia del obstáculo (Long, 1955). También podemos decir que para valores de F pequeños, la altura de la zona estancada es la misma que la del obstáculo, pero según aumente F , la altura de la zona estancada disminuye frente a obstáculos en forma de cuña.

Cuando una capa bloqueada estancada, se encuentra frente al obstáculo que la causa, hay una línea de corriente a cuyos lados el flujo es discontinuo. Por sobre ella el fluido circula y por debajo de la misma está estancando. No obstante, no podemos situar a priori la posición de esta línea, aunque sabemos que a lo largo de ella se satisface la ecuación de Bernoulli (Milne-Thompson, 1951) proveyendo así una frontera dinámica no-lineal en la parte fluente.

Físicamente, el problema corresponde al estudio de un flujo atmosférico sobre una montaña y consideramos que también al

estudio de un flujo de una masa de agua sobre un promontorio del fondo, como por ejemplo en las secciones del estuario ya presentadas (Figuras 7b y 8b). Cuando la masa de agua fluya a escasa velocidad (ca 2 cm seg^{-1}) y siendo la estratificación lo suficientemente fuerte (Figuras 7d, 8d, 9d y 10d) debe observarse una región estancada frente al promontorio, así como formación de remolinos aguas abajo de la circulación. Esto parece cumplirse, como se ve en la Figura 8b. Compárese con Kao (1965) en la Figura 12.

Finalmente, podemos plantear que lo anterior puede dar origen a zonas con pobre contenido de oxígeno sobre el fondo, como puede apreciarse en las Figuras 11a,b, condición ésta que, de persistir, puede ser de desastrosas repercusiones ecológicas.

ESTABILIDAD VERTICAL

En ríos, estuarios, y aun en el mar, se observa frecuentemente que fluidos más ligeros —agua dulce o salobre, por ejemplo— flotan sobre otros más densos, existiendo entre ellos una delgada capa o *interfase*, con un brusco gradiente de densidad o *picnoclina*, permitiendo esto explicar la gran estabilidad que es posible encontrar en estas regiones (Okuda, 1961). Además, el estudio de esta interfase reviste un cierto interés con vistas al empleo del agua dulce suprayacente con propósitos de regadío (Tápanes, 1973c).

Okuda (1961) empleó en su trabajo experimental densidades dentro de los valores de $1,000$ a $1,020 \text{ g cm}^{-3}$, con valores máximos de $\Delta\rho = 0,02 \text{ g cm}^{-3}$. Posteriormente, hemos hallado en el estuario que este valor de $\Delta\rho$ puede ser considerado como valor fronterizo máximo en flujos reales bajo condiciones normales, ya que la densidad del agua de río (salobre) por ejemplo, puede ser de $\rho_r = 1,003 \text{ g cm}^{-3}$, y la del agua de mar puede ser $\rho_m = 1,022 \text{ g cm}^{-3}$, arrojando esto un valor de $\Delta\rho = 0,013 \text{ g cm}^{-3}$.

Para aclarar algo los conceptos y fenómenos concomitantes de la estabilidad vertical veremos someramente los dos casos principales estudiados por diferentes investigadores, que son: 1) Cálculo del flujo horizontal en dos capas, sin velocidad vertical: se han realizado varios

trabajos para flujos laminadores entre dos capas estratificadas verticalmente (Keulegan, 1944; Lock, 1951; Potter, 1957). Pai (1954) ha estudiado flujos turbulentos, habiendo encontrado estos autores que la velocidad en la interfase es prácticamente el valor medio de las velocidades en las capas superior e inferior. Lo anterior no concuerda, no obstante, con el hecho de que la velocidad disminuye rápidamente y desaparece en la zona de contacto (Okuda, 1961).

En hidrografía de estuarios se han llevado a cabo estudios experimentales (Pritchard, 1952b) con agua dulce en la capa superior y salada en la inferior, aunque estos trabajos también presentan inconsistencias con relación al trabajo de Okuda ya citado.

2) Flujo horizontal con zona intermedia, flujo de tres capas: generalmente, se observa que cuando un líquido de menos densidad sobrenada otro más denso, se forma una delgada capa de densidad intermedia debido a una mezcla inevitable entre ambos (Okuda, 1961). Sin embargo, sí nos interesa sobremanera el estudio de la estabilidad de esta capa intermedia, puesto que los valores de estabilidad encontrados por nosotros son, en general, altos.

Hasta el presente se han hecho algunos estudios acerca de la estabilidad de flujos horizontales con gradientes verticales de densidad. L. F. Richardson ha investigado la turbulencia atmosférica con un método "energético" y G. I. Taylor y S. Goldstein han estudiado, independientemente, la estabilidad de un flujo horizontal cizallado, con estratificación de densidades.

Los autores citados han mostrado que el flujo horizontal con estratificación de densidades es *estable* cuando el número de Richardson (Proudman, 1953) definido como

$$Ri = -\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} \Big/ \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 \quad (2)$$

excede un cierto valor, donde tenemos que: ρ es la densidad del fluido, g es la aceleración debida a la gravedad, U es la velocidad horizontal, y es el eje de coordenadas tomado verticalmente hacia arriba. Schlichting (1935) obtuvo un número de Richardson, necesari-

rio para la estabilidad, de $Ri > 0,04$, presentando Phillips (1966), para el mismo parámetro, un valor de $Ri > 0,25$. Luego, en nuestra experiencia en el estuario, el líquido denso inferior (agua de mar) se encuentra prácticamente en reposo en la cuenca, y el movimiento cerca de la interfase superior es similar a la frontera formada por una pared rígida. Podemos utilizar los valores de $Ri > 0,04$ o de $Ri > 0,25$ como criterios de estabilidad.

Sustituyendo valores en (2), obtendremos, según Okuda (1961) la relación

$$Ri = \frac{g \Delta\rho H^2}{16 V^2 \rho h} \quad (3)$$

donde: H es el espesor de la capa superior, h es el espesor de la capa intermedia, V es la velocidad en la capa superior del fluido y $\Delta\rho$ es la diferencia entre las densidades de los líquidos en las capas superior e inferior; g y ρ ya han sido definidos anteriormente para la ecuación (2).

Okuda (1961) usó valores de $\rho = 1 \text{ g cm}^{-3}$, $H = 10 \text{ cm}$, $h = 1 \text{ cm}$, $V = 2 \text{ cm seg}^{-1}$, aproximadamente. Luego, adoptando el valor crítico de $Ri > 0,04$, y sustituyendo en (3), obtendremos un valor para $\Delta\rho \approx 2,5 \times 10^{-5} \text{ g cm}^{-3}$, mostrándonos este resultado que aun pequeñas diferencias en las densidades de los líquidos son suficientes para estabilizar el flujo en la zona intermedia.

Para nuestro estuario hemos encontrado valores de $Ri > 200$, lo que demuestra la gran estabilidad que debe tener la sección investigada. Los valores que han dado origen a este valor de Ri , típico para la sección, han sido: $g = 981 \text{ cm seg}^{-2}$, $\rho_1 = 1,0152 \text{ g cm}^{-3}$, $\rho_2 = 1,02265 \text{ g cm}^{-3}$, $\Delta\rho = 0,00745 \text{ g cm}^{-3}$, $H = 150 \text{ cm}$, $h = 50 \text{ cm}$ y $U = 1 \text{ cm seg}^{-1}$. En las Figuras 7d, 8d, 9d, y 10d ya hemos presentado los valores de la estabilidad calculados para la sección.

CONCLUSIONES

Podemos concluir que:

- a) Los estuarios de planicie costera ("coastal plain estuaries")

pueden presentar constitución de estuarios de cuña salina, viéndose agravada esta estructura con la construcción de represas aguas arriba de sus desembocaduras.

b) Estos estuarios pueden presentar fenómenos de *bloqueo* en sus aguas profundas, los cuales pueden dar origen a trastornos ecológicos por falta de oxígeno en estas capas de fondo.

c) Debido a la fuerte estratificación de las capas de agua, estos estuarios de cuña salina presentan una gran estabilidad vertical, haciéndose muy difícil, por lo tanto, el intercambio entre las masas de agua de superficie y de fondo.

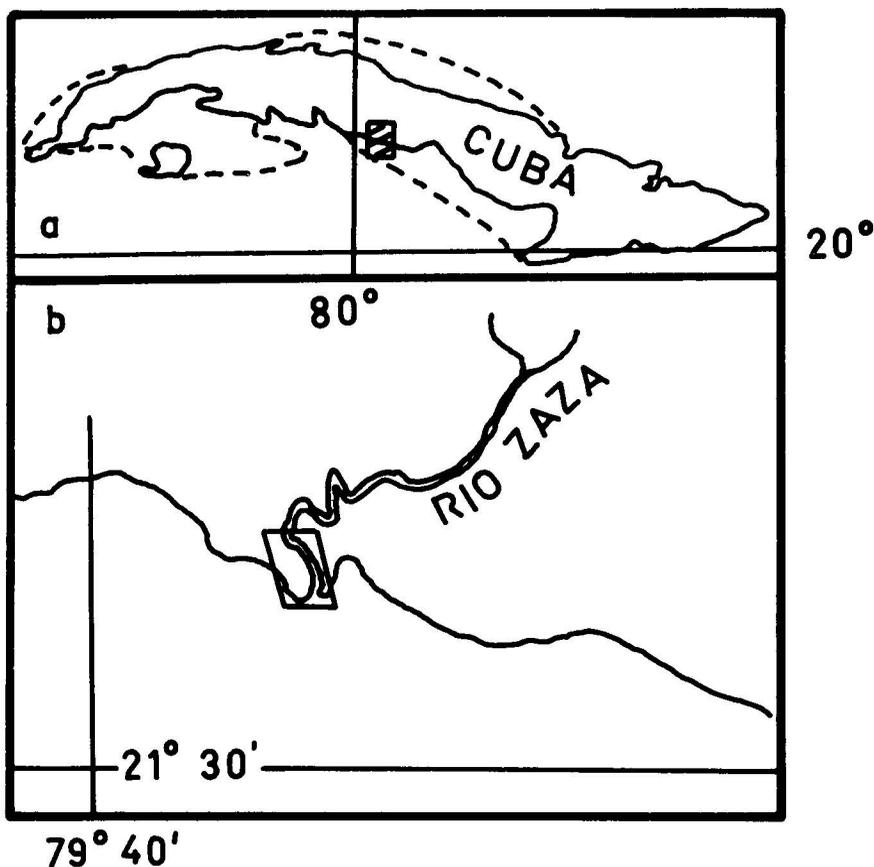


Figura 1. Río Zaza y regiones adyacentes.

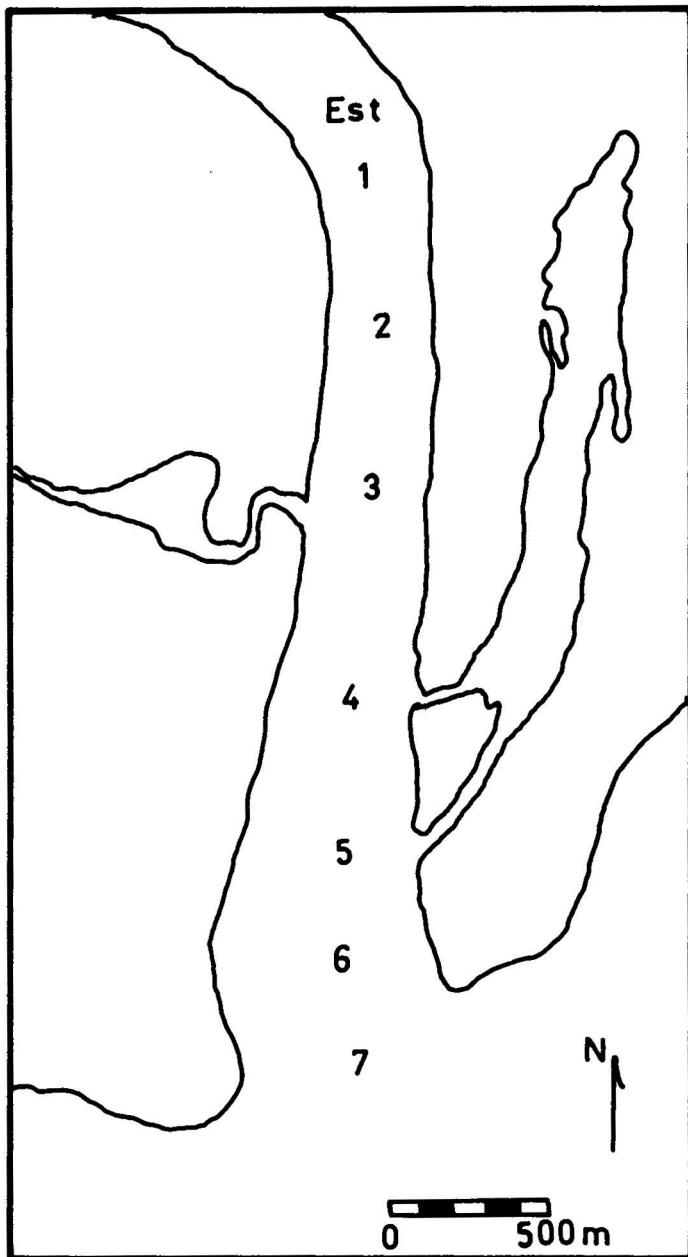


Figura 2. Vista general del estuario. Los números representan las estaciones visitadas.

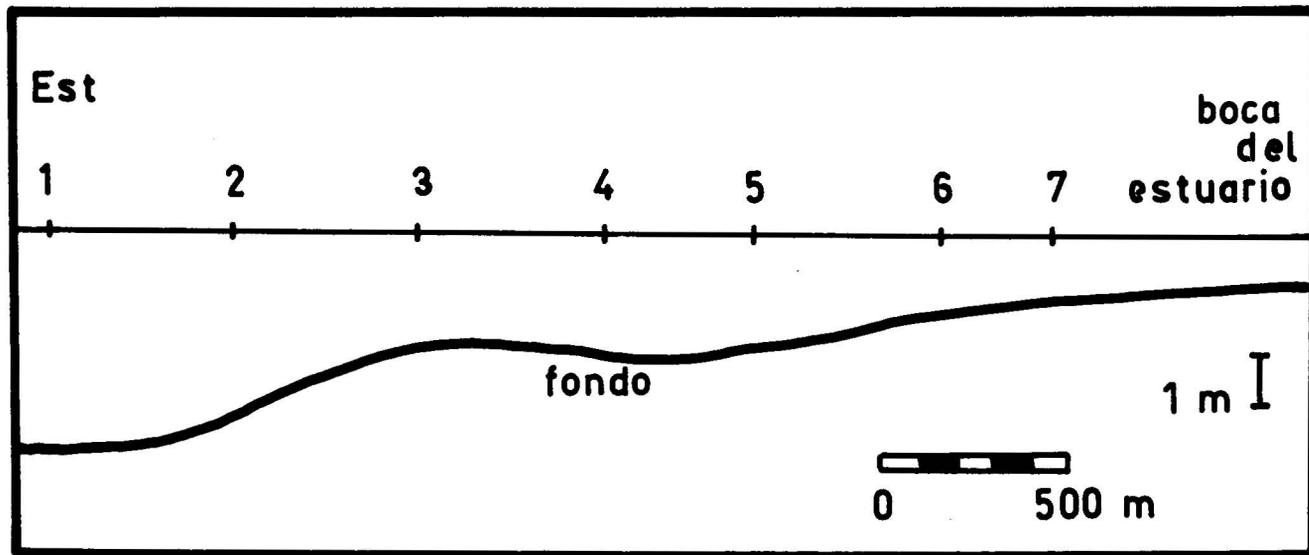


Figura 3. Sección central del mismo. Profundidades en metros.

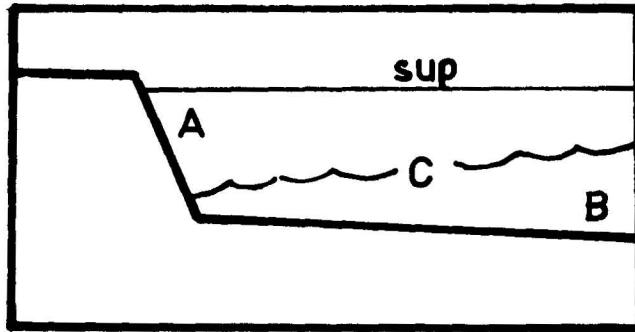


Figura 4. Esquema muy simplificado de estuario de cuña salina, donde: "A", capa de agua de río que fluye hacia el mar; "B", cuña de agua salada que fluye río arriba; "C", interfase.

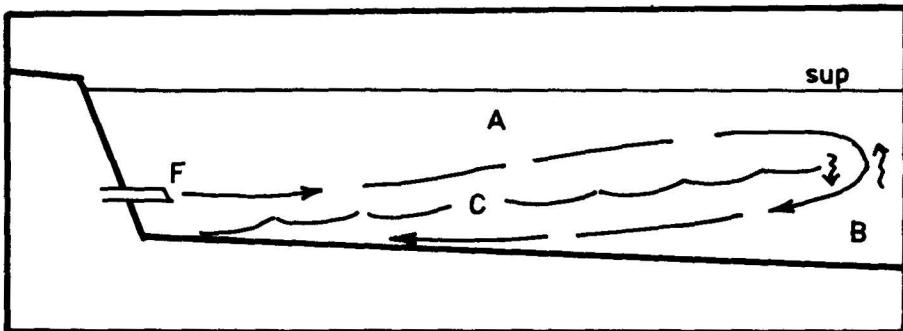


Figura 5. Contaminante hipopical descargado en profundidad. Al llegar a la desembocadura del estuario se mezcla con el agua de mar y retorna al sistema.

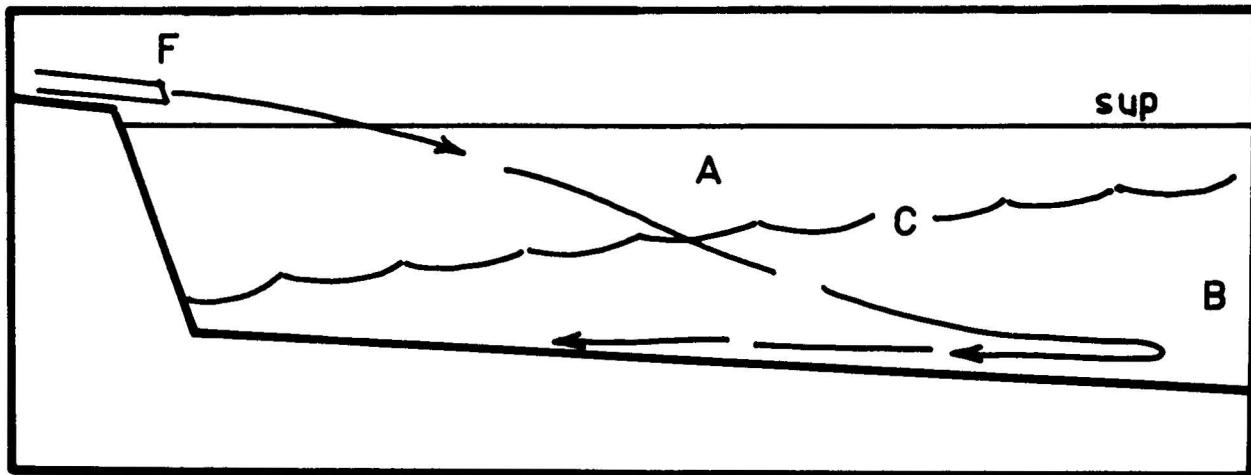


Figura 6. Contaminante hiperpícnico descargado en superficie. Queda depositado sobre el fondo siendo absorbido por los organismos del bentos.

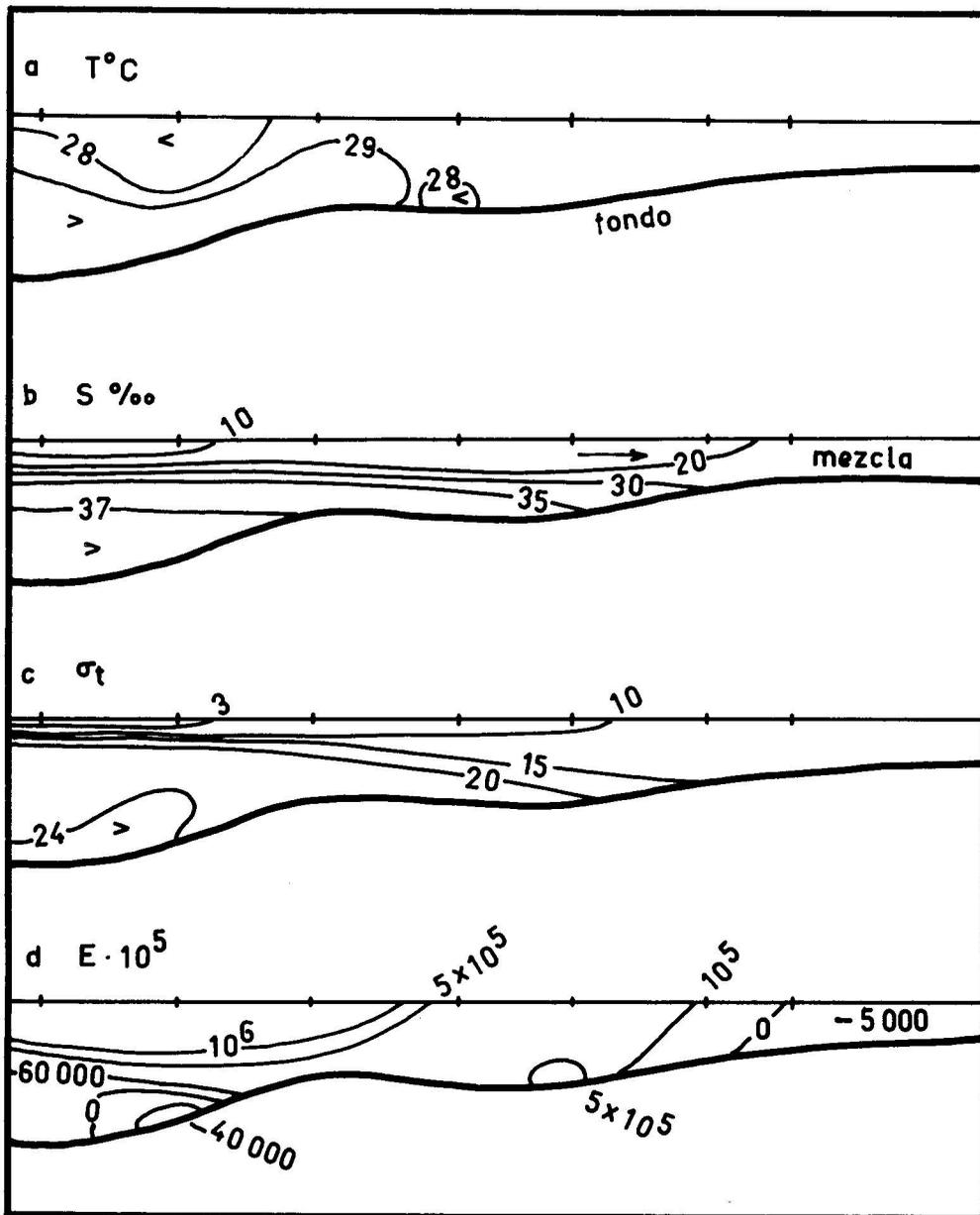


Figura 7. Condiciones de temperatura, salinidad, densidad y estabilidad durante el mes de abril (1973).

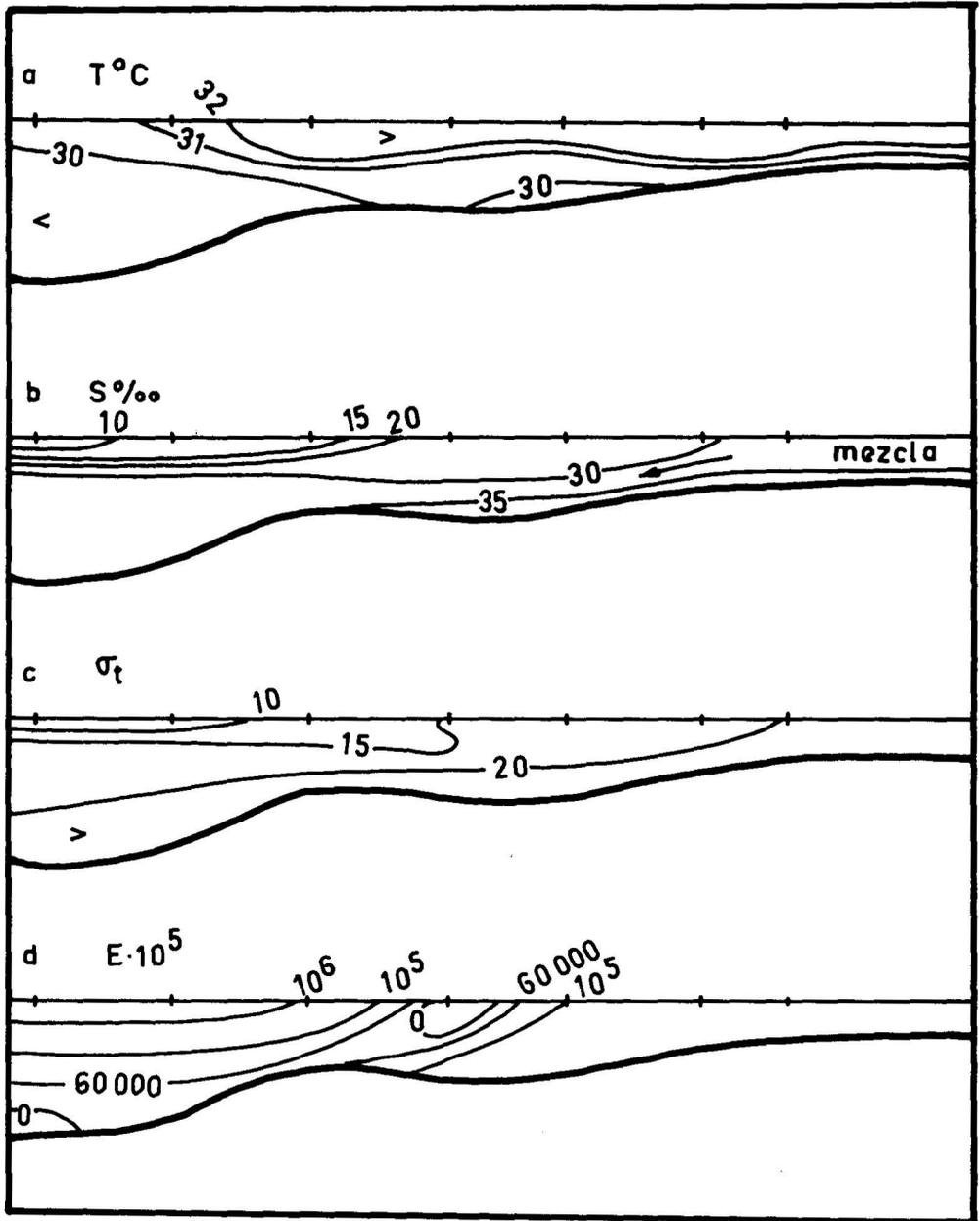


Figura 8. Condiciones de temperatura, salinidad, densidad y estabilidad durante el mes de mayo (1973).

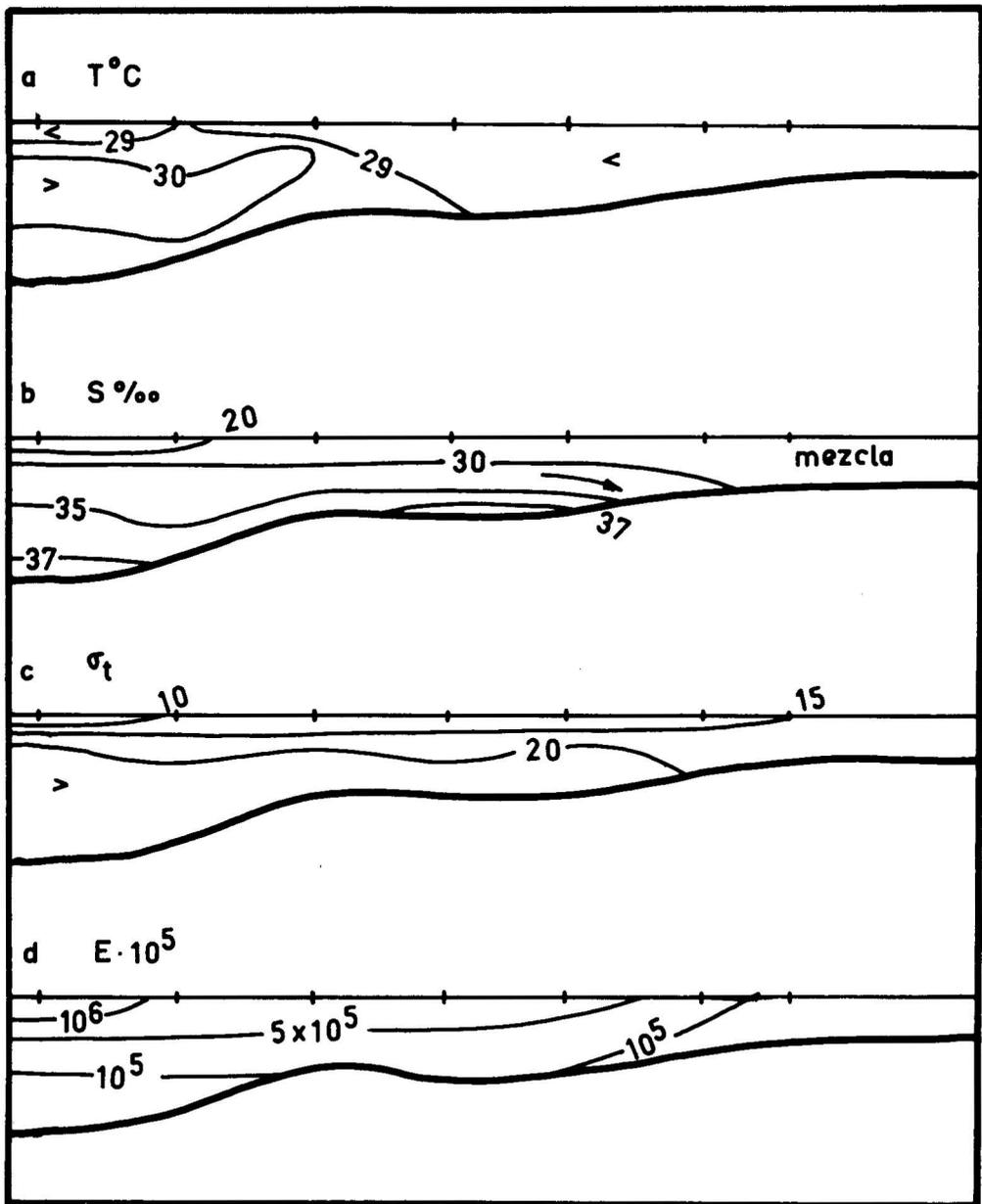


Figura 9. Condiciones de temperatura, salinidad, densidad y estabilidad durante el mes de junio (1973).

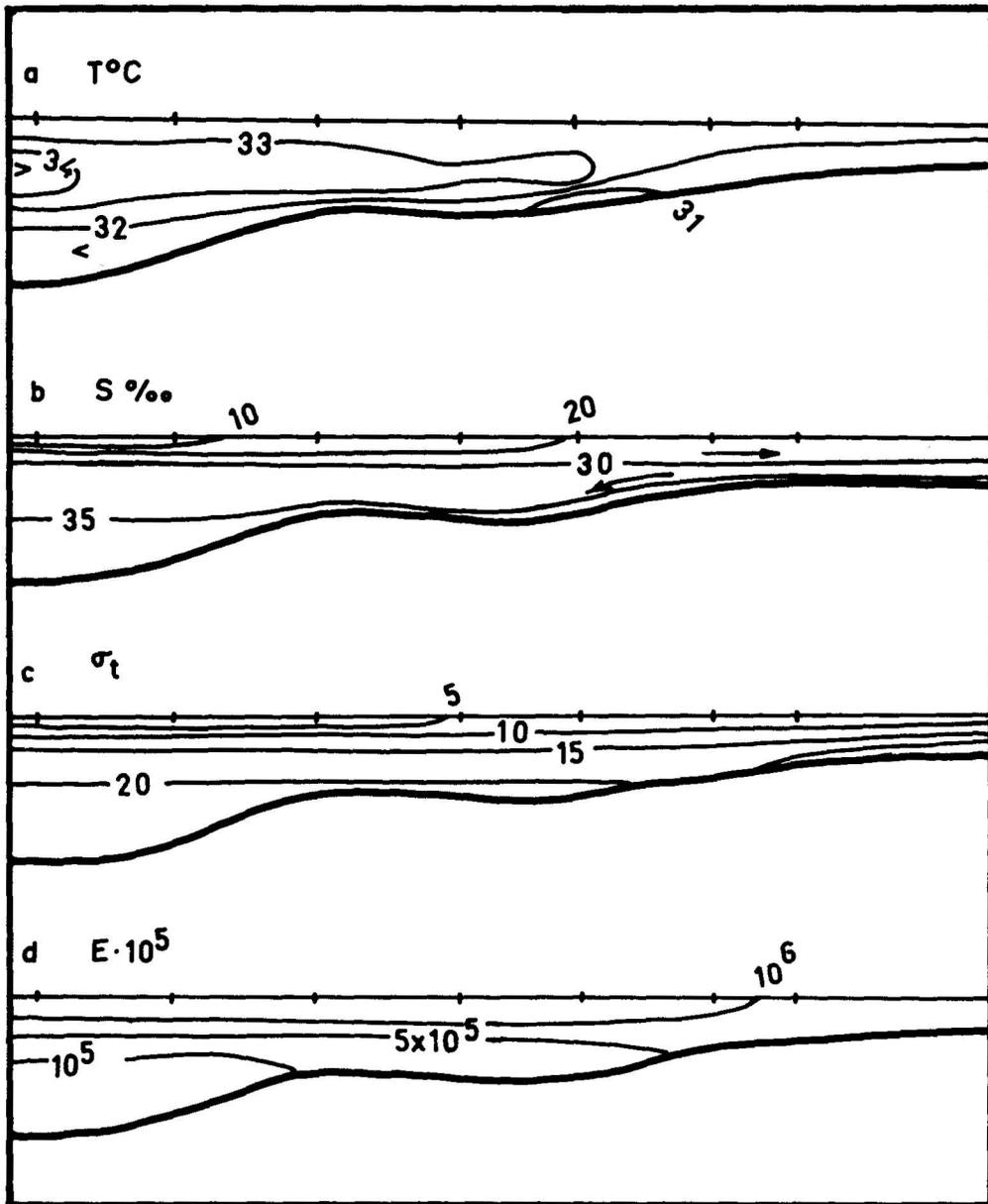


Figura 10. Condiciones de temperatura, salinidad, densidad y estabilidad durante el mes de julio (1973).

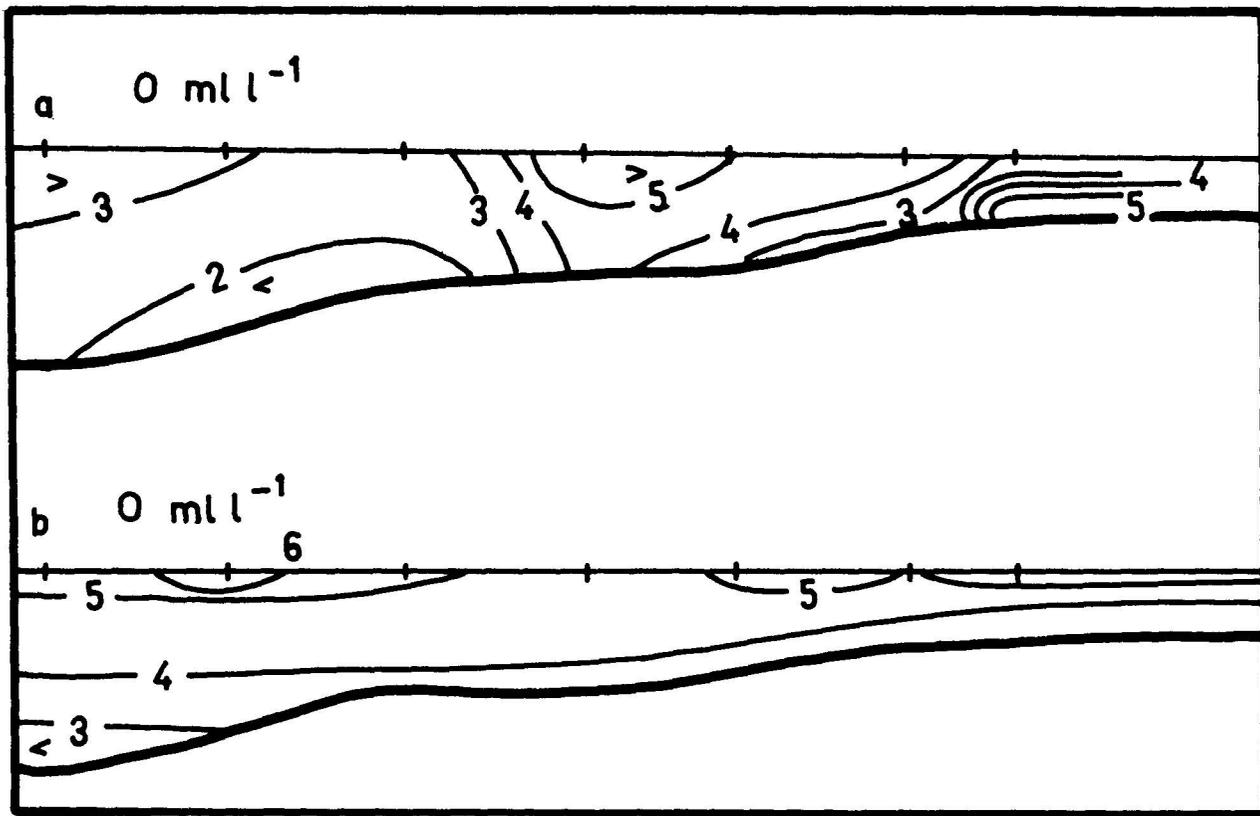


Figura 11. Poca presencia de oxígeno debido al bloqueo de la masa de agua, durante los meses de abril y julio de 1973.

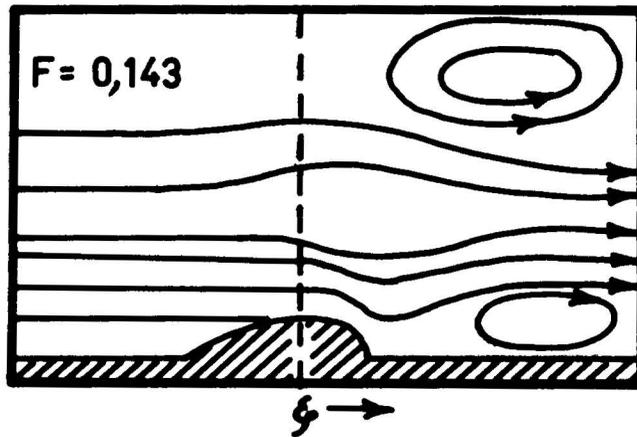


Figura 12. Flujo sobre una cuña con zona estancada, frente al promontorio, número de Froude $F = 0,143$ (según Kao, 1965).

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece la cooperación y ayuda prestadas en todo momento por los patrones y tripulantes de los motopesqueros Omicrón 50 "Manjúa" y Cubamar II, del Centro de Investigaciones Pesqueras (La Habana).

BIBLIOGRAFIA

- BOWDEN, K. F., 1967. Circulation and diffusion. En: *Estuaries* (G. H. Lauff, Ed.) A. A. A. Sc., Pub. 83: 15-36.
- BOWDEN, K. F. y R. M. GILLIGAN, 1971. Characteristics features of estuarine circulation as represented in the Mersey estuary. *Limnology and Oceanography*, 16(3): 490-502.
- CAMERON, W. M. y D. W. PRITCHARD, 1963. Estuaries. En: *The Sea* (M. M. Hill, Ed.) Vol. 2, Interscience; 83-101.
- DICKIE, L. M., 1970. *Bedford Institute Biennial Review 1969/70*. Bedford Ins., Canada; 221-227.
- DIETRICH, G., 1963. *General Oceanography*. Wiley; 588 pp.

- HANSEN, D. V. y M. RATTARY, 1966. New dimensions in estuary classification. *Limnology and Oceanography*, 11(3): 319-326.
- HANSEN, D. V., 1967. Salt balance and circulation in partially mixed estuaries. En: *Estuaries* (G. H. Lauff, Ed.) A. A. A. Sc. Publ. 83: 45-51.
- HOWELL, B. F., Jr., 1969. *Introduction à la Géophysique*. Masson; 398 pp.
- KAO, T. W., 1965. The phenomenon of blocking in stratified flows. *J. Geophysical Res.*, 70(4): 815-822.
- KEULEGAN, G. H., 1944. *J. Res. Nat. Bur. Standards*, (32): 303.
- LOCK, R. C., 1951. *Quart. J. Mech. & Applied Maths.*, 4; 42.
- LONG, R. R., 1955. Some aspects of the flow of stratified fluids. *Tellus*, (7): 341-357.
- MILNE-THOMPSON, L. M., 1951. *Hidrodinámica Teórica*. Aguilar; 604.
- OKUDA, S., 1961. The velocity distribution at the interfase between two liquids. *J. Phys. Soc. Japan*, 16(2): 324-338.
- PAI, S. I., 1954. *Fluid Dynamics of Jets*. Van Nostrand; 164 pp.
- PHILLIPS, O. M., 1966. *The Dynamics of the upper ocean*. Cambridge Univ. Press; 261 pp.
- POTTER, O. E., 1957. *Quart. J. Mech. & Applied Math.*, (10); 312.
- PRITCHARD, D. W., 1952a. The physical structure, circulation and mixing in a coastal plain estuary. *Chesapeake Bay Inst. Tech. Rept.* III, Ref. 52-2; 56.
- PRITCHARD, D. W., 1952b. *Advances in Geophysics*, Vol. 1, Academic Press.
- PRITCHARD, D. W., 1954. A study of the salt balance in a coastal plain estuary. *J. Mar. Res.*, (13): 133-144.
- PRITCHARD, D. W., 1956. The dynamic structure of a coastal plain estuary. *J. Mar. Res.*, (15): 33-42.
- PRITCHARD, D. W., 1967. Observation of circulation in coastal plain estuaries. En: *Estuaries* (G. H. Lauff, Ed.), A. A. A. Sc. Publ. 83: 37-44.
- PROUDMAN, J., 1953. *Dynamical Oceanography*. Methuen; 409 pp.
- RATTRAY, M. y D. V. HANSEN, 1962. A similarity solution for circulation in an estuary. *J. Mar. Res.*, 20(2): 121-133.
- SCHLICHTING, H., 1935. *Z. A. A. M.*, (15): 313.
- SVERDRUP, H. U., M. W. JOHNSON y R. H. FLEMING, 1942. *The Oceans*. Prentice-Hall; 1088 pp.
- TAPANES, J. J., 1970. Importancia y clasificación de los estuarios. *Mar y Pesca* (62): 28-31.
- TAPANES, J. J., 1971a. Contaminación térmica de los estuarios. *Mar y Pesca* (71): 48-51.
- TAPANES, J. J., 1971b. La contaminación por petróleo. *Mar y Pesca*, (67): 12-17.
- TAPANES, J. J., 1971c. Los mecanismos de difusión en los estuarios. *Mar y Pesca* (72): 30-33.

- TAPANES, J. J., 1972a. Hidrología de la plataforma cubana (Primera Parte). *Juventud Técnica* (73): 82-96.
- TAPANES, J. J., 1972b. Hidrología de la plataforma cubana (Segunda Parte). *Juventud Técnica* (74): 73-88.
- TAPANES, J. J., 1973a. Hidrología de otoño de ecosistemas limitados. *Juventud Técnica* (83).
- TAPANES, J. J., 1973b. Contaminación térmica de ecosistemas limitados. *Voluntad Hidráulica* (en espera de publicación.)
- TAPANES, J. J., 1973c. Posible uso de estuarios y bahías como embalses de agua dulce. *Voluntad Hidráulica* (en espera de publicación.)