

CAPÍTULO 7 - PROCESSAMENTO DE DADOS - DIAGRAMAS T-S

1. Representação gráfica dos dados - Variações espaciais

Oceanografia sinótica não baseia seus estudos na distribuição de uma única propriedade, para a determinação da circulação oceânica. A interpretação da circulação deve ser consistente com todas as distribuições das propriedades.

Medições oceanográficas devem ser plenamente identificadas: posição de cada estação, instante de medidas, instrumentos utilizados, condições meteorológicas, etc...

Primeiro estágio no processamento de dados:

traçado de perfis verticais (temperatura, salinidade, etc...), a partir de medições realizadas nas profundidades padrão (se necessário, são consideradas interpolações na vertical).

Medições simultâneas são também representadas em secções horizontais e verticais das propriedades, com o traçado de suas isolinhas.

2. Representação gráfica dos dados - Variações temporais

Fig. 1a: Variação temporal de uma propriedade escalar (ex: salinidade)

Fig. 1b: Variação temporal de um perfil vertical (ex: temperatura)

Fig. 1c: Variação temporal de uma propriedade vetorial, com a representação separada de intensidade e direção (ex: correntes)

Fig. 1d: Variação temporal de uma propriedade vetorial, com o traçado dos vetores (ex: correntes) (também chamado "stick plot")

Há outras opções de plotagem de grandezas vetoriais (correntes, ventos):

Variações temporais das componentes EW e NS

Variações temporais das componentes paralela e perpendicular à costa

3. Variações espaciais e temporais

Perfis e secções (horizontais e verticais) podem ser dispostos seqüencialmente no tempo (como na Figura 1b).

Analogamente, séries temporais obtidas em locais ou profundidades diferentes podem ser dispostas segundo distribuições espaciais.

4. Análise de séries temporais de dados

Análise estatística - fornece os parâmetros: média, desvio padrão da média, variância, histograma, função de distribuição, etc...

Análise espectral - fornece as periodicidades presentes nos registros, com suas amplitudes e fases.

5. Análise isentrópica

Montgomery (1938) mostra que o fluxo das águas nas camadas superiores ocorre preferencialmente ao longo das superfícies de densidade potencial constante (σ_θ constante), que nas camadas superiores correspondem às superfícies de densidade constante (σ_t constante), chamadas superfícies isopicnais.

Portanto, como o fluxo nas camadas superiores ocorre preferencialmente ao longo das superfícies isopicnais, favorece mais a "mistura lateral" (paralela às isopicnais) do que a "mistura vertical" (através das isopicnais) - ver Fig 2.

6. Diagrama de características ou Diagrama T-S

Distribuições de temperatura, salinidade e concentração de oxigênio,... não são totalmente independentes, no sentido que, no oceano, um número limitado de combinações ocorre.

A razão é que a maioria das massas d'água adquire propriedades características em certas regiões, na superfície, em função de condições climáticas (geralmente nas altas latitudes).

Depois, essas águas afundam e fluem ao longo de superfícies de densidade, carregando consigo as propriedades adquiridas.

Assim, um número relativamente limitado de combinações de T, S, O_2 ,... ocorre nos oceanos.

Em conseqüência, uma massa d'água pode ser reconhecida pela combinação característica de suas propriedades e sua trajetória pode ser determinada.

Não é possível reconhecer uma parcela de água somente pela sua densidade, visto que há muitas combinações de temperatura e salinidade que produzem a mesma densidade.

Entretanto, a combinação temperatura-salinidade pode ser usada para este fim, com a vantagem destas propriedades serem conservativas nas camadas abaixo da superfície.

Helland - Hansen (1918) foi o primeiro a plotar o "diagrama de características", ou "diagrama T-S", plotando a temperatura contra a salinidade para cada estação oceanográfica.

Cada ponto do diagrama T-S representa a combinação temperatura-salinidade a uma dada profundidade da coluna vertical da estação oceanográfica e corresponde a uma densidade; os pontos são reunidos em seqüência de profundidades crescentes por uma curva contínua chamada "T-S da estação" (Figura 3).

7. Utilidades do Diagrama T-S

Normalmente, o diagrama T-S inclui linhas de σ_t constante (isopletas de σ_t).

Ao examinar o T-S de uma estação na presença das curvas de σ_t , se tem uma indicação da estabilidade da coluna d'água. Quando a curva T-S apresenta σ_t crescente com a profundidade, a coluna é estável; quando a curva é paralela às linhas de σ_t , a coluna apresenta estabilidade neutra; e quando a curva T-S apresenta σ_t decrescente com o aumento de profundidade, a coluna é instável.

Máximos e mínimos de salinidade são comuns no diagrama T-S mas, com exceção da superfície e do fundo, não é comum encontrar máximos e mínimos de temperatura.

A razão é que, com exceção das regiões polares e zonas costeiras, a densidade

depende muito mais da temperatura do que da salinidade, e normalmente se tem colunas d'água estáveis. Na Figura 4, um máximo de temperatura como em G significaria que a água acima de G (i. e., na direção de F) é mais densa do que G, o que é uma situação instável e pouco provável.

Além de fornecer indicações sobre a estabilidade, o diagrama T-S possibilita a localização de massas d'água, sendo que a comparação de várias curvas indica a origem de massas d'água e sua trajetória.

No diagrama T-S, um ponto (na prática, um conglomerado de pontos próximos) é chamado "tipo d'água"; uma porção da curva T-S (na prática, não exata) representa uma "massa d'água".

Dessa forma, uma massa d'água possui uma faixa de temperaturas e uma faixa de salinidades associadas a ela. Processos climáticos de superfície formam os tipos d'água. Uma massa d'água pode ser considerada como uma mistura de dois ou mais tipos d'água.

Por exemplo, na Figura 5, o segmento pontilhado AB representa uma massa d'água produzida pela mistura, em proporções variadas, dos tipos d'água A e B; esta interpretação supõe que não existe processo algum gerando ou removendo calor ou sal; mas, ressalte-se que, na superfície, a radiação solar, a evaporação e a precipitação são fontes ou sorvedouros de calor e sal (eventualmente, medidas de superfície são omitidas nos diagramas T-S).

Na Fig 5, o "triângulo de mistura" ABC representa todas as massas d'água possíveis a partir da mistura dos tipos d'água A, B e C.

Dessa forma, o diagrama T-S se torna um poderoso instrumento para o estudo das águas oceânicas, considerando que sua forma é, muitas vezes, característica da água de um local no oceano e alguns traços podem indicar misturas de diferentes tipos d'água.

Por exemplo, a Figura 6 mostra as curvas T-S típicas dos Oceanos Atlântico e Índico.

Na realidade, existem alguns tipos d'água típicos, tais como a Água do Mediterrâneo e a Água Antártica de Fundo, os quais apresentam valores únicos e singulares de temperatura e salinidade a eles associados; entretanto, a maioria das águas oceânicas é resultante de mistura (Sverdrup, 1942).

Na Fig 5, o "triângulo de mistura" ABC representa todas as massas d'água possíveis a partir da mistura dos tipos d'água A, B e C.

Dessa forma, o diagrama T-S se torna um poderoso instrumento para o estudo das águas oceânicas, considerando que sua forma é, muitas vezes, característica da água de um local no oceano e alguns traços podem indicar misturas de diferentes tipos d'água.

Por exemplo, a Figura 6 mostra as curvas T-S típicas dos Oceanos Atlântico e Índico.

Na realidade, existem alguns tipos d'água típicos, tais como a Água do Mediterrâneo e a Água Antártica de Fundo, os quais apresentam valores únicos e singulares de temperatura e salinidade a eles associados; entretanto, a maioria das águas oceânicas é resultante de mistura (Sverdrup, 1942).

Emery & Meincke (1986) apresentam uma tabela revisada de massas d'água e os correspondentes padrões de curvas T-S, para todos os oceanos; são identificadas 19 massas d'água de superfície (0 a 500 m), 12 massas d'água intermediárias (500 a 1500 m) e 4 profundas ou abissais (1500 m ao fundo).

O diagrama T-S é também útil para indicar se há erros nas temperaturas e salinidades das amostras: se um ponto cai muito afastado da curva característica da região, deve ser considerado suspeito.

Mas os diagramas T-S têm dois inconvenientes: o primeiro é a má indicação da distribuição em profundidade (z) das diferentes massas d'água, pelo fato da escala de profundidade não ser linear (por vezes, convém evitar interpolações verticais de T ou S usando o diagrama). O segundo é não dar qualquer indicação da distribuição geográfica das massas. Sob esses dois aspectos, as secções horizontais e verticais são mais convenientes.

8. Mistura de dois tipos d'água

temperatura constante; estas condições são também consideradas para a salinidade (Figura 7).

À medida que esses dois tipos d'água se aproximam, as águas se misturam e a nítida descontinuidade desaparece. Num estágio final, uma curva suave representa os perfis verticais de temperatura e salinidade e resulta um segmento como a curva TS; este segmento liga o tipo de água inicial na camada de superfície ao tipo inicial da camada do fundo, sendo que as condições finais dos perfis verticais são representadas nos pontos intermediários deste segmento representativo da curva TS. Note-se portanto que "um segmento de um diagrama T-S representa a mistura de dois tipos d'água".

Sejam dois tipos d'água: M_1 (c/ temperatura T_1 e salinidade S_1) e M_2 (c/ temperatura T_2 e salinidade S_2). O tipo d'água M é formado pela mistura dos tipos M_1 e M_2 , nas proporções (ou massa fracional) P_1 e P_2 (Fig 8).

$$P_1 + P_2 = 1$$

Sendo o calor e o sal conservativos:

$$\begin{cases} \rho_1 C_{p1} P_1 T_1 + \rho_2 C_{p2} P_2 T_2 = \rho C_p T \\ K_1 P_1 S_1 + K_2 P_2 S_2 = K S \end{cases}$$

Onde ρ_1 , ρ_2 e ρ são as densidades, K_1 , K_2 e K são os coeficientes de difusão do sal e C_{p1} , C_{p2} e C_p são os calores específicos, dos tipos d'água M_1 , M_2 e M . Normalmente se considera

$$\begin{cases} K_1 \cong K_2 \cong K \\ C_{p1} \cong C_{p2} \cong C_p \\ \rho_1 \cong \rho_2 \cong \rho \end{cases}$$

Dessa forma, T e S (ou P_1 e P_2) são determinados pelo sistema de equações

$$\begin{cases} P_1 T_1 + P_2 T_2 = T \\ P_1 S_1 + P_2 S_2 = S \end{cases}$$

9. Mistura de três (ou mais) tipos d'água

Quando três tipos d'água são considerados, uma mistura similar ocorre. Isto é demonstrado na Figura 9, onde um sistema de três camadas idealizado é inicialmente considerado e as descontinuidades nítidas em temperatura e salinidade são novamente suavizadas à medida que a mistura se intensifica, até que num estágio final se tem uma representação curvilínea no diagrama T-S. Portanto, "uma

porção curvilínea de um diagrama T-S representa a mistura de três ou mais tipos d'água numa massa d'água".

Matematicamente, por um procedimento análogo ao caso de dois tipos d'água, para os três tipos com temperaturas, salinidades e proporções de mistura (T_1, S_1, P_1) , (T_2, S_2, P_2) e (T_3, S_3, P_3) , se chega a:

$$\begin{cases} P_1 T_1 + P_2 T_2 + P_3 T_3 = T \\ P_1 S_1 + P_2 S_2 + P_3 S_3 = S \\ P_1 + P_2 + P_3 = 1 \end{cases}$$

No caso da mistura de quatro tipos d'água (através de superfícies de separação), a solução do problema inverso pode conduzir a um sistema indeterminado, por haver um número de incógnitas (as proporções de mistura P_1, P_2, P_3 e P_4) maior do que o número de equações. Neste caso, se deve utilizar uma terceira propriedade físico-química (R) que seja independente de (T,S), o que leva ao seguinte sistema:

$$\begin{cases} P_1 T_1 + P_2 T_2 + P_3 T_3 + P_4 T_4 = T \\ P_1 S_1 + P_2 S_2 + P_3 S_3 + P_4 S_4 = S \\ P_1 R_1 + P_2 R_2 + P_3 R_3 + P_4 R_4 = R \\ P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1 \end{cases}$$

Shtokman (1946) desenvolveu uma teoria de curvas T-S, mostrando como podem ser usadas para estimar quantitativamente a mistura. Nesta teoria, considere-se inicialmente a massa de água homogênea intermediária B (T_2, S_2) , com núcleo em $z = 0$ e com espessura $2h$, entre os tipos d'água A (T_3, S_3) e C (T_1, S_1) , conforme a Figura 10. No instante inicial, a imagem dos "índices termohalinos" dos tipos d'água, sobre o plano TS, representam os vértices do "triângulo de mistura"; neste triângulo, são úteis as definições dos lados (AB e BC) e da base (AC), de modo que Bm é a mediana principal e am, bm são as medianas secundárias (Fig. 10). Os teoremas de Shtokman estabelecem como evoluem geometricamente os pares (T,S) da curva T-S sob a ação dos processos de mistura vertical, com os seguintes enunciados:

- 1) No instante inicial da mistura (tempo $t \rightarrow 0$) a curva T-S é uma linha quebrada, consistindo de dois segmentos de reta que unem, sucessivamente sobre o plano T-S, os índices termohalinos dos tipos d'água que se misturam.
- 2) Em pontos suficientemente afastados das interfaces da água intermediária ($z = \pm h$), as tangentes à curva T-S por esses pontos são praticamente coincidentes com os dados do triângulo de mistura.

- 3) Os pontos da curva T-S que correspondem ao núcleo da água intermediária ($z = 0$) são pontos extremos dessa curva. A reta tangente a esses pontos é paralela à base do triângulo de mistura.
- 4) Os pares de valores (T, S) correspondentes ao núcleo da água intermediária ($z = 0$) evoluem ao longo da mediana principal do triângulo de mistura.
- 5) Todos os pares (T, S) referentes às interfaces de separação da água intermediária ($z = \pm h$) evoluem ao longo das medianas secundárias do triângulo de mistura. Esses segmentos de reta interceptam, sobre a curva T-S, arcos que caracterizam a água intermediária (Fig. 11).

10. Métodos de análise T-S e as massas d'água dos oceanos

Os pares (T, S) medidos no oceano e plotados sobre o diagrama T-S constituem o ponto de partida para a análise termohalina das massas de água (Miranda, 1987); como acima mencionado, neste diagrama são também inseridas famílias de curvas paramétricas (em geral de densidade, isopicnais). Uma curva T-S, juntamente com a família de curvas paramétricas (isopicnais), permite analisar os fatores mais importantes que determinam a natureza das transformações e interações das diferentes massas d'água (permite determinar se a mistura é isopicnal ou não).

O caso mais comum da mistura de massas d'água, em condições reais, é a mistura vertical de duas, três ou quatro massas de água sobrepostas verticalmente. O exame da mistura dessas massas é feito com base na Teoria analítica das curvas T-S para o oceano infinito (Teoria de Shtokman), que segue as seguintes regras, resultantes das características geométricas do triângulo de mistura (ver como exemplo a Figura 12):

- 1) O limite entre massas de água deve ser considerado como sendo a profundidade na qual a percentagem de mistura, determinada com base na reta

O caso mais comum da mistura de massas d'água, em condições reais, é a mistura vertical de duas, três ou quatro massas de água sobrepostas verticalmente. O exame da mistura dessas massas é feito com base na Teoria analítica das curvas T-S para o oceano infinito (Teoria de Shtokman), que segue as seguintes regras, resultantes das características geométricas do triângulo de mistura (ver como exemplo a Figura 12):

- 1) O limite entre massas de água deve ser considerado como sendo a profundidade na qual a percentagem de mistura, determinada com base na reta ou no triângulo de mistura, é igual a 50%.
- 2) Se a curva T-S é aproximadamente uma reta, então a reta de mistura deve ser usada para sua análise.
- 3) Se a curva T-S consiste de duas ou mais partes quase retas, então há três ou mais massas de água. A quantidade de massas de água que interagem é igual ao número de extremos da curva T-S mais dois. Esses extremos estão indicados na Figura 12 por A, B, J e D.
- 4) A determinação dos índices termohalinos é feita traçando as tangentes aos trechos da curva T-S. As intersecções destas tangentes nas regiões dos pontos de extremo determinam os índices termohalinos das massas (ou tipos) de águas intermediárias (J e D na Figura 12). Os extremos da curva T-S correspondem aos índices termohalinos das massas (ou tipos) de água da superfície e fundo (A e B na Figura 12).
- 5) Para a determinação das percentagens de mistura e os limites de massas d'água, para diferentes valores da profundidade z , são traçados os triângulos de mistura, que tem por vértices os índices termohalinos (AJD e JDB na Figura 12).
- 6) As medianas principais dos triângulos de mistura (Jd e Dc na Figura 12) interceptam a curva T-S em pontos (T, S, z) que caracterizam o núcleo da água

- 7) As medianas secundárias dos triângulos de mistura (ad, de, ce e bc na Figura 12) interceptam a curva T-S em pontos onde os parâmetros z correspondem aos limites da massa de água intermediária.

Note-se, na Figura 12, que o extremo referente à profundidade de 50 m não é considerado, uma vez que não é estacionário; a secção da curva T-S entre 0 e 50 m é caracterizada por uma estratificação instável, apenas temporária.

Com a aplicação dessas regras às análises das curvas T-S dos oceanos, foi possível estabelecer uma classificação das principais massas de água, as características dos processos de mistura e as regiões de formação (que qualificam as massas nominalmente). Surgiram assim, graças principalmente ao trabalho pioneiro de Sverdrup (1942), os "diagramas T-S generalizados", alguns dos quais são reproduzidos na Figura 13.

É importante notar que as características das massas d'água são adquiridas na superfície dos oceanos, nas altas latitudes; a formação de massas d'água se dá em escala de tempo sazonal, mas o tempo necessário para uma dada massa d'água sair da superfície e atingir uma certa profundidade é variável. A Tabela 1 relaciona as principais massas d'água presentes nos oceanos e seus respectivos índices termohalinos (Mamayev, 1975); os "índices termohalinos" correspondem aos valores de T, S condicionados na região de formação das massas d'água; a Figura 14 mostra a estrutura vertical da coluna d'água composta por diversas massas de água presentes no Oceano Atlântico Sul.

Note-se que, ao processar perfis de T-S medidos, convém traçar inicialmente os diagramas T-S-z (ou seja, incluir ao longo das curvas T-S os valores de profundidade z); a seguir, são usados os índices termohalinos da literatura, para caracterizar as massas d'água que participam da mistura (centrais, intermediárias e de fundo); ao traçar as medianas dos triângulos de mistura, em geral há necessidade de uma pequena extrapolação dessas medianas, de modo a atingir as curvas T-S; e também pode haver necessidade de uma interpolação dos valores de z ao longo da curva T-S para se obter os limites das massas d'água.

11. O "Core method" para a determinação do movimento de massas d'água

Wüst (1935) desenvolveu um método para seguir o fluxo e a mistura de uma camada intermediária que é caracterizada por um máximo ou mínimo de salinidade, utilizando o diagrama T-S ("core method").

Um "core" é definido como a camada (ou região) em que uma propriedade da água atinge um máximo ou mínimo; secções horizontais e verticais da propriedade são usadas para localizar o "core", o qual passa a ser considerado como o centro do fluxo (em geral, salinidade é a propriedade mais adequada, e temperatura não deve ser usada para localizar um "core"); curvas T-S são usadas para acompanhar o deslocamento do "core" e as modificações de suas propriedades originais.

12. Diagrama T-S-V

Montgomery (1958) adaptou o diagrama T-S para mostrar a distribuição da temperatura e da salinidade em termos de volume. Basicamente, dividiu o diagrama T-S num reticulado, de 2°C por 1 unidade de salinidade de lado, por exemplo. Em cada quadrado, registra-se o volume d'água de temperatura e salinidade incluídos nos

limites do quadrado. O volume é deduzido dos dados oceanográficos colhidos numa região. O cálculo é repetido para todos os valores de temperatura e salinidade e para todas as estações (cálculos mais recentes de Worthington, 1981).

O resultado final é um reticulado em que, em cada quadrado, um número informa o volume d'água com as faixas de temperatura e salinidade do quadrado. Este é o diagrama T-S-V (Figura 15).

Na Figura 15, a unidade de volume é 10^5 km^3 . Por exemplo,

a água profunda do Atlântico Norte tem um volume de $1600 \times 10^5 \text{ km}^3$, com salinidade entre 34 e 35‰ e temperatura entre 2 e 4°C.

Os números de fora dos diagramas são as somas dos volumes na horizontal e na vertical. A Figura 15 mostra que, no Atlântico:

85% das águas ($2988 \times 10^5 \text{ km}^3$) tem salinidade entre 34‰ e 35‰,

47% ($1657 \times 10^5 \text{ km}^3$) tem temperatura entre 2 e 4°C; e

76% ($(381+640+1657) \times 10^5 \text{ km}^3$) tem temperatura entre os limites -2 e 4°C.

13. Complementação

Eventualmente, pesquisadores plotam outros diagramas além do T-S, tais como T-O₂, S-O₂, O₂-fostato, etc.

No diagrama T-S-V, é mais correto usar a temperatura potencial θ do que a temperatura T, considerando que se tem volumes de água advindos de uma grande faixa de profundidades.

Alguns autores utilizam o diagrama Temperatura - Salinidade - tempo (T-S-t), que constitui uma forma compacta de apresentar as variações das propriedades com o tempo (Figura 16).

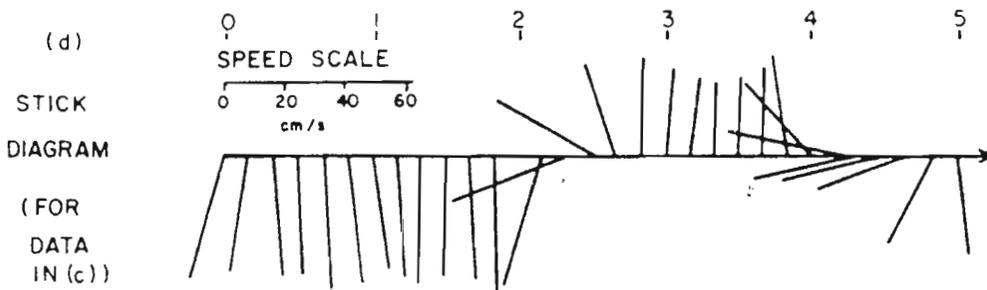
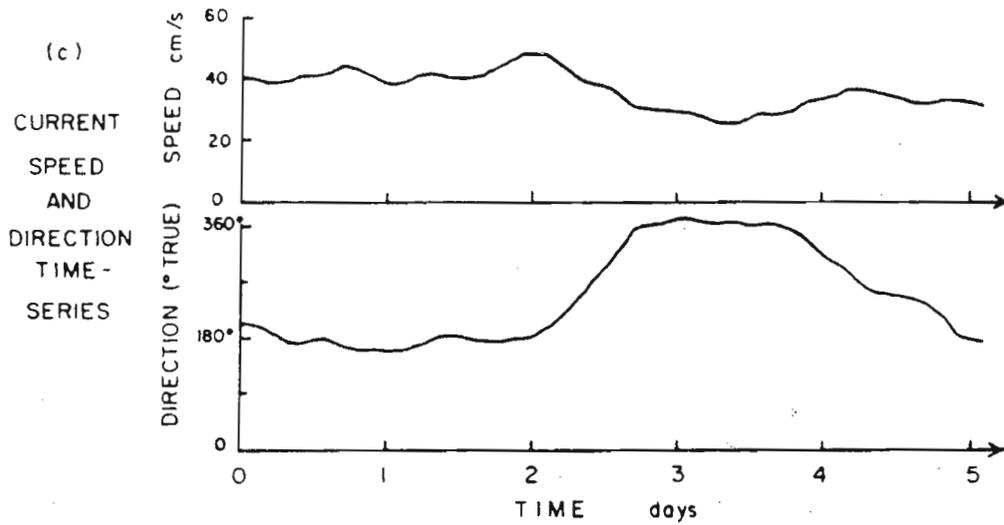
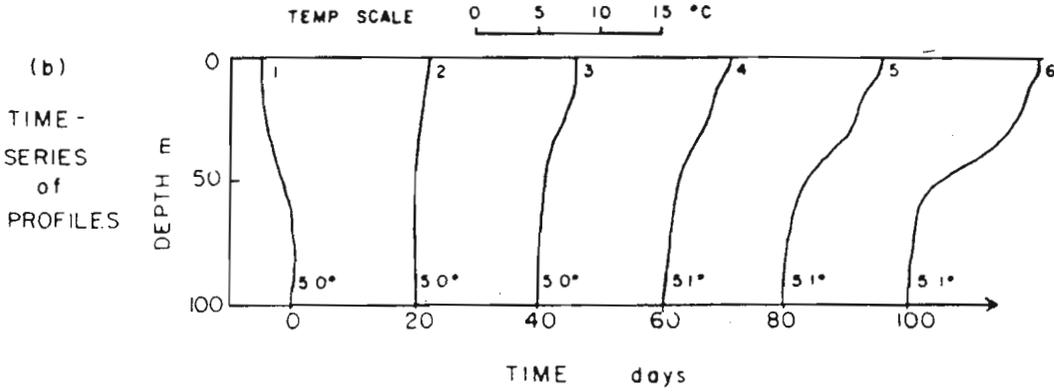
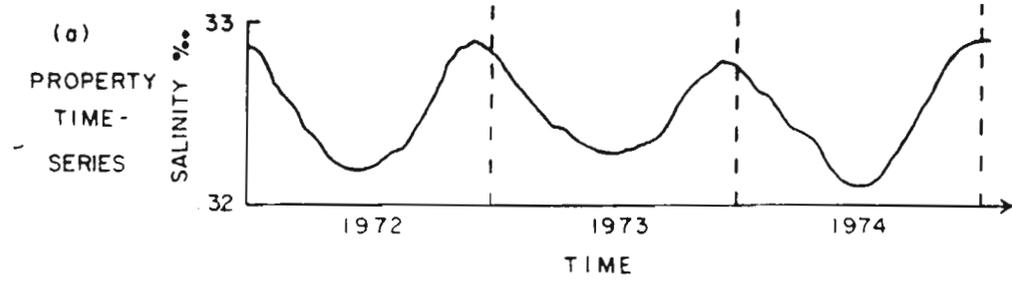
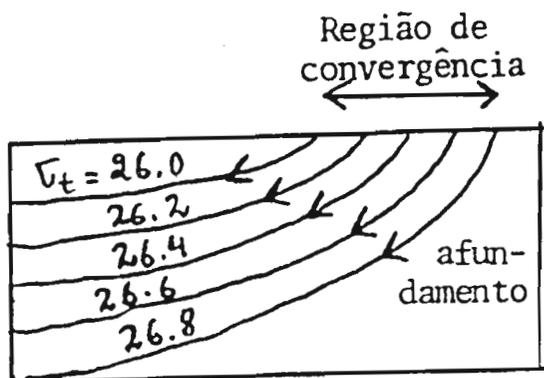
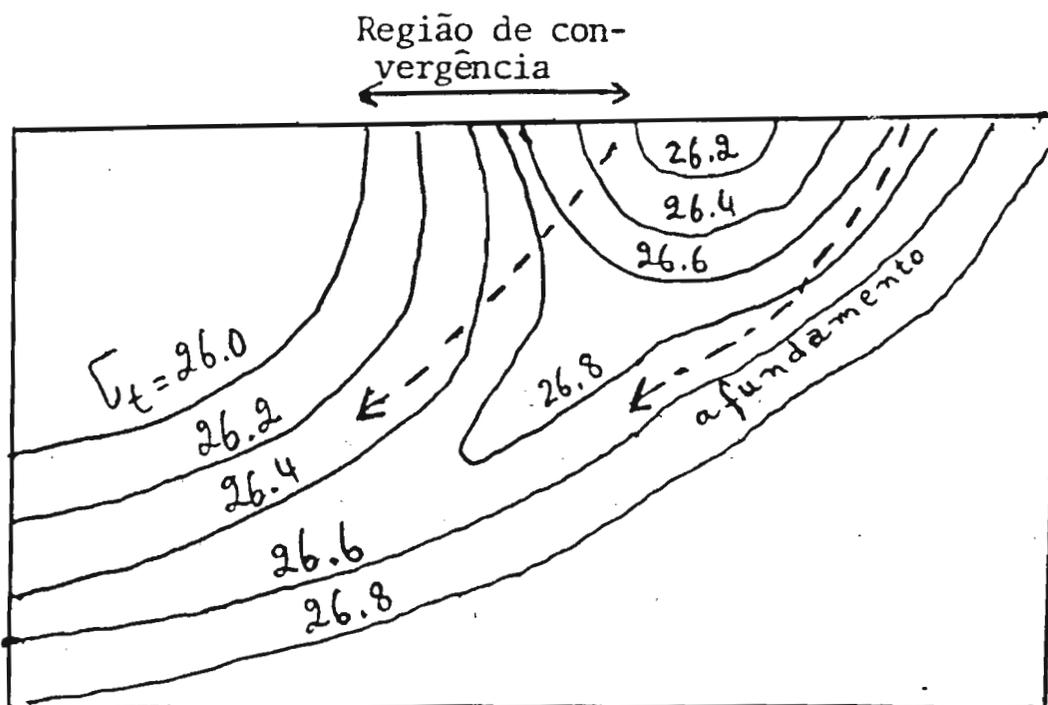


FIGURA 1

FIG. 6.9. Examples of time-series plots: (a) property/time, (b) time-series of profiles, (c) current speed and direction, (d) stick diagram for data of (c) above.



Mistura lateral



Mistura vertical

FIGURA 2

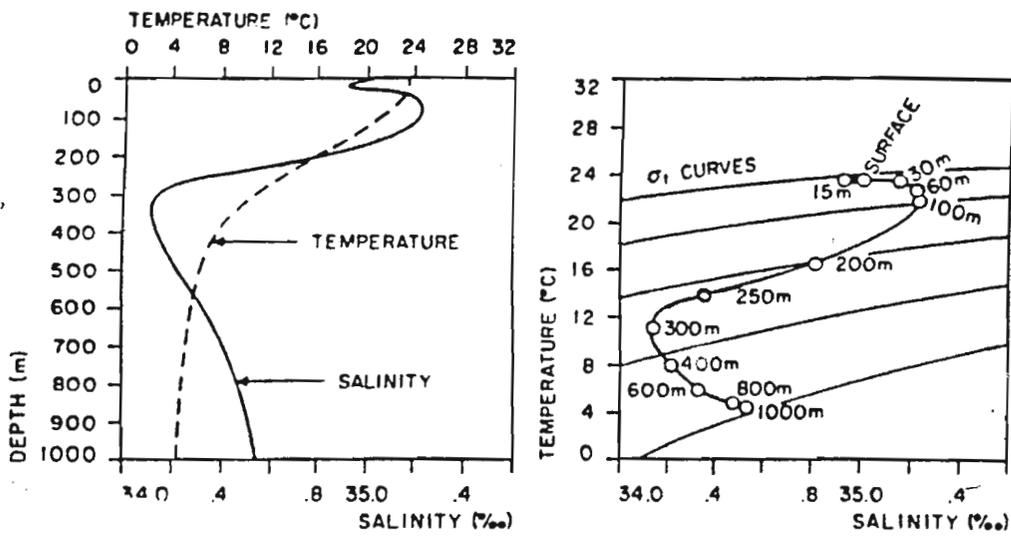


FIGURA 3

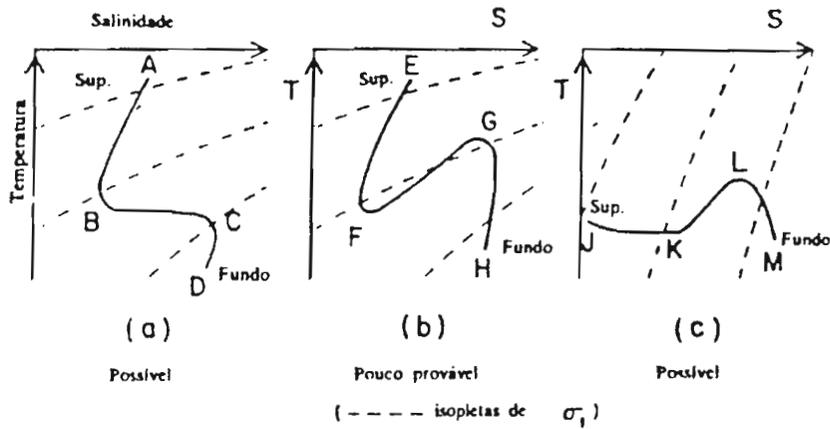


FIGURA 4

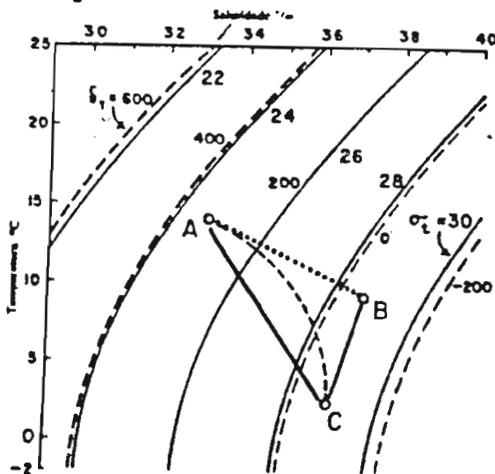


Fig. 2 — Gráfico temperatura x salinidade, mostrando as linhas de igual densidade (σ_t) e de igual anomalia termostérica (δ_ϵ).

FIGURA 5

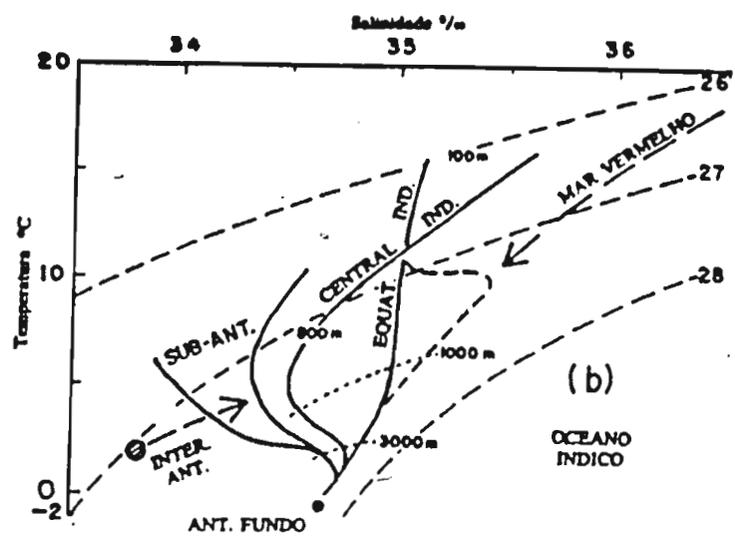
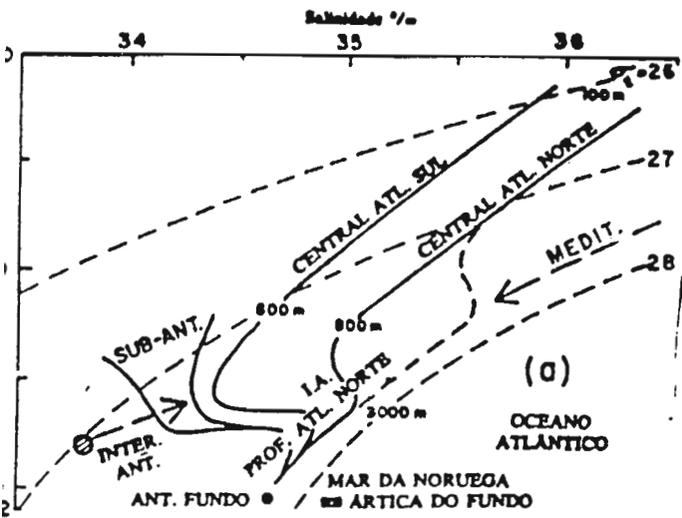


FIGURA 6

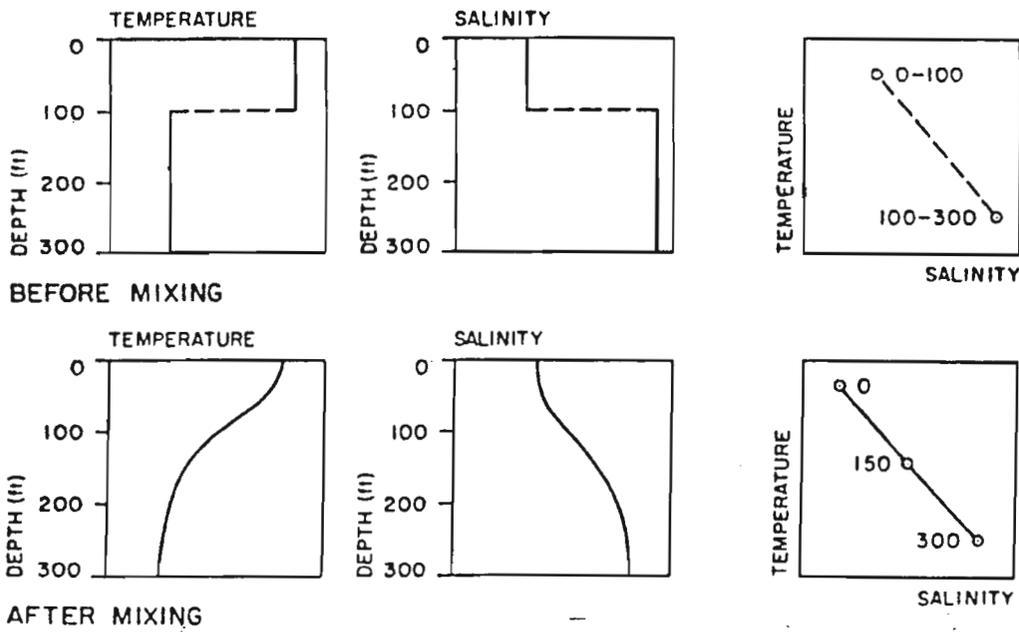


FIGURA 7

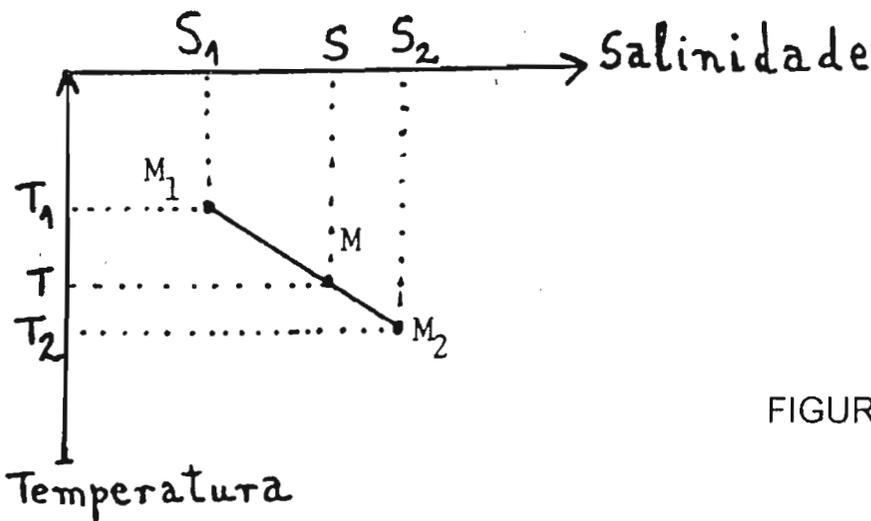


FIGURA 8

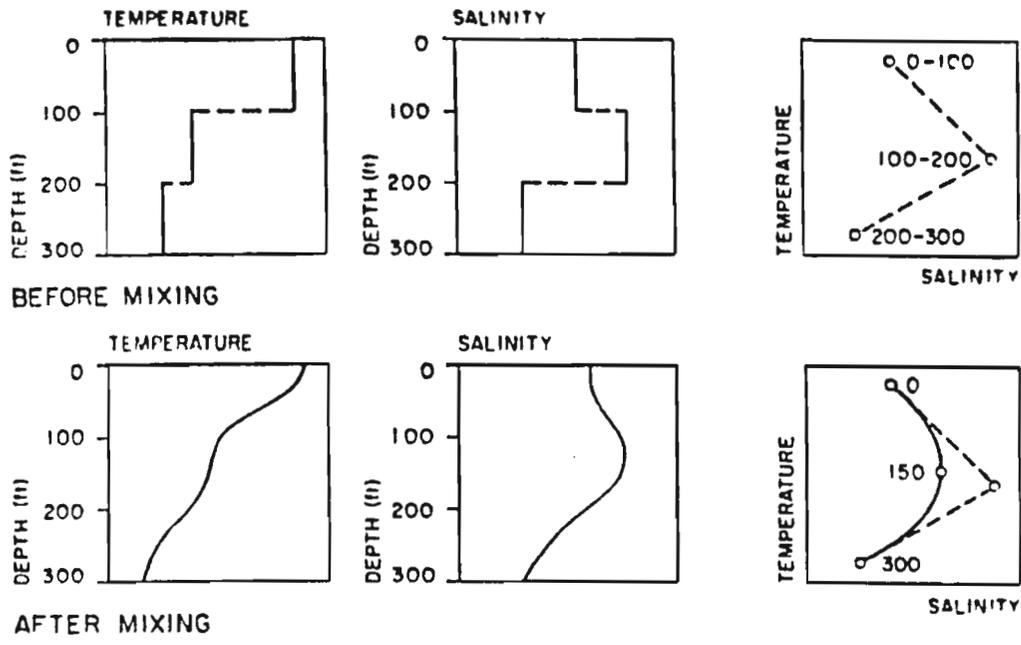


FIGURA 9

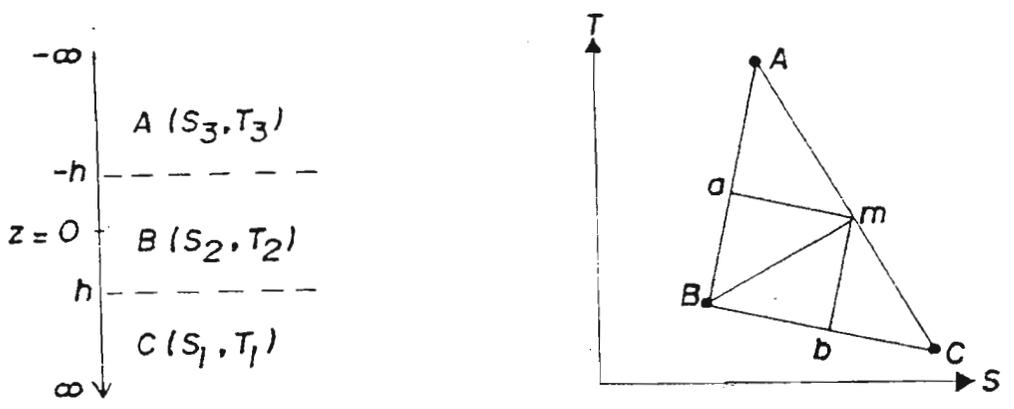


FIGURA 10

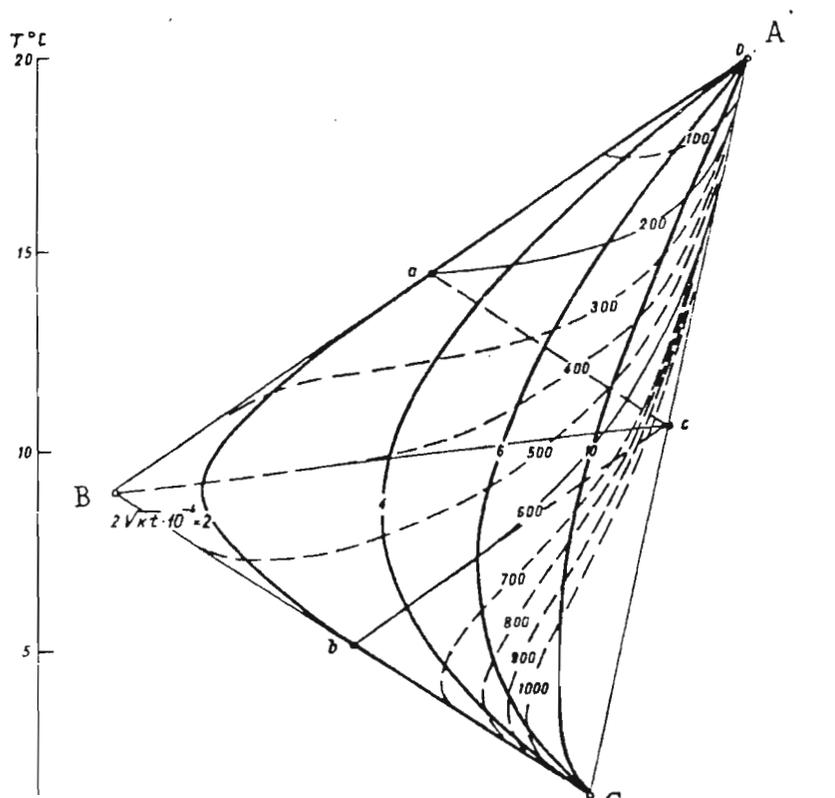


FIGURA 11

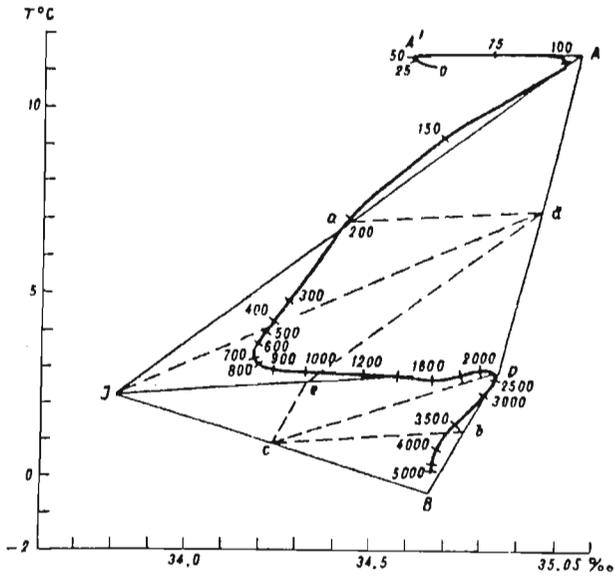


FIGURA 12

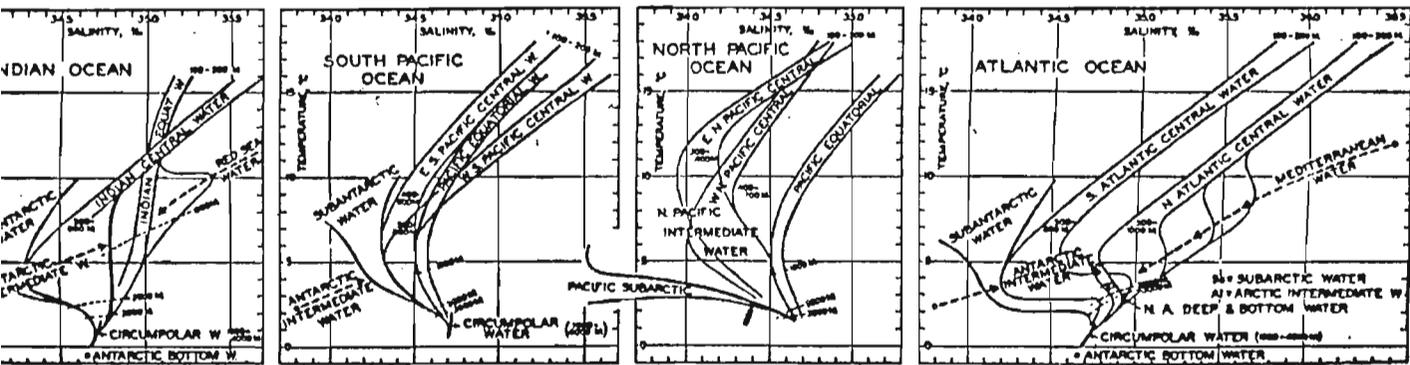


FIGURA 13

TABELA 1

Principal water masses of the World Ocean and their *T-S* indexes

Water masses	Atlantic Ocean	Indian Ocean	Pacific Ocean
Tropospheric ¹	North Atlantic Subtropical (20.0°C; 36.5‰)	Bengal (Bay) (25.0°C; 33.8‰)	Western North Pacific Subtropical (20.0°C; 34.8‰)
		Equatorial (25.0°C; 35.3‰)	Eastern North Pacific Subtropical (20.0°C; 35.2‰)
		Timor (Sea) (25.0°C; 34.5‰)	
	South Atlantic Subtropical (18.0°C; 35.9‰)	South Indian Subtropical (16.0°C; 35.6‰)	South Pacific Equatorial and Subtropical (25.0°C; 36.2‰)–(20.0°C; 35.7‰)
Intermediate	Subarctic (2.0°C; 34.9‰)	–	Subarctic (5.0°C; 33.8‰)–(9.0°C; 33.5‰)
	Mediterranean (11.9°C; 36.5‰)	Red Sea (23.0°C; 40.0‰)	Eastern South Pacific Subtropical (11.5°C; 33.9‰)
		Timor Sea (12.0°C; 34.6‰)	
	Antarctic (2.2°C; 33.8‰)	Antarctic (5.2°C; 34.3‰)	Antarctic (5.0°C; 34.1‰)
Stratospheric (Deep and Bottom)	North Atlantic Deep and Bottom (2.5°C; 34.9‰)	Deep and Bottom (0.6°C; 34.7‰)	Deep and Bottom (1.3°C; 34.7‰)
	South Atlantic Deep (4.0°C; 35.0‰)		
	Antarctic Bottom (–0.4°C; 34.66‰)		

¹ Not included in the table are surface (tropospheric) arctic, subarctic, antarctic and subantarctic waters with unstable *T-S* indexes.

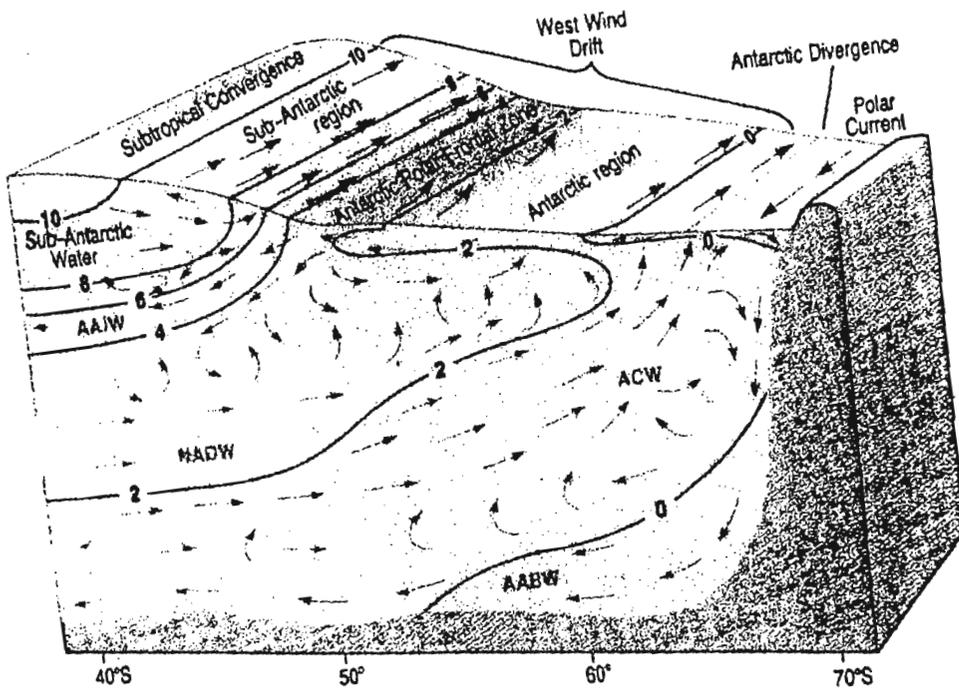


FIGURA 14

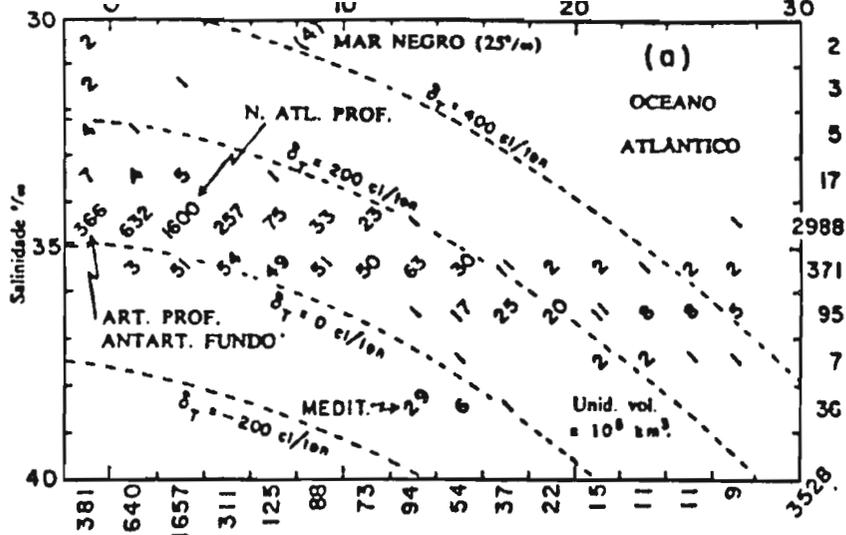
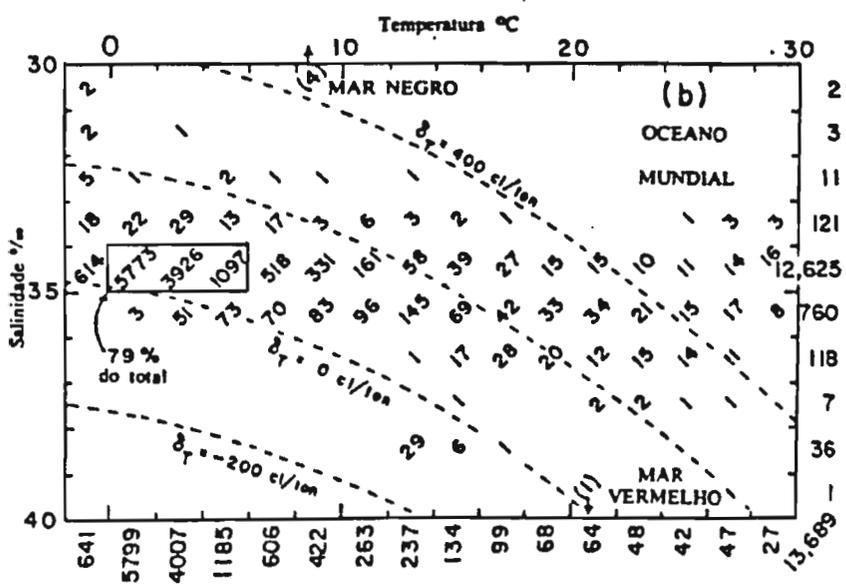


FIGURA 15



Descriptive Physical Oceanography

SALINITY ‰

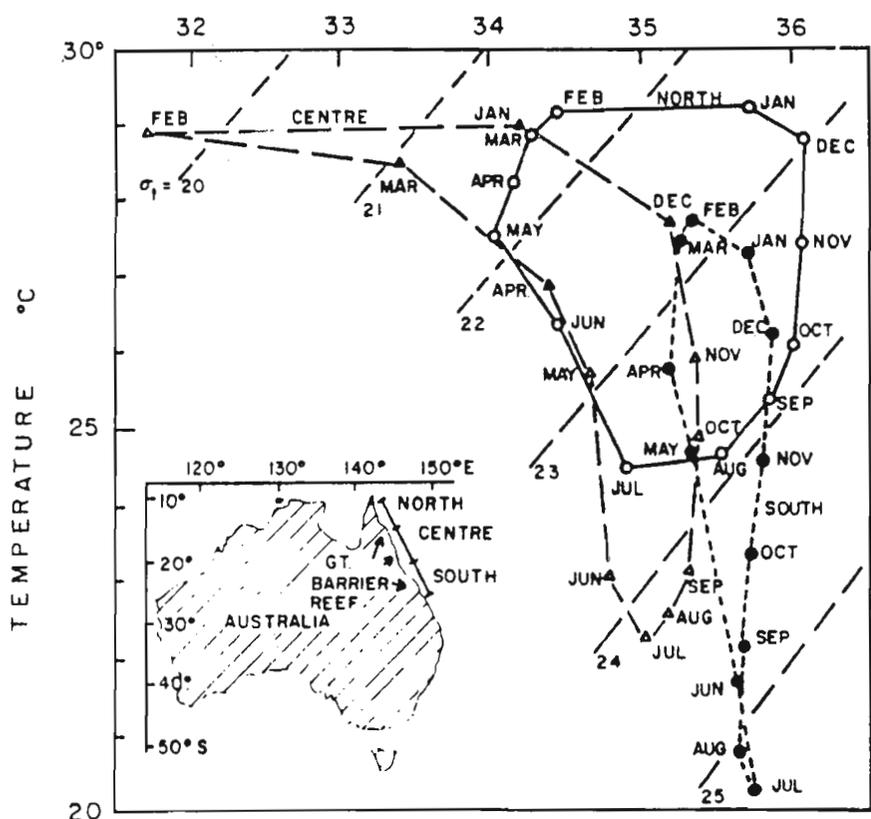


FIGURA 16