

Herminio Foloni Neto

Análise Multiparamétrica Ótima de Massas de Água
na Bacia de Campos - RJ

Monografia de Bacharelado apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia.

Orientador:

Prof. Dr. Ilson Carlos Almeida da Silveira

São Paulo

Novembro de 2008

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO OCEANOGRÁFICO

**Análise Multiparamétrica Ótima de Massas de Água na Bacia
de Campos - RJ**

Herminio Foloni Neto

Monografia de Bacharelado apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de
São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em
Oceanografia.

Aprovada em / / por

Prof. Dr. Ilson Carlos Almeida da Silveira

Prof.(a.) Dr.(a.)

Prof.(a.) Dr.(a.)

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Processos de Formação de Massas de Água	1
1.1.1	Convecção	1
1.1.2	Subducção	2
1.1.3	Mistura Subsuperficial	2
1.2	Ciclo de Vida das Massas de Água	3
1.3	Tipos de Água	4
1.4	A Análise de Massas de Água	4
2	Objetivos	5
3	A Área de Estudo	6
3.1	As Massas de Água na Bacia de Campos	6
3.1.1	Água Tropical (AT)	8
3.1.2	Água Central do Atlântico Sul (ACAS)	8
3.1.3	Água Intermediária Antártica (AIA)	8
3.1.4	Água Circumpolar Superior (ACS)	9
3.1.5	Água Profunda do Atlântico Norte (APAN)	9
4	Metodologia	9
4.1	Conjunto de Dados	9
4.2	Tratamento dos Dados	13
4.2.1	Temperatura e Salinidade	13
4.2.2	Oxigênio Dissolvido e Nutrientes	16
4.3	A Análise Multiparamétrica Ótima	18
4.3.1	Resolução pelo método dos mínimos quadrados com a restrição não-negativa	22
4.3.2	A Razão de Redfield	22
4.3.3	Resíduos da conservação de massa	23
4.3.4	Seleção dos parâmetros para os tipos de água fonte	23
5	Resultados e Discussão	31
5.1	Água Tropical	31

5.2	Água Central do Atlântico Sul	34
5.3	Água Intermediária Antártica	34
5.4	Água Circumpolar Superior	37
5.5	Água Profunda do Atlântico Norte	40
6	Considerações Finais	41
7	ANEXO I	45
	Referências	55

Lista de Acrônimos

AT: Água Tropical

ACAS: Água Central do Atlântico Sul

AIA: Água Intermediária Antártica

ACS: Água Circumpolar Superior

APAN: Água Profunda do Atlântico Norte

AMO: Análise Multiparamétrica Ótima

OCEANPROF II: Cruzeiro oceanográfico realizado entre os dias 12 e 20 de junho de 2003 na Bacia de Campos, como parte do projeto "Caracterização Ambiental de Águas Profundas da Bacia de Campos".

CTD: *Conductivity, Temperature and Depth* - equipamento oceanográfico utilizado para medir propriedades da água do mar como a salinidade e a temperatura, bem como a respectiva profundidade onde os dados foram coletados.

Lista de Figuras

1	Bacia de Campos entre o Cabo de São Tomé e Cabo Frio.	7
2	Identificação de massas de água segundo <i>Zemba</i> (1991) na região da Corrente do Brasil entre 27°S e 36°S: no eixo das abcissas tem-se a salinidade e nas ordenadas temos a densidade potencial convencional (kg m^{-3}) com referência a 2000 metros de profundidade (σ_2). Sendo CW, AAIW e NADW traduzidos respectivamente para o português como ACAS, AIA e APAN. Dados provindos do cruzeiro Thomas Washington Marathon, entre novembro e dezembro de 1984.	10
3	Identificação de massas de água segundo <i>Zemba</i> (1991) na região da Corrente do Brasil entre 27°S e 36°S: no eixo das abcissas temos o oxigênio dissolvido (ml/l) e nas ordenadas temos a densidade potencial convencional com referência a 2000 metros de profundidade (σ_2) em kg m^{-3} . Sendo AAIW, UCPW, NADW e LCPW sendo traduzidos para o português, respectivamente como AIA, ACS, APAN e ACI. Dados provindos do cruzeiro Thomas Washington Marathon, entre novembro e dezembro de 1984.	11
4	Distribuição geográfica das 10 estações oceanográficas realizadas durante o cruzeiro OCEANPROF II no período de 12 a 20 de Junho de 2003.	12
5	Exemplificação da interpolação em perfis verticais de nitrato ($\mu\text{mol kg}^{-1}$) nas dez estações oceanográficas do cruzeiro OCEANPROF II, onde os asteriscos (*) representam as profundidades de coleta por garrafas Niskin.	13
6	Retirado de <i>Mattos</i> (2003) - Distribuição de pesos para os pontos adjacentes na janela do tipo “Hanning”, para as larguras de 11 e 31 pontos.	16
7	Perfil Vertical de Temperatura antes e depois do alisamento dos dados para a estação 7481.	17
8	A ordem das estações oceanográficas (indicada pelas setas) do cruzeiro OCEANPROF II utilizadas na AMO para a obtenção das seções verticais.	31
9	Isolinhas de conteúdo percentual da massa de Água Tropical (AT), segundo a AMO para as cinco estações ao norte da grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.	32
10	Isolinhas de conteúdo percentual da massa de Água Tropical (AT), segundo a AMO para as cinco estações ao sul da grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.	32

11	Percentual de resíduos da conservação de massa pela densidade potencial convencional (kg m^{-3}) gerados pela AMO durante a análise realizada ao norte da grade amostral.	33
12	Percentual de resíduos da conservação de massa pela densidade potencial convencional (kg m^{-3}) gerados pela AMO durante a análise realizada ao sul da grade amostral.	33
13	Isolinhas de conteúdo percentual da massa de Água Central do Atlântico Sul (ACAS), segundo a AMO para as cinco estações ao norte na grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.	35
14	Isolinhas de conteúdo percentual da massa de Água Central do Atlântico Sul (ACAS), segundo a AMO para as cinco estações ao sul na grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.	35
15	Isolinhas de percentual da massa de Água Intermediária Antártica (AIA), segundo a AMO para as cinco estações ao norte na grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.	36
16	Isolinhas de percentual da massa de Água Intermediária Antártica (AIA), segundo a AMO para as cinco estações ao sul na grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.	36
17	Isolinhas de percentual da massa de Água Circumpolar Superior, segundo a AMO para as cinco estações ao norte na grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.	37
18	Isolinhas de percentual da massa de Água Circumpolar Superior, segundo a AMO para as cinco estações ao sul na grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.	38
19	Densidade potencial convencional com referência a 2000 metros de profundidade (σ_2) em kg m^{-3} <i>versus</i> oxigênio dissolvido em ml l^{-1} das estações do cruzeiro OCEANPROF II.	39
20	Densidade potencial convencional com referência a 2000 metros de profundidade (σ_2) em kg m^{-3} <i>versus</i> a salinidade das estações do cruzeiro OCEANPROF II.	39
21	Densidade potencial convencional com referência a 2000 metros de profundidade (σ_2) em kg m^{-3} <i>versus</i> o silicato $\mu\text{mol kg}^{-1}$ nas estações do cruzeiro OCEANPROF II.	40

22	Isolinhas de percentual da massa de Água Profunda do Atlântico Norte (APAN), segundo a AMO para as cinco estações ao sul na grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.	41
23	Isolinhas de percentual da massa de Água Profunda do Atlântico Norte (APAN), segundo a AMO para as cinco estações ao sul na grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.	41
24	Limites médios das massas de água na Bacia de Campos de acordo com as isolinhas de conteúdo percentual igual 50% e posição dos núcleos na coluna de água.	42
25	Isolinhas de conteúdo percentual da massa de Água Tropical (AT), segundo a AMO calculada a partir de dados discretos, para as cinco estações ao norte da grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.	45
26	Isolinhas de conteúdo percentual da massa de Água Tropical (AT), segundo a AMO calculada a partir de dados discretos, para as cinco estações ao sul da grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.	45
27	Isolinhas de conteúdo percentual da massa de Água Central do Atlântico Sul (ACAS), segundo a AMO calculada a partir de dados discretos, para as cinco estações ao norte na grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.	46
28	Isolinhas de conteúdo percentual da massa de Água Central do Atlântico Sul (ACAS), segundo a AMO calculada a partir de dados discretos, para as cinco estações ao sul na grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.	46
29	Isolinhas de percentual da massa de Água Intermediária Antártica (AIA), segundo a AMO calculada a partir de dados discretos, para as cinco estações ao norte na grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.	47
30	Isolinhas de percentual da massa de Água Intermediária Antártica (AIA), segundo a AMO calculada a partir de dados discretos, para as cinco estações ao sul na grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.	47
31	Isolinhas de percentual da massa de Água Circumpolar Superior, segundo a AMO calculada a partir de dados discretos, para as cinco estações ao norte na grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.	48

32	Isolinhas de percentual da massa de Água Circumpolar Superior, segundo a AMO calculada a partir de dados discretos, para as cinco estações ao sul na grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.	48
33	Isolinhas de percentual da massa de Água Profunda do Atlântico Norte (APAN), segundo a AMO calculada a partir de dados discretos, para as cinco estações ao sul na grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.	49
34	Isolinhas de percentual da massa de Água Profunda do Atlântico Norte (APAN), segundo a AMO calculada a partir de dados discretos, para as cinco estações ao sul na grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.	49
35	Percentual de resíduos da conservação de massa pela densidade potencial convencional (kg m^{-3}) gerados pela AMO, calculada com dados discretos, durante a análise realizada ao norte da grade amostral.	50
36	Percentual de resíduos da conservação de massa pela densidade potencial convencional (kg m^{-3}) gerados pela AMO, calculada com dados discretos, durante a análise realizada ao sul da grade amostral.	50

Lista de Tabelas

1	Coordenadas das estações oceanográficas do Cruzeiro OCEANPROF II, realizado entre dos dias 12 e 20 de Junho de 2003.	14
2	Pesos atribuídos a cada parâmetro, para o oceano Atlântico, utilizados na AMO segundo <i>Poole & Tomczak (1999)</i>	21
3	Índices de densidade potencial convencional relativamente a 0 m (σ_0), temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido e nutrientes referentes a Água Tropical.	25
4	Índices de densidade potencial convencional relativamente a 0 m (σ_0), temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido e nutrientes referentes a Água Central do Atlântico Sul.	26
5	Índices de densidade potencial convencional relativamente a 0 m (σ_0), temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido e nutrientes referentes a Água Intermediária Antártica.	27
6	Índices de densidade potencial convencional relativamente a 2000 m (σ_2), temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido e nutrientes referentes a Água Circumpolar Superior.	28
7	Índices de densidade potencial convencional relativamente a 2000 m (σ_2), temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido e nutrientes referentes a Água Profunda do Atlântico Norte.	29
8	Índices de temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido e nutrientes referentes a cada tipo de água fonte utilizados na AMO. O oxigênio dissolvido e os nutrientes estão em $\mu\text{mol kg}^{-1}$	30
9	Limites médios das massas de água na Bacia de Campos de acordo com as isolinhas de conteúdo percentual igual 50% e profundidades médias dos núcleos de cada massa de água.	43

Agradecimentos

Agradeço a Deus, ou seja lá o que isso for, que sempre me deu forças para alcançar meus objetivos. Aos meus pais, por conseguirem sempre suprir minhas necessidades, que não são poucas, e por me apoiarem em quase tudo na vida. Muito tenho a agradecer ao meu orientador, Prof. Dr. Ilson Carlos Almeida da Silveira, que durante esse período ajudou a formar meu conceito sobre o que é ser um cientista e também o agradeço pelas conversas (científicas ou quaisquer outras) que me proporcionaram bons momentos. Ao pessoal do LaDO (Rafael, Juliana, Leandro, César, Patricia, Fernando e Hebe), que desde que cheguei me ajudaram sempre que precisei. Agradeço a Luciana, a Hell, a Cíntia e a Nadine por sempre estarem por perto, tanto nas baladas quanto nas horas apertadas. Ao pessoal da Turma 3 do curso de Oceanografia (muita gente para colocar o nome), que nesses anos de graduação me adicionaram experiências que nunca vou esquecer e que mudaram meu modo de ver o mundo. Agradeço ao Ferrero, Mineiro e Tiagão, por me encherem o saco sempre que podiam, o que gerou discussões interessantes. Ao Pitú (Hélio), por saber me ouvir e também por seus conselhos. Ao Laboratório de Ecofisiologia de Peixes, principalmente ao Prof. Dr Vicente Gomes e a Msc. Thaís da Cruz Alves dos Santos que me ajudaram muito no início da minha vida acadêmica e colaboraram muito para a minha formação. E por fim ao IOUSP, que durante estes cinco anos em que lá permaneci, consegui adquirir conhecimento e experiências, das quais serei grato por muito tempo.

Resumo

A análise de massas de água, em sua versão moderna, faz uso de ferramentas e dados que não eram disponíveis a 60 anos atrás, quando Sverdrup *et al.*(1942) formalizaram o estudo deste tema. A combinação entre conjuntos de dados hidrográficos, que incluem os parâmetros não-conservativos da água do mar e os dados hidrográficos clássicos (temperatura e salinidade), tornou possível o desenvolvimento de métodos inversos capazes de extrair um maior número informações sobre as massas de água. Inclui-se na categoria destes novos métodos, a AMO (Análise Multiparamétrica Ótima), que possui uma abordagem efetivamente quantitativa. Este trabalho é calcado na utilização da AMO, na investigação da composição e estrutura das massas de água da Bacia de Campos (RJ,Brasil). Aplicou-se aqui, além dos parâmetros conservativos tradicionais, parâmetros considerados não-conservativos como nutrientes e oxigênio dissolvido. Os resultados obtidos se mostraram consistentes com informações na literatura para o Atlântico Sudoeste. As interfaces médias estão situadas em cerca de 150 m de profundidade para a Água tropical (AT) e a Água Central do Atlântico Sul (ACAS); em 400 m para a ACAS e a Água Intermediária Antártica (AIA); em 1060 m para a AIA e a Água Circumpolar Superior (ACS); e em 1300 m entre a ACS e a Água Profunda do Atlântico Norte (APAN). Foram calculadas também as profundidades médias dos núcleos das massas de água: para a ACAS foi encontrada em cerca de 251 m, para a AIA em cerca de 800 m e para a ACS, em 1200 m. Não foram calculadas as profundidades médias dos núcleos das massas de água das extremidades da coluna de água (AT e APAN, neste caso).

Descritores: Massas de Água (Water Masses), Análise Multiparamétrica Ótima - AMO (Optimum Multiparameter Analysis-OMP), Bacia de Campos-RJ, Parâmetros conservativos (Conservative parameters), Parâmetros não-conservativos (Non-conservative parameters), Talude continental (Continental slope).

Abstract

Modern water mass analysis can make use of data and tools not available to the oceanographers 60 years ago when *Sverdrup et al.* (1942) first formalized this subject. Combination between hydrographic data set, that includes seawater non-conservative parameters and classic hydrographic data (temperature and salinity), makes possible the use of inverse methods that are capable of extracting more information about water masses than previously. The OMP analysis (Optimum Mutiparameter Analysis) is included in this category, with an effective quantitative approach. This work has its focus on the OMP analysis applied in the Campos Basin continental slope (RJ, Brazil) to investigate the water mass distribution. We employed both conservative (temperature and salinity) and non-conservative (oxygen, nitrate, phosphate and silicate) parameters of the seawater. The results obtained were consistent with the literature for Southwestern Atlantic. The average depth of water mass interfaces were found at 150 m for Tropical Water (TW) and South Atlantic Central Water (SACW) interface, at 400 m for SACW and Antarctic Intermediate Water (AAIW) interface, at 1060 m for AAIW and Upper Circumpolar Water (UCW) interface and at 1300 m for UCW and North Atlantic Deep Water (NADW) interface. We also calculated the average depth of water mass cores at 251 m for the SACW, at 800 m for AAIW and at 1200 m for UCW. We did not calculate the average depth of water mass cores for the first (TW) and last (NADW) water mass of water column.

Keywords: Water Masses, Optimum Multiparameter Analysis-OMP, Campos Basin-RJ (Brazil), Conservatives parameters, Non-conservative parameters, Continental slope.

1 Introdução

A significância das massas de água é melhor entendida nos oceanos através da analogia com as massas de ar na atmosfera. O conceito de massas de ar está intimamente ligado à previsão do tempo e grande parte das pessoas podem relatar isso através das suas experiências com as mudanças no tempo, passagens de frentes, etc. O oceano e a atmosfera são fluidos em movimento turbulento e a analogia entre os mesmos é usualmente apreciada no contexto da dinâmica de fluidos. Assim, como as massas de ar na atmosfera as massas de água, nos oceanos, são entidades físicas com um volume mensurável e ocupam um espaço finito nos oceanos. Em sua região de formação, ocupam um espaço exclusivo; e fora dali, compartilham o oceano com outras massas de água, com as quais se misturam (*Tomczak, 1999*).

Essa definição de massas de água deixa espaço para decisões subjetivas, já que o ambiente natural é complexo. É então necessário uma série de classificações e definições para tornar-se mais preciso. Esta inclui os processos de formação de massas de água e o ciclo de vida das massas de água.

1.1 Processos de Formação de Massas de Água

São conhecidos três processos físicos para explicar a formação de massas de água. São eles: a convecção, a subducção e a mistura subsuperficial. As definições apresentadas a seguir são baseadas no trabalho de *Tomczak (1999)*, onde podem ser encontradas com mais detalhes.

1.1.1 Convecção

A convecção é um processo de formação onde a densidade da água na superfície oceânica é aumentada por resfriamento ou por evaporação, o que conduz ao afundamento de água para profundidades onde o equilíbrio hidrostático é restabelecido. Afundamentos de parcelas individuais por convecção não passam de algumas centenas de metros, porém o efeito acumulativo pode atingir profundidades muito maiores. Após afundar, a recém-formada massa de água é carregada para fora da sua região de formação por correntes dominantes na mesma profundidade. Massas de água formadas por convecção são caracterizadas pelo contato/troca com a atmosfera, e pela homogeneização por mistura

na região de convecção, o que resulta em propriedades extremamente uniformes por uma larga faixa de profundidade. Este processo é característico de formação da Água Profunda e de Fundo.

1.1.2 Subducção

A subducção é um processo de formação através da combinação da ação do vento e do resfriamento. A convergência do transporte de Ekman, conhecida como bombeamento de Ekman negativo (ou subsidência), “empurra” água para baixo ao longo das superfícies isopícnais. Este movimento é extremamente vagaroso e, no fim do outono e inverno é ultrapassado pelo espessamento da camada de mistura. As parcelas de água são misturadas convectivamente e, como resultado, há o resfriamento da superfície. A maioria das parcelas que afundaram devido bombeamento de Ekman negativo é, no inverno, colocada de volta na camada de mistura e suas propriedades se tornam uniformes. Quando estabelece-se na primavera a pycnoclina sazonal, a camada de mistura é isolada novamente, compreendendo uma delgada camada de água quente. No entanto, o bombeamento de Ekman continua atuando e eventualmente move a água para baixo e para fora do alcance da camada de mistura no próximo inverno. Deste modo, a água é injetada no interior do oceano. Este processo foi sugerido primeiramente por *Stommel* (1979) como sendo o responsável pela formação da Água Central. A Água Intermediária também é formada pelo processo de subducção em latitudes maiores, e por conseguinte, com maior efeito da componente termodinâmica do processo (*Tomczak & Godfrey*, 1994). Uma das características da subducção é que a água subduzida é geralmente saturada em oxigênio.

1.1.3 Mistura Subsuperficial

É o único processo que não remete à interação oceano-atmosfera. Não é tão comum como as outras duas formas de formação de massas de água. Ocorre quando parte de duas ou mais massas de água encontram-se e misturam-se tão intensamente, que na região onde ocorre a mistura, encontra-se uma água com propriedades bem definidas e distintas daquelas massas de água precursoras. Essa água, conseqüentemente espalha-se pelo oceano, é então, considerada uma massa de água recém-formada.

A massa de água mais proeminente formada predominantemente por este processo é a Água Circumpolar no sul dos oceanos Pacífico e Atlântico (*Thompson & Edwards*, 1981).

1.2 Ciclo de Vida das Massas de Água

Este tópico trata de processos ativos após a formação da massa segundo *Tomczak* (1999). O primeiro processo que ocorre é a homogeneização da massa de água através da mistura. Este processo é apropriadamente chamado de *consolidação da massa de água* e ocorre mesmo na ausência de mistura com outra massa de água, em outras palavras, ocorre também em situações onde a massa de água possui exclusividade no espaço que ocupa.

A consolidação da massa de água pode eliminar diferenças verticais de propriedades da massa de água o que ajuda a formar uma distribuição mais uniforme dos gradientes das mesmas, logo diminuindo também o desvio padrão associado.

Um segundo processo que ocorre assim que a massa de água sai da sua região de formação é o *envelhecimento da massa de água* que também pode ser chamado de modificação da massa de água. Ocorre independentemente da mistura com outras massas de água, tendo efeito apenas nas propriedades não-conservativas através do seu comportamento físico-químico e bioquímico. Como resultado, a massa de água sofre mudanças mesmo quando ela é a única a ocupar determinada profundidade no oceano, ou seja, o envelhecimento ou modificação da massa de água muda suas propriedades não-conservativas.

O terceiro processo é a *mistura* que ocorre entre duas ou mais massas de água. A mistura não resulta na mudanças de propriedade das massas de água no espaço físico, mas produz novas combinações de propriedades que não são encontradas nas massas de água precursoras. A sequência da consolidação, envelhecimento e mistura pode ser descrito como o período de evolução da massa de água. Eventualmente, as massas se misturam de tal maneira que não podem mais ser identificadas como uma mistura. Em algumas situações, podem desaparecer sem deixar traços, como por exemplo a Água do Mediterrâneo que é absorvida pela Água Profunda do Atlântico Norte ao deixar o estreito de Gibraltar. Este processo é denominado de *absorção de massa de água*. Em outras situações, massas de água podem desaparecer por ter se transformado em outra, esse processo denominado de *transformação de massa de água* está sempre associado ao processo de formação de massas de água por mistura subsuperficial. A absorção e transformação de massas de água são as duas possíveis formas da fase final da vida das massas de água, que pode ser chamada de *decaimento*.

1.3 Tipos de Água

O cerne da análise moderna de massas de água consiste na quantificação das taxas de formação, volume total de massas de água e taxas de mistura. Isto requer algumas definições matemáticas para auxiliar na quantificação das massas de água no espaço físico.

Considere um espaço com n dimensões definidos por n parâmetros da água. Em geral, a temperatura e a salinidade estão sempre inseridas, logo a dimensão mínima deste espaço será de $n = 2$. Porém, podem ser inclusos outros parâmetros como o oxigênio dissolvido, nutrientes, radionuclídeos e outros traçadores, considerando assim, mais dimensões para este espaço. O *tipo de água* é um ponto no espaço n -dimensional, ou seja, é uma construção matemática e não ocupa volume no espaço físico. Eventualmente, podem existir partículas de água que contenham exatamente as mesmas propriedades descritas pelo tipo de água, porém a existência das mesmas não é necessária para o tipo de água existir.

Se um tipo de água corresponde aproximadamente as propriedades de uma massa de água em sua região de formação, o mesmo é então chamado de *tipo de água fonte*. As condições de formação podem variar muito durante o tempo, e novamente, é possível que não haja uma única partícula de água associada as propriedades descritas pelo tipo de água fonte, significando que o tipo de água fonte também é uma construção matemática e não existe no espaço físico. Matematicamente, uma massa de água pode ser definida através da combinação de tipos de água fonte e seus desvios padrões associados (Tomczak, 1999).

1.4 A Análise de Massas de Água

A maioria dos estudos sobre a análise de massas de água utilizam-se da teoria analítica das curvas T-S, que pode ser encontrada em detalhes em Mamayev (1975). Esta análise mostra que é possível encontrar a interface representada por 50% de mistura entre as duas (ou três) massas de água empilhadas verticalmente (Silveira, 2007). Isto pode ser feito através do traçado de uma reta de mistura (envolvendo duas massas de água) ou de um triângulo de mistura (envolvendo três massas de água). Este método advém dos teoremas de Shtokman, que de acordo com Mamayev (1975), é baseado em conceitos termodinâmicos da água do mar e permitiu estabelecer uma classificação de suas principais massas de de água e as características de suas transformações devido aos processos de mistura (Miranda, 1983). Porém, tal método possui limitações quantitativas, já que só

pode ser aplicado em situações de mistura de até três tipos de água (*Tomczak, 1999*) e calcam-se em informações de temperatura e salinidade.

Já alguns autores determinaram as interfaces das massas de água por métodos qualitativos que combinam perfis verticais de várias propriedades da água como nutrientes e oxigênio dissolvido, utilizando-se de seus máximos e mínimos (*Zemba, 1991; Mémerly et al., 2000; Reid et al., 1977*). Novamente, as limitações quantitativas para a análise da mistura de massas de água estão presentes.

Estas restrições foram reduzidas pela introdução da Análise Multiparamétrica Ótima (AMO) por *Tomczak (1981)*, que possui uma abordagem efetivamente quantitativa. Essa abordagem moderna da análise de massas de água faz uso de ferramentas e dados que não eram disponíveis na década de 40, quando teve início a análise de massas de água baseada em apenas princípios termodinâmicos (*Shtokman, 1943*).

Um novo conjunto de dados hidrográficos, que inclui os nutrientes e elementos-traço, que são parâmetros não-conservativos, ou seja, possuem sua concentração alterada facilmente por processos biogeoquímicos. E combinados com dados hidrográficos clássicos (parâmetros conservativos que não se alteram facilmente, exceto pelo contato com a atmosfera) possibilitou a princípio a estimativa da quantidade de massas de água envolvidas nos processos de mistura (*Tomczak & Large, 1989*). Adicionalmente, a técnica AMO não limita o número de massas de água em regiões onde a coluna de água é composta por um número maior que três.

2 Objetivos

O objetivo central deste trabalho é a caracterização regional das massas de água que compõem a coluna de água sobre o talude continental da Bacia de Campos (RJ). Buscar-se-á caracterizá-las em termos de suas propriedades conservativas e não-conservativas. Para tanto, a AMO será utilizada nos dados hidrográficos do cruzeiro OCEANPROF II, do projeto “Caracterização Ambiental de Águas Profundas da Bacia de Campos”, financiado pela PETROBRAS.

Como objetivos específicos, almeja-se:

i) a seleção dos índices de temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido, fosfato, nitrato e silicato para o Atlântico Sul com base na literatura;

ii) a determinação do conteúdo percentual de cada uma das massas de água que compõem a coluna de água sobre o talude continental da Bacia de Campos até 2000 m de profundidade; e

iii) a estimativa do posicionamento médio dos núcleos e das interfaces entre estas massas de água.

3 A Área de Estudo

A Bacia de Campos é definida estruturalmente como a região da margem continental compreendida entre o Alto de Vitória ($20,5^{\circ}S$) e o Alto de Cabo Frio ($24^{\circ}S$), ocupando um área de mais de 100.000 km^2 (Viana *et al.*, 1998). Ainda segundo Viana *et al.* (1998), em termos de grandes províncias fisiográficas da Bacia de Campos, destacamos que a plataforma tem uma largura média de 100 km. A quebra da plataforma, que demarca a transição daquela província com o talude continental, varia entre 80 m e 130 m, o talude continental possui uma declividade média de $2,5^{\circ}$. Sua base é mais rasa no limite norte (cerca de 1500 m) e mais profunda em sua parte Sul (cerca de 2000 m).

Este trabalho abrangerá uma porção do talude na Bacia de Campos localizada entre o Cabo de São Tomé e o Cabo Frio, como mostra a Figura 1.

3.1 As Massas de Água na Bacia de Campos

Segundo Silveira (2007), a estrutura vertical das massas de água na região é característica do Atlântico Sul, encontram-se nos primeiros 3500 m: a Água Tropical (AT), a Água Central do Atlântico Sul (ACAS), a Água Intermediária Antártica (AIA), a Água Circumpolar Superior (ACS), a Água Profunda do Atlântico Norte (APAN) e a Água Circumpolar Inferior (ACI). Este estudo irá ocupar-se somente até profundidades ocupadas pela APAN, já que a ACI é ainda mais profunda do que o limite de profundidade das estações oceanográficas utilizadas.

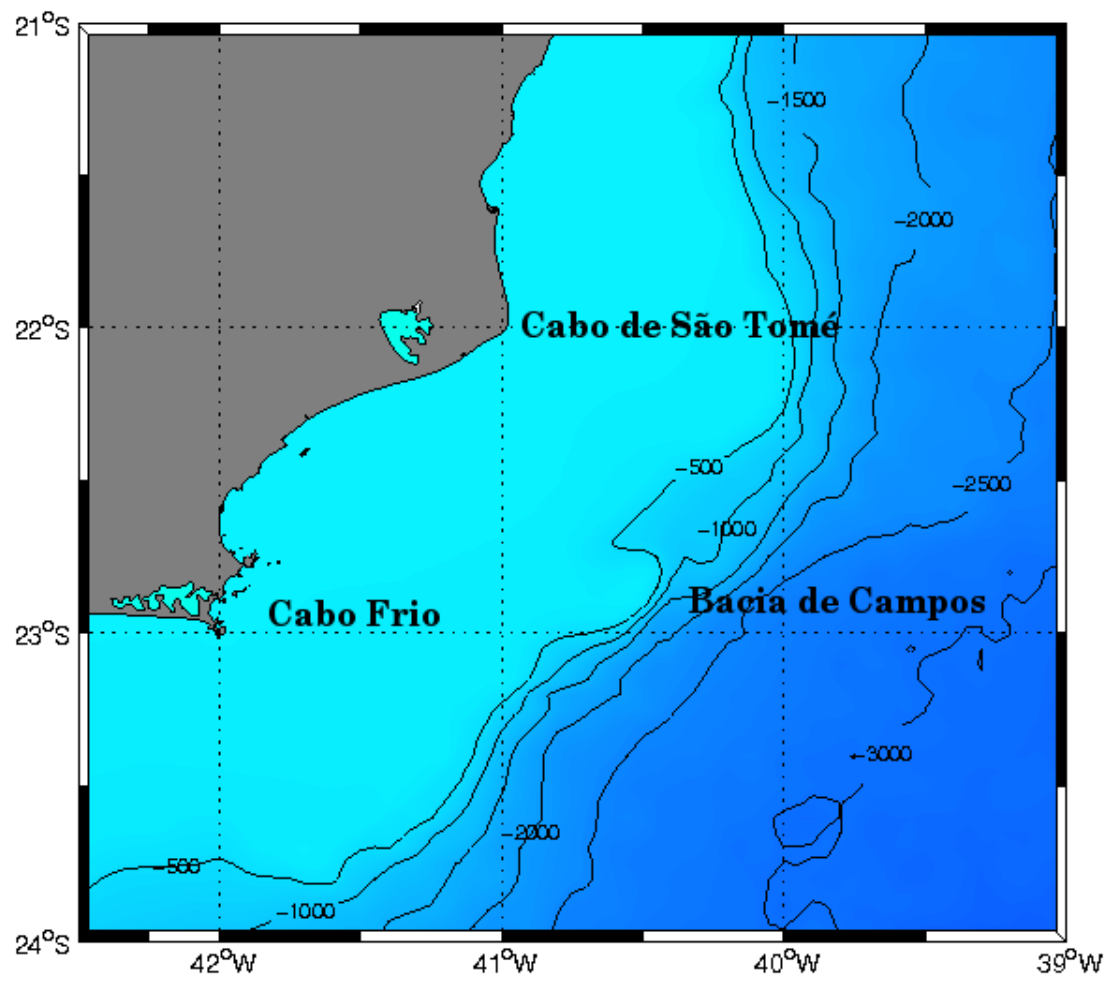


Figura 1: Bacia de Campos entre o Cabo de São Tomé e Cabo Frio.

3.1.1 Água Tropical (AT)

A AT foi descrita por *Emilson* (1961) como parte da massa de água quente e salina que ocupa a superfície do Atlântico Sul Tropical, a qual é transportada para o sul pela Corrente do Brasil. Essa água de superfície é formada como consequência da intensa radiação e excesso de evaporação em relação a precipitação, característicos do Atlântico Tropical. Em seu trajeto para o sul, mistura-se com águas de origem costeira mais frias e de baixa salinidade. O resultado é que a AT é caracterizada por temperaturas maiores que 20 °C e salinidades acima de 36,2 ao largo do sudeste brasileiro. É também descrita na literatura como água de máxima salinidade (*Mémery et al.*, 2000), pois tem seu núcleo associado ao máximo de salinidade na coluna de água que ocorre subsuperficialmente.

3.1.2 Água Central do Atlântico Sul (ACAS)

A ACAS é encontrada fluindo na região da picnoclina, apresenta um intervalo grande de temperatura e salinidade. *Sverdrup et al.* (1942) menciona que a ACAS é formada por afundamento das águas na região da Convergência Subtropical, e subsequente espalhamento ao longo da superfície de densidade adequada a seu ajustamento hidrostático. A ACAS entra como parte do Giro Subtropical, circula com as a Correntes do Atlântico Sul e Benguela, e atinge a costa da América do Sul, ao largo do sudeste brasileiro, transportada pela Corrente Sul Equatorial (CSE). Ao se aproximar da costa africana, recebe contribuição da Água Central do Índico. Como consequência, altera as propriedades que originalmente adquiriu em seus sítios de formação (*Tomczak & Godfrey*, 1994), atingindo a costa sul-americana com suas propriedades modificadas.

3.1.3 Água Intermediária Antártica (AIA)

A AIA é uma massa de água intermediária relativamente fria, rica em oxigênio e pouco salina. Segundo *Zemba* (1991), existe um mínimo de salinidade e um máximo de oxigênio associado a essa massa de água (Figuras 2 e 3). *Deacon* (1937) sugeriu que a formação da AIA surgia do afundamento da Água Superficial Antártica ao sul da frente subantártica. Essa teoria inicial vem sendo substituída pela formação da AIA em regiões específicas no sudeste do Oceano Pacífico e no sudoeste do Oceano Atlântico (*Talley*, 1996). Hoje há consenso que são estas duas regiões de formação da AIA, no entanto ainda existe muitos debates sobre os mecanismos de mistura envolvidos na formação. A

formação e a circulação da AIA no Atlântico Sul são discutidos com mais detalhe em *Talley & Suga* (1995) e em *Bostock* (2005). Seu padrão de circulação está associado à porção intermediária do Giro Subtropical (*Stramma & England*, 1999).

3.1.4 Água Circumpolar Superior (ACS)

A ACS - Água Circumpolar Superior é uma massa de água intermediária do Atlântico Sul, nomeada por *Reid et al.* (1977) para designar a parte superior da AC - Água Circumpolar provinda do oceano Pacífico, que através da Passagem de Drake, entra no Atlântico Sul e se encontra com a APAN na Bacia Argentina, na região da confluência Brasil-Malvinas. Ao norte da região de confluência, depois do encontro com a APAN, a AC é separada em dois núcleos de mínimos de oxigênio e máximos em nutrientes, especialmente o silicato (*Zemba*, 1991; *Mémery et al.*, 2000; *Maamaatuaiahutapu et al.*, 1994): a ACS - Água Circumpolar Superior, acima da APAN em sua porção superior e ACI - Água Circumpolar Inferior, abaixo da parte inferior da APAN. A Figura 3 exhibe as características em termos de oxigênio dissolvido. O padrão de circulação da ACS é ainda debatido na literatura, mas usualmente, atribui-se que seja similar ao da AIA (*Stramma & England*, 1999).

3.1.5 Água Profunda do Atlântico Norte (APAN)

A APAN possui relativamente níveis mais altos de oxigênio, maior salinidade e é pobre em nutrientes, quando comparada a Água Circumpolar (superior e inferior) (*Zemba*, 1991). Os extremos de salinidade e de oxigênio foram usados por *Wüst* (1936) para dividir a Água Profunda do Atlântico Norte em três partes. Na parte superior, denominou o máximo de salinidade de Água Profunda do Atlântico Norte Superior (APANS) e especulou sobre uma possível fonte: o Mar Mediterrâneo. Abaixo do máximo de salinidade, ele achou dois máximos de oxigênio e os denominou de Água Profunda do Atlântico Norte Média (APANM) e Água Profunda do Atlântico Norte Inferior (APANI), e indicou que as mesmas originam-se nos Mares de Labrador e Irminger, respectivamente.

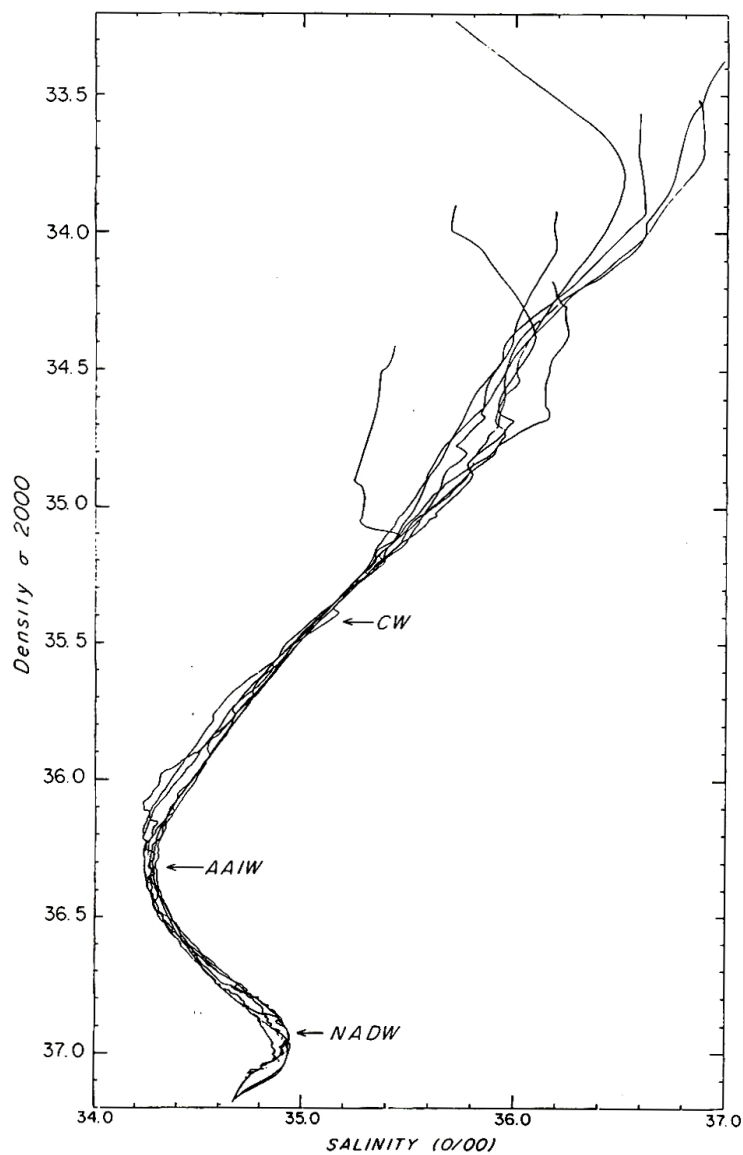


Figura 2: Identificação de massas de água segundo *Zemba* (1991) na região da Corrente do Brasil entre 27°S e 36°S: no eixo das abcissas tem-se a salinidade e nas ordenadas temos a densidade potencial convencional (kg m^{-3}) com referência a 2000 metros de profundidade (σ_2). Sendo CW, AAIW e NADW traduzidos respectivamente para o português como ACAS, AIA e APAN. Dados providos do cruzeiro Thomas Washington Marathon, entre novembro e dezembro de 1984.

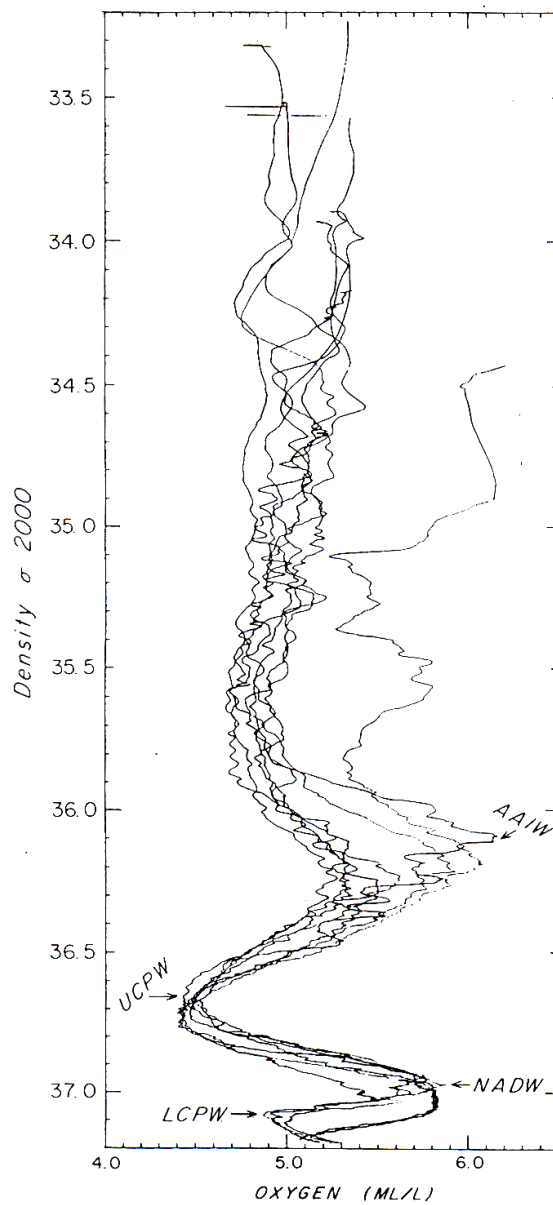


Figura 3: Identificação de massas de água segundo Zemba (1991) na região da Corrente do Brasil entre 27°S e 36°S: no eixo das abscissas temos o oxigênio dissolvido (ml/l) e nas ordenadas temos a densidade potencial convencional com referência a 2000 metros de profundidade (σ_2) em kg m^{-3} . Sendo AAIW, UCPW, NADW e LCPW sendo traduzidos para o português, respectivamente como AIA, ACS, APAN e ACL. Dados providos do cruzeiro Thomas Washington Marathon, entre novembro e dezembro de 1984.

4 Metodologia

4.1 Conjunto de Dados

Foram utilizados dados de temperatura, salinidade, nutrientes e oxigênio dissolvido provindos de 10 estações realizadas durante o cruzeiro OCEANPROF II no período de 12 a 20 de Junho de 2003 na região da Bacia de Campos, mostradas na Figura 4.

A Tabela 1 mostra as coordenadas das estações oceanográficas, assim como as profundidades de amostragem com garrafas. A denominação das estações apresentadas é aquela registrada nos diários de bordo do N.Oc. Prof. W. Besnard, numeradas sequencialmente desde a aquisição do navio pelo Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOUSP), em 1967 e varia de 7475 até 7484 neste caso.

Cabe lembrar que as amostragens de temperatura, salinidade e pressão foram realizadas através da perfilação de um CTD, e portanto, são dados quase contínuos. O contrário ocorre com as amostragens do oxigênio dissolvido e dos nutrientes, feitas com lançamentos de garrafas do tipo Niskin, que são medidas discretas. Por essa razão, estes dados foram interpolados de forma que os máximos e os mínimos resultantes na interpolação fossem correspondentes aos dados coletados (Figura 5).

Os dados referentes aos nutrientes (nitrato, fosfato e sílica) e ao oxigênio dissolvido foram gentilmente cedidos pelo coordenador do projeto: Prof. Dr. Rodolfo Paranhos da UFRJ-Universidade Federal do Rio de Janeiro UFRJ

4.2 Tratamento dos Dados

4.2.1 Temperatura e Salinidade

Antes de passarem por análise oceanográfica, os dados de temperatura e de salinidade necessitam um tratamento básico, no qual filtros de qualidade são aplicados para a eliminar erros e ruídos que ocorrem durante a aquisição. Além deste controle de qualidade, são aplicadas rotinas de aprimoramento dos dados, para torná-los mais contínuos e equidistribuídos verticalmente. Este tratamento básico foi realizado para todas as estações deste trabalho. De acordo com *Mattos* (2003), este processo pode ser dividido em 3 partes que são descritas a seguir:

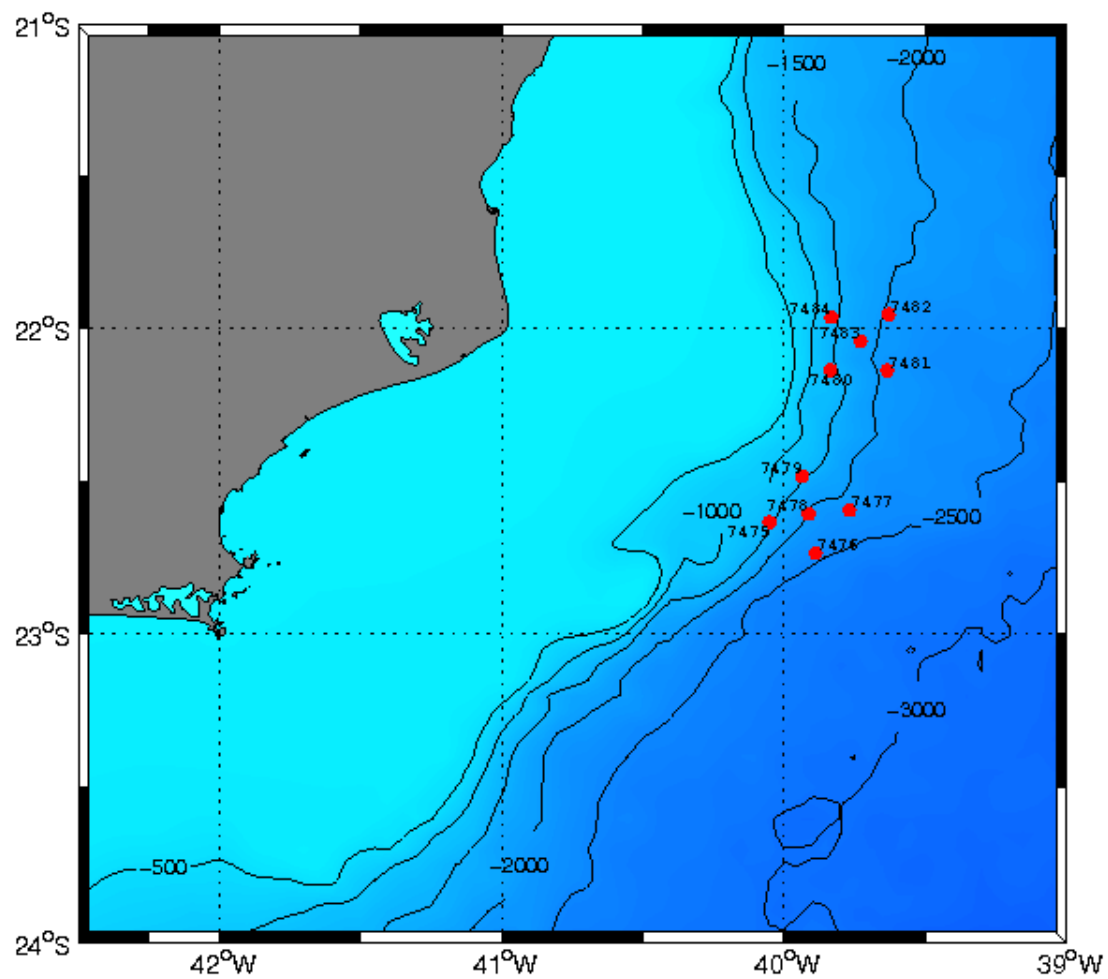


Figura 4: Distribuição geográfica das 10 estações oceanográficas realizadas durante o cruzeiro OCEANPROF II no período de 12 a 20 de Junho de 2003.

Tabela 1: Coordenadas das estações oceanográficas do Cruzeiro OCEANPROF II, realizado entre dos dias 12 e 20 de Junho de 2003.

Estação	Lat (S)	Long (W)	Prof. (m)	Profundidade das garrafas (m)
7475	22° 37,95'	040° 02,59'	1371	0, 30, 60, 90, 200,300, 500, 700, 1000, 1300
7476	22° 43,56'	039° 53,03'	2418	45, 90, 135, 200,300, 500, 700, 1000, 1300, 2300
7477	22° 35,63'	039° 46,28'	2239	43, 95, 139, 200,300, 500, 700, 1300, 2100
7478	22° 36,05'	039° 54,31'	2034	45, 90, 135, 200,300, 500, 700, 1000, 1300, 1900
7479	22° 28,65'	039° 55,39'	1363	35, 70, 105, 200, 300, 500, 700, 1000, 1250
7480	22° 07,55'	039° 50,00'	1200	40, 80, 120, 200,300, 500, 700, 1000, 1100
7481	22° 08,19'	039° 37,46'	2105	48, 96, 144, 200,300, 500, 700, 1000, 1300, 2000
7482	21° 57,00'	039° 37,41'	2028	45, 90, 135, 200,300, 500, 700, 1000, 1300, 1900
7483	22° 02,34'	039° 43,43'	1774	45, 90, 135, 200,300, 500, 700, 1000, 1300, 1650
7484	21° 57,42'	039° 49,41'	1376	43, 86, 129, 200,300, 500, 700, 1000, 1300

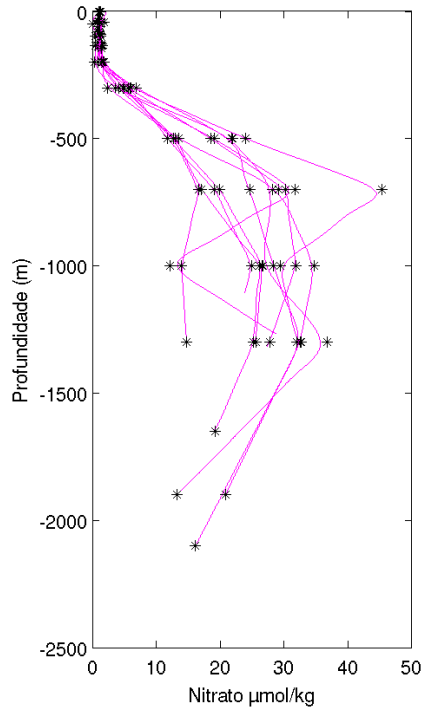


Figura 5: Exemplificação da interpolação em perfis verticais de nitrato ($\mu\text{mol kg}^{-1}$) nas dez estações oceanográficas do cruzeiro OCEANPROF II, onde os asteriscos (*) representam as profundidades de coleta por garrafas Niskin.

Remoção de Picos (Spikes)

Os picos ou “spikes”, são normalmente gerados por falhas de comunicação entre os sensores e a unidade de controle do CTD, e geram valores completamente fora dos padrões de ordem de grandeza das propriedades amostradas, acarretando ruídos no conjunto de dados. Para removê-los, estabeleceu-se uma condição em que os dados que não estivessem dentro de uma faixa de valores aceitáveis, para cada propriedade (temperatura e salinidade), seriam substituídos por valores da profundidade imediatamente acima.

Binagem

Após a remoção dos picos, foi necessário estabelecer um intervalo regular de amostragem para permitir um tratamento numérico adequado. O CTD amostra continuamente a coluna de água, fazendo que o intervalo de profundidades em que os dados são coletados não seja uniforme, visto que a velocidade de movimento do equipamento é variável. Para isto, utilizou-se o processo de média em caixas. Como a frequência de amostragem foi de 24 Hz, e a velocidade média de descida foi em torno de 1 m s^{-1} , fez-se para cada valor inteiro uma caixa, com todos os valores fracionários e aplicou-se a média aritmética. Este

processo permitiu um espaçamento vertical igualitário para os dados.

Alisamento por Janela Móvel

Com a intenção de suavizar ainda mais os ruídos, foram aplicadas Janelas Móveis. Neste procedimento, para cada valor, se faz uma média ponderada utilizando-se dos valores adjacentes, sendo que o dado em questão teve o maior peso. O tipo de janela utilizada foi a “Hanning”, aonde a distribuição dos pesos atribuídos as medidas adjacentes obedeceu a uma curva do tipo gaussiana como mostra a Figura 6, aonde se tem um exemplo da curva com uma extensão de 11 e 31 pontos. Este procedimento se seguiu para todas as estações hidrográficas. O alisamento foi conduzido de modo que o intervalo entre a superfície e a base da termoclina foi utilizada uma janela de 11 pontos e para o restante, 31 pontos. A Figura 7 mostra um exemplo de perfil vertical de temperatura antes e depois do tratamento.

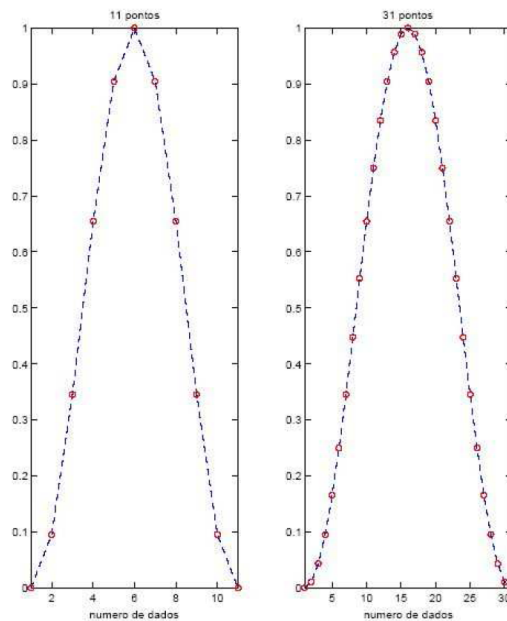


Figura 6: Retirado de *Mattos* (2003) - Distribuição de pesos para os pontos adjacentes na janela do tipo “Hanning”, para as larguras de 11 e 31 pontos.

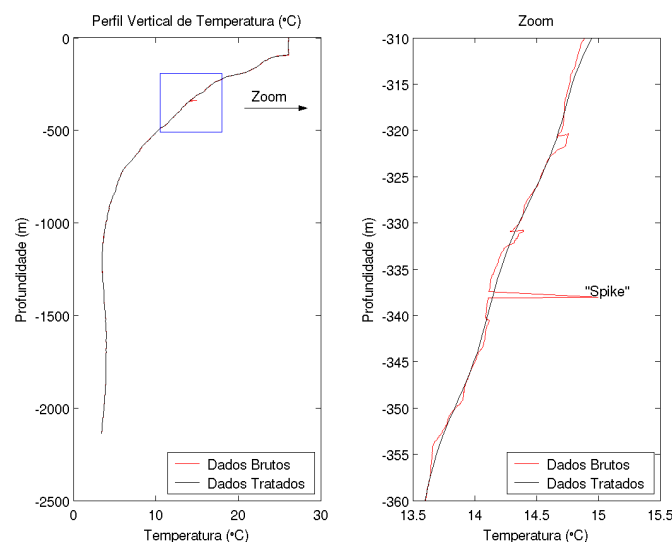


Figura 7: Perfil Vertical de Temperatura antes e depois do alisamento dos dados para a estação 7481.

4.2.2 Oxigênio Dissolvido e Nutrientes

Utiliza-se aqui a descrição da metodologia utilizada pelo Prof.Dr Rodolfo Paranhos nas análises de oxigênio dissolvido e nutrientes do cruzeiro OCEANPROF II. As amostras de água foram coletadas com uma garrafa de Niskin de 10L (General Oceanics, revestida com teflon) em cada profundidade amostrada. A primeira amostra a ser drenada da garrafa de coleta destinou-se à determinação do teor de oxigênio dissolvido. Esta alíquota foi colocada num frasco de DBO (Demanda Biológica de Oxigênio) de 300 ml e imediatamente (5 minutos no máximo) fixada para posterior titulação. Em seguida foi drenada a amostra para a determinação de nutrientes. Esta foi colocada num frasco de polipropileno de 1l, frasco este previamente lavado com HCl 1:1 e abundantemente lavado com água ultra-pura (Milli-Q[®] Gradient UV). As amostras para as determinações de nutrientes foram imediatamente (5 minutos no máximo) congeladas em freezer.

Oxigênio Dissolvido

As titulações foram realizadas em no máximo 10 horas após a fixação pelo método de Winkler (CNEOX, 1983) descrito segundo *Grasshoff et al.* (1999). O oxigênio dissolvido na água do mar é quase que exclusivamente determinado pelo método de Winkler (*Grasshoff et al.*, 1999). Este método é uma titulação iodométrica. E como o oxigênio dissolvido na água do mar não oxida diretamente o íon iodeto para iodo, uma oxidação

“por partes” é feita utilizando o manganês como mediador.

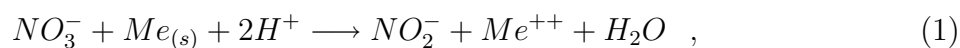
Ortofosfato (PO_4^{3-})

O fósforo existe na água do mar nas formas iônicas do ácido ortofosfórico (H_3PO_4). Cerca de 10% do fosfato inorgânico na água do mar está presente na forma de PO_4^{3-} e praticamente todo o fosfato remanescente está sob a forma de HPO_4^{2-} (*Grasshoff et al.*, 1999).

A determinação do ortofosfato (PO_4^{3-}) foi através do método fosfomolibídico com redução pelo ácido ascórbico descrito por *Grasshoff et al.* (1999). O método se baseia na reação de uma solução acidificada de molibdato de amônia, íons antimônio e ácido sulfúrico. Os íons trivalentes de antimônio reagem rapidamente com os íons fosfato e formam um complexo de cor azulada que pode ser reduzido pelo ácido ascórbico, contendo antimônio em uma relação de 1:1 para o fosfato, cuja a cor formada equivale a sua concentração.

Nitrato (NO_3^-)

O nitrato é o produto final da oxidação dos compostos nitrogenados na água do mar, sendo considerado o único nível de oxidação termodinamicamente estável na presença do oxigênio na água do mar (*Paranhos*, 1996). O método utilizado, também descrito por *Grasshoff et al.* (1999) foi o princípio da redução do nitrato para nitrito, utilizando-se de um metal (cobre ou cádmio) como doador de elétrons, o que permite a equação 1, dada por



seja a reação resultante.

Silicato ($Si(OH)_4$)

Nos oceanos, as formas químicas mais abundantes principais do silício são os vários íons silicatos, bem como os minerais argilosos em suspensão. Ao pH habitual da água do

mar, o silício está dissolvido em sua grande maioria sob a forma de ácido ortosilicílico (H_4SiO_4) (Paranhos, 1996). O método de análise utilizado foi descrito por Grasshoff *et al.* (1999), é denominado método sílico-molibídico. A determinação é colorimétrica e baseia-se na formação do complexo sílico-molibídico, que após a redução, exibe uma coloração azul intensa.

4.3 A Análise Multiparamétrica Ótima

A Análise Multiparamétrica Ótima (AMO) foi proposta primeiramente por Tomczak (1981) e posteriormente desenvolvida por Mackas *et al.* (1987) e Tomczak & Large (1989). A AMO é baseada em um modelo linear simples de mistura. Nesta análise, assume-se que todas as propriedades das massas de água sofram o mesmo processo de mistura, isto é, seus coeficientes de mistura são idênticos.

O ponto de partida da AMO são as observações das propriedades de massas de água, tais como a temperatura, a salinidade, o oxigênio e nutrientes. E através delas, tenta-se determinar as contribuições dos tipos de água fonte pré-definidos, os quais representam um valor paramétrico da massa de água fonte sem mistura.

Exemplificando a AMO, partindo da seguinte situação: uma mistura a qual envolve seis tipos de água e um conjunto de dados observados que contém seis parâmetros: temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido, fosfato, nitrato e silicato.

O sistema linear de equações de mistura, a qual é a base do método, é dado pelo conjunto de equações 2:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1T_1 + x_2T_2 + x_3T_3 + x_4T_4 + x_5T_5 + x_6T_6 + 0 = T_{obs} + R_T \\ x_1S_1 + x_2S_2 + x_3S_3 + x_4S_4 + x_5S_5 + x_6S_6 + 0 = S_{obs} + R_S \\ x_1O_1 + x_2O_2 + x_3O_3 + x_4O_4 + x_5O_5 + x_6O_6 - \Delta O = O_{obs} + R_O \\ x_1N_1 + x_2N_2 + x_3N_3 + x_4N_4 + x_5N_5 + x_6N_6 + \Delta N = N_{obs} + R_N \\ x_1P_1 + x_2P_2 + x_3P_3 + x_4P_4 + x_5P_5 + x_6P_6 + \Delta P = P_{obs} + R_P \\ x_1Si_1 + x_2Si_2 + x_3Si_3 + x_4Si_4 + x_5Si_5 + x_6Si_6 + \Delta Si = Si_{obs} + R_{Si} \\ x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + 0 = 1 + R_{cm} \quad , \end{array} \right. \quad (2)$$

em que os valores observados de temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido, silicato, fosfato e nitrato são respectivamente T_{obs} , S_{obs} , O_{obs} , Si_{obs} , P_{obs} e N_{obs} , com seus

respectivos resíduos R . Os valores com os índices $T_i, S_i, O_i, Si_i, P_i, N_i$ ($i = 1, \dots, 6$) representam os parâmetros pré-determinados (conhecidos) dos seis tipos de água. Os termos $\Delta O, \Delta N, \Delta P$ e ΔSi estão relacionados com a razão de Redfield, introduzida na AMO por *Karstensen & Tomczak* (1998) para corrigir o comportamento não-conservativo do oxigênio dissolvido e dos nutrientes sobre grandes áreas oceânicas e que será discutida com mais detalhe adiante. A última equação expressa a condição de conservação de massa.

De acordo com estas definições, podemos reescrever a equação 2 em sua forma matricial,

$$\mathbf{G}\mathbf{x} - \mathbf{d} = \mathbf{r}, \quad (3)$$

ou

$$(4) \quad \begin{bmatrix} T_1 & T_2 & T_3 & T_4 & T_5 & T_6 & 0 \\ S_1 & S_2 & S_3 & S_4 & S_5 & S_6 & 0 \\ O_1 & O_2 & O_3 & O_4 & O_5 & O_6 & -rO/P \\ N_1 & N_2 & N_3 & N_4 & N_5 & N_6 & rN/P \\ P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 & P_6 & 1 \\ Si_1 & Si_2 & Si_3 & Si_4 & Si_5 & Si_6 & rSi/P \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ \Delta P \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} T_{obs} \\ S_{obs} \\ O_{obs} \\ N_{obs} \\ P_{obs} \\ Si_{obs} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_T \\ R_S \\ R_O \\ R_N \\ R_P \\ R_{Si} \\ R_{cm} \end{bmatrix}.$$

Os parâmetros dos tipos de água representam uma matriz \mathbf{G} , a contribuição dos tipos de água é representada por um vetor \mathbf{x} , as características observadas estão representadas no vetor \mathbf{d} , ao passo que os resíduos representam o vetor \mathbf{r} . Os termos $-rO/P$, rN/P , rSi/P indicam as relações de Redfield, respectivamente, entre oxigênio, nitrato e silicato versus fósforo, e ΔP corresponde à mudança de concentração do fósforo devida à reatividade biogeoquímica.

Para chegar a uma solução na equação 2, uma normalização (\mathbf{G}') da matriz \mathbf{G} é necessária para tornar todos os parâmetros adimensionais e, portanto, comparáveis. Isto pode ser feito normalizando os elementos de \mathbf{G} pela variação total de cada parâmetro em \mathbf{G} . Se j indica o índice de linhas ($j = 1, \dots, m - 1$, com $m - 1$ sendo o número de

parâmetros observacionais) e i sendo o índice de colunas ($i = 1, \dots, n$, com n sendo o número de tipos de água), podemos obter \mathbf{G}' através da equação 5, dada por

$$G'_{ji} = (G_{ji} - \bar{G}_j) / \sigma_j \quad , \quad (5)$$

em que \bar{G}_j é a média na linha da matriz \mathbf{G} para o parâmetro j e σ_j o desvio padrão do parâmetro j .

As variáveis normalizadas são adimensionais, com média zero e possuem uma variação de ordem 1. A normalização torna todos os parâmetros comparáveis entre si, porém não os faz necessariamente adequados para a AMO.

Alguns parâmetros são difíceis de medir e possuem uma acurácia analítica ou instrumental muito baixa; outros podem variar mais com o tempo e espaço do que outros e podem também estar associados com alta variabilidade ambiental. Para considerar estas diferenças entre os parâmetros, os mesmos devem possuir pesos diferentes.

Tomczak & Large (1989) obtiveram os pesos relatando a variância de cada parâmetro na matriz \mathbf{G} (σ_j^2) com a medida de um fator externo a matriz \mathbf{G} : a maior variância obtida na região fonte (d_{jmax}). Ou seja, para cada região fonte foi calculada a variância para cada parâmetro (j) devido à variabilidade temporal e ambiental e utilizaram a maior variância para cada parâmetro na região fonte e obtiveram a matriz diagonal \mathbf{W} contendo os pesos, cujos os elementos são dados por

$$W_{jj} = \sigma_j^2 / d_{jmax} \quad . \quad (6)$$

Poole & Tomczak (1999) estabeleceram a matriz \mathbf{W} para tipos de água fonte no oceano Atlântico baseados na variabilidade ambiental e na precisão instrumental. Estes pesos serão os mesmos utilizados no presente trabalho e são encontrados na Tabela 2.

Tabela 2: Pesos atribuídos a cada parâmetro, para o oceano Atlântico, utilizados na AMO segundo *Poole & Tomczak (1999)*

Parâmetros	Peso
Temperatura (°C)	158,7
Salinidade	154,3
Oxigênio($\mu\text{mol/kg}$)	35,7
Silicato($\mu\text{mol/kg}$)	10,5
Nitrato ($\mu\text{mol/kg}$)	17,7
Fosfato ($\mu\text{mol/kg}$)	51,7
Conservação de Massa	158,7

4.3.1 Resolução pelo método dos mínimos quadrados com a restrição não-negativa

A AMO assume que as informações obtidas para cada parâmetro são de mesma qualidade, entretanto, isto raramente é obtido em oceanografia. Desta forma, a AMO aplica em \mathbf{G}' , a versão normalizada de \mathbf{G} , os pesos respectivos para cada parâmetro através matriz diagonal \mathbf{W} . Desta forma o quadrado dos resíduos, base do método dos mínimos quadrados, pode ser descrito por

$$\mathbf{r}^T \mathbf{r} = (\mathbf{G}'\mathbf{x} - \mathbf{d})^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} (\mathbf{G}'\mathbf{x} - \mathbf{d}) \quad , \quad (7)$$

$$= \sum_{j=1}^m W_j^2 \left(\sum_{i=1}^n G_{ji} x_i - d_j \right)^2 \quad . \quad (8)$$

Assim, é com esse erro ao quadrado ($\mathbf{r}^T \mathbf{r}$) que o método dos mínimos quadrados para funções de múltiplas variáveis é aplicado para resolver o sistema de equações 2. Uma descrição mais detalhada sobre a minimização ($\mathbf{r}^T \mathbf{r}$) pode ser encontrada em *Tomczak & Large (1989)* e, sobre o método dos mínimos quadrados para funções de várias variáveis,

pode ser encontrado em *Silva et al.* (1995).

Essa forma do método dos mínimos quadrados provê uma solução para o vetor \mathbf{x} que pode ser positivo ou negativo. Sabendo que a AMO não aceita contribuições negativas dos tipos de água fonte predefinidos, é então necessária uma restrição de não-negatividade. Esta restrição é conseguida através da teoria de Kuhn-Tucker. Em outras palavras, não podem simplesmente existir contribuições de concentrações negativas das propriedades, por estas serem desprovidas de significado físico.

4.3.2 A Razão de Redfield

A razão de Redfield foi incorporada na AMO para considerar o comportamento não-conservativo do oxigênio e dos nutrientes. Esta razão foi introduzida por *Redfield et al.* (1963) e é relativa ao consumo de oxigênio (ΔO), na remineralização do fosfato (ΔP) e do nitrato (ΔN) durante a oxidação de detritos.

A razão inicialmente proposta por *Redfield et al.* (1963) de O : N : P era de 138 : 15 : 1 para a água do mar de todos os oceanos. *Takahashi et al.* (1985), através de um outro método, propôs uma razão de Redfield de 171 : 17 : 1 para o Oceano Atlântico, esta razão foi usada por *Poole & Tomczak* (1999), que utilizou-a para a AMO no Atlântico Sul e será a mesma utilizada na aplicação da AMO neste trabalho.

O silício, ao contrário dos outros nutrientes, não depende diretamente da oxidação de matéria orgânica. A proporção de fosfato e nitrato pode diferir muito da proporção de silicato presente na água do mar. Isto ocorre pelo fato de diferentes proporções de diatomáceas (que utilizam o silício) em relação aos outros organismos do fitoplâncton, os quais não requerem silício. Conseqüentemente, a dissolução das testas das diatomáceas segue um rumo diferente do que a regeneração do fósforo e nitrogênio (*Redfield et al.*, 1963).

Na prática, isto significa que a razão de Redfield para o silício deve ser calculada para a região particular de estudo. *Poole & Tomczak* (1999) determinaram uma razão de $\Delta Si : \Delta P$ para todo o Oceano Atlântico igual a 10,5 : 1. Esta razão é da mesma ordem de magnitude da razão 15:1 sugerida originalmente por *Redfield et al.* (1963) e será a mesma utilizada por este trabalho.

4.3.3 Resíduos da conservação de massa

A AMO considera a conservação de massa, porém não obriga que essa condição seja sempre respeitada na solução para cada profundidade, o que acaba gerando resíduos. Estes resíduos podem servir como um controle de qualidade da AMO e quanto mais baixos, melhor será a qualidade da análise (*Poole & Tomczak, 1999*). Como a distribuição dos pesos também influi na conservação de massa, pode-se forçar ainda mais a conservação de massa, aumentando o peso da mesma em relação ao demais parâmetros. Porém, a maioria dos estudos (inclusive este trabalho) que utilizam a AMO, deixam o peso da conservação de massa igual ao peso da temperatura, que por sua vez possui o maior peso (*You & Tomczak, 1993; Poole & Tomczak, 1999; Karstensen & Tomczak, 1998*).

4.3.4 Seleção dos parâmetros para os tipos de água fonte

A AMO depende inteiramente para sua aplicação da matriz \mathbf{G} , onde se encontram os parâmetros (ou índices) dos tipos de água fonte (temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido e os nutrientes). A definição destes parâmetros é feita preferencialmente através da observação do comportamento e da variação, dos mesmos, na região fonte de cada tipo de água fonte ou através de dados obtidos, localmente ou na região fonte, e da literatura para cada tipo de água (*Poole & Tomczak, 1999*). Neste estudo, optou-se por usar índices somente da literatura, em caso contrário, seria necessária a observação de todos os parâmetros utilizados neste trabalho nas regiões fonte, o que obviamente não é possível.

As Tabelas 3, 4, 5, 6 e 7 mostram os índices obtidos para cada tipo de água fonte, que representam as seguintes massas de água : Água Tropical (AT), Água Central do Atlântico Sul (ACAS), Água Intermediária Antártica (AIA), Água Circumpolar Superior (ACS), Água Profunda do Atlântico Norte (APAN). Na Tabela 8, são mostrados os índices que foram utilizados na AMO.

Na escolha dos índices de entrada da AMO, foram levados em consideração a região de obtenção dos mesmos, a definição dos tipos de água relacionada aos máximos e mínimos dos parâmetros medidos e o erro total da Análise Multiparamétrica Ótima, de modo que este último fosse o menor possível. Os critérios utilizados foram:

- Para a AT: Na escolha do índice da AT, utilizou-se dados provindos de áreas de baixas latitudes (*Rezende et al.*, 2007) onde a evaporação é alta e considerada maior que a precipitação, e considerada como região fonte da AT. Utilizou-se também da definição apresentada por *Mémery et al.* (2000), que define o núcleo da AT como sendo o máximo de salinidade.
- Para a ACAS: Foi utilizado apenas um índice para a caracterização da ACAS. Apesar do fato dessa massa de água ocupar-se na faixa da termoclina, e conseqüentemente, definida por um amplo intervalo de temperatura e salinidade (*Tomczak*, 1999), optou-se por um único índice médio (*Maamaatuaiahutapu et al.*, 1994).
- Para a AIA: O índice referente à AIA foi obtido levando-se em consideração os mínimos de salinidade atribuídos a essa massa de água (*Zemba*, 1991; *Reid et al.*, 1977) e obtendo o valor de todos os outros parâmetros a esta mesma profundidade.
- Para a ACS: A ACS é uma massa de difícil caracterização, visto que poucos trabalhos consideram a existência dessa massa de água. Na obtenção dos índices referentes a essa massa de água, levou-se em consideração o mínimo de oxigênio dissolvido apresentado por ela (*Zemba*, 1991; *Mémery et al.*, 2000; *Maamaatuaiahutapu et al.*, 1994; *Silveira*, 2007).
- Para a APAN: Nos índices referentes a APAN levou-se em consideração os valores altos de oxigênio, temperatura, salinidade e sua pobreza em nutrientes em relação a massa adjacente superior a ACS. Em trabalhos como *Zemba* (1991) e *Reid et al.* (1977), a profundidade da APAN é decidida partindo das características citadas acima.

Tabela 3: Índices de densidade potencial convencional relativamente a 0 m (σ_0), temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido e nutrientes referentes a Água Tropical.

AT	Silveira (2007)	Mémery et al. (2000)	Braga & Niencheski (2006)	Rezende et al. (2007)
Densidade σ_0 (kg m^{-3})	-	25,2	-	-
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	> 20	24	>20	26,81
Salinidade	>36,20	37,5	>36,4	37,12
Oxigênio ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	-	-	182,88-219,87	182,87
Silicato ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	-	-	4,33-6,81	2
Nitrato ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	-	-	1,05-1,95	1,08
Fosfato ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	-	-	0,22-0,28	0,02

Tabela 4: Índices de densidade potencial convencional relativamente a 0 m (σ_0), temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido e nutrientes referentes a Água Central do Atlântico Sul.

ACAS	<i>Maamaatuaiaichutapu et al. (1994)</i>	<i>Poole & Tomczak (1999)</i>	<i>Mémery et al. (2000)</i>	<i>Silveira (2007)</i>
Densidade σ_0 (kg m^{-3})	-	-	26,5	-
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	16	6,55-16,26	14-16	8,72-20
Salinidade	35,8	34,40-35,65	-	34,66 – 36,20
Oxigênio ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	224,44	239,56-295,41	>220	-
Silicato ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	5	1,6-4,11	-	-
Nitrato ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	6	0-13	-	-
Fosfato ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	0,5	0,20-1,11	-	-

Tabela 5: Índices de densidade potencial convencional relativamente a 0 m (σ_0), temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido e nutrientes referentes a Água Intermediária Antártica.

AIA	<i>Maamaatuaiahutapu et al. (1994)</i>	<i>Zemba (1991)</i>	<i>Bostock (2005)</i>	<i>Hinrichsen & Tomczak (1993)</i>
Densidade σ_0 (kg m ³)	-	27,1-27,3	27,1	-
Temperatura (°C)	4	-	3,5	3,5
Salinidade	34,2	34,3	34,3-34,5	34,55
Oxigênio ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	232,75	216,13-249,38	200-250	165,2
Silicato ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	20	-	5—80	45
Nitrato ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	26,5	-	20-35	33
Fosfato ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	1,9	-	1,25-2,25	2,3

Tabela 6: Índices de densidade potencial convencional relativamente a 2000 m (σ_2), temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido e nutrientes referentes a Água Circumpolar Superior.

ACS	<i>Maamaatuaiahutapu et al. (1994)</i>	<i>Zemba (1991)</i>	<i>Mémery et al. (2000)</i>	<i>Silveira (2007)</i>
Densidade σ_2 (kg m ³)	-	36,7	36,5-36,95	-
Temperatura (°C)	2,5	-	-	3,46 – 3,31
Salinidade	34,2	34,6	-	34,42 – 34,59
Oxigênio ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	191,19	182,88-191,19	-	-
Silicato ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	70	50-60	-	-
Nitrato ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	29	-	-	-
Fosfato ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	2,2	-	-	-

Tabela 7: Índices de densidade potencial convencional relativamente a 2000 m (σ_2), temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido e nutrientes referentes a Água Profunda do Atlântico Norte.

APAN	<i>Maamaatuaiahutapu et al. (1994)</i>	<i>Zemba (1991)</i>	<i>Hinrichsen & Tomczak (1993)</i>	<i>Silveira (2007)</i>
Densidade σ_2 (kg m ³)	36,76	36,8-36,9	-	-
Temperatura (°C)	3	-	3,5	2,04-3,31
Salinidade	34,92	34,92-34,94	34,94	34,59 – 34,87
Oxigênio ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	232,75	232,75-245,22	271	-
Silicato ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	30	25-30	11	-
Nitrato ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	23,5	-	17,6	-
Fosfato ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	1,7	-	1,1	-

Tabela 8: Índices de temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido e nutrientes referentes a cada tipo de água fonte utilizados na AMO. O oxigênio dissolvido e os nutrientes estão em $\mu\text{mol kg}^{-1}$.

	Temp.(°C)	Sal.	O ₂	PO ₄ ³⁻	NO ₃ ⁻	Si(OH) ₄	Referências
AT	26,81	37,12	182,87	0,02	1,08	2	<i>Rezende et al. (2007)</i>
ACAS	16,26	35,80	224,0	0,50	6,0	5,00	<i>Maamaatuaiahutapu et al. (1994)</i>
AIA	3,9	34,20	232,75	1,9	26,5	20,0	<i>Maamaatuaiahutapu et al. (1994)</i>
ACS	2,5	34,55	182,0	2,2	29,0	50,0	<i>Maamaatuaiahutapu et al. (1994); Zemba (1991)</i>
APAN	3,5	34,94	271,8	1,1	17,6	11	<i>Hinrichsen & Tomczak (1993)</i>

5 Resultados e Discussão

Os resultados apresentados aqui são referentes a análise de totas as estações da áreas ao norte e ao sul da grade amostral (Figura 8) do conjunto de estações oceanográficas do cruzeiro OCEANPROF II. Os mesmos foram separados por massas de água e são apresentados a seguir.

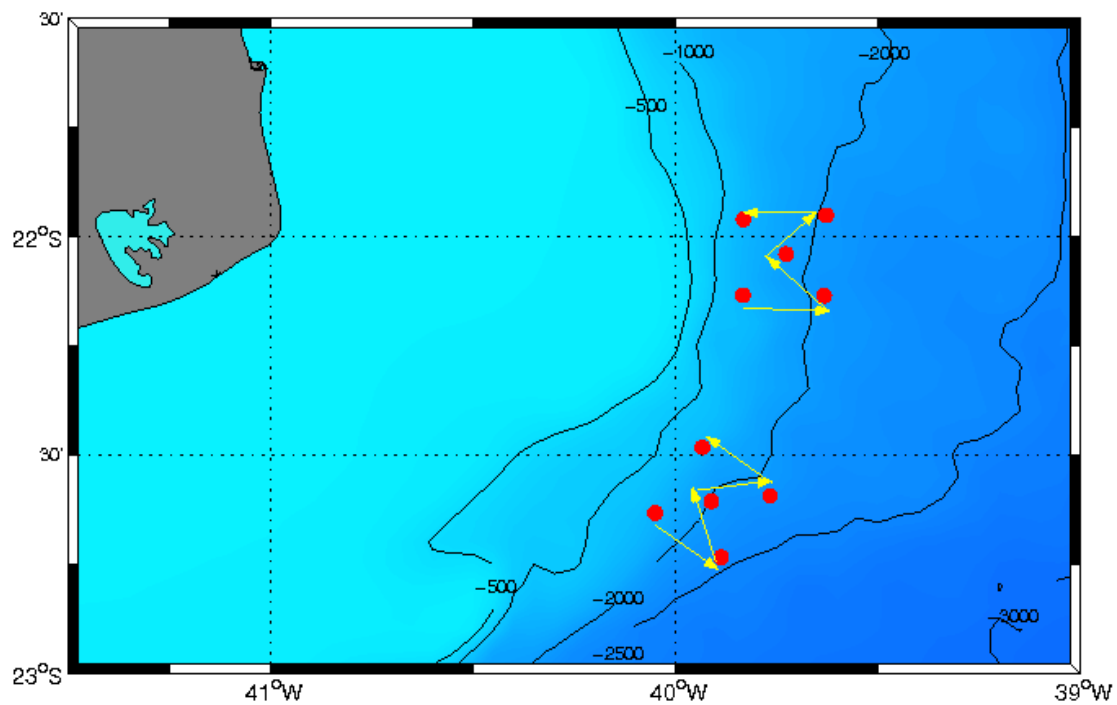


Figura 8: A ordem das estações oceanográficas (indicada pelas setas) do cruzeiro OCEANPROF II utilizadas na AMO para a obtenção das seções verticais.

5.1 Água Tropical

As Figuras 9 e 10 mostram as isolinhas de conteúdo percentual da massa de água AT pela profundidade. Percebe-se que essa massa de água está restrita aos primeiros 200 m de profundidade tanto ao norte quanto ao sul da grade amostral. Corroborando o que é sugerido por *Mémery et al.* (2000). O resíduo da conservação de massa para a faixa de densidade da AT ficou em torno de 5% (Figuras 11 e 12), porém foi o maior encontrado em toda a coluna de água. Este erro pode estar associado na dificuldade de se estabelecer um índice perfeitamente adequado para a Água Tropical, já que a mesma se encontra dentro da camada de mistura e em constante troca com a atmosfera. Portanto, parâmetros como a temperatura e a salinidade não podem ser considerados conservativos. A isolinha de

conteúdo percentual igual a 50% dessa massa de água foi encontrada na profundidade média de 153 m.

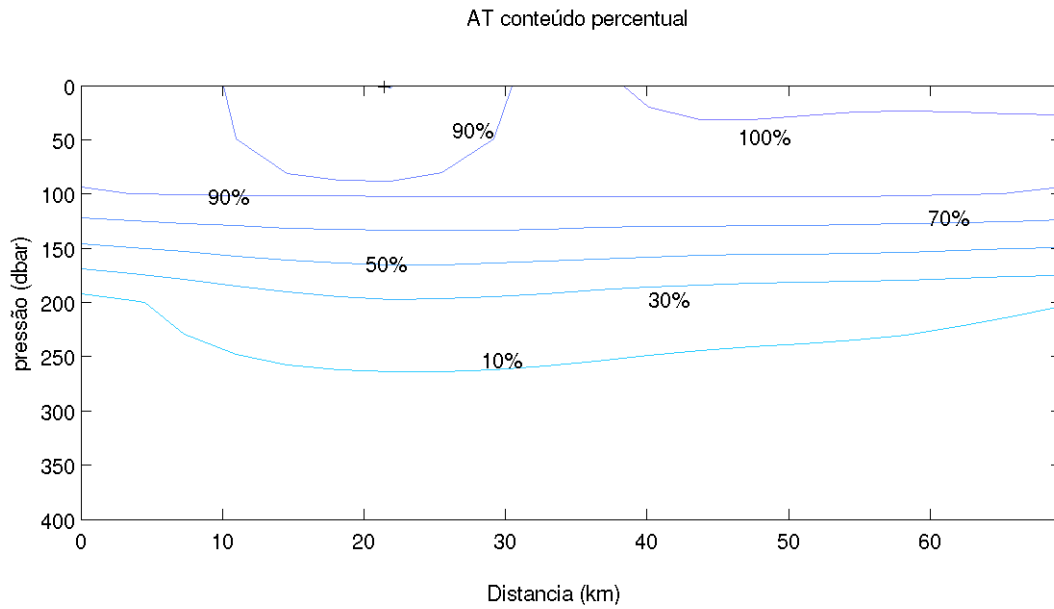


Figura 9: Isolinhas de conteúdo percentual da massa de Água Tropical (AT), segundo a AMO para as cinco estações ao norte da grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.

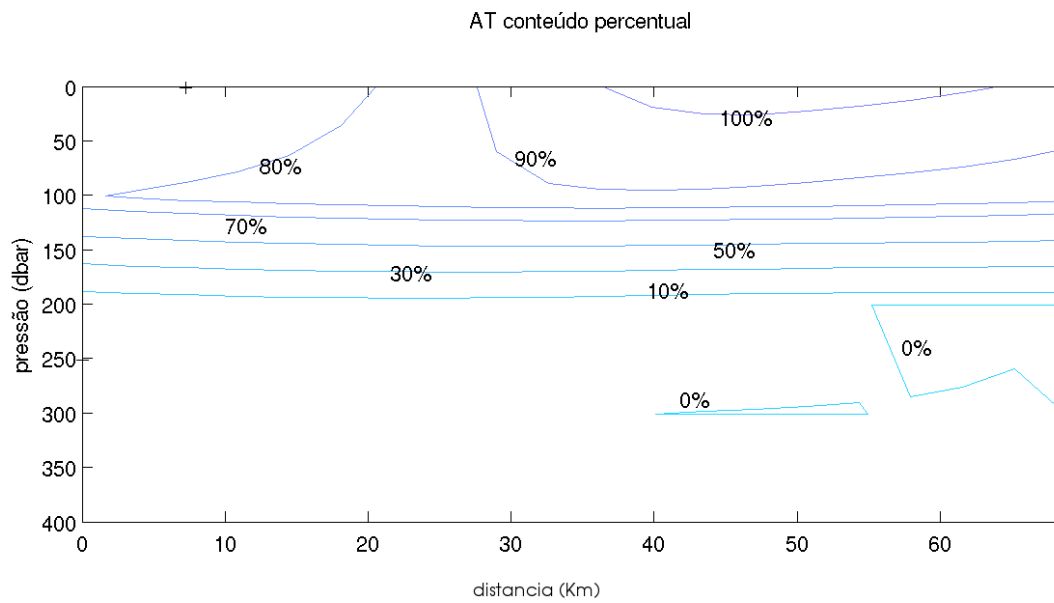


Figura 10: Isolinhas de conteúdo percentual da massa de Água Tropical (AT), segundo a AMO para as cinco estações ao sul da grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.

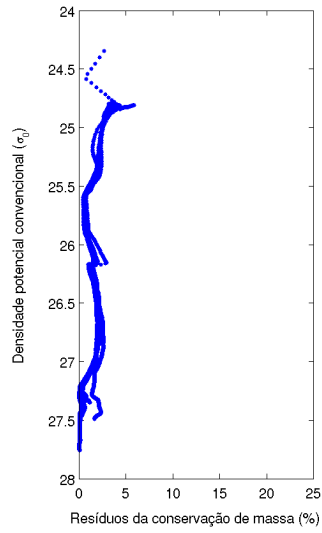


Figura 11: Percentual de resíduos da conservação de massa pela densidade potencial convencional (kg m^{-3}) gerados pela AMO durante a análise realizada ao norte da grade amostral.

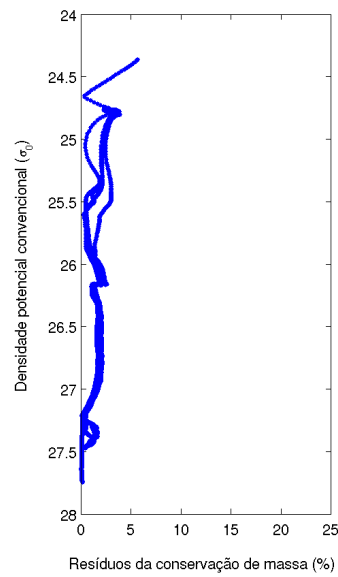


Figura 12: Percentual de resíduos da conservação de massa pela densidade potencial convencional (kg m^{-3}) gerados pela AMO durante a análise realizada ao sul da grade amostral.

5.2 Água Central do Atlântico Sul

Nas Figuras 13 e 14, pode-se observar que a região que a ACAS ocupa se encontra na pycnoclina. O conteúdo percentual superior desta massa de água se dá na profundidade média de 153 m. Este seria o correspondente à interface de 50% de mistura entre ACAS e a AT encontrada por *Silveira* (2007) a 142 m de profundidade.

Já o conteúdo percentual inferior se dá na profundidade média de 398 m, correspondente a interface ACAS-AIA. O núcleo da ACAS foi encontrado em cerca de 251 m de profundidade, resultado relativamente próximo do que foi encontrado para esta massa de água por *Poole & Tomczak* (1999), que encontraram a 300 m de profundidade.

O resíduo da conservação de massa, no intervalo de densidade que a ACAS ocupa - entre 25,70 e 26,80 segundo *Mamayev* (1975) - foi na ordem de 2%, o que indica que a o índice escolhido para esta massa de água possui provavelmente um grau maior de qualidade do que aquele escolhido para representar a AT.

O índice escolhido foi o mesmo utilizado por *Maamaatuaiahutapu et al.* (1994). Já *Poole & Tomczak* (1999) utilizaram dois índices, um superior e outro inferior para caracterizar a ACAS no Atlântico Sul, acreditando que desde modo a mesma seria melhor definida, pois esta massa sofre importantes modificações ao circular no Giro Subtropical. Porém, neste trabalho os resultados obtidos utilizando-se somente um único índice, o encontrado por *Maamaatuaiahutapu et al.* (1994), mostraram-se mais próximos aos obtidos por traçadores dinâmicos na região em estudo, já que a interface entre a ACAS e a AIA (quando calculada por métodos dinâmicos) é esperada em cerca de 400 m de profundidade na região do talude na Bacia de Campos (*Silveira et al.*, 2008), valor este aproximadamente igual ao obtido pela AMO neste estudo.

5.3 Água Intermediária Antártica

Nas Figuras 15 e 16, percebe-se que a AIA encontra-se entre aproximadamente 400 m e 1063 m, já que estas são as profundidades das isolinhas médias de conteúdo percentual de 50% superior e a inferior, respectivamente. *Maamaatuaiahutapu et al.* (1994) encontrou a AIA num intervalo de dominância entre 400 m e 1100 m em sua análise multiparamétrica na região da confluência Brasil-Malvinas. Enquanto *Silveira* (2007) definiu a 567 m a interface de mistura de 50% entre a ACAS a AIA e a 1060 m entre a AIA e a ACS, porém esses valores são resultados não-exclusivos à Bacia de Campos.

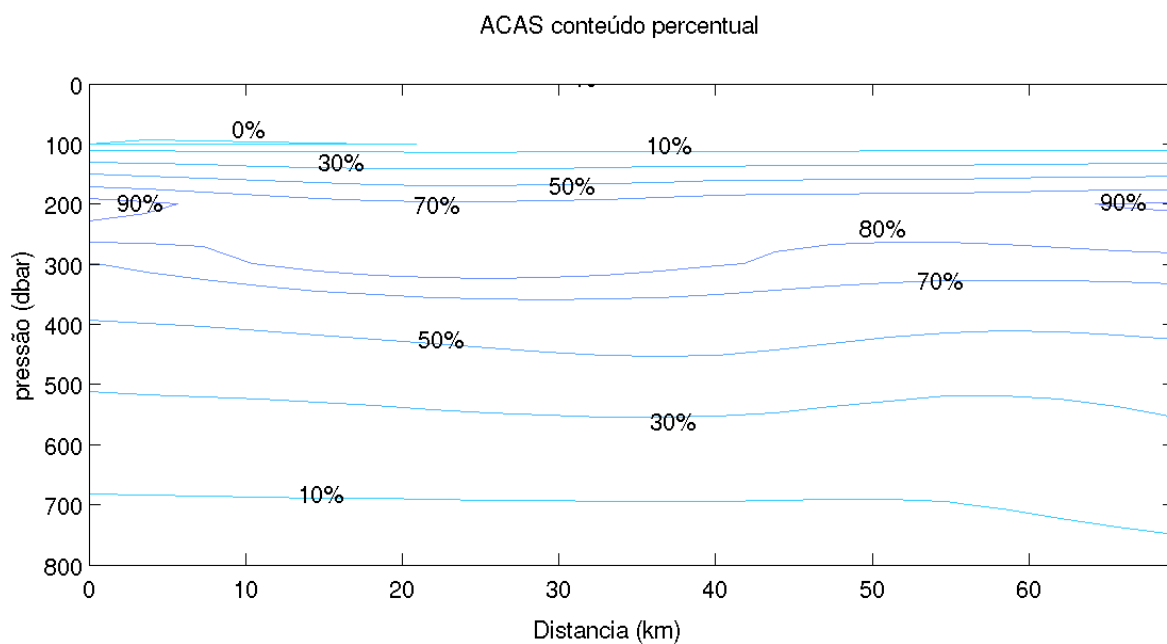


Figura 13: Isolinhas de conteúdo percentual da massa de Água Central do Atlântico Sul (ACAS), segundo a AMO para as cinco estações ao norte na grade amostral do cruzeiro OCEAN-PROF II.

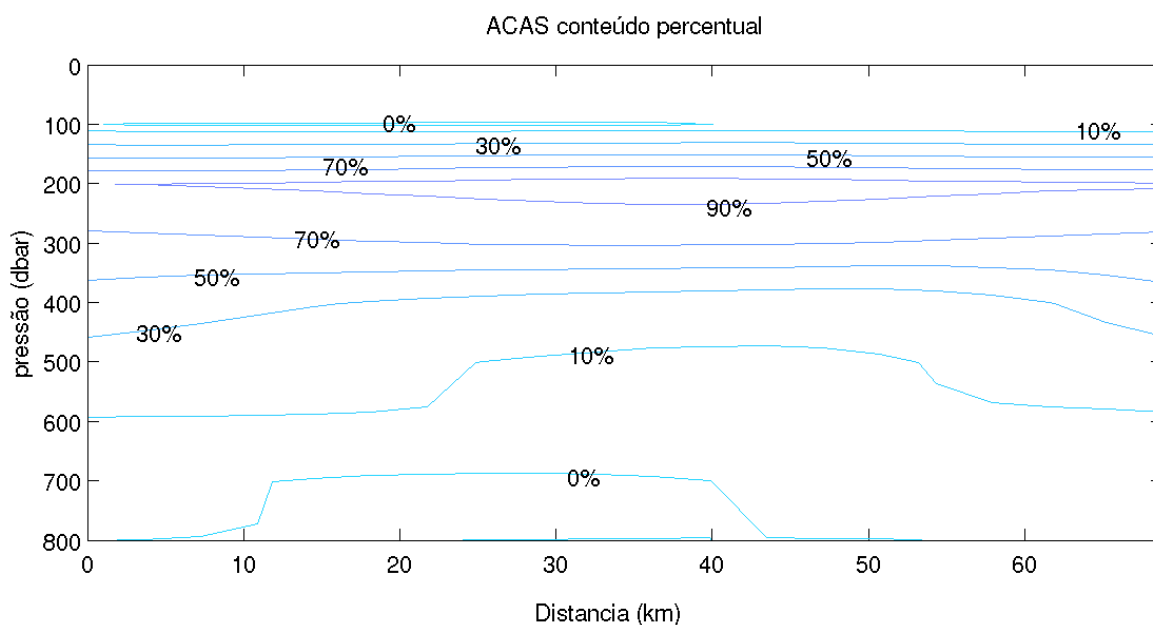


Figura 14: Isolinhas de conteúdo percentual da massa de Água Central do Atlântico Sul (ACAS), segundo a AMO para as cinco estações ao sul na grade amostral do cruzeiro OCEAN-PROF II.

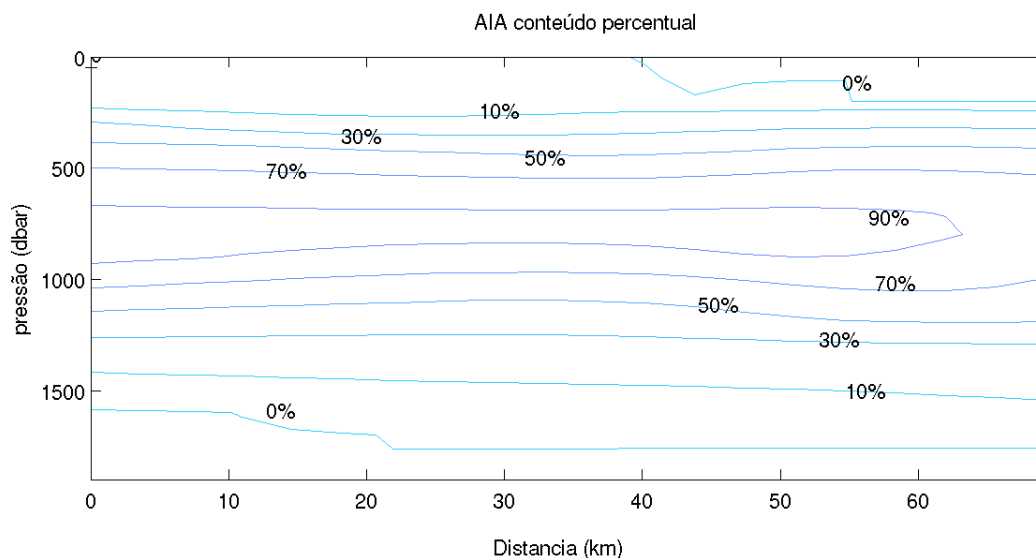


Figura 15: Isolinhas de percentual da massa de Água Intermediária Antártica (AIA), segundo a AMO para as cinco estações ao norte na grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.

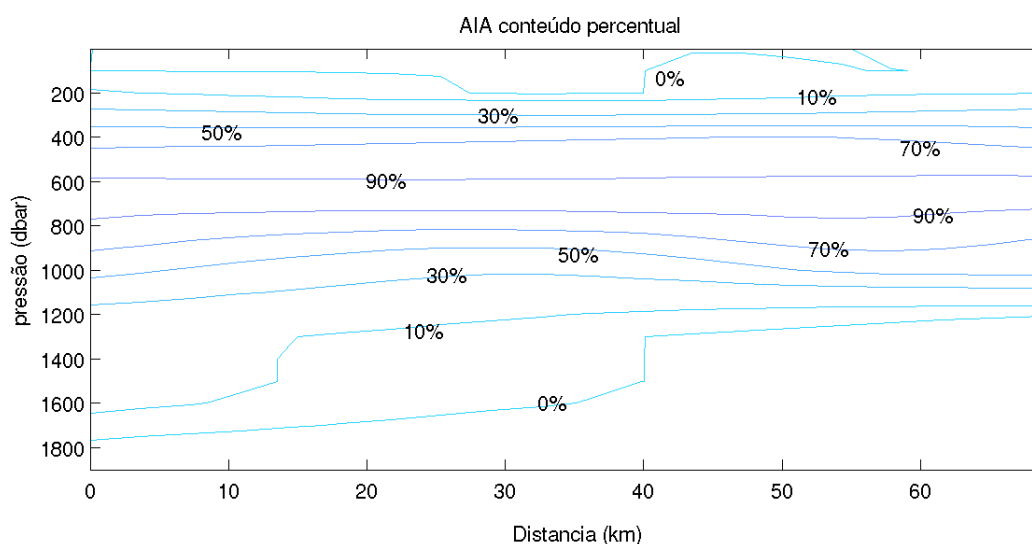


Figura 16: Isolinhas de percentual da massa de Água Intermediária Antártica (AIA), segundo a AMO para as cinco estações ao sul na grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.

Reid et al. (1977) e *Zemba* (1991) definem o núcleo da AIA, em cerca de 900 m, partindo do mínimo de salinidade, a Figura 2 mostra a faixa de densidade (σ_2) ocupada pelo núcleo da AIA, identificando-a pelo mínimo de salinidade. Este núcleo indicado por esses autores corresponde à região de maior conteúdo percentual da AIA encontrado neste estudo pela AMO em cerca de 800 m de profundidade. Deve-se ressaltar que a discrepância entre os resultados deste presente trabalho e os de *Reid et al.* (1977) e *Zemba* (1991) é decorrente da forma quantitativa com que estimou-se aqui a profundidade do núcleo. Este

foi avaliado como a profundidade média, das máximas concentrações obtidas para a AIA nas áreas norte e sul. Caso opte-se pela abordagem mais qualitativa, observa-se ampla faixa de valores maiores que 90% entre aproximadamente 700 m e 900 m.

5.4 Água Circumpolar Superior

O conteúdo percentual igual a 50% da massa de água ACS é identificada pela AMO na média entre 1060 m e 1350 m de profundidade (Figuras 17 e 18). Nos resultados apresentados pela AMO não são encontrados conteúdos percentuais maiores que 70%. Isto pode estar relacionado à escolha do índice para representar o tipo de água encontrado na ACS, que não é fácil de ser estabelecido, visto que existem poucos trabalhos que separaram a ACS da AIA (*Zemba, 1991; Silveira, 2007; Mémerly et al., 2000; Maamaatuaiahutapu et al., 1994*). Outra hipótese seria que a massa de água se estaria num estado de mistura avançado. Conseqüentemente a AMO pode então reconhecer a ACS, porém pode não encontrar percentuais altos do tipo de água definido como índice, já que os mesmos são calculados em relação a esse tipo de água.

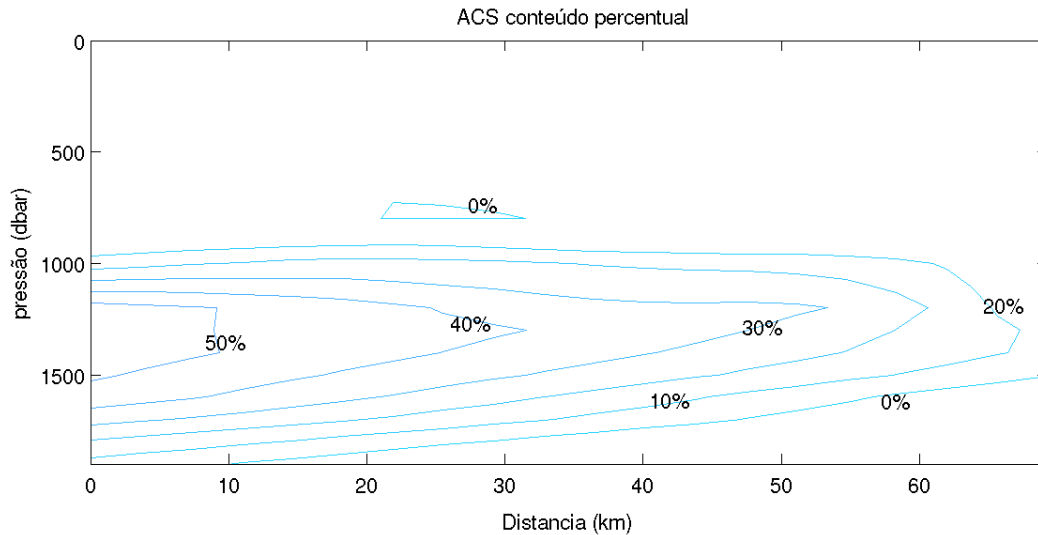


Figura 17: Isolinhas de percentual da massa de Água Circumpolar Superior, segundo a AMO para as cinco estações ao norte na grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.

Se considerarmos o método qualitativo de *Zemba (1991)*, exibido na Figura 2, pode-se perceber que não conseguimos separar a AIA da ACS através de parâmetros conservativos como a salinidade. Estas duas massas de água possuem temperatura e salinidade muito próximas, sendo necessário outros parâmetros para separá-las. O supra-referido trabalho

de *Zemba* (1991) utiliza-se do oxigênio dissolvido para distinguí-las em um perfil vertical, em termos de coordenadas isopicnais, da concentração de oxigênio (Figura 3). O mesmo tipo de padrão observado nas Figuras 2 e 3 é observado nos dados do cruzeiro OCEAN-PROF II (Figuras 19 e 20). Ainda é possível identificar um aumento na concentração de nutrientes (*Zemba*, 1991), principalmente o silicato (*Reid et al.*, 1977) na mesma faixa de densidade onde ocorre o mínimo de oxigênio típico da ACS ajudando a caracterizá-la (Figura 21).

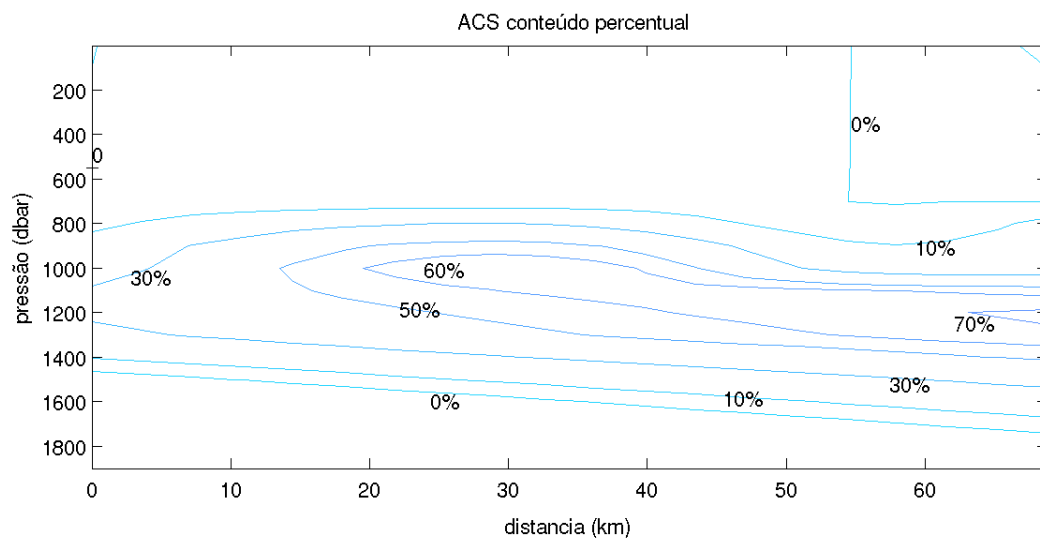


Figura 18: Isolinhas de percentual da massa de Água Circumpolar Superior, segundo a AMO para as cinco estações ao sul na grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.

As interfaces de mistura de 50% indicadas por *Silveira* (2007) para a ACS são 1060 m para a interface AIA-ACS e 1300 m para a ACS e a APAN. Já *Zemba* (1991) aponta o núcleo da ACS em torno de 1200 m de profundidade. Ambas referências mostram valores próximos ao encontrado pela AMO neste trabalho, visto que o núcleo apontado por *Zemba* (1991) está próximo as isolinhas de 50%, 60% e 70% mostradas nas Figuras 17 e 18 (maiores percentuais encontrados) e os dados de oxigênio dissolvido e de silicato mostrados nas Figuras 19 e 21 ajudam a confirmar a presença dessa massa de água na região de estudo.

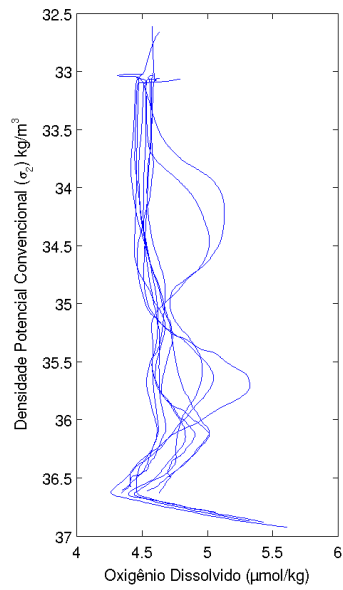


Figura 19: Densidade potencial convencional com referência a 2000 metros de profundidade (σ_2) em kg m^{-3} versus oxigênio dissolvido em ml l^{-1} das estações do cruzeiro OCEANPROF II.

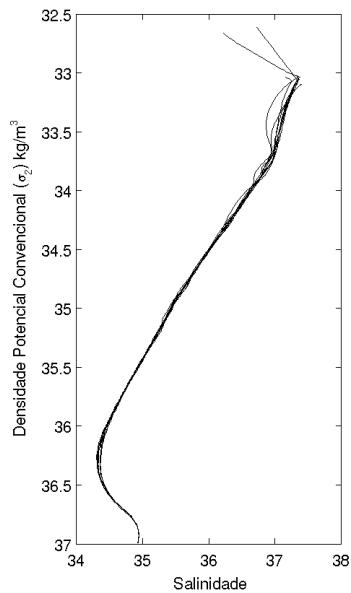


Figura 20: Densidade potencial convencional com referência a 2000 metros de profundidade (σ_2) em kg m^{-3} versus a salinidade das estações do cruzeiro OCEANPROF II.

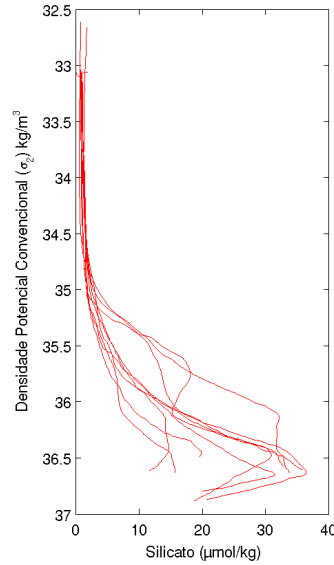


Figura 21: Densidade potencial convencional com referência a 2000 metros de profundidade (σ_2) em kg m^{-3} versus o silicato $\mu\text{mol kg}^{-1}$ nas estações do cruzeiro OCEANPROF II.

5.5 Água Profunda do Atlântico Norte

A faixa ocupada pela a APAN começa em cerca de 1350 m de profundidade média, onde encontra-se a isolinha de conteúdo percentual de 50% (Figuras 22 e 23). O núcleo dessa massa de água na profundidade média das estações se encontra a 1700 m. Neste estudo, só será discutido o limite superior da APAN, visto que o limite inferior se dá a profundidades maiores do que a profundidade da região onde foram realizadas as estações oceanográficas.

Essa massa de água é caracterizada pelas baixas concentrações de nutrientes e alta concentração de oxigênio dissolvido quando comparada à massa adjacente superior, a ACS (Zemba, 1991). Essa mesma autora define a APAN ocupando uma faixa de densidade igual a de $27,57 \text{ kg m}^{-3}$ entre 1200 m e 1300 m. Reid *et al.* (1977) considera o núcleo da APAN a cerca de 1200 m, partindo do máximo de salinidade, enquanto Silveira (2007) sugere como limite superior da APAN a interface de 50% de mistura entre a ACS e a APAN localizada a 1300 m de profundidade. Estes autores sugerem valores que são próximos aos encontrados pela AMO, porém utilizam-se de métodos diferentes para chegar a resultados parecidos.

Os resíduos da conservação de massa na faixa de densidade ocupado por essa massa foi o menor encontrado na coluna (Figuras 11 e 12), chegando a ser praticamente igual a zero.

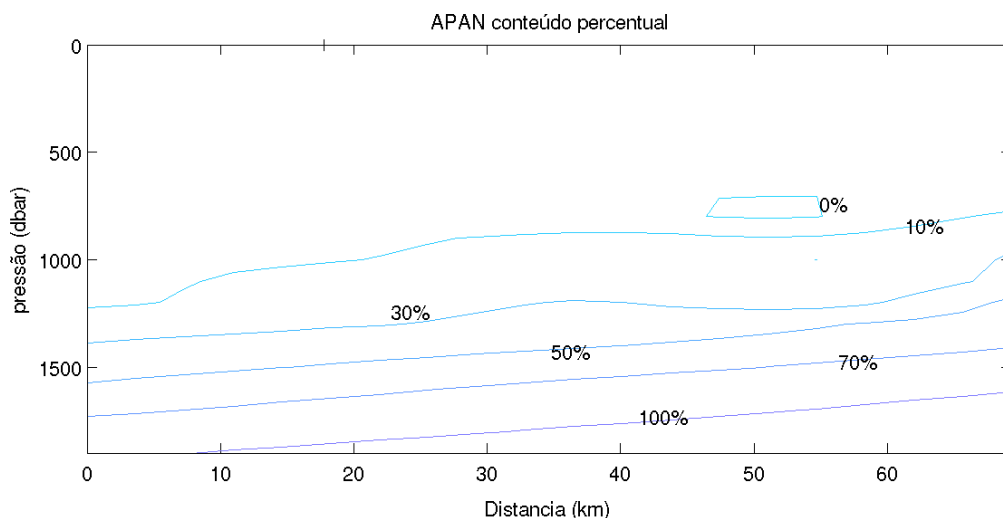


Figura 22: Isolinhas de percentual da massa de Água Profunda do Atlântico Norte (APAN), segundo a AMO para as cinco estações ao sul na grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.

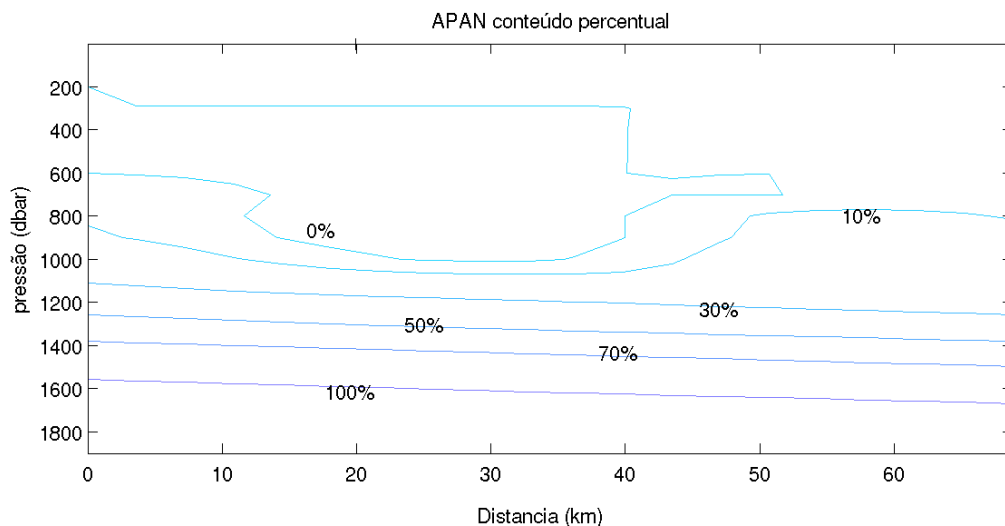


Figura 23: Isolinhas de percentual da massa de Água Profunda do Atlântico Norte (APAN), segundo a AMO para as cinco estações ao sul na grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.

6 Considerações Finais

Neste trabalho, a AMO foi aplicada pela primeira vez na Bacia de Campos. Para isso, foram utilizados dados de temperatura e salinidade amostrados via CTD e de dados de oxigênio dissolvido, nitrato, fosfato e silicato provindos de amostragem por garrafas hidrográficas, ou seja, parâmetros conservativos (temperatura e salinidade) e não-conservativos da água do mar (oxigênio dissolvido e nutrientes). Obteve-se como resultado a caracterização da coluna de água em termos quantitativos das respectivas massas de água que a compõe (AT, ACAS, AIA, ACS e APAN), bem como o estabelecimento das

interfaces médias entre estas massas. Foi possível também o estabelecimento das profundidades dos núcleos das massas de água, exceto aquelas localizadas nas extremidades da coluna de água (AT e APAN, no presente caso).

A Figura 24 e a Tabela 9 sintetizam os resultados obtidos nesta análise, identificando as profundidades, espessuras médias e núcleos das massas de água estudadas. Enfatiza-se a caracterização inédita da ACS para a região de estudo.

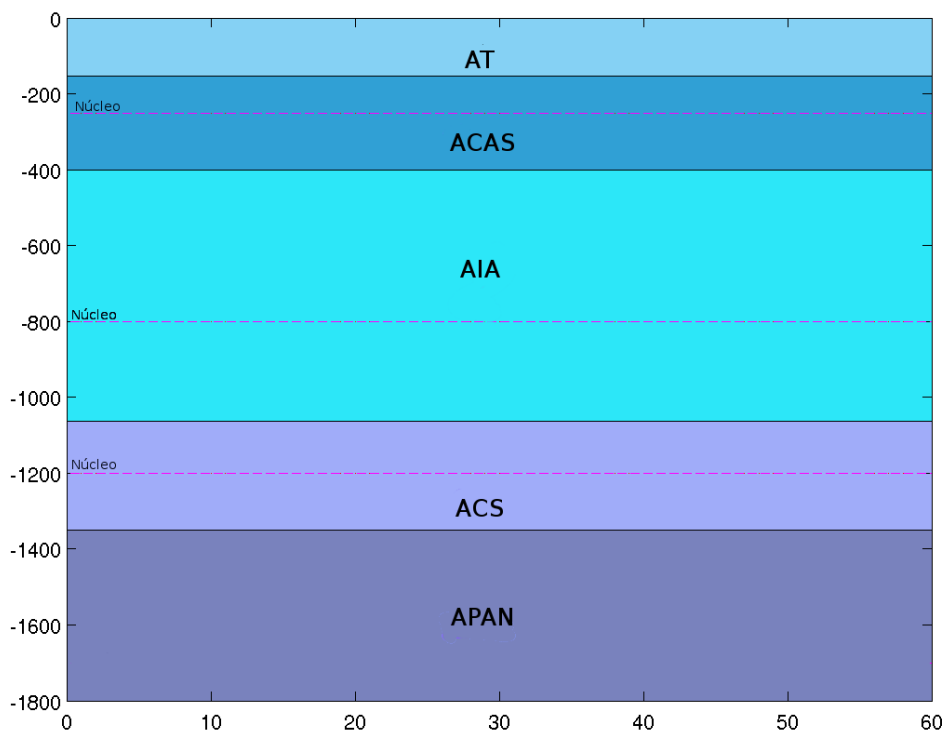


Figura 24: Limites médios das massas de água na Bacia de Campos de acordo com as isolinhas de conteúdo percentual igual 50% e posição dos núcleos na coluna de água.

Outro detalhe metodológico importante a ser ressaltado é a utilização, de forma satisfatória, de índices característicos das massas de água, Razões de Redfield e pesos selecionados da literatura. Este fato torna a AMO uma análise relativamente rápida e simples, partindo do pressuposto de um banco de dados pré-estabelecido. Os resultados apresentaram resíduos da conservação de massa satisfatórios, relativamente baixos e semelhantes com os encontrados em outros trabalhos que utilizam-se da análise multiparamétrica no Oceano Atlântico, em torno de 5% (Poole & Tomczak, 1999; Maamaatuaiahutapu et al., 1994).

Tabela 9: Limites médios das massas de água na Bacia de Campos de acordo com as isolinhas de conteúdo percentual igual 50% e profundidades médias dos núcleos de cada massa de água.

Interfaces	AT-ACAS	ACAS-AIA	AIA-ACS	ACS-APAN
Profundidade média (m)	153	400	1063	1350
Massas de Água	AT	ACAS	AIA	ACS
Profundidade média dos núcleos (m)	-	251	800	1200
				-

Diversos trabalhos vêm se utilizando e modificando a análise multiparamétrica para atingirem seus objetivos (*Perez et al.*, 2001; *Monaco et al.*, 2005; *de Brauwere et al.*, 2007; *Castro et al.*, 1998; *You et al.*, 2003). Neste trabalho, a utilização de dados de oxigênio e nutrientes interpolados para toda a coluna de água na AMO, possibilitou a utilização de todos os dados de temperatura e salinidade da coluna de água, medidos quase-continuamente pelo CTD. Em princípio, tal procedimento deveria fornecer uma maior confiabilidade aos resultados obtidos, visto que, são estes os dois parâmetros (junto à conservação de massa) de maior peso na AMO. Em contra-partida, requer a interpolação dos dados adquiridos de forma discreta (oxigênio dissolvido e nutrientes). Como mencionado na Seção 4.1, o esquema de interpolação do tipo *cubic-spline* coincide os máximos e mínimos dos perfis interpolados com os valores amostrados.

A título de verificar o efeito da interpolação dos perfis de oxigênio dissolvido e nutrientes, repetiu-se a AMO de forma discreta, ou seja, aplicando-a apenas aos pontos onde foram fechadas as garrafas hidrográficas. Os resultados de tal análise são encontrados no ANEXO I. Neste, observa-se que os resultados diferem muito pouco daqueles interpolados. Aliás, ressalta-se que este resultado é automaticamente interpolado após o sistema matricial (equação 4) ter sido resolvido. Portanto, concluí-se que a análise discreta é computacionalmente mais eficiente que aquela com perfis interpolados. No entanto, no presente estudo, a interpolação colaborou para uma verificação adicional considerando as análises qualitativas de *Reid et al.* (1977) e *Zemba* (1991). Tais comparações são válidas e relevantes visto que a AMO não havia sido ainda aplicada no Atlântico Sudoeste.

7 ANEXO I

Nas Figuras 25 e 26 encontram-se os percentuais da Água Tropical, sendo que a interface de 50% média entre a AT e a ACAS ficou em torno de 162 m de profundidade.

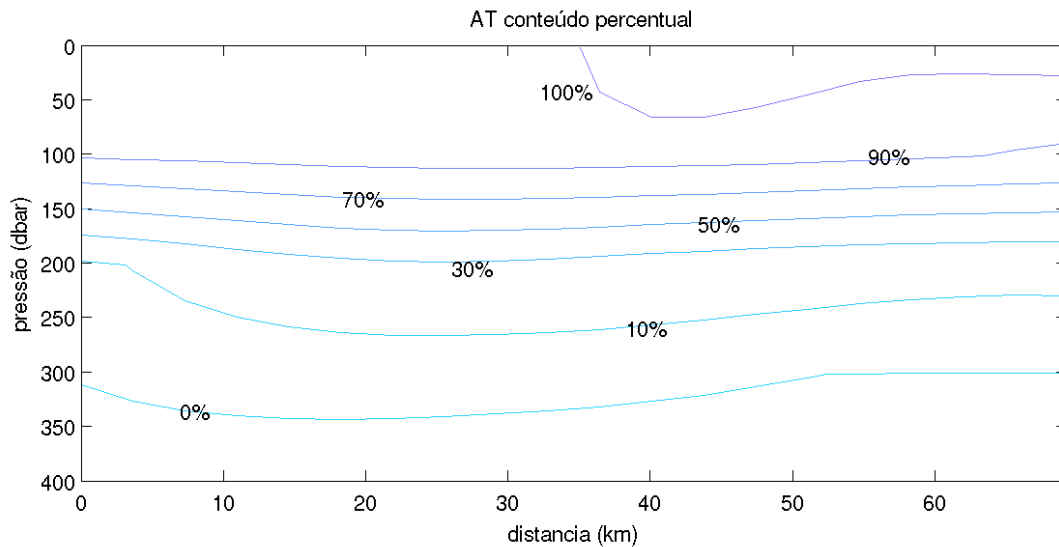


Figura 25: Isolinhas de conteúdo percentual da massa de Água Tropical (AT), segundo a AMO calculada a partir de dados discretos, para as cinco estações ao norte da grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.

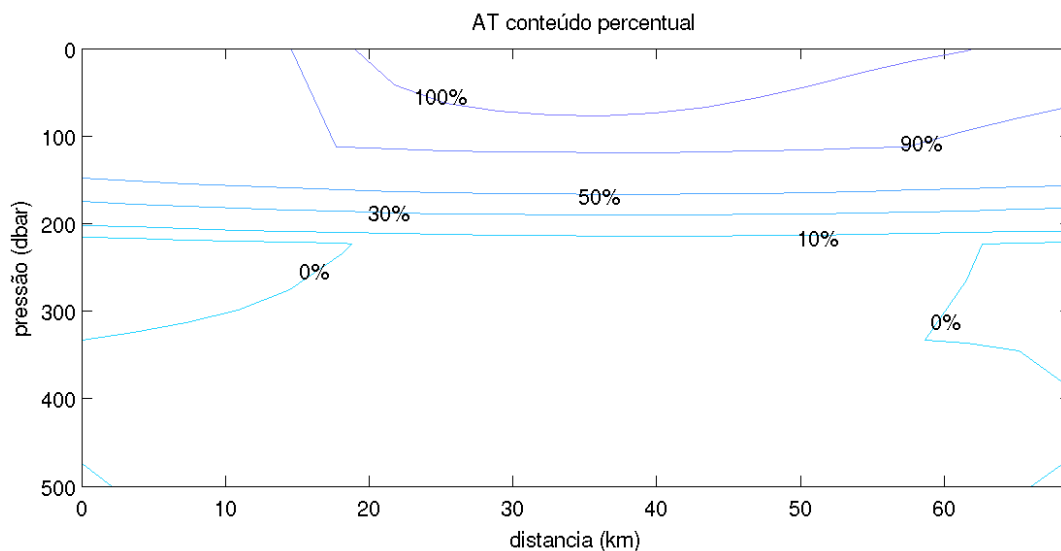


Figura 26: Isolinhas de conteúdo percentual da massa de Água Tropical (AT), segundo a AMO calculada a partir de dados discretos, para as cinco estações ao sul da grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.

Nas figuras 27 e 28 são mostrados os conteúdos percentuais da ACAS, tendo a 162

m de profundidade a interface AT-ACAS. Já a interface entre a ACAS e a AIA ficou em torno de 404 m de profundidade e o núcleo dessa massa foi encontrado na profundidade média de 245 m.

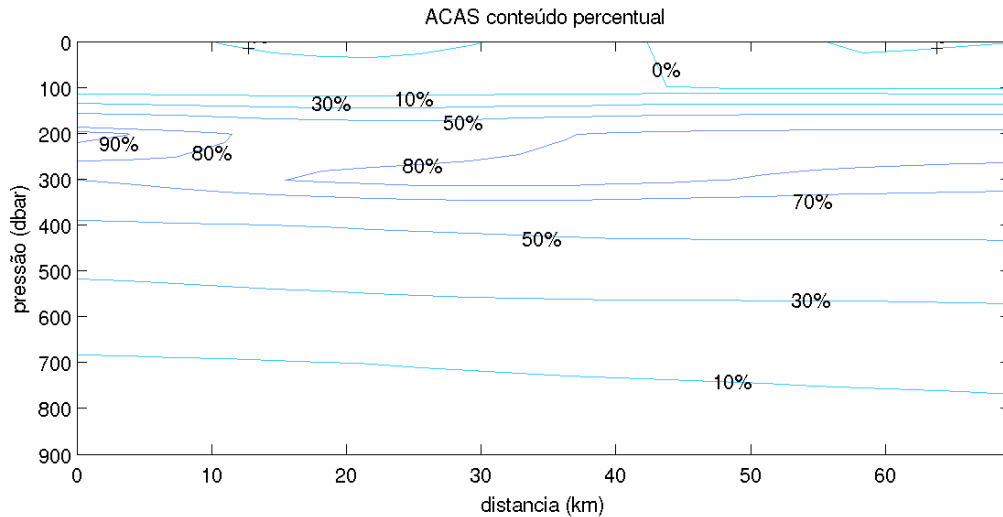


Figura 27: Isolinhas de conteúdo percentual da massa de Água Central do Atlântico Sul (ACAS), segundo a AMO calculada a partir de dados discretos, para as cinco estações ao norte na grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.

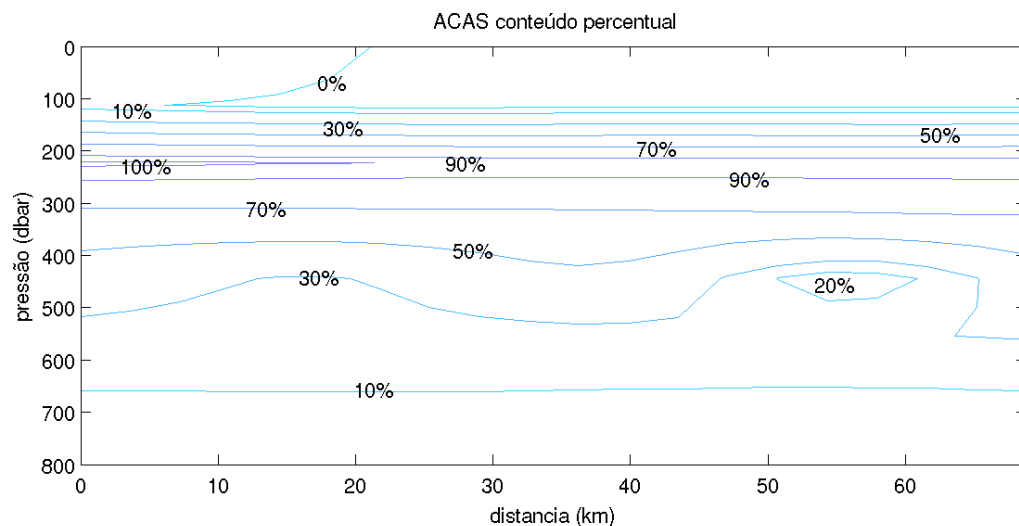


Figura 28: Isolinhas de conteúdo percentual da massa de Água Central do Atlântico Sul (ACAS), segundo a AMO calculada a partir de dados discretos, para as cinco estações ao sul na grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.

As Figuras 29 e 30 mostram o conteúdo percentual da AIA nas porções norte e sul respectivamente, sendo que a interface de 50% média ACAS-AIA foi encontrada a 404 m

de profundidade. E a interface AIA-ACS em 1173 m de profundidade. O núcleo da AIA foi encontrado a profundidade média de 790 m.

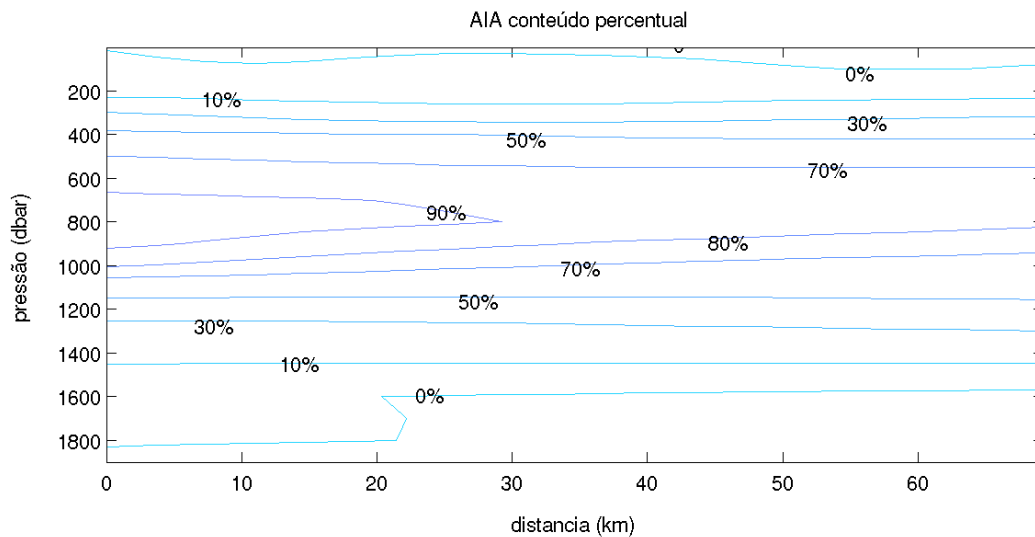


Figura 29: Isolinhas de percentual da massa de Água Intermediária Antártica (AIA), segundo a AMO calculada a partir de dados discretos, para as cinco estações ao norte na grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.

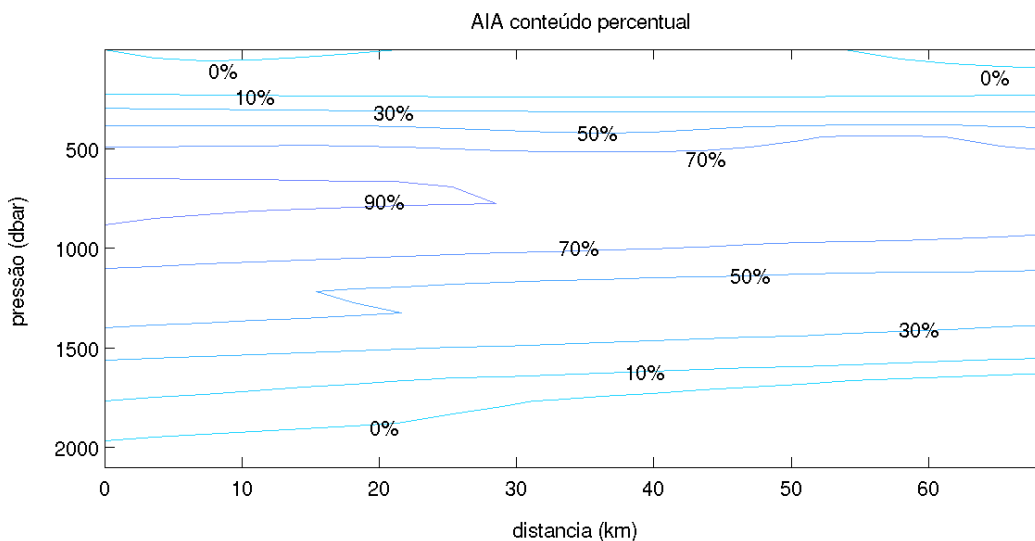


Figura 30: Isolinhas de percentual da massa de Água Intermediária Antártica (AIA), segundo a AMO calculada a partir de dados discretos, para as cinco estações ao sul na grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.

As Figuras 31 e 32 mostram as isolinhas de conteúdo percentual da Água Circumpolar Superior (ACS). A interface entre a AIA e a ACS é encontrada a 1173 m de profundidade, já a interface ACS-APAN é encontrada em 1362 m de profundidade, sendo que seu núcleo,

considerado a região média de maior percentual de massa, foi encontrado em 1250 m de profundidade.

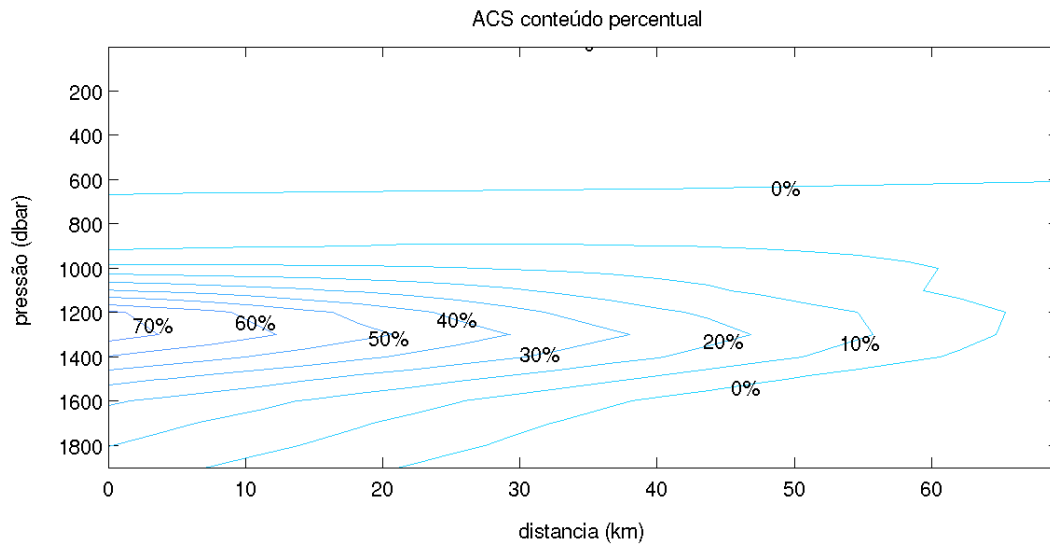


Figura 31: Isolinhas de percentual da massa de Água Circumpolar Superior, segundo a AMO calculada a partir de dados discretos, para as cinco estações ao norte na grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.

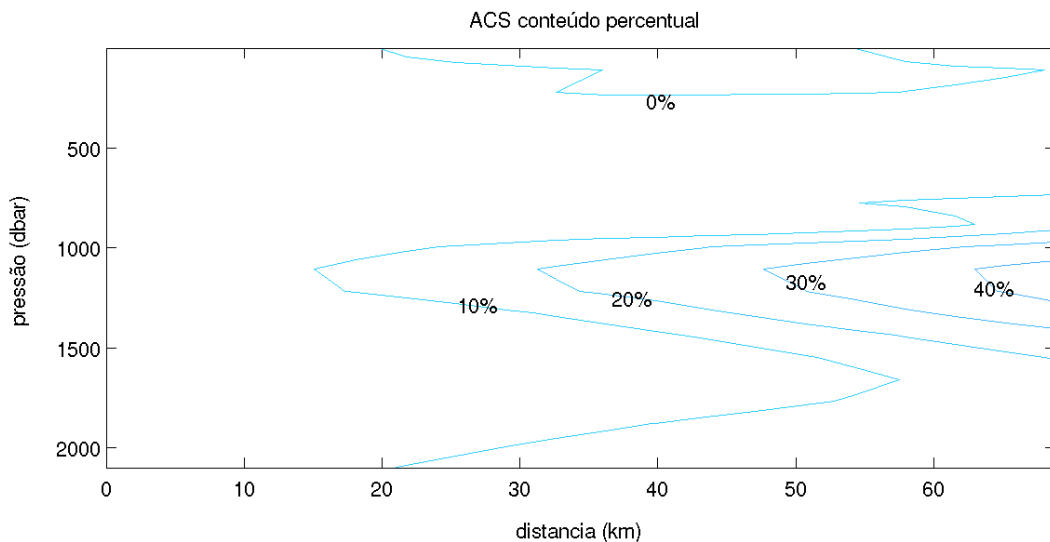


Figura 32: Isolinhas de percentual da massa de Água Circumpolar Superior, segundo a AMO calculada a partir de dados discretos, para as cinco estações ao sul na grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.

Nas Figuras 33 e 34 encontram-se as isolinhas de conteúdo percentual da Água Profunda do Atlântico Norte nas porções norte e sul da grade amostral. Sendo que a interface média entre a ACS e a APAN foi encontrada em 1362 m de profundidade e a região de

maior percentual dessa massa de água se deu a profundidade de 1700 m de profundidade.

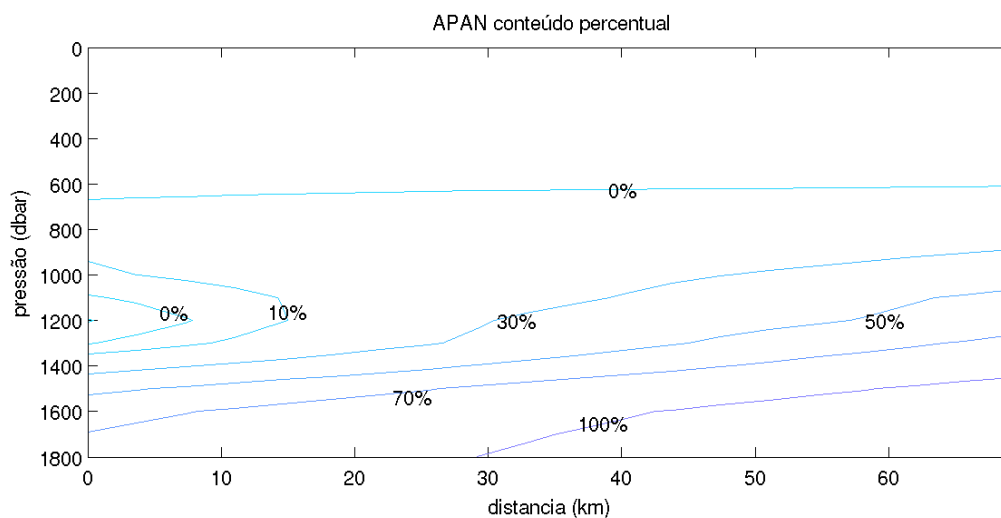


Figura 33: Isolinhas de percentual da massa de Água Profunda do Atlântico Norte (APAN), segundo a AMO calculada a partir de dados discretos, para as cinco estações ao sul na grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.

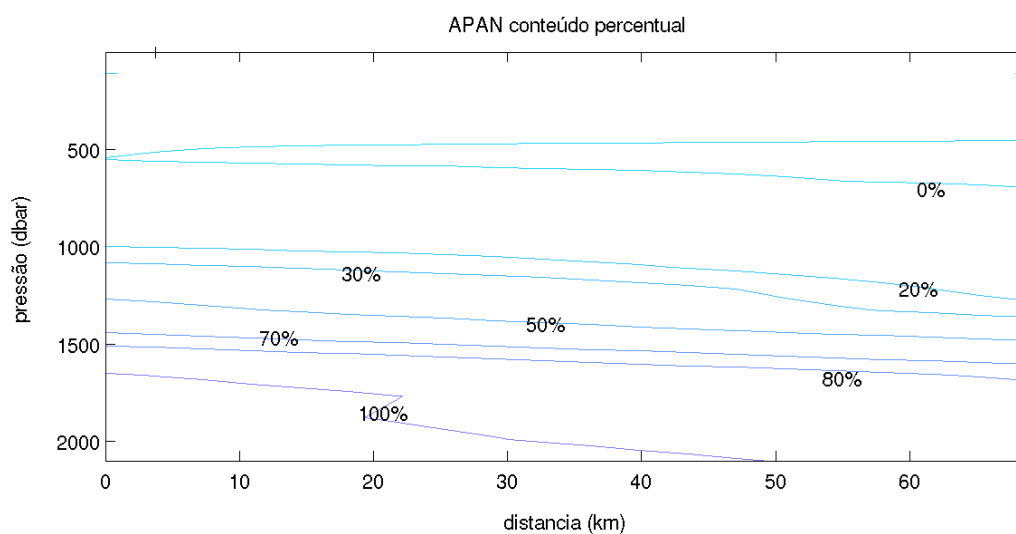


Figura 34: Isolinhas de percentual da massa de Água Profunda do Atlântico Norte (APAN), segundo a AMO calculada a partir de dados discretos, para as cinco estações ao sul na grade amostral do cruzeiro OCEANPROF II.

As Figuras 35 e 36 mostram os resíduos da conservação de massa nas análises ao norte e ao sul da grade amostral.

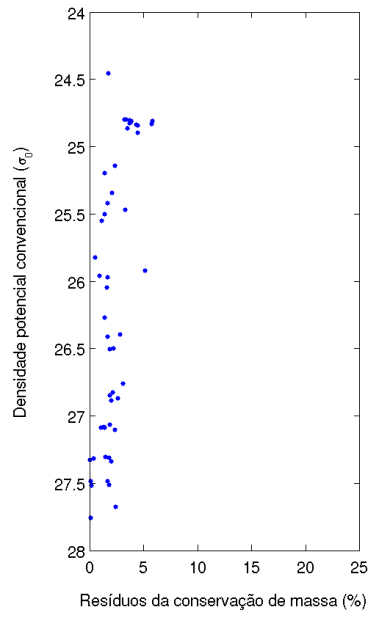


Figura 35: Percentual de resíduos da conservação de massa pela densidade potencial convencional (kg m^{-3}) gerados pela AMO, calculada com dados discretos, durante a análise realizada ao norte da grade amostral.

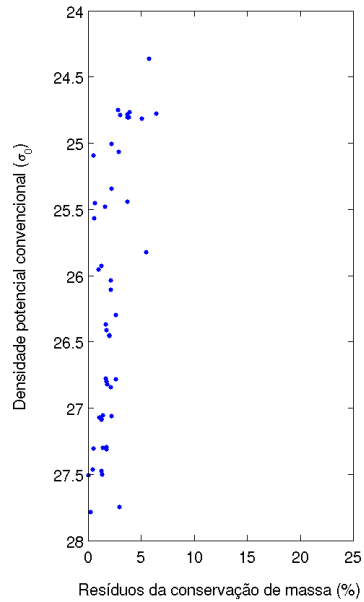


Figura 36: Percentual de resíduos da conservação de massa pela densidade potencial convencional (kg m^{-3}) gerados pela AMO, calculada com dados discretos, durante a análise realizada ao sul da grade amostral.

Referências

- Bostock, H. C., 2005: Geochemically tracing the intermediate and surface waters in the Tasman Sea, southwest Pacific. Tese de Doutorado, The Australian National University, 207 pp.
- Braga, E. S. & L. F. H. Niencheski, 2006: *Composição das massas de água e seus potenciais produtivos na área entre o Cabo de São Tomé (RJ) e o Chuí (RS)*. In: *O ambiente Oceanográfico da Plataforma Continental e do Talude na Região Sudeste-Sul do Brasil*. Ed: C. L. B. Rossi-Wongtschowski; L. S. Madureira. Edusp, São Paulo, 353 pp.
- Castro, C., F. Perez, S. Holleyb, & A. Rios, 1998: Chemical characterisation and modeling of water masses in the Northeast Atlantic. *Progress in Oceanography*, 41, 249–279.
- CNEXO, 1983: *Manuel de analyses chimiques au milieu marin*. In: *CNEXO-BNDO Documentation Eds: A. Aminot and M. Chaussepied*. Brest, 374 pp.
- de Brauwere, A., S. H. M. Jacquet, F. D. Ridder, F. Dehairs, R. Pintelon, J. Schoukens, & W. Baeyens, 2007: Water mass distributions in the Southern Ocean derived from a parametric analysis of mixing water masses. *Journal of Geophysical Research*, 112(C02021), doi:10.1029/2006JC003.742.
- Deacon, G. E. R., 1937: The hydrology of the Southern Ocean. *Discovery Reports*, (15).
- Emílson, I., 1961: The shelf and coastal waters off Southern Brazil. *Boletim do Instituto Oceanográfico*, 17(2), 101–112.
- Grasshoff, K., M. Erhardt, & K. Kremling, 1999: *Methods of Seawater Analysis*. Wiley-Verlag Chemie, Weinheim, 3^a edição, 600 pp.
- Hinrichsen, H. H. & M. Tomczak, 1993: Optimum multiparameter analysis of the water mass structure in the western North Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research*, (98), 155–169.
- Karstensen, J. & M. Tomczak, 1998: Age determination of mixed water masses using CFC and oxygen data. *Journal of Geophysical Research*, 103, 18.599–18.610.

- Maamaatuaiahutapu, K., V. C. Garyon, C. Provost, M. Boulahdid, & A. A. Bianchi, 1994: Spring and winter water mass composition in the Brazil-Malvinas Confluence. *Journal of Marine Research*, (52), 397–426.
- Mackas, D., K. Denman, & A. Bennett, 1987: Least squares multiple tracer analysis of water mass composition. *Journal of Geophysical Research*, 92, 2907–2918.
- Mamayev, O. I., 1975: *Temperature-salinity analysis of world ocean waters*. Elsevier Scientific Publication, Amsterdam, 374 pp.
- Mattos, R. A., 2003: Avaliação da geostrofia do Sistema Corrente do Brasil ao largo de Cabo Frio (23). *Monografia de Graduação. Universidade de São Paulo, São Paulo*. 40 pp.
- Miranda, L. B., 1983: *Análises de massas de água*. Escuela Naval Almirante Padilla, Cartagena, 200 pp.
- Monaco, C. L., N. Metzl, A. Poisson, C. Brunet, & B. Schauer, 2005: Anthropogenic CO₂ in the Southern Ocean: Distribution and inventory at the Indian-Atlantic boundary (World Ocean Circulation Experiment line I6). *Journal of Geophysical Research*, 110(C06010), doi:10.1029/2004JC002.643.
- Mémery, L., M. Arhan, X. A. Alvarez-Salgado, M. J. Messia, H. Mercier, C. G. Castro, & A. F. Rios, 2000: The water masses along the western boundary of the south and equatorial Atlantic. *Progress in Oceanography*, (47), 69–98.
- Paranhos, R., 1996: *Alguns métodos para análise da água*. Sub-Reitoria de Ensino de Graduação e Corpo Discente-UFRJ, Rio de Janeiro, 200 pp.
- Perez, F. F., L. Mintrop, O. Llinas, M. Glez-Davila, C. G. Castro, M. Alvarez, A. Kortzinger, M. Santana-Casiano, M. Rueda, & A. F. Rios, 2001: Mixing analysis of nutrients, oxygen and inorganic carbon in the Canary Islands region. *Journal of Marine Systems*, 28, 183–201.
- Poole, R. & M. Tomczak, 1999: Optimum multiparameter analysis of the water mass structure in the Atlantic Ocean thermocline. *Deep-Sea Research I*, (46), 1895–1921.

- Redfield, A. C., B. H. Ketchum, & F. A. Richards, 1963: *The influence of organisms on the composition of sea-water. In: The Sea: Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas. Ed: M. N. Hill. Wiley, London. Vol.2, 550 pp.*
- Reid, J. L., W. D. Nowlin, & W. C. Patzert, 1977: On the characteristics and circulation of the southwestern Atlantic Ocean. *Journal of Physical Oceanography*, (7), 62–91.
- Rezende, C. E., L. Andrade, M. S. Suzuki, B. C. M. T. Faro, A. S. M. Gonzalez, & R. Paranhos, 2007: *Hidroquímica. In: Características hidrobiológicas da região central da Zona Econômica Exclusiva brasileira (Salvador, BA, ao Cabo de São Tomé, RJ). Ed: J. L. Valentin. Série Documentos REVIZEE/Score Central- Ministério do Meio Ambiente, Brasília. 168 pp.*
- Shtokman, V. B., 1943: Geometrical properties of T–S curves in the mixing of three water masses in a infinite sea. *Problems of Arctic*, 1, 32–71.
- Silva, W. P., C. M. D. Silva, & M. S. Nascimento, 1995: *Tratamento de dados experimentais. Universitária-UFBA, João Pessoa. 146 pp.*
- Silveira, I. A. C., J. A. M. Lima, A. C. K. Schmidt, W. Ceccopieri, A. Sartori, C. P. F. Francisco, & R. F. C. Fontes, 2008: Is the meander growth in the Brazil current system off Southeast Brazil due to baroclinic instability? *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, pág. doi:10.1016/j.dynatmoce.2008.01.002.
- Silveira, I. C. A., 2007: O Sistema Corrente do Brasil na Baía de Campos, RJ. *Tese de Livre Docência. Universidade de São Paulo, São Paulo. 181 pp.*
- Stommel, H., 1979: Determination of water mass properties of water pumped down from the Ekman layer to the geostrophic flow below. *Process National Academics Science*, 76 (7), 3051–3055,.
- Stramma, L. & M. England, 1999: On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 104 (C9), 20.863–20.883.
- Sverdrup, H. U., M. W. Johnson, & R. H. Fleming, 1942: *The Oceans, their physics, chemistry, and general biology. Prentice-Hall, New Jersey, 1087 pp.*

- Takahashi, T., W. S. Broecker, & S. Langer, 1985: Redfield ratio based on chemical data from isopycnal surfaces. *Journal of Geophysical Research*, (90), 6907–6924.
- Talley, L. D., 1996: *Antarctic Intermediate Water in the South Atlantic*. In: *The South Atlantic: Present and past circulation*, Ed: G. Wefer. Springer Verlag, New York, 219–238 pp.
- Talley, L. D. & T. Suga, 1995: Antarctic Intermediate Water circulation in tropical and subtropical South Atlantic. *Journal of Geophysical Research*, 100 (7), 13.441–13.453.
- Thompson, R. O. R. Y. & W. Edwards, 1981: Mixing and water-mass formation in the Australian Subantarctic. *Journal of Physical Oceanography*, (11), 1399–1406.
- Tomczak, M., 1981: A multiparameter extension of temperature/salinity diagram techniques for the analysis of non-isopycnal mixing. *Progress in Oceanography*, 10, 147–171.
- Tomczak, M., 1999: Some historical, theoretical and applied aspects of quantitative water mass analysis. *Journal of Marine Research*, (57), 275–303.
- Tomczak, M. & J. S. Godfrey, 1994: *Regional oceanography: an introduction*. Pergamon, Great Britain. 422 pp.
- Tomczak, M. & D. G. B. Large, 1989: Optimum multiparameter analysis of mixing in the thermocline of the eastern Indian Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 94, 16.141–16.149.
- Viana, A. R., J. C. Faugères, R. O. Kowsmann, J. A. M. Lima, L. F. G. Caddah, & J. G. Rizzo, 1998: Hydrology, morphology and sedimentology of the Campos continental margin, offshore Brazil. *Sedimentary Geology*, 115, 133–157.
- Wüst, G., 1936: Schichtung und Zirkulation des Atlantischen Ozeans: Das Bodenwasser und die Gliederung der Atlantischen Tiefsee. *Wissenschaftliche Ergebnisse der Deutschen Atlantischen Expedition "Meteor" 1925-1927*, VI (1), 3–107.
- You, Y., J. R. Lutjeharms, O. Boebel, & W. P. M. de Ruijter, 2003: Quantification of the interocean exchange of intermediate water masses around southern Africa. *Deep-Sea Research II*, 50, 197–228.

You, Y. & M. Tomczak, 1993: Thermocline circulation and ventilation in the Indian Ocean derived from water mass analysis. *Deep-Sea Research I*, (40), 13–56.

Zemba, J. C., 1991: The structure and transport of the Brazil Current between 27° and 36° South. Tese de Doutorado, Massachusetts Institute of Technology and Woods Hole Oceanographic Institution, 160 pp.

Herminio Foloni Neto

(12/11/2008 - Monografia de Bacharelado)

Prof. Dr. Ilson Carlos Almeida de Silveira

(12/11/2008 - Monografia de Bacharelado)