

MASAS DE AGUA DEL CARIBE COLOMBIANO

Por: CF. JORGE E. URBANO ROSAS



*Capitán de Fragata.
Oceanógrafo Físico.
Director Centro de Investigaciones
Oceanográficas e Hidrográficas.*



RESUMEN

El presente trabajo comprende el análisis de la temperatura y salinidad sobre un sector del Caribe colombiano, para determinar las masas de agua existentes, utilizando la información obtenida durante el crucero Océano II.

Se estudia la distribución vertical de temperatura, salinidad y SIGMA-T, relacionándola con la distribución porcentual de masas de agua obtenidas mediante un triángulo de mezcla, conformado a su vez por los índices termohalinos propuestos por Mamayev O.I., 1975. Los anteriores análisis se relacionan además con cálculos de estabilidad vertical y de difusión turbulenta de sal.

Los resultados del estudio indican la existencia de tres masas de agua e indican que las surgencias presentes en la zona de la Guajira corresponden a masas de Aguas Profundas del Atlántico Norte (APAN). Las aguas localizadas entre 100 y 400 metros de profundidad corresponden a Aguas Centrales del Atlántico Norte (ACAN) y las de 500 metros de profundidad se presentan alternadas por Aguas Intermedias Antártida (AIAN) y Agua Profunda del Atlántico Norte (APAN).

ABSTRACT

The work comprehends the analysis of temperature and salinity over an area of the Colombian Caribbean, to determine the presence of water masses, using the information collected during the cruise Oceano II.

The vertical distribution of temperature, salinity and SIGMA T is studied, in relation with the percentual distribution of water masses obtained through a mixing triangle, constructed from the thermohaline indices proposed by Mamayev O.I., 1975. These analysis are also related to vertical stability and salt turbulent diffusion analysis.

The results of the study indicate the existence of three masses of water and also that the present upwellings in the Guajira region belong to Deep Waters of the North Atlantic (APAN). The waters located between 100 and 400 meters to Central North Atlantic Waters (ACAN) and the 500 meters depth waters are alternated by Antarctic Intermediate Water (AIAN) and Deep North Atlantic Waters (APAN).

INTRODUCCION

Los datos recolectados durante el crucero oceanográfico Océano II, se han utilizado para la elaboración del presente documento. El objetivo es el análisis de temperatura y salinidad del Caribe colombiano, para definir las masas de agua existentes en dicha zona; la importancia del análisis radica en que permite la elaboración de los pronósticos de las condiciones físicas del medio marino, para ser aplicadas en las operaciones navales y además relacionarlos con la existencia y abundancia de diferentes especies biológicas marinas, alcanzando este último aspecto una gran importancia dentro del campo de la pesca nacional.

Para la presente publicación solamente se registran los resultados del análisis de masas de agua; en un segundo documento serán tratados los resultados del análisis de la estabilidad vertical y de la difusión turbulenta de sal.

Los análisis y resultados corresponden a los datos recolectados en el área Colombiana comprendida entre latitudes 10°N y 13°N, y longitudes 71°W y 78°W (Figura 1).

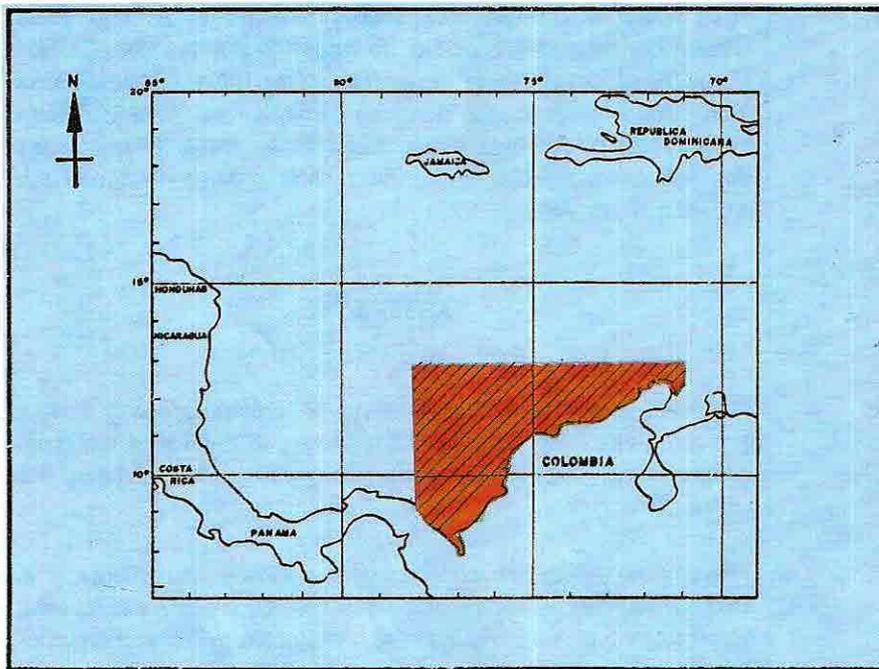


Figura 1.

Localización área de muestreo - crucero Océano II.

OBTENCION Y PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

La obtención de los datos se efectuó durante el desarrollo del crucero oceanográfico Océano II, en las áreas 2 y 3 del Mar Caribe, durante los meses de septiembre, octubre y noviembre de 1972; el crucero mencionado se realizó a bordo del ARC "SAN ANDRES" y la información se encuentra colectada y publicada en el documento DIVOC-CECOLDO DO 13/1976, de la Dirección General Marítima. La información ha sido complementada con datos del National Ocean-

graphic Data Center-NODC, con el fin de comprobar y comparar los datos del crucero Océano II; cuando se utilizan las estaciones del NODC, se nombran los buques que las realizaron con las letras de codificación correspondientes y el año en que las realizaron.

El área 2 y 3 del litoral colombiano está comprendida entre Turbo y la Guajira. se hicieron observaciones oceanográficas en 80 estaciones (Figura 2), se tomaron 80 placas de batitermógrafo mecánico y se efectuaron observaciones meteorológicas de superficie y de altura.

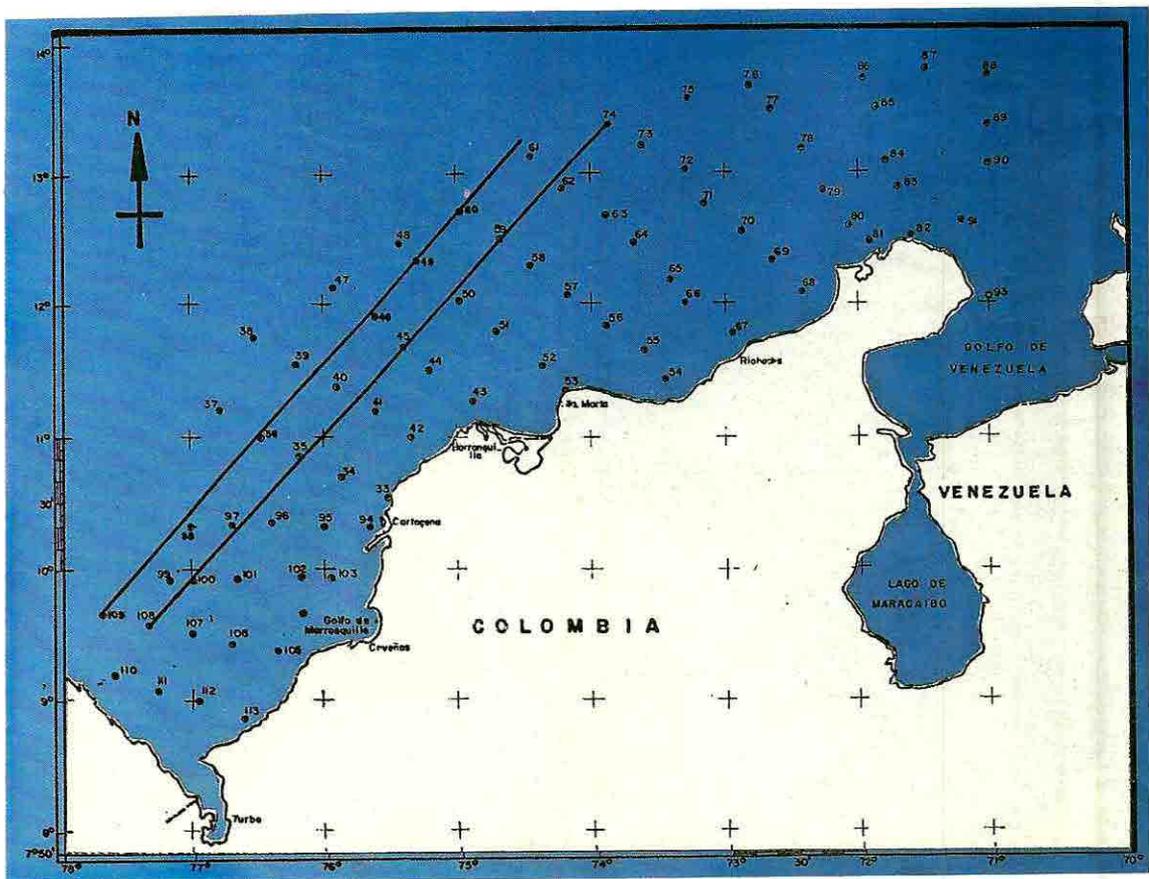


Figura 2.

Localización de las estaciones del crucero Océano II. (Áreas 2 y 3) y región seleccionada para el presente estudio.

El procesamiento de los datos del crucero Océano de Estadística (DANE).
 II se realizó de la siguiente forma:

En el Centro Colombiano de Datos oceanográficos (CECOLDO) fueron hechos los cálculos de corrección de temperatura y profundidades reales de inversión por medio de un programa para computación en Fortrán IV.

Los cálculos del Sigma-T, anomalía de volumen específico, altura dinámica, velocidad del sonido y valores interpolados a profundidades estándar, fueron obtenidos por medio del programa para estaciones oceanográficas del NODC de los EE.UU., después de hacer el montaje respectivo y adaptación para un computador IBM 370/145 OS-VS1 del Departamento Administrativo Nacional

de Estadística (DANE).
 Abordo del ARC "SAN ANDRES" fueron hechos los cálculos y correcciones necesarias para la obtención de los valores de salinidad, por medio de un salinómetro de inducción Modelo RS 7-B.

Para el presente trabajo se seleccionaron dos secciones lineales de estaciones (Fig. 2). El criterio de escogencia de las estaciones que conforman las secciones, fue el de buscar que las líneas resultantes de la unión de ellas tenga aproximadamente la dirección de las corrientes (PILOT CHART-USN) predominantes en la época del año durante la cual se realizó la toma de muestras utilizadas en este estudio (Figura 3).

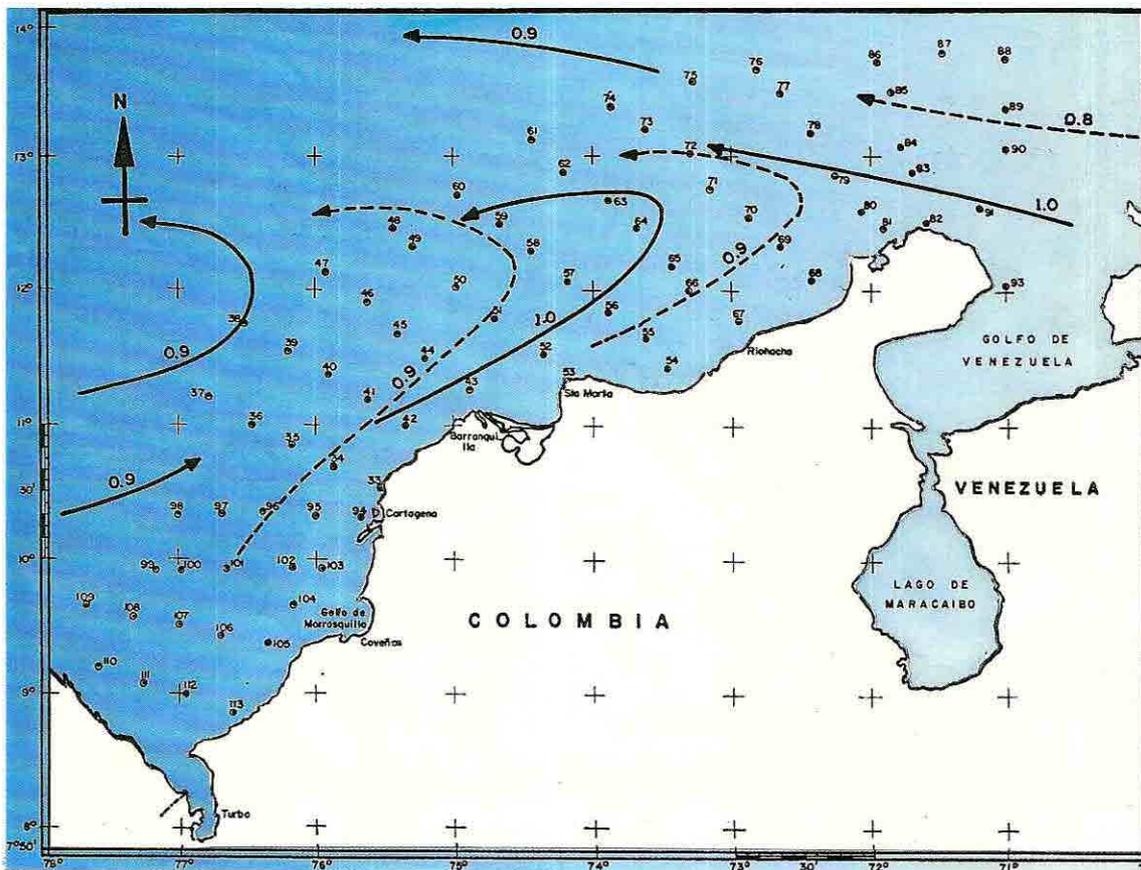


Figura 3.

Localización de corrientes oceánicas para los meses de septiembre \longrightarrow , octubre \dashrightarrow de 1972 (PILOT CHART-U.S.N.).

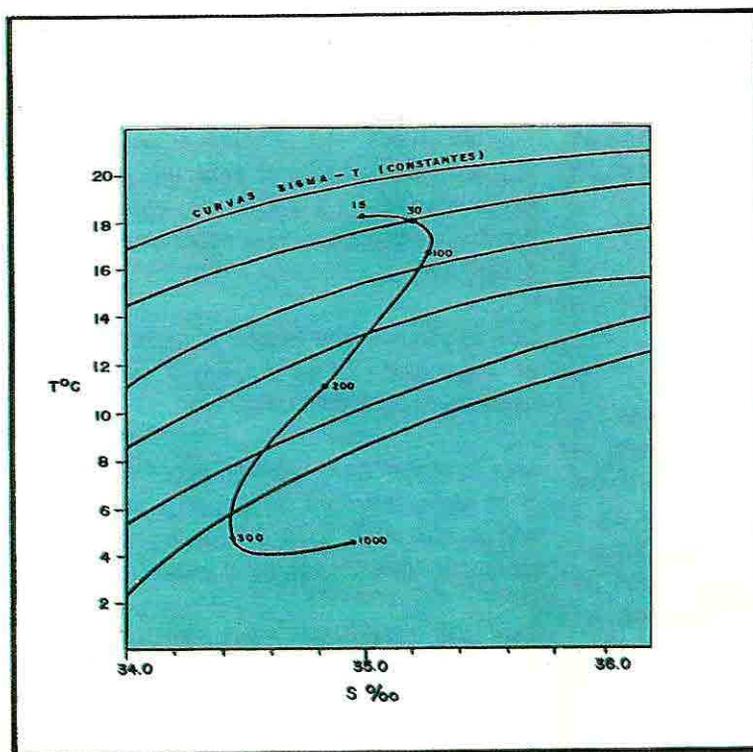
Para el análisis de masas de agua y cálculo del coeficiente vertical de difusión turbulenta se utilizó únicamente la sección II, por cubrir mayor número de estaciones, las cuales fueron muestreadas a una profundidad de cero a 1.800 metros.

Para el cálculo de la estabilidad se utilizaron las estaciones de las dos secciones con el fin de analizar esta variable en una área mayor.

DIAGRAMA T - S Y SUS PROPIEDADES

GENERALIDADES

Un diagrama T-S es la graficación de la temperatura Vs. salinidad en donde la temperatura y salinidad son las coordenadas y la profundidad se anota para cada una de las observaciones que se desean evaluar, seguidamente se unen los puntos con una línea en la medida en que se incrementa la profundidad (Figura 4), dando como resultado una curva, la cual recibe el nombre de curva T-S-z.



D. Se utiliza para graficar las isolíneas de velocidad de propagación del sonido.

E. Análisis del valor numérico de algunos parámetros físicos:

Proporciones de diferentes masas de agua presentes en una mezcla, coeficientes de difusión turbulenta y contracción de volumen específico.

Figura 4.

Diagrama T-S.

APLICACIONES

La importancia de los diagramas T-S radica en la gran variedad de información que pueden proporcionar; entre sus aplicaciones en la oceanografía física se menciona:

A. El diagrama T-S o Termo-Halograma, es la base para graficar las relaciones de temperatura y salinidad de las masas de agua de los océanos del mundo, por lo cual se utiliza para clasificarlas.

B. Es posible sobre un diagrama T-S, con diferentes valores de temperatura y salinidad, trazar isopicnas o líneas de igual densidad (Sigma-T). Haciendo un análisis de la curva T-S en presencia de las líneas de Sigma-T, se obtiene un indicador de la estabilidad presente en la columna de agua (Fig. 4).

C. Sirve para graficar las isolíneas de densidad o volumen específico, en tal caso recibe el nombre de "Diagrama T-S Isotérico" (Figura 5). Del anterior diagrama se pueden obtener otros dos, haciendo combinaciones entre los parámetros representativos de los ejes, originando un "Volumen-Termograma" o "Volumen-Halograma" de acuerdo a la descripción de los ejes.

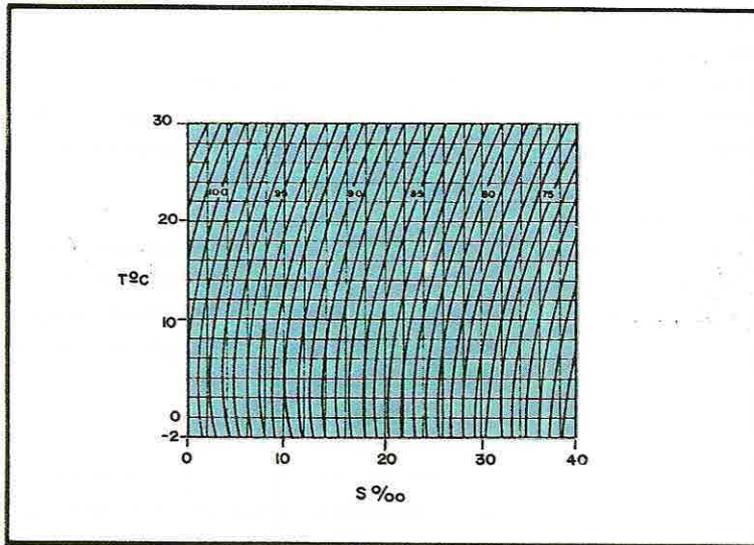


Figura 5.

Diagrama T-S- Isotérico
(O.I. Mamayev, 1975 pág.
30)

valores medios es permisible para el estudio de las estructuras del agua.

Cuando se grafican los valores de temperatura y salinidad para una estación oceanográfica teniendo en cuenta la profundidad, se obtiene la curva T-S-z; estas curvas permiten la interpretación oceanográfica

- F. Se utiliza para comprobación de datos obtenidos en estaciones oceanográficas.
- G. Sobre un diagrama T-S se pueden trazar las líneas de temperatura de máxima densidad y la de temperatura de congelamiento del agua de mar. también se pueden trazar las isólnas de la primera derivada de la densidad por temperatura y salinidad.
- H. Se aplica el diagrama T-S para hacer análisis estadísticos, se utiliza también para la construcción de diagramas volumétricos de estado, para esto se plotea la temperatura en el eje Y, la salinidad en el eje X y la presión en el eje Z.

por observación en la forma de dichas curvas.

la distribución de salinidades y temperatura a lo largo de una columna de agua para estaciones caracterizadas por su similitud en la forma de las curvas T-S, pueden ser extremadamente diferentes y se debe hacer una separada consideración entre la forma y la distribución del parámetro Z, por ser solamente la forma de la curva T-S la que demuestra la propiedad de conservación de masa.

Otra característica es que la pendiente de la curva T-S observada con relación a las curvas de Sigma-T, da inmediatamente una idea de la estabilidad de las capas de agua de mar, permitiendo determinar si la estabilidad es positiva o negativa.

CARACTERISTICAS BASICAS DE LAS CURVAS T-S

Las curvas T-S muestran la distribución de los dos parámetros físicos más importantes; la temperatura y salinidad son de gran importancia para la generalización de las estructuras del agua de mar. V.N. Stepanov presentó el primer trabajo con los resultados obtenidos por aplicación de este principio, para distinguir los tipos de las estructuras de agua en todos los mares y océanos.

En el trazado de las curvas T-S la utilización de

Dos estaciones que tengan la misma pendiente en una sección de su curva T-S, pueden tener diferente estabilidad cuantitativa.

para el cálculo de estabilidad sobre una curva T-S se debe tener en cuenta otra característica básica de ellas, que es la distribución del parámetro "z" a lo largo de la vertical.

Para aclarar lo anotado anteriormente, se presenta el siguiente ejemplo (Figura 6). En las dos estaciones A y B, la línea que une los puntos de 300 a 400 metros y la que une de 600 a 800

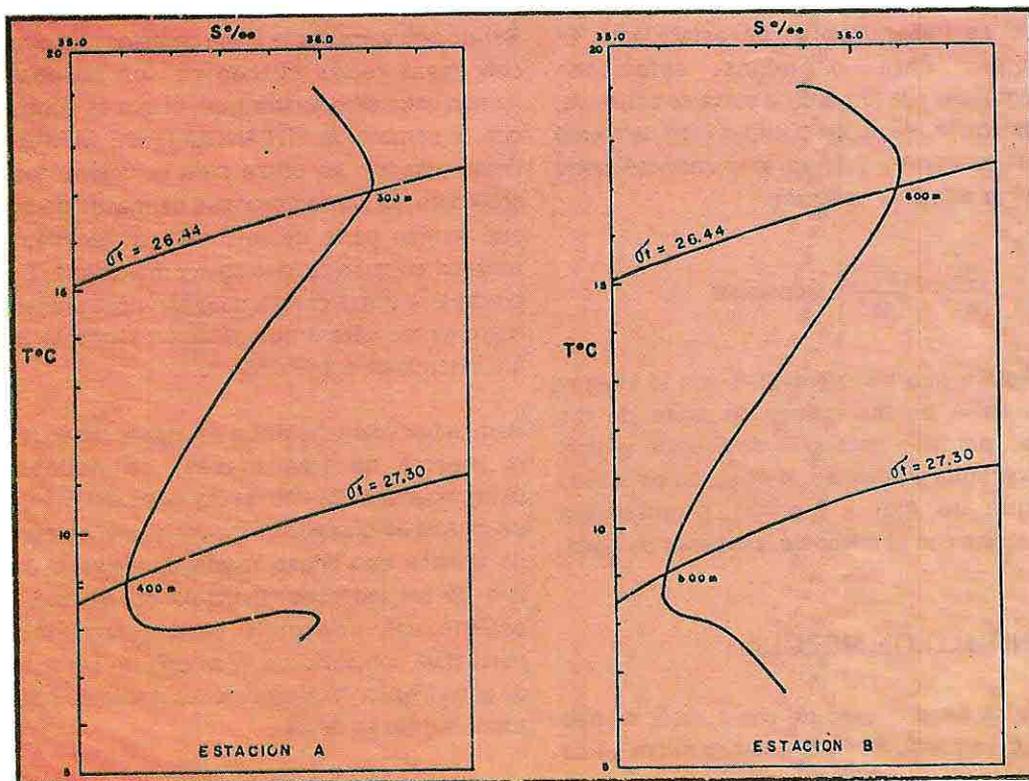


Figura 6.

Distribución del parámetro Z para dos estaciones oceanográficas.

metros, presentan la misma pendiente con relación a las isolíneas de Sigma-T, esto quiere decir que existe estabilidad positiva en dicha capa de agua (Estación A y B) pero el valor de la estabilidad "E" es diferente:

$$E_a \cong \frac{\Delta\sigma T}{\Delta Z} \cong \frac{27.30 - 26.44}{400 - 300} \cong 0.86 \times 10^{-4} \frac{\text{gm/cm}^3}{\text{cm}}$$

$$E_b \cong \frac{\Delta\sigma T}{\Delta Z} \cong \frac{27.30 - 26.44}{800 - 600} \cong 0.43 \times 10^{-4} \frac{\text{gm/cm}^3}{\text{cm}}$$

La diferencia observada se debe al cambio del parámetro Z. Para solucionar este problema de disparidad en los cálculos de estabilidad O.I. Mamayev, 1964, pág. 138, deduce la expresión:

$$E = \sqrt{\left(\frac{ds}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dT}{dz}\right)^2} \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial s} \cos \mu + \frac{\partial p}{\partial T} \sin \mu\right)$$

En la cual se separa el efecto del parámetro Z (gradiente vertical de temperatura y salinidad) de la forma de la curva T-S.

μ = Angulo de la pendiente de la curva T-S en relación al eje de las abscisas.

LA forma de la curva T-S y su posición sobre el plano T-S es determinada por el segundo término de la ecuación.

$$\frac{\partial p}{\partial s} \cos \mu + \frac{\partial p}{\partial T} \sin \mu = \text{Constante}$$

Significa que la curva tiene una forma constante. Cuando se tienen valores de estabilidad "E" constante, para diferentes estaciones oceanográficas y la forma de la curva se conserva, el parámetro "z" se puede distribuir irregularmente sobre tales curvas T-S, en este caso se debe imponer la siguiente condición:

$$\left(\frac{ds}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dT}{dz}\right)^2 = \text{Constante}$$

Se concluye que las curvas T-S son la imagen más precisa de las masas de agua de los océanos, permiten conocer la distribución vertical de temperatura y salinidad, la ecuación de estado del agua de mar y algunas propiedades relacionadas con el origen de las masas de agua.

TRIANGULO DE MEZCLA

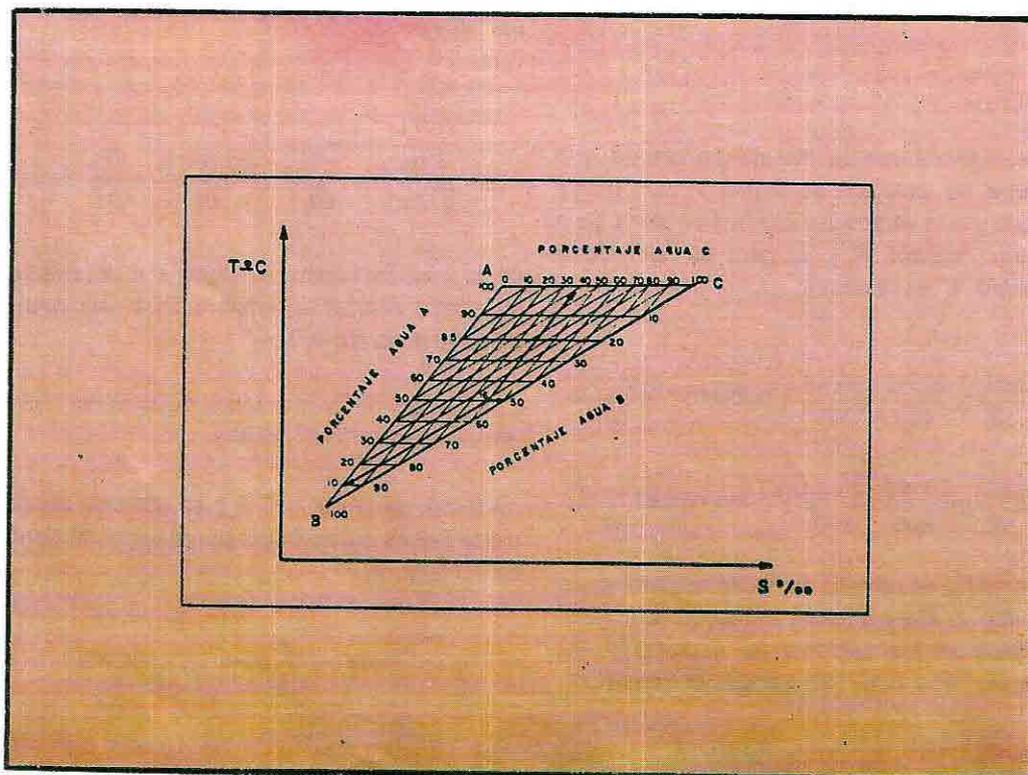
Cuando se tiene el caso de una mezcla de tres masas de agua A, B, C, que tienen temperatura

y salinidad dadas por (T1, S1); (T2, S2) y (T3, S3) respectivamente; la unión de estos tres puntos con líneas rectas cuando no son colineales, forman entre ellos un triángulo, el que es conocido con el nombre de "TRIANGULO DE MEZCLA". Dicho triángulo se utiliza para la determinación gráfica de las concentraciones de masas de agua que forman parte de una mezcla; también es utilizado en química, geología y metalurgia. En la práctica se utiliza el método gráfico por presentar mayores facilidades de aplicación; dicho método fue introducido por Thomsem.

Para determinar la relación de masas de agua en la mezcla de tres masas, es necesario descomponer cada uno de los lados del triángulo de mezcla en diez partes iguales y unir los puntos de división con líneas rectas paralelas a cada uno de los lados del triángulo de mezcla. Se obtiene así, una grilla para determinar el porcentaje contenido de cada una de las masas de agua (Figura 7), el número resultante de puntos sobre la grilla es de 66.

Figura 7.

Triángulo de mezcla. Determinación porcentual de masas de agua en el punto 16 (O.J. Mamayev - pág. 121, 1975)



La grilla puede ser aplicada a otras estaciones que se encuentren cerca a la estación de la cual se originó. Por ejemplo, en el punto 16 de la figura 7, la concentración de masas de agua es:

10%	masa de agua	-A
50%	masa de agua	-B
40%	masa de agua	-C

El triángulo de mezcla tiene aplicación en la mezcla horizontal de masas de agua y permite determinar igualmente el contenido porcentual de ellas.

DETERMINACION DEL CONTENIDO PORCENTUAL DE MASAS DE AGUA

El contenido porcentual de masas de agua participantes en un proceso de mezcla, se puede determinar gráfica o analíticamente. El cálculo del contenido porcentual hace posible: estudiar más completamente los resultados de la mezcla, la determinación de los contornos de las masas de agua y desde luego, dan una idea de la densidad de las correspondientes masas y además hacen posible construir las gráficas de la distribución y transformación de las masas de agua de los océanos.

INDICES TERMOHALINOS

El término de índice termohalino es la representación de un punto único sobre el diagrama T-S que se encuentra definiendo la temperatura-salinidad de los principales tipos de agua de los océanos del mundo. Un tipo de agua está definido por una salinidad y una temperatura fija, mientras que una masa de agua está compuesta de varios tipos de agua.

Cuando valores estacionarios de temperatura y salinidad son observados en algún punto sobre la superficie del mar, el correspondiente índice termohalino puede ser considerado como un indicador de dicha masa de agua.

La separación o localización sobre un diagrama T-S de los índices termohalinos de las masas de agua originales, es necesario para definir los contornos, para determinar el contenido porcentual, y otras características numéricas de interacción de masas de agua.

Para el desarrollo del presente trabajo se utilizan como referencia, los índices determinados por Mamayev, (1969). Sobre una curva T-S-z de una estación oceanográfica, se determinan los índices termohalinos como el punto de intersección de las líneas tangentes a la parte donde el perfil T-S-z muestra una exagerada curvatura (Figura 8).

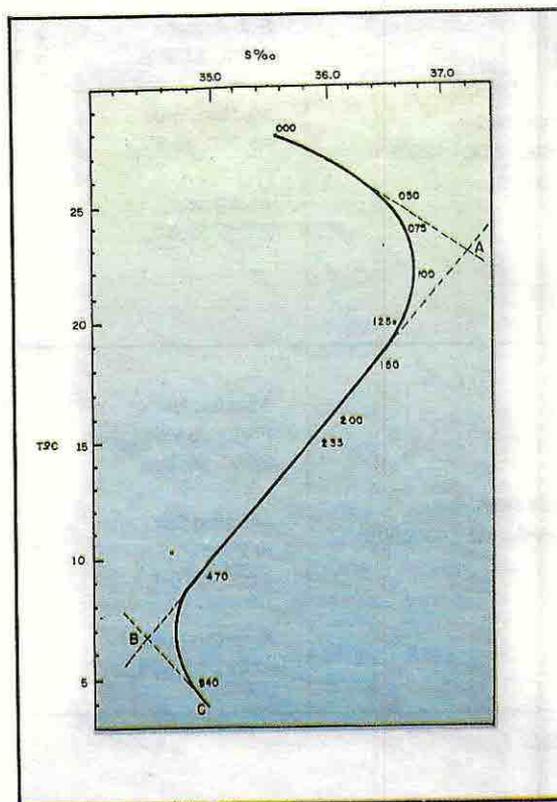


Figura 8.

Representación gráfica de la determinación de índices (A,B,C) termohalinos sobre un perfil T-S-z. Estación No. 109 crucero Océano II.

MASA DE AGUA	O. ATLANTICO	O. INDICO	O. PACIFICO
Troposférica (100-900) metros.	Atlántico Norte Subtropical; 20°C ; 36.5‰ Atlántico Sur Subtropical: 18°C ; 35.9‰	Bengala (Bahía): 25.0°C ; 33.8‰ Ecuatorial: 25.0°C ; 35.3‰ Indico Sur Subtropical: 16°C ; 35.6‰	Pacífico Nor-oeste Subtropical: 20°C ; 34.8‰ Pacífico Nor-oeste Subtropical 20.0°C ; 35.2‰ Pacífico Ecuatorial Sur y Subtropical 25.0°C ; 36.2‰ 20.0°C ; 35.7‰
Intermedia (600 - 800 - 1200) metros.	Sub-Ártica: 2.0°C ; 34.9‰ Mediterránea: 11.9°C ; 36.5‰ Antártica: 2.2°C ; 33.8‰	Mar Rojo: 23.0°C ; 40.0‰ Timor (mar) 12.0°C ; 34.6‰ Antártica: 5.2°C ; 34.3‰	Sub-Ártica: (5.0°C ; 33.8‰ 99.0°C ; 33.5‰ Pacífico Sur-Este Subtropical 11.5°C ; 33.9‰ Antártica: 5.0°C ; 34.1‰
Estratosférica (Profunda y de fondo)	Atlántico Norte: Profunda y de fondo 2.5°C ; 34.9‰ Atlántico Sur: Profunda 4.0°C ; 35.0‰ Antártico-fondo -0.4°C ; 34.66‰	Profunda y de fondo 0.6°C ; 34.7‰	Profunda y de fondo 1.3°C ; 34.7‰

Tabla 1.

Principales masas de agua de los océanos del mundo y sus índices termohalinos. (O.I. Mamayev, pág. 314, 1975).

De la unión de los índices termohalinos resulta posteriormente el llamado "TRIANGULO DE MEZCLA" en el caso de tres masas de agua, o una línea recta, cuando sólo existen dos masas de agua.

RESULTADOS

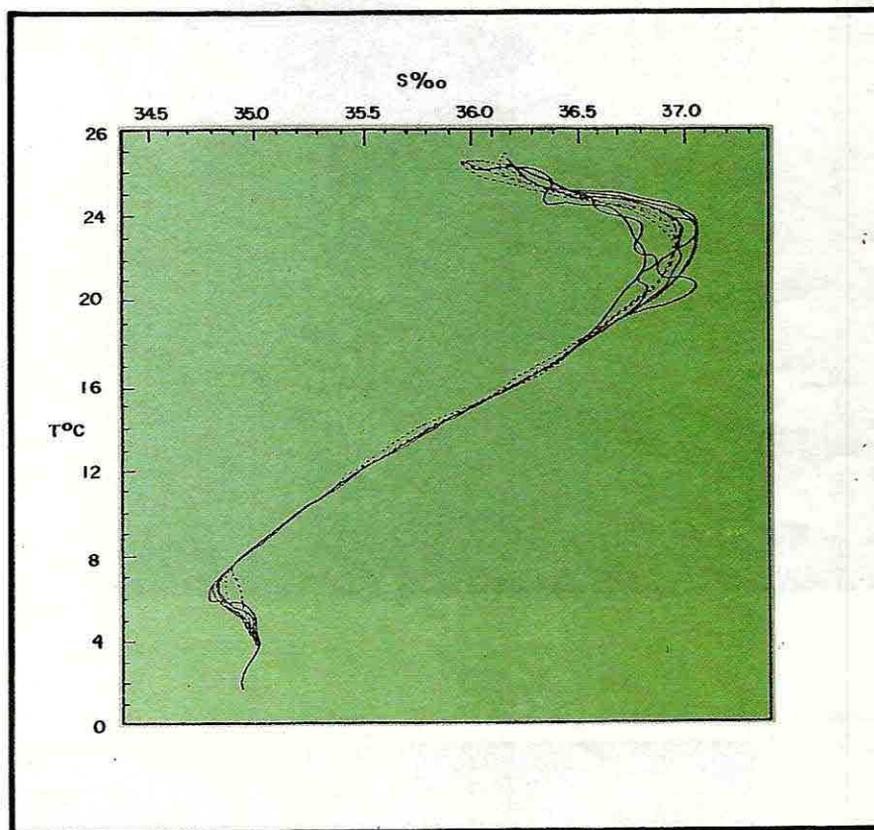
DIAGRAMA T-S-z Y CARACTERISTICAS GENERALES DE LA SECCION II.

Los primeros diagramas T-S generalizados para las aguas de los océanos del mundo, fueron

constituidos por Sverdrup, 1492 y complementados por Dietrich, 1950.

En la figura 9, se representa la forma del diagrama T-S para las aguas del Caribe.

Para la evaluación y comprobación de las curvas T-S resultantes del crucero Océno II, se compararon estas con diez curvas más que se obtuvieron de diferentes cruceros efectuados en esta área. Los datos de las diez estaciones que



La representación gráfica de las curvas T-S-z de las estaciones del crucero Océano II, concuerda con la forma del diagrama T-S generalizado de las masas de agua del Océano Atlántico Norte, de acuerdo a los estudios y clasificación de las masas de agua de los océanos, efectuado por V.N. Stepanov, 1964.

De las 80 estaciones del crucero Océano II, solamente se representan en este trabajo una parte de ellas, en la siguiente forma:

Sección II - formada por las estaciones: 108, 100, 97, 35, 45, 50, 62 y 74 (Figuras 10 y 11).

se utilizaron para comparación, se obtuvieron de la información tabulada por el "Data Center Washington" en el NODC Computer Listing of Oceanography.

Estas últimas curvas conservan la misma forma que las curvas graficadas en el crucero Océano II, lo cual demuestra que la información obtenida en el crucero se encuentra dentro de los límites reales para los parámetros de temperatura y salinidad. En la figura 12 se grafican las estaciones A y B, realizadas por los buques JP/1966 y CF/1958 (acuerdo codificación del Data-Center", respectivamente.

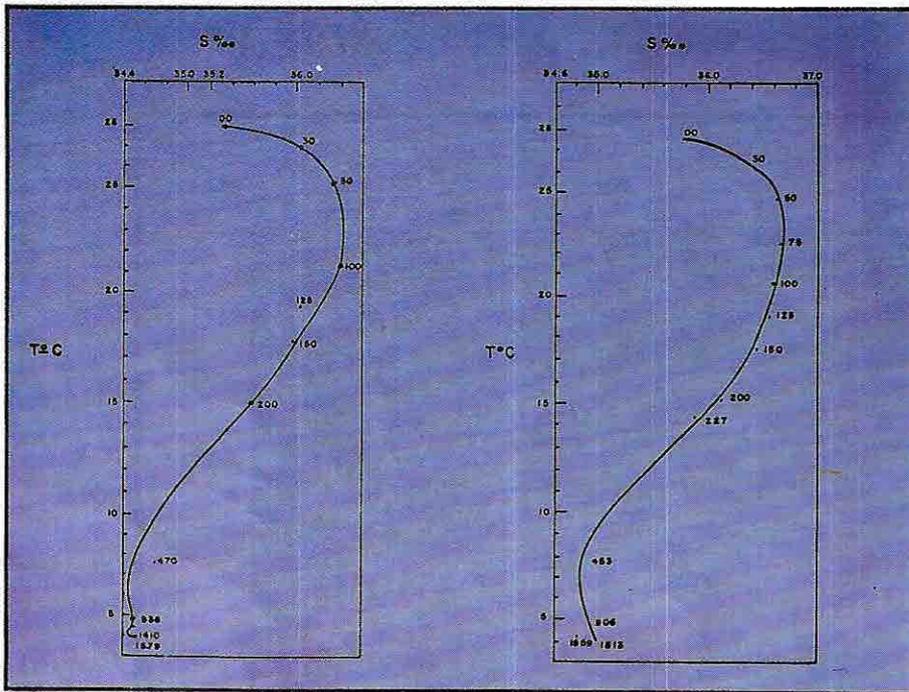
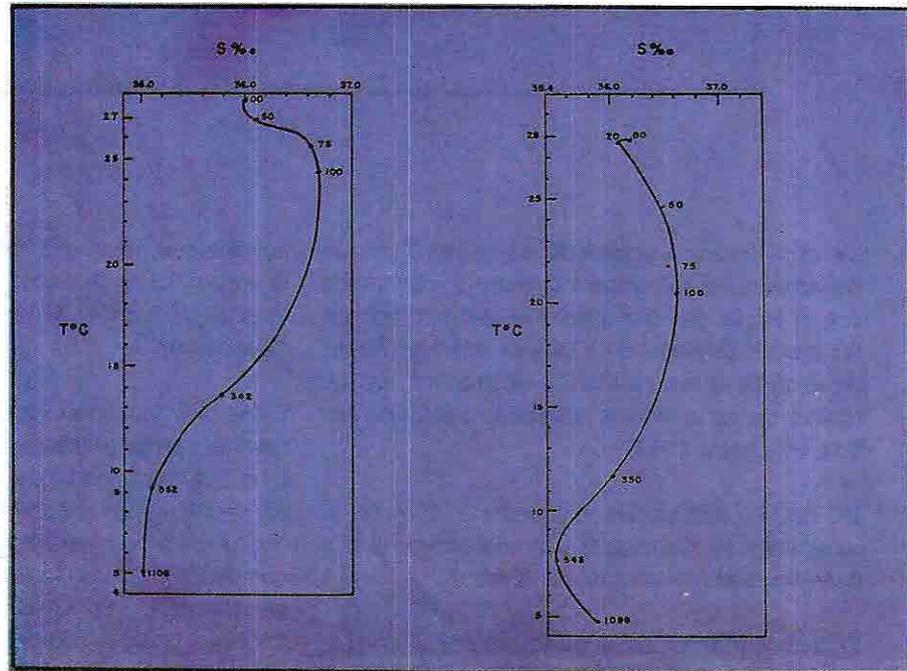


Figura 10.

Curvas T-S-z de las estaciones Nos. 100 - 97.

Figura 11.

Curvas T-S-z de las estaciones Nos. 50 - 59.



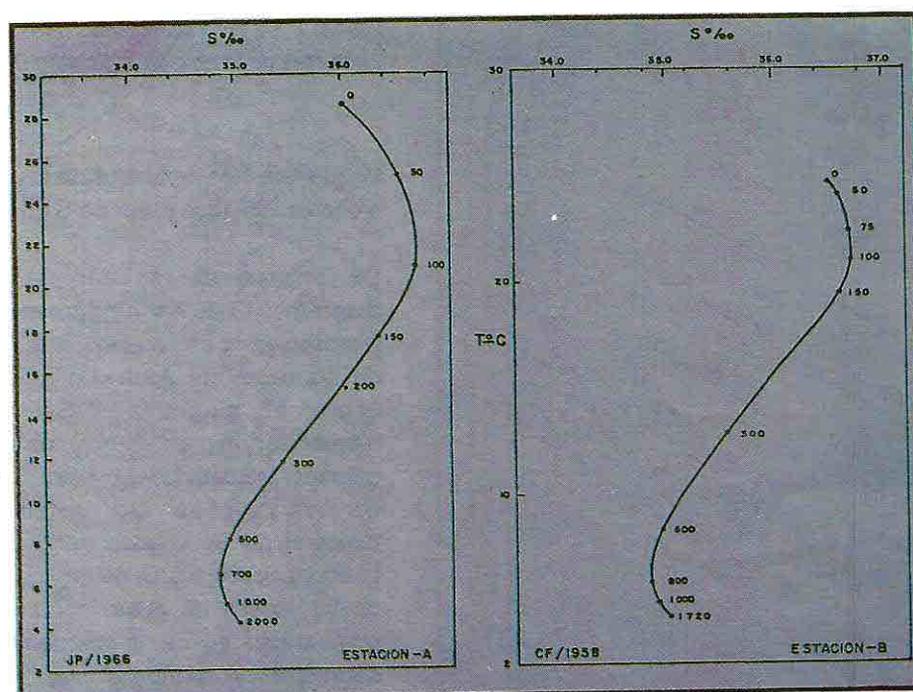


Figura 12.

Curvas T-S-z de las estaciones localizadas en A: latitud $10^{\circ}52'N$ longitud: $77^{\circ}12'W$; B: latitud $11^{\circ}51'N$ longitud: $73^{\circ}43'W$.

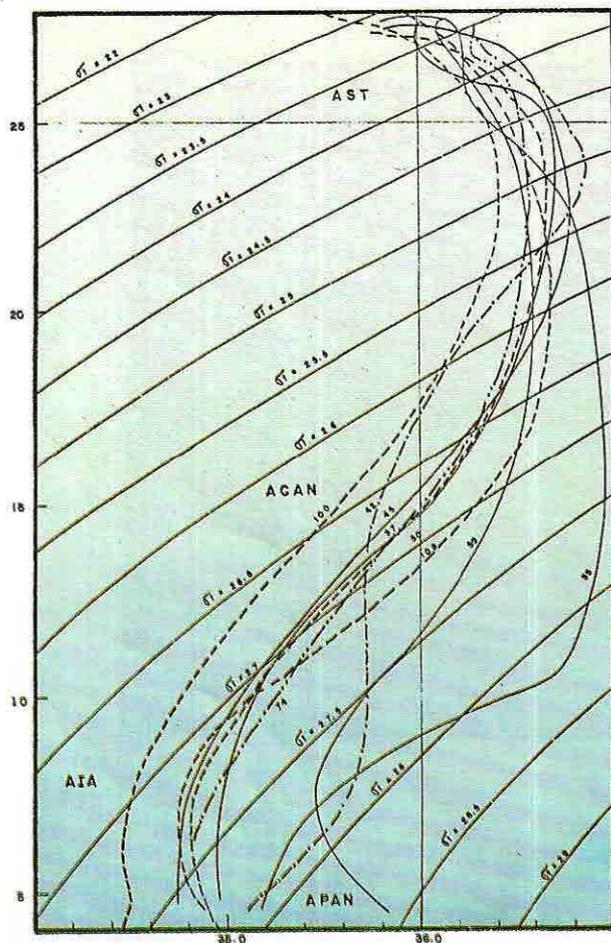
Al graficar sobre un mismo diagrama T-S todos los perfiles verticales de temperatura y salinidad (Figura 13), se observa que la capa superficial tropical (AST) presenta variaciones horizontales y verticales menores de temperatura y salinidad que la capa de agua correspondiente al Agua Central del Atlántico Norte (ACAN) y al Agua Intermediaria Antártida (AIA). En la zona correspondiente al Agua Profunda del Atlántico Norte (APAN), los perfiles T-S tienden a unirse, lo cual indica estabilización en la homogeneidad de los parámetros T-S (Sverdrup et al...1942).

Se determina el mayor valor de salinidad para una profundidad promedio 120 metros y corresponde a 36.72‰ . Este intermedio máximo de salinidad identifica en latitudes tropicales y sub-tropicales la termoclina principal y se presenta

entre el agua superficial y la intermedia. (David Askren-Antoine Baddan.. 1947).

Con el transporte de agua hacia las convergencias sub-tropicales, tiene que existir un transporte de compensación hacia el Ecuador en agua más profundas para mantener un balance de masas; tal flujo ocurre en la región de la termoclina desde las convergencias sub-tropicales hacia la divergencia ecuatorial. El transporte de agua sub-tropical de relativamente alta salinidad, explica el desarrollo del máximo intermedio de salinidad y su relación con la termoclina principal, en latitudes tropicales (Febres, O.G., 1972).

En todos los perfiles T-S se presenta una sección de baja salinidad 34.8‰ , la que se localiza para la sección II a una profundidad promedio de 700



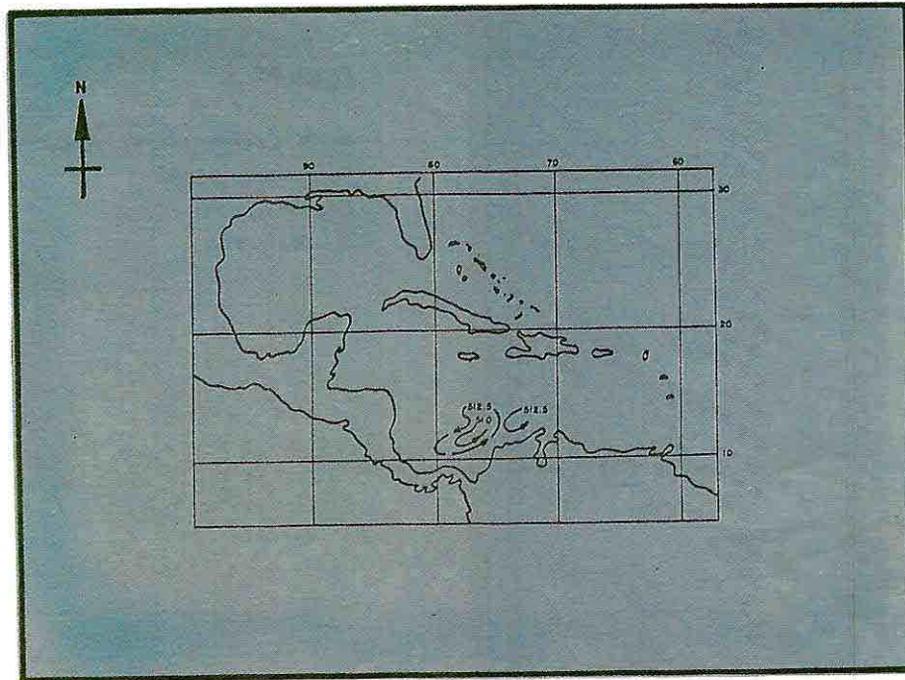


Figura 14.

Circulación de las aguas a profundidad de 300 metros (B.A. Nelepo 1976).

Se observó que la anomalía presente es temporal; se graficaron estaciones de otros cruceros para el mismo punto de interés y para diferentes épocas del año, obteniéndose resultados diferentes. En el presente trabajo se presenta la gráfica de una de las estaciones observadas (Figura 15).

Cuando se grafican las curvas T-S de la sección II partiendo de la estación No. 108 hacia la No. 74, se observa que las curvas presentan la característica de ser relativamente oscilantes; unas veces se adelantan y otras veces se atrasan con respecto al diagrama T-S inmediatamente anterior. Estas oscilaciones son de mayor rango para profundidades entre 500 y 600 metros, lo anterior indica el movimiento vertical de las capas de agua, lo que se comprueba por la existencia del mismo tipo de agua a diferentes profundidades en las diferentes estaciones.

DISTRIBUCION VERTICAL DE TEMPERATURA, SALINIDAD Y SIGMA-T

De la distribución vertical de temperatura (Figura 16) se observa que la termoclina se localiza en las estaciones Nos. 108, 100 y 97 entre 100 y 150 metros; a partir de la estación No. 97 se profundiza hasta 157 metros permaneciendo así en las Nos. 35, 45 y 50; entre las estaciones Nos. 50, 59 y 62 se observa un acusamiento de la termoclina que la sitúa entre 80 y 130 metros de profundidad para la estación No. 59, a partir de la cual alcanza mayores profundidades hasta situarse en la estación No. 74 entre 200 y 280 metros. También aumenta hacia el Oeste su profundidad, puesto que la superficie del mar se inclina hacia el Este por razones dinámicas.

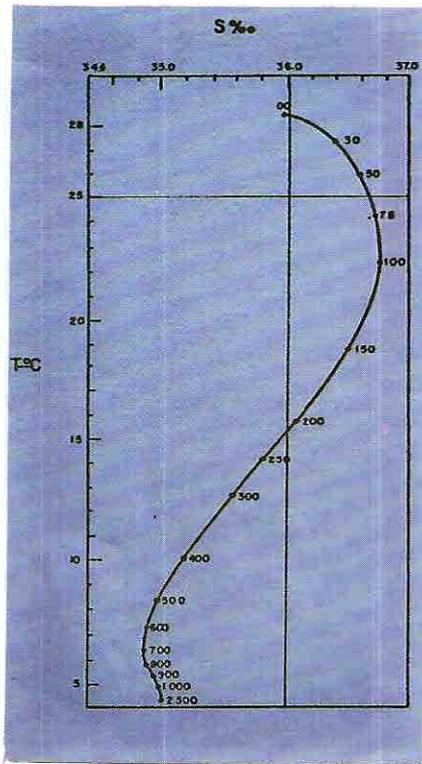


Figura 15.

NODC Código: 311367 - buque: JP-

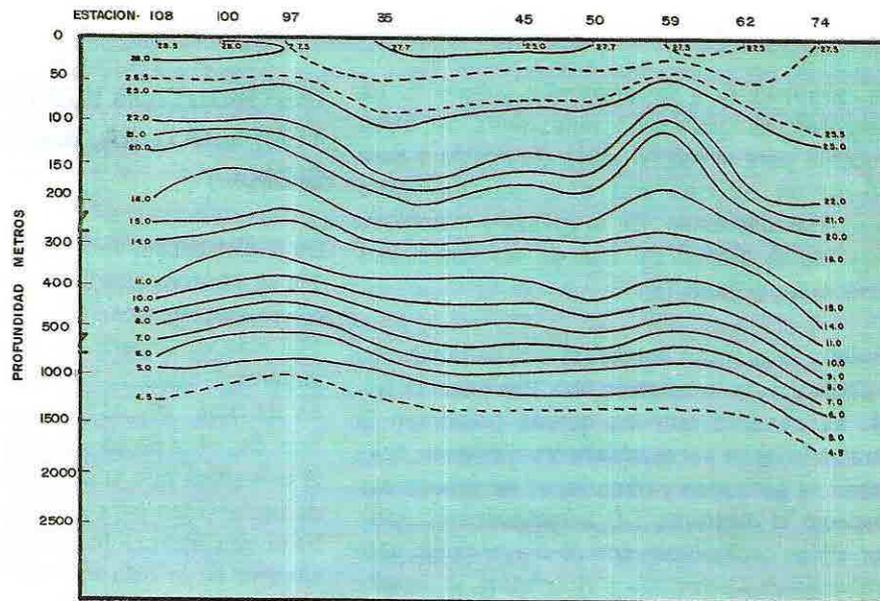
Fecha: julio 1/1966.

$L = 11^{\circ} 15'$,

$\lambda = 076^{\circ} 13' W.$

Figura 16.

Distribución vertical de temperatura -
Sección II. Crucero
Océano II.



Debajo de la termoclina el gradiente vertical de temperatura disminuye con el aumento de profundidad hasta un mínimo de 4.03°C - 4.09°C , alrededor de los 2.250 metros.

En la figura 16, se observa que la termoclina conserva su espesor a medida que avanza hacia el Norte, igualmente, las isoterms bajo la termoclina presentan una mejor estratificación, que las aguas superficiales. Las isoterms entre 45°C y 8°C correspondientes al AIA (Sverdrup et al., 1942) se localizan en la estación No. 74 a mayores profundidades que en el resto de las estaciones de la sección II, indicando de esta manera el hundimiento de la masa de agua intermedia.

Las capas de agua más profundas presentan una mejor estratificación vertical a lo largo de las secciones de estudio. Acuerdo Sverdrup 1942, a medida que aumenta la latitud mejora la estratificación hasta que en altas latitudes el agua es casi homogénea.

En la figura 16, se observa que la temperatura disminuye a medida que aumenta la profundidad; los gradientes verticales de temperatura son me-

menores en la zona de agua intermedia que en la superficie.

En la superficie el gradiente vertical de temperatura corresponde a $0.06^{\circ}\text{C}/\text{metro}$ y en la zona intermedia a $0.006^{\circ}\text{C}/\text{mt}$. En la capa de agua correspondiente a los primeros 30 metros se determina disminución en la temperatura a medida que se avanza de la estación No. 108 a la No. 35, excepto en esta donde se manifiesta un aumento superficial relativo a la temperatura, con valor de 27.7°C , para luego continuar disminuyendo hasta la estación No. 45 con valor de 25°C . En la estación No. 50 la temperatura aumenta nuevamente a 27.7°C , determinando así entre las estaciones Nos. 35 y 50 un embolsamiento de agua de 27.7°C .

Desde la estación No. 59 hasta la No. 74 se conserva la temperatura de 27.5°C .

En la figura 17 "Distribución Vertical de Salinidad", se observa que en la superficie la salinidad aumenta en dirección hacia las estaciones que se encuentran más al Norte, a excepción de la estación No. 100, donde se presenta una bolsa

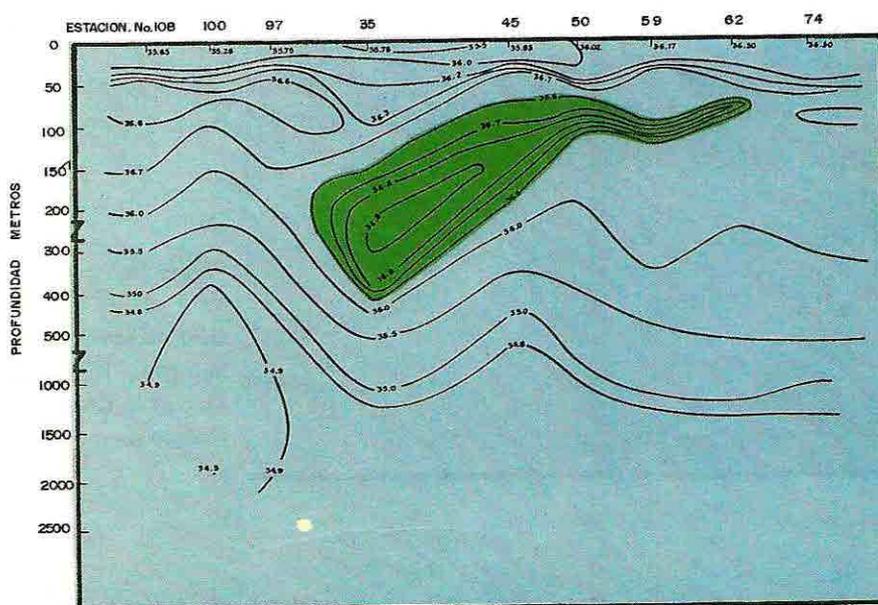


Figura 17.

Distribución vertical de salinidad - Sección II. Crucero Océano II.

de baja salinidad en relación con las demás estaciones.

A profundidad de 100 metros entre las estaciones Nos. 108 y 97, se localiza una lengua de alta salinidad, 36.6‰, en la siguiente estación, la No. 35, otra lengua se presenta más profunda a 150 metros y se extiende como un núcleo de alta salinidad hasta la estación No. 62, este núcleo tiene un valor de 36.9‰ de salinidad a profundidad entre 150 a 300 metros.

La capa de salinidad mínima obtenida en la sección II está determinada por la isohalina de 34.8‰ a medida que se propaga de la estación No. 108 a la 74 se profundiza más. En la sección II este valor corresponde a una profundidad de 450 metros para la estación No. 108, mientras que en la estación No. 74 alcanza una profundidad de 1,061.

El análisis de la distribución vertical de salinidad

demuestra que el espesor de las capas de agua entre dos isohalinas cualesquiera, por ejemplo entre la isohalina de 35.5 y 36.0‰ que en la estación No. 108 tiene un espesor de 50 metros, aumenta a medida que la capa se propaga hacia las estaciones que se encuentran más al Norte y alcanza un espesor en la estación No. 74 de 240 metros, lo que corresponde a un gradiente de 0.61 metros de espesor/milla.

Del análisis de la distribución vertical de Sigma-T (Figura 18), se observa que las isopicnales de 24.0 y 25.0 en la estación No. 74 presentan un mayor espesor entre ellas comparadas con la estación No. 108; por ejemplo, en la estación No. 108, el gradiente de entre las isopicnales de 25.0 y 25.5 es $0.02 \text{ g l}^{-1} \text{ m}^{-1}$ mientras que en la estación No. 74 presenta un gradiente de $0.012 \text{ g l}^{-1} \text{ m}^{-1}$; en el primer caso se localiza a una profundidad entre 40 y 80 metros, demostrándose así la dispersión vertical de la pycnoclina.

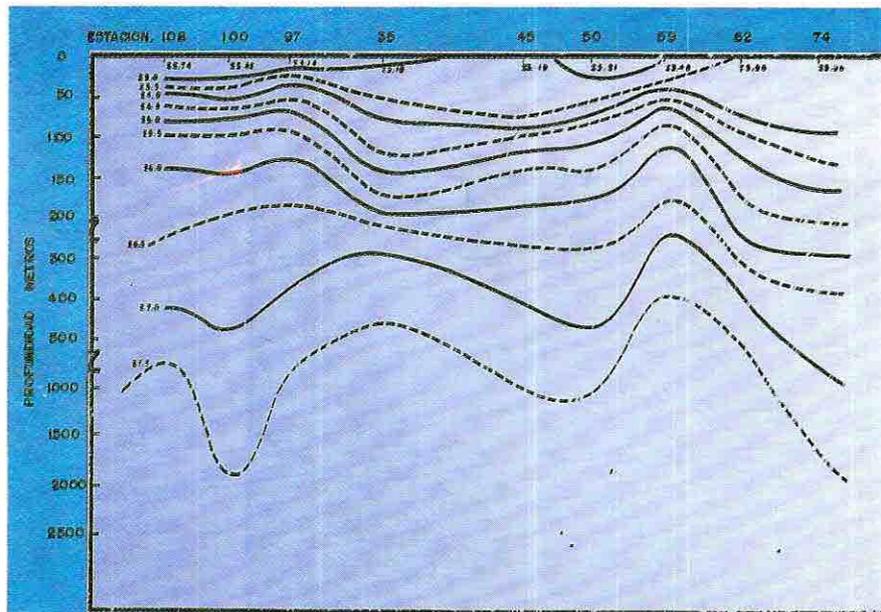


Figura 18.

Distribución vertical
de Sigma - T.
Sección II. Crucero
Océano II.

En la figura 18, se observa que la variación de Sigma-T en la superficie va aumentando a medida que se avanza hacia las estaciones más Norte y presenta en la estación No. 100 una inversión, la

cual se debe a la baja tasa de evaporación ya que la estación fue realizada a las 23:00 horas (tiempo local).

Con el fin de visualizar en forma más amplia la lengua de alta salinidad presente en la figura 17, se grafica la distribución horizontal de salinidad para diferentes profundidades. Se observa en las figuras 19 y 20 la presencia de un núcleo de alta salinidad en la región al Este del área de estudio. A medida que la profundidad aumenta, dicho núcleo incrementa su tamaño y se extiende hacia el Este; se determina así una lengua de alta salinidad, la cual a medida que avanza hacia el Este busca la superficie, pero disminuyendo al mismo tiempo su extensión.

DIAGRAMA T-S DISPERSO

Al plotear las nueve estaciones de la sección II

sobre un mismo diagrama T-S se observa en la figura 21, la distribución vertical de los puntos de temperatura y salinidad de todas las estaciones y se le llama diagrama disperso.

Los puntos en la superficie presentan mayor coherencia que los puntos correspondientes al agua intermedia y los correspondientes al agua profunda. Los gradientes verticales de temperatura y salinidad son menores en la zona de agua intermedia que en la superficie. En esta, el gradiente vertical de temperatura corresponde a $0.06^{\circ}\text{C}/\text{metro}$ y en la zona de agua intermedia a $0.006^{\circ}\text{C}/\text{metro}$.

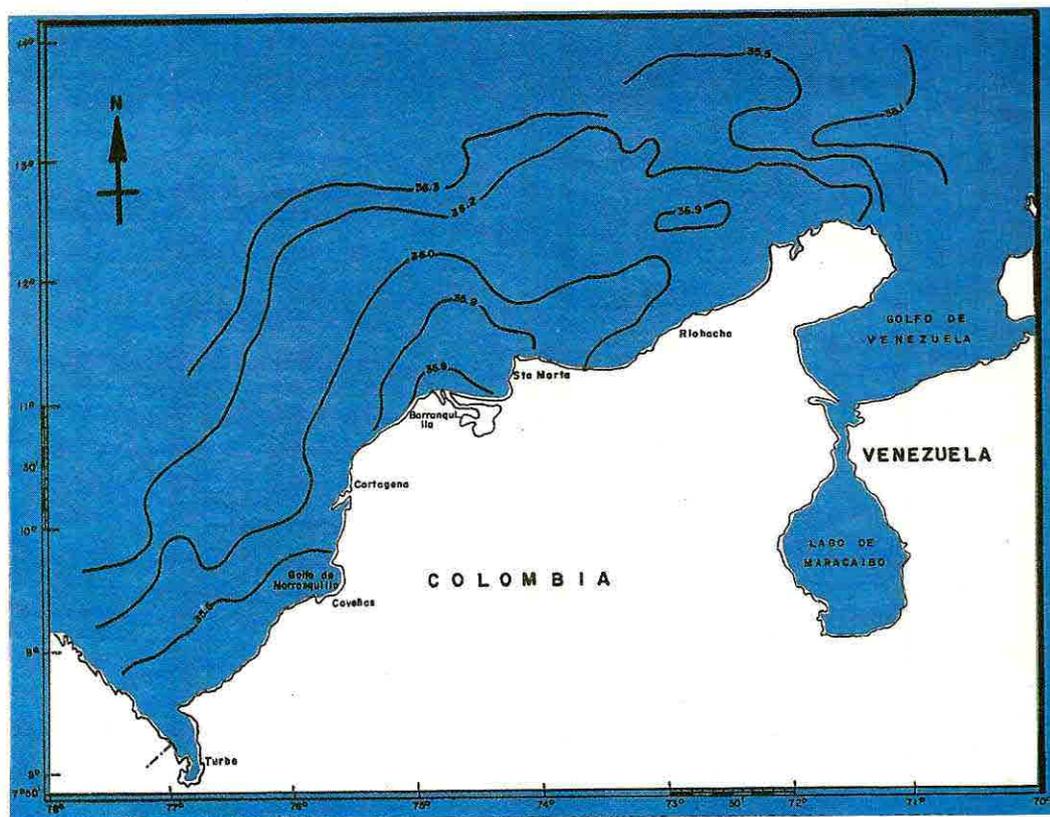


Figura 19.

Distribución horizontal de salinidad. Profundidad 30 metros.

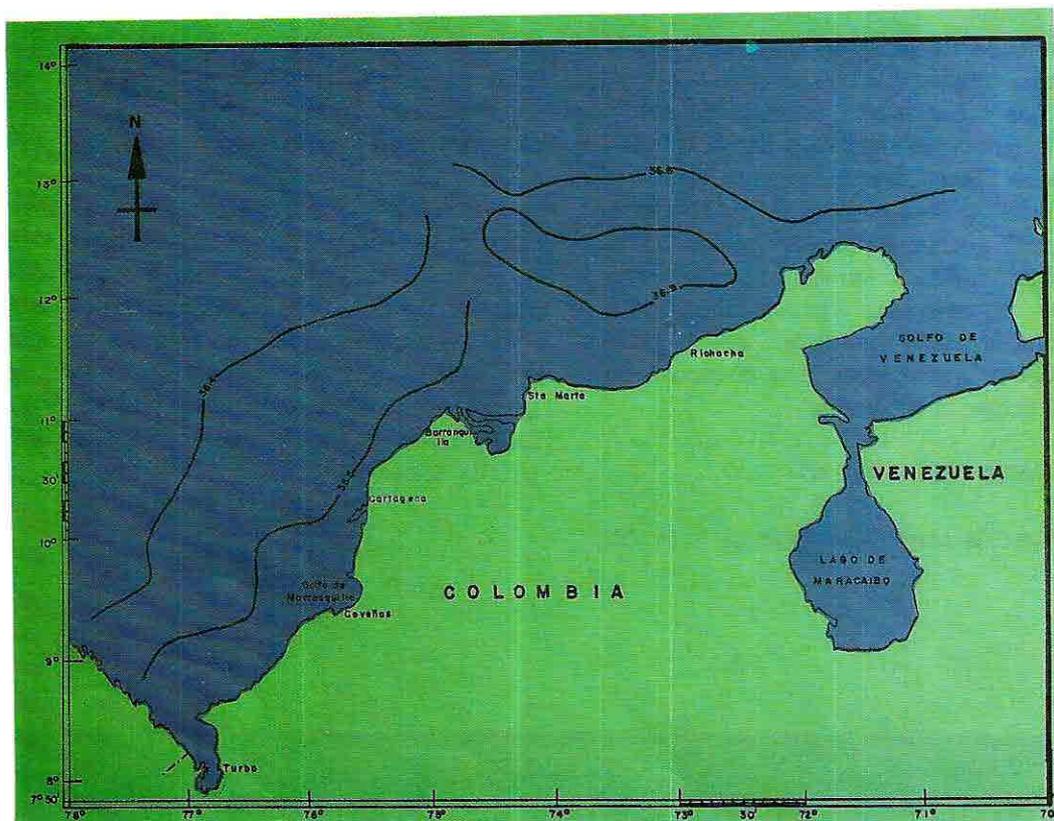


Figura 20.

Distribución horizontal de salinidad. Profundidad 150 metros.

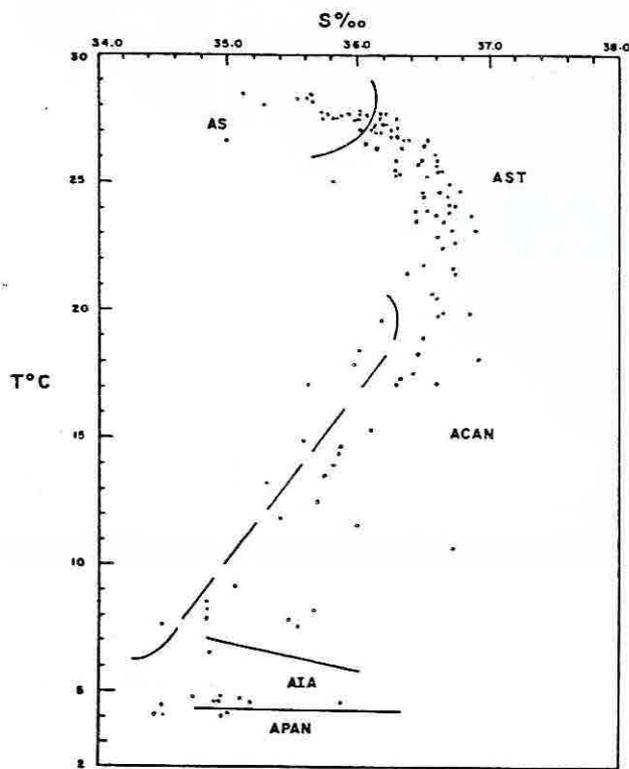


Figura 21.

Diagrama disperso correspondiente a las estaciones Nos. 108, 97, 35, 45, 50, 59, 62, 74. Crucero Océano II.

El diagrama disperso T-S es utilizado para una mejor identificación de los varios tipos de agua presentes en la zona, y además para demostrar la existencia de movimientos verticales.

El primer tipo de agua identificado en el diagrama disperso es el agua superficial "AS", es típica en las estaciones retiradas de la costa y para este período fue identificada por temperatura entre 27°C-28.5°C y salinidad entre 35.1-36.1‰, lo que corresponde a una profundidad promedio de 30 metros. A continuación se localiza una capa de Agua Sub-Tropical "AST" de espesor variable y de alta salinidad, esta capa alcanza profundidades no mayores de 150 metros; se detecta su presencia en los fenómenos de surgencia. Las altas concentraciones de salinidad de esta capa han sido originadas en la superficie, en lugares donde han sido expuestas a la prolongada acción de los factores meteorológicos.

Se encuentra seguidamente una zona de tránsito donde la temperatura y salinidad bajan progresivamente, se le llama Agua Central del

Atlántico Norte "ACAN" y se localiza entre 125-600 metros de profundidad; en algunos diagramas ha sido posible localizar Agua Central del Atlántico Sur "ACAS", cuyos valores de temperatura y salinidad son más bajos para un mismo valor de Sigma-T.

El agua intermedia Antártica se encuentra entre 600 y 1.200 metros de profundidad con temperatura entre 4.5°C-7°C y salinidades menores de 35‰, el núcleo de esta masa de agua se sitúa a una profundidad promedio de 700 metros. Debajo de esta capa se observa un aumento en la salinidad mayor que 35‰, a medida que se aumenta la profundidad y corresponde al Agua Profunda del Atlántico Norte "APAN" con valores de temperatura alrededor de 4°C.

Del diagrama disperso detallado anteriormente, se traza una curva promedio T-S (Figura 22) que corresponde al diagrama característico del área del Caribe colombiano, sobre dicho diagrama se trabaja para determinar las cantidades porcentuales.

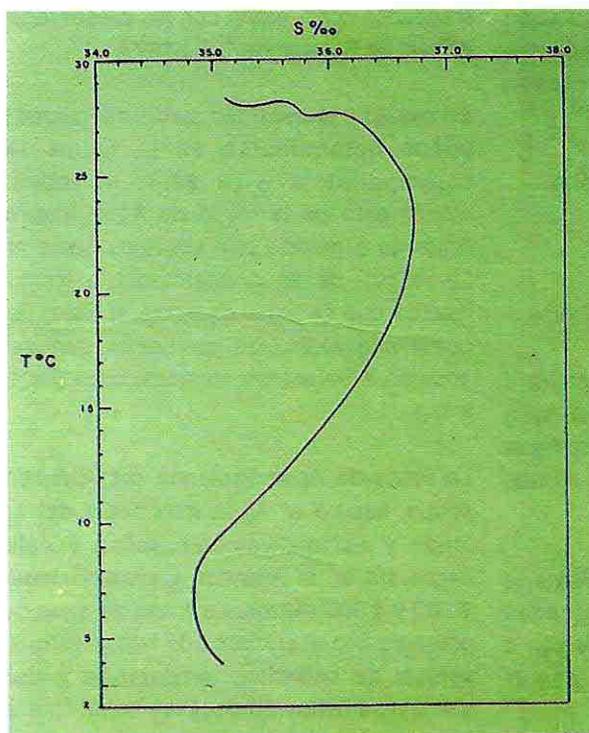


Figura 22.

Curva T-S- promedio resultante del diagrama disperso correspondiente a las estaciones Nos. 108, 100, 97, 35, 45, 50, 59, 62, 74.

DETERMINACION DE LOS INDICES TERMOHALINOS

Como referencia se toman los índices termohalinos determinados por O.I. Mamayev, 1975; no se trabaja con la masa de agua superficial, ni con la que se ha llamado agua sub-tropical, por estar ellas sometidas a la acción de los factores meteorológicos.

Se utilizan los siguientes índices que corresponden a las masas de agua originales:

ACAN	= Agua Central del Atlántico Norte T = 20°C; S = 36.5‰
AIA	= Agua Intermediaria Antártica T = 2.2°C; S = 33.8‰
APAN	= Agua Profunda del Atlántico Norte T = 2.25°C; S = 34.9‰

DETERMINACION DE MASAS DE AGUA

Se determinan las masas de agua, teniendo en cuenta el modelo tridimensional de circulación oceánica, diseñado por Wust (DEFANT Volumen I, pág. 697). En el área de interés se encuentran las siguientes masas de agua:

ACAN	= Agua Central del Atlántico Norte
AIA	= Agua Intermediaria Antártica
APAN	= Agua Profunda del Atlántico Norte

El Agua Central del Atlántico Norte se localiza a profundidades entre 100 y 600 metros; el Agua Intermediaria entre 600 y 1.200 metros; el Agua Profunda y de fondo a partir de los 1.200 metros hasta los 6.000 metros.

Los primeros 100 metros que corresponden a la capa de mezcla es una zona de marcadas variaciones de temperatura y salinidad, debido a la interacción de la superficie del mar con la atmósfera.

El ACAN se forma en la región de convergencia

sub-tropical entre 35°N y 40°N; esta masa de agua reposa bajo los 100 metros y su mayor profundidad la alcanza en el Mar de los Sargazos a 900 metros, se caracteriza por presentar en los perfiles T-S el máximo de salinidad (Figura 13).

El origen de AIA se encuentra en la convergencia Antártica y se extiende entre superficies isopícnicas (27.2 y 27.4) principalmente hacia el Norte hasta los 20°N. Dicha masa de agua resulta de la mezcla del agua superficial Antártica y el Agua Sub-Superficial Sub-Antártica (ASA y ASS), entre los 48°S y 60°S, de acuerdo a Herrera, 1973; en el momento inicial de la mezcla el AIA presenta una salinidad de 38.8‰ a medida que se desplaza hacia el Norte por efectos de la mezcla vertical, va aumentando su salinidad. En el trabajo efectuado por Belmiro Mendez de C.F. 1977, el AIA tiene una salinidad de 34.46‰, mientras en la zona del Caribe colombiano presenta un valor de salinidad 34.8‰, (Figura 17).

Al observar el AIA con relación a las superficies isobáricas, se ve un aumento de temperatura en este núcleo de agua a medida que se propaga hacia el Norte del Caribe colombiano. Estos resultados concuerdan con los presentados en el trabajo de Belmiro de C.F., 1977.

En cuanto a la densidad media del núcleo de AIA puede determinarse en la figura 18, que corresponde a $\sigma_T = 27.4$, se observa el hundimiento de la masa de Agua Intermediaria Antártica a medida que viajamos hacia el Norte. La lengua de agua intermediaria disminuye a medida que se extiende hacia el Este, debido al coeficiente vertical de intercambio turbulento, de acuerdo a Defant fue computado en 5 a 10 g/cm x seg.

La masa de Agua Profunda del Atlántico Norte APAN, separa el Agua Intermedia del agua de fondo y es relativamente salina y cálida. Se encuentra en el Atlántico a profundidades entre 1.000 y 4.000 metros. La masa de agua de fondo presenta con el aumento de latitud estratificación vertical de salinidad, temperatura y densidad, estos parámetros se debilitan hasta que en altas latitudes el agua es casi homogénea verticalmente. (Mamayev O.I. 1969).

El agua profunda y de fondo es formada entre la península de Labrador y la costa Sur-Occidente de Groenlandia, llegando hasta el fondo. El agua profunda es observada sobre los 3.000 metros, casi sin mezcla en la totalidad del Atlántico Norte, fluye bajo el agua intermedia y sobre el agua de fondo.

De acuerdo a O.I. Mamayev, 1969, el APAN se caracteriza por un máximo relativo de salinidad y se localiza entre 1.100 metros y 2.500 metros. El agua profunda del Atlántico Norte (APAN), que se origina en la región sub-Ártica se desplaza en dirección hacia el sur y durante este desplazamiento se mezcla con aguas de alta salinidad, provenientes del Mediterráneo.

Debajo del APAN se encuentra situada el AFAN, que posee las menores temperaturas de todas las masas de agua presentes en las zonas tropicales y sub-tropicales; debajo de los 3.000 metros se presentan pequeñas ganancias de temperatura, que parecen ser significantes y son evidentemente, el resultado de remolinos difusivos desde altos niveles.

De acuerdo a las clasificaciones hechas por O.I. Mamayev 1969, las masas de agua del litoral colombiano en su parte superficial 100-500 metros, corresponden al Agua Central del Atlántico Norte.

TRIANGULO DE MEZCLA Y CALCULO DE LAS CANTIDADES PORCENTUALES DE MASAS DE AGUA

Con los tres índices termohalinos seleccionados en el párrafo anterior, se construye un triángulo (Figura 23); se dividen los lados del triángulo en diez partes iguales y se trazan líneas paralelas al lado opuesto; se numeran las divisiones en la forma indicada en la figura y se tiene de esta forma una grilla, mediante la cual se determinan las cantidades porcentuales de agua existentes en la sección II; se toman las curvas resultantes T-S de cada estación y se introduce en el triángulo de mezcla, teniendo cuidado que el vértice superior debe localizarse en el punto donde se determina que empieza el Agua Central del Atlántico Norte y procurando que la totalidad de

la curva T-S quede dentro del triángulo de Mezcla. En la tabla 2 se indican los valores porcentuales obtenidos a diferentes profundidades.

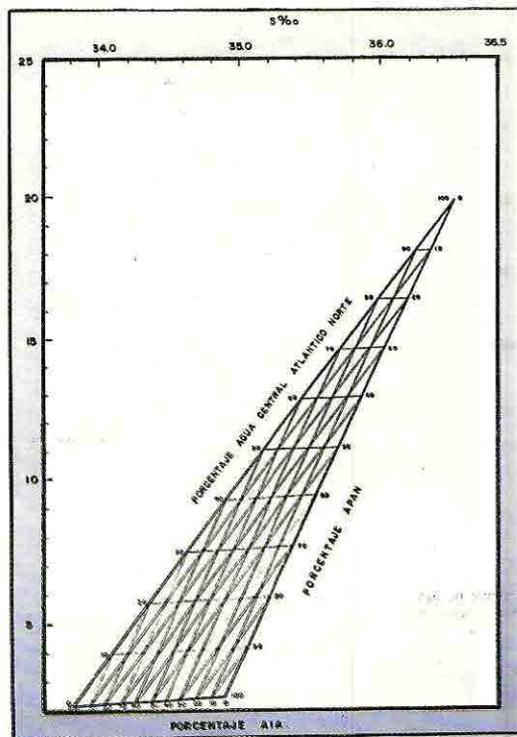


Figura 23.

Triángulo de mezcla.

En las figuras 24 y 25 se representan respectivamente las distribuciones porcentuales de ACAN y AIA, presentes en la sección II.

En la figura 24 se observa que el ACAN a medida que se propaga de Sur a Norte (de la estación No. 108 a la No. 74) alcanza mayores profundidades en las estaciones situadas más al Sur. Considerando la isólinea del 50% como el contorno de la masa de agua, se observa que en la estación No. 108 se encuentra a profundidades de 275 metros mientras que en la No. 74 se ha hundido hasta 500 metros.

A partir de la isólinea de 50%, la separación entre las que se encuentran a mayor profundidad se aumenta, esto se relaciona con la presencia del AIA, lo demuestra la existencia de la mezcla de

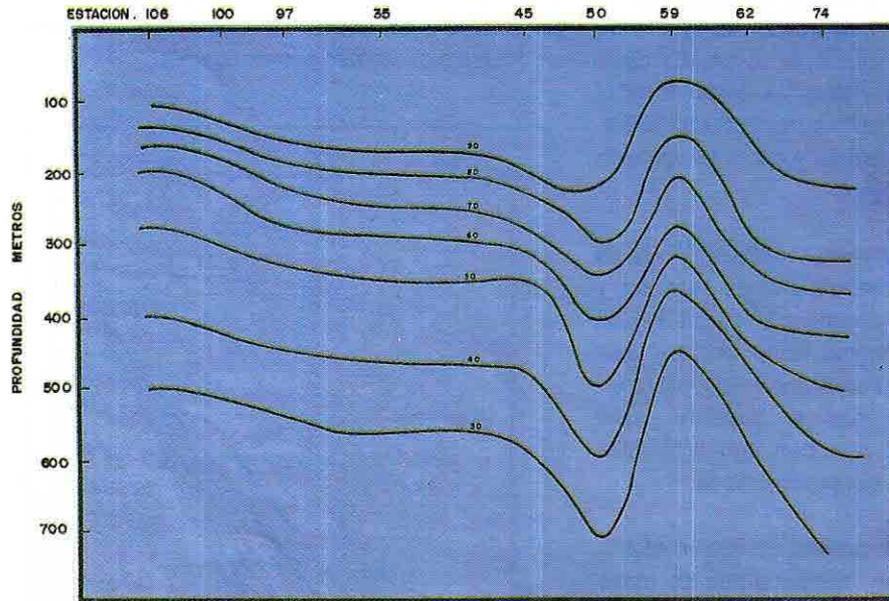


Figura 24.

Distribución porcentual del ACAN en la Sección II. Crucero Océano II.

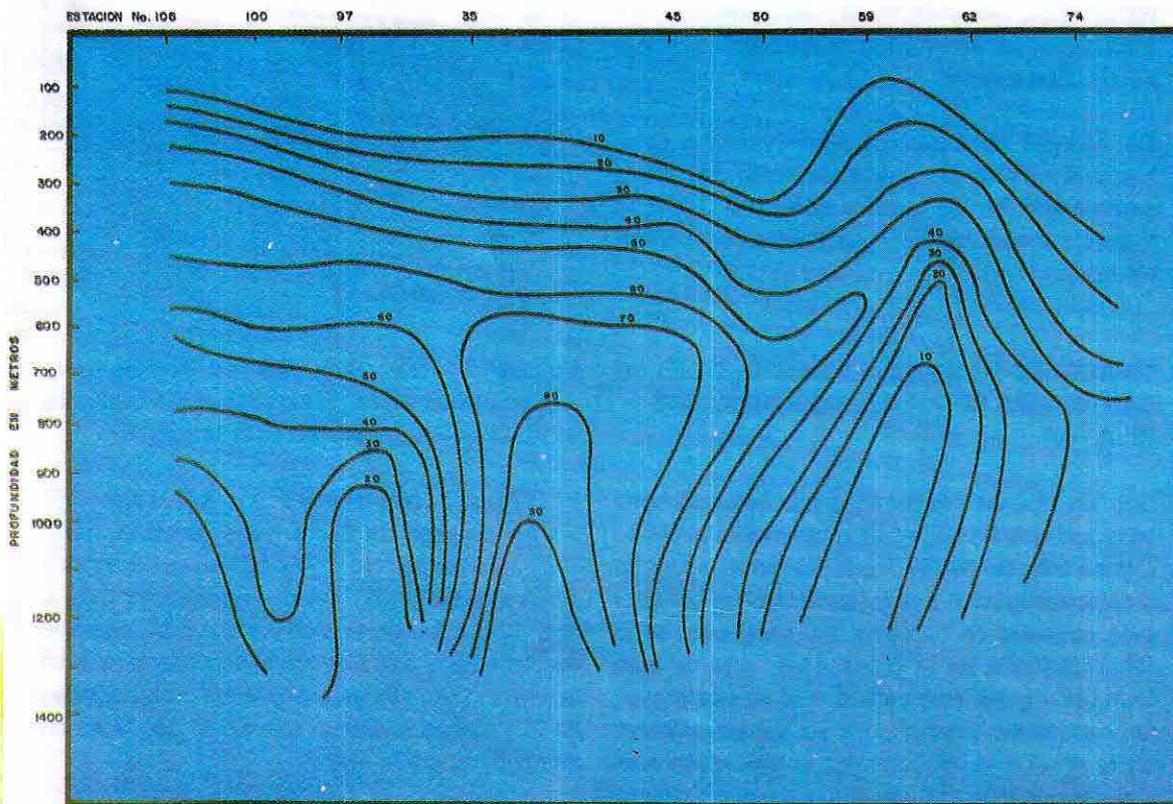


Figura 25.

Distribución porcentual de Agua Intermediaria Antártica (AIA) en el Caribe colombiano.
Crucero Océano II.

aguas.

En la figura 24, se observa entre las estaciones Nros. 50, 59, 62, un hundimiento de la masa de agua, seguido de una rápida elevación para luego volver a hundirse.

En la figura 25 se observa una menor separación entre las isolíneas porcentuales, situadas por encima del núcleo del AIA, comportamiento este contrario al de las situadas por debajo del núcleo de AIA; esto se debe a la existencia de una mayor penetración de la masa de agua en las capas inferiores. Lo anterior es indicativo de que la mezcla de AIA con el APAN, es mucho más intensa que con el ACAN.

En las figuras 24 y 25 se calcula el espesor del núcleo de ACAN en 300 metros; se considera desde 100 hasta 400 metros de profundidad. El Agua Intermediaria Antártica se calcula que tiene un espesor de 300 metros y está situada entre 300 y 600 metros de profundidad, en las estaciones más al Sur del Caribe colombiano. Se observa que el núcleo de agua intermedia aumenta su profundidad a medida que se aleja de la costa; esto debido a los efectos de mezcla con las aguas que la rodean.

Entre las estaciones Nos. 50 y 62, existe una deformación de las isolíneas porcentuales, la cual se presenta hasta la profundidad de 500 metros, esto es representativo de los movimientos verticales presentes en la zona.

En la figura 26 se representa la distribución vertical porcentual de todas las masas de agua (Tabla 2), de la sección II. Se indican con líneas diferentes los núcleos correspondientes a dichas masas (zonas que contienen más del 50% de la respectiva masa de agua); la parte superior se encuentra formada por ACAN; a partir de 400 metros de profundidad se presenta AIA entre las estaciones Nros. 35 y 50 mientras que entre las estaciones 50 y 62 se localiza APAN, lo cual es causa del domo que se forma en esta zona. La presencia de APAN a profundidades cerca de los 400 metros, indica la posibilidad de domos en el área.

Estación No.	Prof. metros	ACAN %	AIA %	APAN %
100	125	90	0	10
	150	80	5	15
	200	65	20	15
	470	22	58	20
	938	3	34	63
	1410	1	27	72
45	150	100	0	0
	200	90	0	10
	235	83	0	17
	250	78	8	14
	300	63	28	9
	366	47	45	8
	581	27	65	8
	1136	5	45	50
74	354	85	3	12
	530	67	20	13
	1061	25	50	25
50	342	63	18	19
	552	48	40	12
	1106	13	13	74
97	125	98	0	2
	200	77	9	14
	227	71	22	7
	453	33	60	7
	906	14	25	61
	1813	11	15	74
108	447	37	59	4
	945	12	20	68
59	100	88	12	0
	356	40	30	30
	343	23	62	15
	1098	2	8	90
35	200	82	15	3
	394	35	35	30
	589	18	70	12
	1241	3	90	7
62	378	58	40	2
	587	32	5	63
	1183	12	28	60

Tabla 2.

División porcentual de masas de agua en la Sección II caribe colombiano.

A 800 metros de profundidad en la figura 26, se distinguen tres núcleos de agua bien definidos, mientras que a 400 metros se observa que es la zona de interacción entre todos los núcleos.

área la configuración de tres masas de agua bien definidas, y se supone que las mayores profundidades están ocupadas por agua de fondo del Atlántico Norte. (AFAN).

Los datos recolectados permiten determinar en el

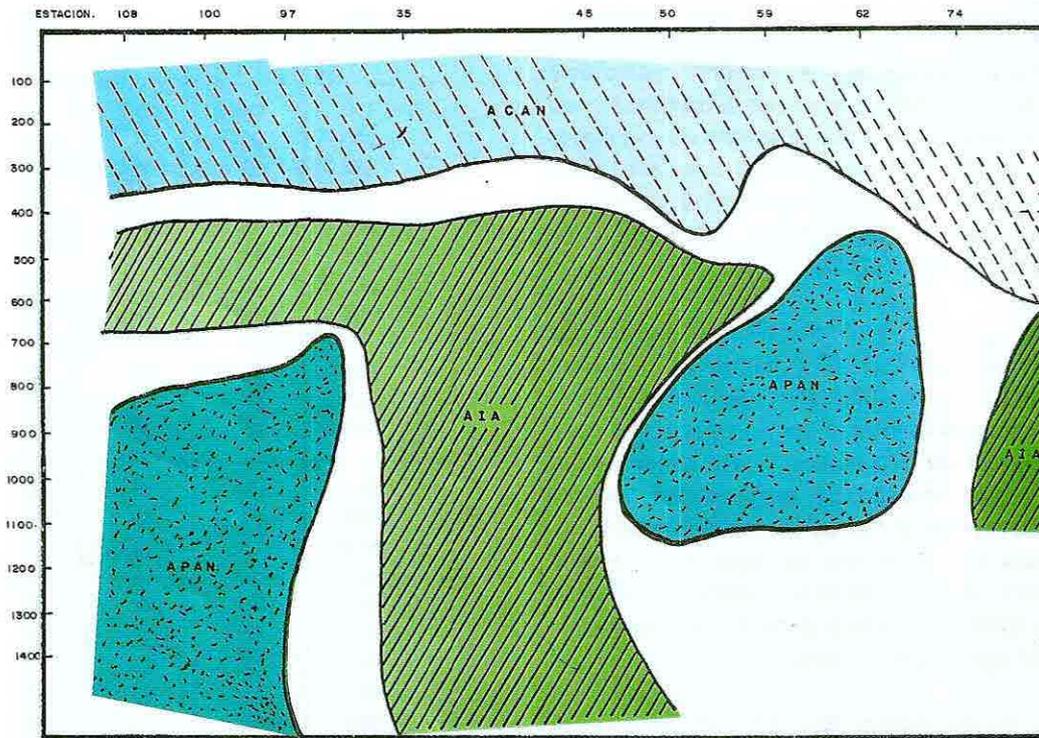


Figura 26.

Distribución de los núcleos de agua existentes en la sección II.

CONCLUSIONES

1. Se determina de la distribución vertical de salinidad en el Caribe colombiano (Figura 17), que en las estaciones al Sur (No. 108) de la sección II de estudio, la capa de mayor salinidad se localiza a 150 metros de profundidad, mientras que en las estaciones Nos. 62 y 74 se localiza a 75 metros de profundidad.

La isohalina de menor valor se encuentra a mayor profundidad en las estaciones Nos. 74 y 62, diferenciando en forma notoria de las estaciones Nos. 108 y 100 que se encuentran al Sur de la

sección. Comportamiento este debido a la batimetría de la cuenca del Caribe y el efecto de un fuerte movimiento ciclónico que presentan las aguas en el Sur del Caribe (B.A. Nelepo, 1974).

2. Se define el área de estudio constituida por tres masas de agua sin considerar la capa superficial de 100 metros, la cual está influenciada por la acción atmosférica.

ACAN: Agua central del Atlántico Norte; locali-

zada entre 100 y 400 metros de profundidad.

AIA: Agua Intermediaria Antártica; localizada entre 450 y 680 metros de profundidad en las estaciones Nos. 108-100-97; para las estaciones Nos. 35-45 alcanza profundidades mayores a los 1.300 metros; en las estaciones Nos. 59-62 no se observa su presencia.

APAN: Agua profunda del Atlántico Norte; localizada a profundidades mayores de 800 metros en las estaciones Nos. 108-100-97; en las estaciones Nos. 35-45 no se observa; para las estaciones Nos. 50-59-62 se localiza entre 450 y 1.100 metros de profundidad.

Se deduce que el AIA se mezcla más intensamente con el agua profunda que con el agua central del Atlántico Norte (Figura 25), esto debido a la mayor separación de las isolíneas inferiores.

3. Se calcula el gradiente vertical de temperatura en la superficie igual a 0.06C/metro, mientras que en la zona de agua intermedia es de 0.006C/metro; es mayor en la superficie debido a la interacción de la atmósfera con el mar.
4. Los gradientes horizontales de temperatura y salinidad son mayores en las capas de agua correspondientes a las zonas de ACAN y del AIA, que los de la llamada capa de mezcla (100 primeros metros); esto debido a que los movimientos de las masas de agua hasta los 200 metros de profundidad, siguen una misma dirección a lo largo del área de estudio, mientras que a 300 metros de profundidad, los movimientos presentan direcciones convergentes (Figura 14), es ésta la causa por la que el diagrama T-S conjunto de todas las estaciones de la sección II (Figura 13), presenta una exagerada dispersión entre los 300 y 800

metros de profundidad.

5. Para una misma profundidad existen diferencias de densidad entre las estaciones del área de estudio, la causa son los movimientos verticales de masas de agua, ocasionados por el fuerte movimiento ciclónico que existe en el Sur del Caribe colombiano. (B.A. Nelepo, 1974).
6. La termoclina aumenta su profundidad en la estación No. 74 con relación a la estación No. 108, esto es debido a las características dinámicas de la zona. Las capas de agua entre las isohalinas de 36.0‰, 35.5‰, 35.0‰ y 34.8‰ aumentan su espesor en la estación No. 108 debido a que el transporte de agua es hacia las convergencias sub-tropicales, y por lo tanto existe un transporte de compensación hacia el Ecuador en aguas más profundas, para poder mantener el balance, lo cual hace que el espesor de la capa aumente cuando se avanza hacia el Norte.
7. La zona comprendida entre las estaciones Nos. 97 y 62 presentan un núcleo de alta salinidad 36.94‰, localizado a una profundidad entre 150 y 300 metros. Dicho núcleo se debe al hundimiento de agua sub-superficial, ocasionado por el fuerte movimiento ciclónico presente en el Sur del Caribe (B.A. Nelepo, 1976).
8. Los diagramas T-S han sido utilizados para investigar el origen de las varias masas de agua, de esto ha sido posible reorganizar todos los tipos de agua descritos para el Caribe por varios autores, y para confirmar que durante este época, el Caribe colombiano representa una pequeña fracción de Aguas del Atlántico Central Norte; se calcula su núcleo en 300 metros de espesor y se localiza entre 100 y 400 metros de profundidad.

BIBLIOGRAFIA

- ASKREND, D., BADEN A., 1978. Conceptos de Oceanografía Física. School of Oceanography, Oregon. 160 pp.
- BELMIRO, M. de C., 1977. Análise Termohalina de Masas de Água Da Região Oeste Do Oceano Atlântico Sul Tropical. São Paulo.
- FEBRES, O.G., 1972. Isanosteric Analysis of the Eastern Caribbean Waters During Winter. Bol Inst. Oceanogr. U. Oriente 11 (1)-1934 (1972). Tabla 1, Fig. 5.
- FOFONOFF, N.P. & FROESE, C., 1958. Tables of Physical Properties of Sea Water. Fish. Res. Board Can. Manuser. Rep. Ser. (Oceanogr. Limnol), 24.
- HERRERA, L.E., 1973. On the Origin, propagation and Mixing of Antarctic Intermediate Water in the Atlantic Ocean. Cuadernos Oceanogr. Univ. de Oriente, Cumana, Venezuela, 4: 1-60.
- IVANOV, A.V., 1949. Determination of the Percentage Composition of a Mixture of Water Masses of the Sea Tr. Inst. Okeanol. Akad. Nauk. S.S.S.R., 4.
- MAMAYEV, O.I., 1962. Analysis of Moving Ocean Water Masses of Finite Depth. Okeanologiya, 2(2).
- NEUMANN, G. and PIERSON Jr., W.J., 1966. Principles of Physical Oceanography Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- STEPANOV, V.N., 1965. Basic Types of Structure of World Ocean Waters Okeanologiya 5(5).
- SVERDRUP, H.U. JOHNSON, M.W. and FLEMING, R.H., 1942. The Oceans, Their Physics, Chemistry and general Biology, Prentice-Hall, New York, N.Y.
- WUST, G., 1963. On the Stratification and the Circulation in the Cold Water Sphere of the Antillean Caribbean Basins-Sea-Research 1963. Vol. 10, pág. 165-187.