



**UFC**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR  
GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA**

**MARINA SOUSA DA SILVEIRA**

**CARACTERIZAÇÃO TERMOHALINA DA REGIÃO OCEÂNICA ADJACENTE AO  
NORTE-NORDESTE BRASILEIRO**

**FORTALEZA - CE**

**2018**

MARINA SOUSA DA SILVEIRA

CARACTERIZAÇÃO TERMOHALINA DA REGIÃO OCEÂNICA ADJACENTE AO  
NORTE-NORDESTE BRASILEIRO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Oceanografia do Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres  
Teixeira

Coorientadora: Profa. Dra. Ana Paula  
Morais Krelling

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

S589c Silveira, Marina Sousa da.  
CARACTERIZAÇÃO TERMOHALINA DA REGIÃO OCEÂNICA ADJACENTE AO NORTE-  
NORDESTE BRASILEIRO / Marina Sousa da Silveira. – 2018.  
49 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do  
Mar, Curso de Oceanografia, Fortaleza, 2018.

Orientação: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira.  
Coorientação: Profa. Dra. Ana Paula Morais Krelling.

1. Massa de Água. 2. Variação Meridional. 3. Oceanografia Física. 4. Circulação de Larga escala. I. Título.  
CDD 551.46

---

MARINA SOUSA DA SILVEIRA

CARACTERIZAÇÃO TERMOHALINA DA REGIÃO OCEÂNICA ADJACENTE AO  
NORTE-NORDESTE BRASILEIRO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Oceanografia do Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Oceanografia.

Aprovada em: 12/12/2018

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Profa. Dra. Ana Paula Morais Krelling (Coorientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Antônio Geraldo Ferreira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

*Às minhas avós,  
uma estrela, uma rainha e uma guerreira  
E a todas as mulheres da ciência  
que se encaixam nessa definição*

## AGRADECIMENTOS

Tenho tanta coisa para agradecer,  
Mas a primeira tem que ser a UFC  
Ao ensino público,  
Por tudo que me proporcionou viver  
Agradecer de todo o coração,  
A força tarefa arquitetada  
Pela melhor professora inventada,  
Quem não tem uma Ana, que arrume  
Cada aventura, que ela assume.  
Quem não teve a sorte de um Carlos, encontre alguém com sinônimo de bondade  
E obrigada, Geraldo, por chegar até Trindade.  
Painho e Mainha, eu prometo parar de dar susto  
Cês criaram uma pessoinha para o mundo.  
E agora eu preciso navegar.  
Não se preocupa, que a intenção é voltar  
Netinho, maior que você não tem,  
Melhor irmão, também.  
Casamento, parceria, sinergia, união  
Tay, de tu não abro mão, sem tu não tinha saído.  
Sem presente estudo grupo não sei como teria sido,  
Jonathan, eu não discuto mais contigo (mentira, vem cá),  
Que história é essa de riscar toda a minha introdução?  
João, não esquece de mim no teu país feito na imaginação,  
Erik, obrigada por tudo consertado.  
Rafa, sem tu não tinha rotina  
E sem a Babi, que resolve tudo quando atina.  
Sem vocês só tinha lágrimas,  
Mas teve, graças a Deus, mais risadas.  
Vitória, enfrentar machistas e o Atlântico,  
Do teu lado teve um sabor especial  
Eu me sinto muito bem por conhecer gente assim  
Tipo, a Camila que reclama de um jeito sem fim,

Gente bonita, feito copo de cerveja gelada  
Tipo, a Lorena que para tudo tem uma piada (ruim)  
Gente incrível, que usa havaiana molhada  
Tipo, o Derley, que topa qualquer viagem  
Independente de quantas paradas  
Para a gente, quanto mais paradas (viagens) melhor  
Gente que mergulha profundo  
Feito o Oscar, que se dá bem com todo mundo.  
Passar 4 anos com vocês, nesse instituto  
Foi enriquecedor, impressionante  
Melhores voltas para casa a bordo do Xande, com a Anne.  
Gente que é tipo dia de subway em dobro,  
Ou hot dog, com refil,  
Tipo, o Victor, que segue esse perfil  
Gente que fica tanto junta,  
Que vira duas  
A Lerissa e a Latícia,  
Ou aquelas é tipo filme de terror na sala,  
A Mariana e a Andrezza,  
O paizinho, Gabriel  
E o chato do Nathaniel,  
Obrigada galera, do bem  
Que é tipo diária de campo dobrada,  
Feito a Ravena, que cuida e é cuidada  
Gente que mostra a cara,  
Queria agradecer aos parceirinhos do PET  
Reunião toda semana, trabalhinho bacana  
A todos que me ajudaram no início,  
A todos os bolos e sorvetes no Zoobentos  
Até ao suado campo da Rebentos.  
Amigas lindas que estão espalhadas,  
Valeu por aguentarem as crises  
Valeu por planejarem presente, estudos, países  
Valeu você, pessoa fofa que passou ali

E veio ler tudo, desde cima

Valeu por ler até aqui

Sem reclamar da rima

## Lista de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - - Mapa Batimétrico da área de estudo, a zona equatorial sudoeste, com desenho esquemático das principais correntes superficiais presentes na região .....   | 22 |
| Figura 2 - Equipamento Argo na Figura 2a, e em 2b uma representação esquemática dos dispositivos internos do mesmo.....  | 23 |
| Figura 3 - Subdivisão da área de estudo. A zona equatorial sudoeste será dividida entre uma parcela central representada pelo retângulo azul e uma parcela sul adjacente representada pelo retângulo vermelho. ....  | 25 |
| Figura 4 - Localização dos perfis encontrados na região equatorial sudoeste. A divisão esquemática para o trabalho está representada pela linha sólida preta. Os pontos azuis representam os perfis encontrados em 2017, os pontos vermelhos representam os perfis encontrados em 2007 e os pontos pretos representam os perfis encontrados em 1999..... | 26 |
| Figura 5 - Perfis Argo de salinidade coletados em 2017 na região equatorial sudoeste. As Figuras a) e b) correspondem a região central e as Figuras c) e d) correspondem a região sul. ....  | 29 |
| Figura 6 - Perfis Argo de Temperatura coletados em 2017 na região equatorial sudoeste. As Figuras a) e b) correspondem à região central e as Figuras c) e d) correspondem à região sul. ....   | 30 |
| Figura 7 - Mapas da distribuição de temperatura em de perfis coletados em 2017 na região equatorial sudoeste. a) a 130m de profundidade b) a 1000m de profundidade com perfis do ano todo. ....  | 31 |
| Figura 8 - Mapas da distribuição de salinidade de perfis coletados em 2017 na região equatorial sudoeste. (a) a 130m de profundidade e (b) a 1000m de profundidade para o ano de 2017. ....  | 33 |
| Figura 9 - Perfis Argo de Salinidade coletados em 2007 na região equatorial sudoeste. As Figuras a) e b) correspondem a região central e as Figuras c) e d) correspondem a região sul  | 34 |
| Figura 10 - Perfis Argo de Temperatura coletados em 2007 na região equatorial sudoeste. As Figuras a) e b) correspondem a região central e as Figuras c) e d) correspondem a região sul. ....  | 35 |
| Figura 11 - Mapas da distribuição de temperatura coletados em 2007 na região equatorial sudoeste (a) a 120m de profundidade, (b) a 300m de profundidade e (c) a 1000m de profundidade.....   | 37 |
| Figura 12 - Perfis de salinidade coletados em 1999 na região equatorial sudoeste. A Figura 12(a) é referente aos perfis da região central e a Figura 12(b) é referente aos perfis da região sul.....   | 38 |
| Figura 13 - Perfis de Temperatura coletados em 1999 na região equatorial sudoeste. As Figuras (a) correspondente a região central enquanto que a Figura (b) corresponde a região sul.....  | 39 |
| Figura 14 - Diagrama TS, para cada região e para cada ano. Os perfis pontilhados correspondem ao ano de 2017, os tracejados ao ano de 2007 e os intervalados entre ponto e traço são perfis de 1999. A cor azul é correspondente a região central, e a vermelha a região sul.....  | 43 |

- Figura 15 - Médias de Salinidade para cada ano e região. A cor azul corresponde a região central e a vermelha a região sul. As linhas sólidas representam o ano de 2017, as tracejadas o ano de 2007 e a linha solida com ponto o ano de 1999. ....45
- Figura 16 - Médias de Temperatura para cada ano e região. A cor azul corresponde a região central e a vermelha a região sul. As linhas sólidas representam o ano de 2017, as tracejadas o ano de 2007 e a linha solida com ponto o ano de 1999. ....46

## LISTA DE SIGLAS

|      |   |
|------|---|
| ACAS | Água Central do Atlântico Sul           |
| ACAN | Água Central do Atlântico Norte         |
| AT   | Água Tropical                           |
| ACAN | Água Central do Atlântico Norte         |
| AMS  | Água de Máxima Salinidade               |
| CNB  | Corrente Norte do Brasil                |
| CCSE | Contracorrente Sul Equatorial           |
| CSE  | Corrente Sul Equatorial                 |
| cCSE | Ramo Central da Corrente Sul Equatorial |
| nCSE | Ramo Norte da Corrente Sul Equatorial   |
| sCSE | Ramo Sul da Corrente Sul Equatorial     |
| CNE  | Corrente Norte Equatorial               |
| CCNE | Contracorrente Norte Equatorial         |
| SNB  | Subcorrente Norte do Brasil             |
| SCE  | Subcorrente Equatorial                  |
| SSE  | Subcorrente Sul Equatorial              |

**SUMÁRIO**

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b>           | 15 |
| <b>2 OBJETIVOS</b>            | 20 |
| 2.1 Geral                     | 20 |
| 2.2 Específicos               | 20 |
| <b>3 METODOLOGIA</b>          | 21 |
| <b>3.1 ÁREA DE ESTUDO</b>     | 21 |
| <b>3.2 BASE DE DADOS</b>      | 22 |
| <b>3.3 PERFIS</b>             | 24 |
| <b>4.1 - DADOS DE 2017</b>    | 27 |
| <b>4.2 – DADOS DE 2007</b>    | 33 |
| <b>4.3 DADOS DE 1999</b>      | 38 |
| <b>4.4 – ANÁLISE CONJUNTA</b> | 40 |
| <b>4.4.1 – Médias</b>         | 42 |
| <b>5 CONCLUSÃO</b>            | 47 |
| <b>6 REFERÊNCIAS</b>          | 48 |

## RESUMO

Perfis coletados nos anos de 2017, 2007 e 1999 foram usados com o objetivo de descrever massas de água encontradas na região oceânica adjacente ao norte-nordeste brasileiro, entre 5°N e 15°S e 38°W e 48°W. A região oceânica adjacente à plataforma norte-nordeste brasileira possui um complexo sistema de correntes que transporta calor e massa de um hemisfério a outro. Para o entendimento da circulação termohalina na região, que faz parte dos padrões gerais de escoamento do oceano, se faz necessária a investigação sobre as massas de água presentes em uma região e sua movimentação. Foram utilizados dados disponibilizados pelo EN4 *Met Office*, que consistem em perfis feitos por variados equipamentos de perfilagem e entre eles, os flutuadores ARGO. Os principais perfis utilizados foram os de temperatura e salinidade. A região oceânica de interesse foi dividida em dois retângulos, para compará-las e analisar além das suas diferenças as possíveis influências que uma tem sobre a outra. Essa divisão de duas regiões foi efetiva, com resultados simples de que há diferença entre as zonas escolhidas. Ao se observar as mudanças entre uma região e outra, foi possível levantar novas perguntas quanto a extensão das massas de água e de seus valores anuais. A região compreendida entre as latitudes de 5°N e 5°S e as longitudes de 30°W e 45°W possui uma coluna de água com uma configuração de ATS (27,6°C e 21,8°C), AMS (~36,33 UPS), ACAS (19°C e 6,53°C), AIA (~34,54 UPS) e APAN (34,78 e 34,96 UPS). Valores médios encontrados para as médias de 1999,2007 e 2017. A região compreendida entre as latitudes de 5°S e 15°S e as longitudes de 28°W e 38°W possui uma coluna de água com uma configuração de ATS (27,2 e 20°.2, MAS (~36,88 UPS), ACAS (19°C e 6°C), AIA (~34,45 UPS) e APAN (34,78 e 34,96 UPS). Valores médios encontrados para as médias de 1999,2007 e 2017.

Palavras-chave = Massa de água, variação meridional, Oceanografia Física, Circulação de larga escala.

## ABSTRACT

Profiles collected in the years 2017, 2007 and 1999 were used to describe water masses found in the oceanic region adjacent to north-northeast Brazil, between 5 ° N and 15°S and 38°W and 48°W. The oceanic region adjacent to the north-northeast Brazilian platform has a complex system of currents that transports heat and mass from one hemisphere to another. To understand the thermohaline circulation in the region, which is part of the general patterns of ocean flow, it is necessary to investigate the water masses present in a region and its movement. Data from the EN4 Met Office were used, consisting of profiles made by various profiling equipment and among them, the ARGO floats. The main profiles used were temperature and salinity. The oceanic region of interest was divided into two rectangles, to compare them and to analyze beyond their differences the possible influences that one has on the other. This division of two regions was effective, with simple results that there is a difference between the chosen zones. By observing the changes between one region and another, it was possible to raise new questions about the extent of water bodies and their annual values. The region between latitudes 5 ° N and 5 ° S and longitudes 30 ° W and 45 ° W has a water column with an ATS configuration (27.6 ° C and 21.8 ° C), AMS (~ 36.33 UPS), ACAS (19 ° C and 6.53 ° C), AIA (~ 34.54 UPS) and APAN (34.78 and 34.96 UPS). Mean values found for the 1999,2007 and 2017 averages. The region between latitudes 5°S and 15°S and longitudes 28°W and 38°W has a water column with an ATS configuration (27.2 and 20°.2, MAS (~ 36.88 UPS), ACAS (19 ° C and 6 ° C), AIA (~ 34.45 UPS), and APAN (34.78 and 34.96 UPS) average values for the 1999,2007 and 2017 averages.

Keywords = Water masses, meridional variation, Physical Oceanography, large-scale Circulation.

## 1 INTRODUÇÃO

A observação de propriedades hidrográficas da água do mar é uma das principais bases do conhecimento oceanográfico. Com a análise de dados oceanográficos, é possível perceber que características básicas, como salinidade, temperatura e densidade possuem estratificação horizontal e vertical.

No que se refere aos fluxos oceânicos, estes podem ser divididos entre circulação forçada pelo vento e a circulação termohalina. A combinação desses fluxos resulta nos padrões de escoamento oceânicos estudados em oceanografia. Uma descrição detalhada destes dois tipos de circulação é dada nos sub-tópicos seguintes

A região oceânica adjacente à plataforma norte-nordeste brasileira possui um complexo sistema de correntes que transporta calor e massa de um hemisfério a outro. Existem estudos sobre caracterização da região (SCHOTT e STRAMMA, 1998) e sobre a circulação termohalina na região da Corrente Norte do Brasil (CNB) (MORAES, 2011). Alguns trabalhos também caracterizaram as correntes encontradas na região, como a Subcorrente Norte do Brasil (SNB) (MARIN, 2009), Contracorrente Norte Equatorial (CCNE) (FRATANTONI, D. M., RICHARDSON), Corrente Sul Equatorial (CSE) (PETERSON e STRAMMA, 1991) e CNB (KRELLING, 2010). FREITAS (2003) caracterizou a coluna de água do Nordeste desde a superfície à 1000m, para cada uma das estações do ano. Não obstante, as interpretações sobre os processos de mesoescala dessa região são consideradas escassas (MARIN, 2009). Portanto, para o entendimento da circulação termohalina na região, que faz parte dos padrões gerais de escoamento do oceano, se faz necessária a investigação sobre as massas de água presentes em uma região e sua movimentação.

### 1.1 CIRCULAÇÃO SUPERFICIAL

A circulação superficial dos oceanos se desenvolve a partir da fricção do vento na interface oceano-atmosfera. A circulação gerada pelo vento modifica as isopicnais, influenciando as correntes até cerca de 1000m de profundidade, de modo que até essa profundidade, ou até em regiões mais profundas, a circulação pode ser considerada como gerada pelo vento. A circulação superficial apresenta um movimento predominantemente horizontal que tem grande importância no transporte de excesso de calor das zonas equatorial e tropical para os polos, bem como águas frias para o equador. No campo horizontal, o efeito

da fricção dos ventos na superfície do oceano e da força de Coriolis criam um movimento giratório nas águas superficiais, em sentido horário no HN e Anti-horário no HS.

Além disso, os continentes constituem barreiras físicas para a circulação oceânica. Na região dos ventos alísios, a CSE é defletida para sul pela presença da América do Sul, onde dá origem à Corrente do Brasil (CB). Do mesmo modo, o fluxo para leste, que caracteriza a Corrente do Atlântico Sul, na região dos ventos de oeste, é defletido para norte pela presença do continente africano. O resultado final é uma circulação fechada, chamada de giro subtropical do Atlântico Sul (TOMZCAK E GODFREY, 1993).

Já na região equatorial, há um sistema de correntes zonais que se comunica com o giro do Atlântico Sul, recebendo água da corrente de Benguela e alimentando a CNB e CB. A CSE carrega água relativamente frias da região subtropical, provenientes da Corrente de Benguela em direção à margem continental brasileira (RODRIGUES et al., 2007), e com isso forma a parte norte do giro subtropical do Oceano Atlântico Sul. É importante frisar que a CSE desloca águas superficiais no equador de leste para oeste, e se subdivide entre os hemisférios, com ramos norte (nCSE) e sul (sCSE), e um ramo central (cCSE) (SCHOTT e STRAMMA 1998). O ramo sCSE se bifurca entre as latitudes de 15°S e 20° S (STRAMMA e SCHOTT 1999) ao se aproximar da plataforma continental, em um ramo que forma a CB e flui para sul e um ramo que flui para norte. O segundo é mais intenso que o primeiro, resultando na Subcorrente Norte do Brasil (SNB) com núcleo em subsuperfície, entre 150m e 250m. STRAMMA e SCHOTT (1999) caracterizam esse ramo como SNB. A SNB atinge velocidade de  $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  em direção ao Equador, de 20°S a latitudes inferiores a 5°S.

A CSEc flui zonalmente em 4°S, de leste para oeste até alcançar a costa brasileira onde soma seu aporte ao fluxo da SNB. O ramo central da CSE possui valores de transporte entre 26 Sv, indicado por Molinari (1982) e 29 Sv, indicado por Silveira et Al (1994). Ao norte de 4°S, a cCSE faz a SNB perder a sua característica de subcorrente e se transformar em CNB (SCHOTT e STRAMMA 1998), pois o ramo central da CSE se sobrepõe ao núcleo da SNB, o que intensifica o fluxo em superfície da CNB (MARIN, 2009). A CNB é uma importante fonte de massa para as correntes zonais próximas ao Equador, no que diz respeito às trocas inter-hemisféricas (GOES *et al*, 2005), pois faz parte do giro Equatorial do Atlântico. Esse transferência inter-hemisférica é a maior fonte de água quente de Sul para Norte (MARIN, 2009).

O interesse na bifurcação da sCSE deve-se principalmente pela possível implicação na

variabilidade climática, pois a CNB é um dos principais condutores da Célula de Revolvimento Meridional (TALLEY, 2003; GANACGAUD, 2003; LUMPKIN & SPEER, 2003). RODRIGUES, (2007) observou que a latitude de bifurcação da sCSE tem influência no transporte resultante da SNB e da CB, além da quantidade de calor que é dispersada nessa bifurcação entre os hemisférios. O Equador é a área que mais recebe radiação solar durante o ano e, desta forma, possui valores de temperatura mais altos que outros pontos da Terra. As correntes superficiais transportam esse calor do equador para os polos e trazem águas frias dos mesmos para o equador, o que ilustra a sua importância regional no balanço de calor global.

Outra corrente presente na região de interesse é a Subcorrente Equatorial (SCE), que flui em sentido contrário da CSE, possuindo seu núcleo de velocidade em cerca de 100m de profundidade. A SCE é a mais forte que a CSE, possuindo velocidades acima de  $1,2\text{ms}^{-1}$ . Dados de CTD indicam que a zona ocupada pela SCE é também caracterizada por um máximo de salinidade (TOMCZAK & GODFREY, 1994).

## 1.2 CIRCULAÇÃO TERMOHALINA NO ATLÂNTICO

Outra importante componente da circulação oceânica global é a circulação termohalina, que está relacionada com mudanças na densidade de águas superficiais e consequente formação de massas de água. As modificações na densidade da água do mar estão relacionadas a processos responsáveis por variações na temperatura e na salinidade, de modo que a densidade é inversamente proporcional à temperatura e diretamente proporcional à salinidade. Deste modo, de forma simplificada, quando há aumento de densidade em águas superficiais, seja pelo aumento da salinidade, seja pela diminuição da temperatura e ocorre subsidência de grande volume de água, há formação de massa de água.

Quando há mudança na homogeneidade entre regiões da coluna de água com condições específicas de salinidade e temperatura, existe a formação de água de alta densidade, que submerge e se espalha vagarosamente abaixo das águas superficiais. A densidade da água do mar determina a profundidade na qual cada massa de água ficará em equilíbrio; após a massa de água se estabilizar em uma determinada profundidade, ela passa a fluir horizontalmente, acima de águas mais densas e abaixo de águas menos densas. Esses movimentos são bastante lentos quando comparados com as correntes geradas pelo vento.

No que se refere ao padrão de distribuição de massas d'água no Atlântico, a superfície do oceano Atlântico Tropical é recoberta pela Água Tropical Superficial (ATS); que se estende desde a superfície do mar até a faixa superior da termoclina permanente, incluindo a

camada de mistura. Essa massa de água possui certa homogeneidade, gerada pela mistura que a interação entre o oceano e atmosfera provoca. A temperatura da ATS varia de 27°C em superfície até a isoterma de 20°C, como limite inferior (STRAMMA E SCHOTT, 1999), e ocupa desde a superfície até cerca de 200m de profundidade. Já os valores de salinidade da ATS variam de 35,5 a 37,5.

Segundo Wilson (1994), a ATS pode ser dividida em duas partes, de acordo com os hemisférios: águas superficiais dos hemisférios norte e sul, onde as primeiras são mais salinas (>37,2) do que as últimas (~36,5). Os maiores valores de salinidade da ATS se encontram alguns metros abaixo do início da haloclina. Em cerca de 100m existe a Água de Máxima Salinidade (AMS). Essa massa de água é formada por subducção na transição da região subtropical para a tropical (TOMZCAK E GODFREY, 1993), onde a evaporação é maior que a precipitação. Esta formação acontece em ambos os hemisférios.

A maior parte de um diagrama TS típico do Atlântico é ocupada pela Água Central do Atlântico, onde há grande variação de temperatura em relação ao aumento de profundidade. A Água Central do Atlântico Sul (ACAS) possui valores de temperatura e salinidade entre 23°C e 10°C e 36,8 e 35, respectivamente, e é originada no Sul do Oceano Índico (PETERNSO STRAMA,1991) devido a uma intensa evaporação, uma vez que é proveniente das zonas subtropicais áridas. A ACAS pode ser encontrada até cerca de 20°S, onde as características da massa de água central são da Água Central do Atlântico Norte (ACAN).

Sob a ACAS é percebida uma zona de mínima salinidade da coluna de água, ocupada pela Água Intermediária Antártica (AIA), formada por subsidência em dois pontos: na região da confluência Brasil Malvinas e na Frente Polar Antártica. A AIA flui para norte, podendo chegar até 20°N, entre as profundidades de 500 e 1200m. É a massa de água menos salina do Atlântico. Debaxo da AIA, existe a Água Circumpolar Profunda Superior (ACPS) formada na Frente Polar Antártica, região que pode ser encontrada em toda a extensão do Oceano Austral, também podendo ser chamada de Convergência Antártica. Quando chega mais próximo do equador é difícil de identificar a ACPS, então ela as pode ser caracterizada em alguns trabalhos como parte da AIA (MORAES, 2011).

Embaixo da AIA, Água Profunda do Atlântico Norte (APAN) flui para sul, sendo considerada a massa de água mais salina entre as mais frias, com temperatura e salinidade médias de 4°C e 35, respectivamente. A APAN é geralmente descrita como uma grande fornecedora de massa para a Célula de Revolvimento Meridional (CRM), uma vez que ao se formar no mar de Labrador e no mar da Groelândia por resfriamento superficial, resulta na

subsistência de um grande volume de água. A APAN pode ser encontrada entre 1000 e 4500m de profundidade, se estendendo meridionalmente até 20°S.

Nas profundidades de 3500 a 4000 metros é encontrada a Água Antártica de Fundo (AAF) gerada no Mar de Weddel durante o inverno. A AAF possui salinidade média de 34,5, que é menor que a salinidade da APAN, porém é bem mais fria (temperaturas entre 1°C e 0°C), e por isso mais densa. No equador é difícil de encontrá-la, pois existem poucos locais com batimetria superior a 3500m.

As correntes superficiais transportam massas de água. A CSE transporta ATS e AMS da borda leste do oceano Atlântico até a América Latina, onde são divididas entre os hemisférios. A SNB transporta ATS, ACAS e AIA desde a superfície até 1100m de profundidade (SCHOTT, 2005).

Os giros oceânicos se caracterizam por correntes de contorno oeste que carregam água quente do equador para os polos e correntes de contorno leste que levam água fria para o equador, fechando a circulação de correntes superficiais. A Célula de Revolvimento Global resulta da comunicação entre as bacias oceânicas, e conseqüentemente da circulação de correntes e massas d'água. O sistema de massa de água do Atlântico é considerado bastante complexo, não só pela quantidade de massas de água, mas também por possuir uma média de fluxo de calor diferente dos outros oceanos. No Atlântico, a corrente de Benguela, que contorna a borda leste do oceano, leva água quente do Índico e termina transportando mais calor para os trópicos como resultante do giro. A água que chega na zona equatorial do Atlântico pela corrente de contorno oeste é em média mais quente que das outras bacias, por esse motivo.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Geral

- Caracterizar do ponto de vista termohalino a região oceânica adjacente às regiões norte e nordeste do Brasil, utilizando dados históricos.

### 2.2 Específicos

- Descrever a coluna de água com base em propriedades físicas como salinidade e temperatura.
- Diferenciar as águas do Atlântico equatorial e as águas da região sul adjacente.
- Investigar modificações de longo período na estrutura termohalina da região de estudo.

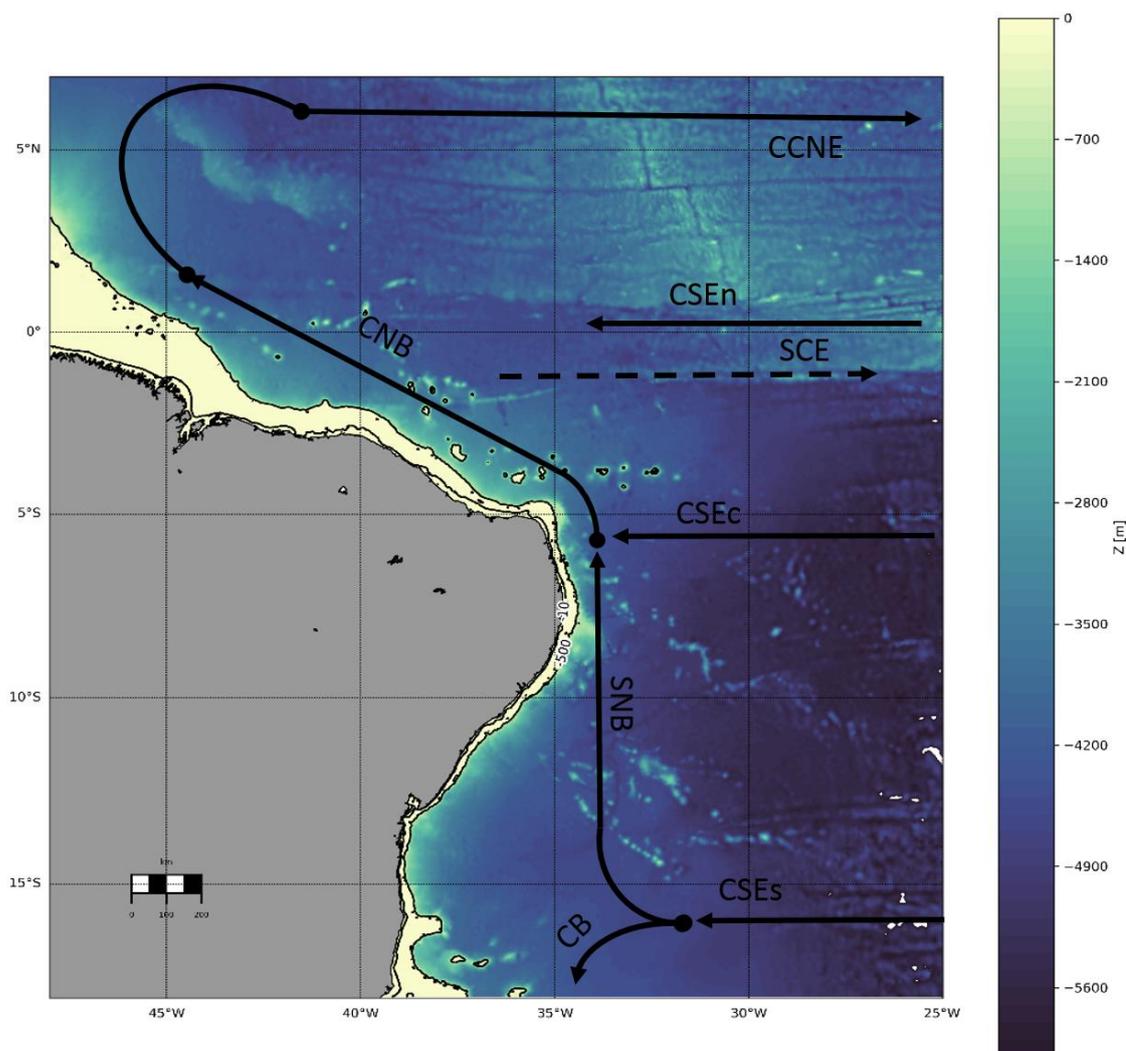
### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

A região equatorial é dividida desde 30°N até 30°S, e em 0° está presente a linha do equador, que divide os dois hemisférios. Os dados observados foram escolhidos para que estivessem dentro dos limites de 5°N a 15°S e 28°W a 45°W. A circulação oceânica da área de estudo possui estas correntes como dominantes: SNB, com núcleo de velocidade em cerca de 200m e flui com sentido norte, contornado a quebra da plataforma do Nordeste Brasileiro. CNB que flui para norte e contribui para trocas de calor e massa inter-hemisféricas, onde sua retroflexão está mais ao norte do que a região de estudo abrange.

A CSE pode ser dividida em 3 ramos com velocidades zonais. O ramo norte e o ramo central estão na região de interesse, onde o cCSE influencia na SNB por volta de 4°S. O ramo sul da CSE sofre bifurcação entre 20° e 15°, formando a CB e a SNB. A SCE é uma corrente de subsuperfície, com núcleo entre 100 e 200m de profundidade que flui de oeste para leste, abaixo da CSE. Na Figura 1 é possível perceber que existe sutil diferença entre a batimetria da região equatorial e da região adjacente a sul.

Figura 1 - - Mapa Batimétrico da área de estudo, a zona equatorial sudoeste, com desenho esquemático das principais correntes superficiais presentes na região



Fonte: A autora.

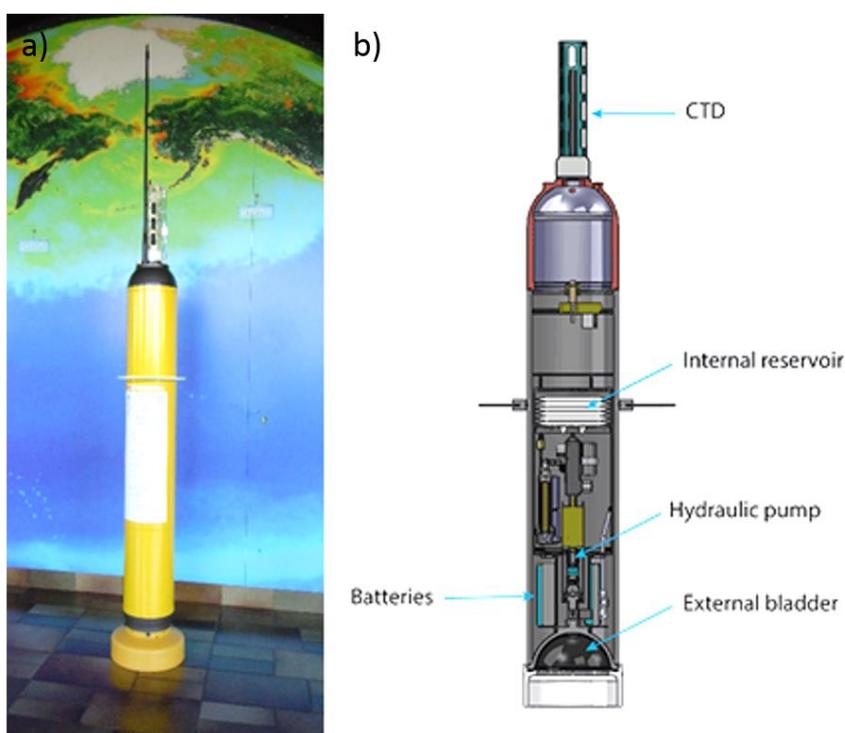
### 3.2 BASE DE DADOS

Para que os objetivos do presente estudo fossem alcançados, foram utilizados conjuntos de perfis de temperatura e salinidade da coluna de água da base de dados EN4 (versão 4 do *Met Office Hadley Centre* “EN”). O EN4 compila perfis oceânicos coletados in situ obtidos de vários projetos que aquisitionam dados de perfilagem. A grande maioria dos perfis foram agrupados pelo *World Ocean Database 2009* (WOD09) e originados por outros projetos. O WOD09 é um projeto da NOAA, enquanto os outros são divididos temporalmente por vários projetos. Os primeiros dados compilados nesse sistema provêm de projetos como *Arctic Synoptic Basin Wide Oceanography* (ASBO), cujo objetivo principal era

mapear o ártico, e outros projetos menores, que perfilaram outras partes do oceano. A partir de 2000 todos os dados foram obtidos por derivadores Argo (GOOD et al, 2013), que estão representados na Figura 2.

Cada perfil possui uma data, latitude e longitude específica, e todos os perfis gerados para um mês são agrupados em um bloco de dados. Estes são pré-processados (por exemplo, para remover perfis duplicados) e depois são submetidos a uma série de verificações de controle de qualidade. Os dados que passaram pelo controle de qualidade são disponibilizados para produzir análises objetivas mensais da temperatura e salinidade do oceano (GOOD et al, 2013.), o que significa representar determinada região para um mês específico com um conjunto de perfis.

*Figura 2 - Equipamento Argo na Figura 2a, e em 2b uma representação esquemática dos dispositivos internos do mesmo.*



*Fonte: ARGO 2018.*

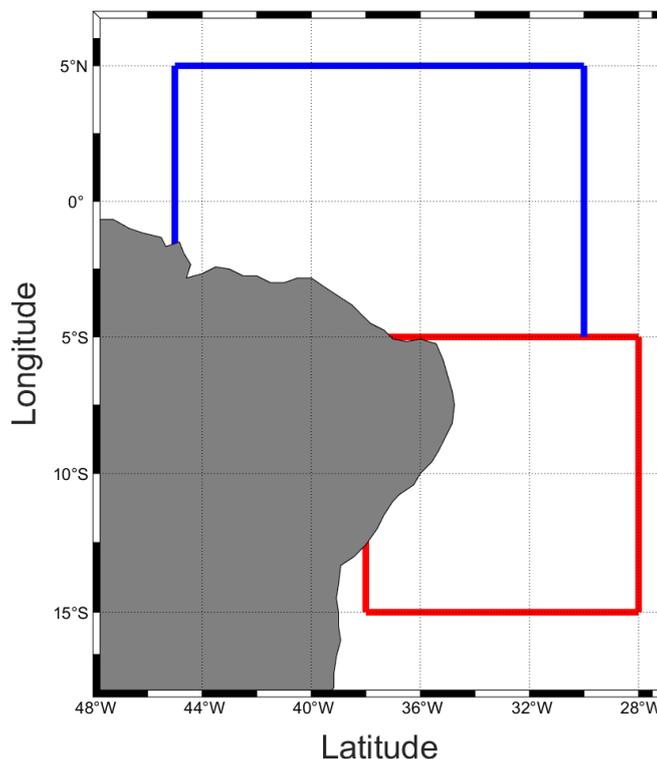
O programa ARGO consistem em um conjunto global de 3.800 flutuadores atualmente, em novembro de 2018, que possuem o mesmo nome e medem temperatura e salinidade dos 2000 m superiores do oceano. Quando um flutuador emerge na superfície do oceano, ele transmite todas as informações coletadas da coluna de determinada latitude e longitude. Esses dados são disponibilizados na internet em diversos sites. O protocolo que o

ARGO reproduz geralmente é de descer a uma profundidade alvo de 1000m para derivar por um tempo determinado pelo modelo do aparelho, e depois descer novamente até 2000m, onde inicia o perfil de temperatura e salinidade (ARGO, 2018).

### 3.3 PERFIS

Foram separadas duas regiões de interesse dentro da área de estudo inicial, com objetivo de compará-las entre si. A área mais central da região equatorial, onde está o equador recebe mais calor durante o ano, do que das zonas adjacentes. Na Figura 3 é mostrada a divisão da região de interesse, em dois retângulos. A região do retângulo azul, onde se faz presente o equador será denominada daqui em diante apenas de central e a região ao sul, limitada pelo retângulo vermelho será denominada a partir daqui apenas de sul, para facilitar o entendimento dos resultados. A região central está limitada entre 5°N e 5°S e 30°W e 45°W. Já a região sul contém os perfis que estão de 5°S a 15°S e 28°W a 38°W, região que se encontra a norte da bifurcação da CSE, e engloba o fluxo da SNB.

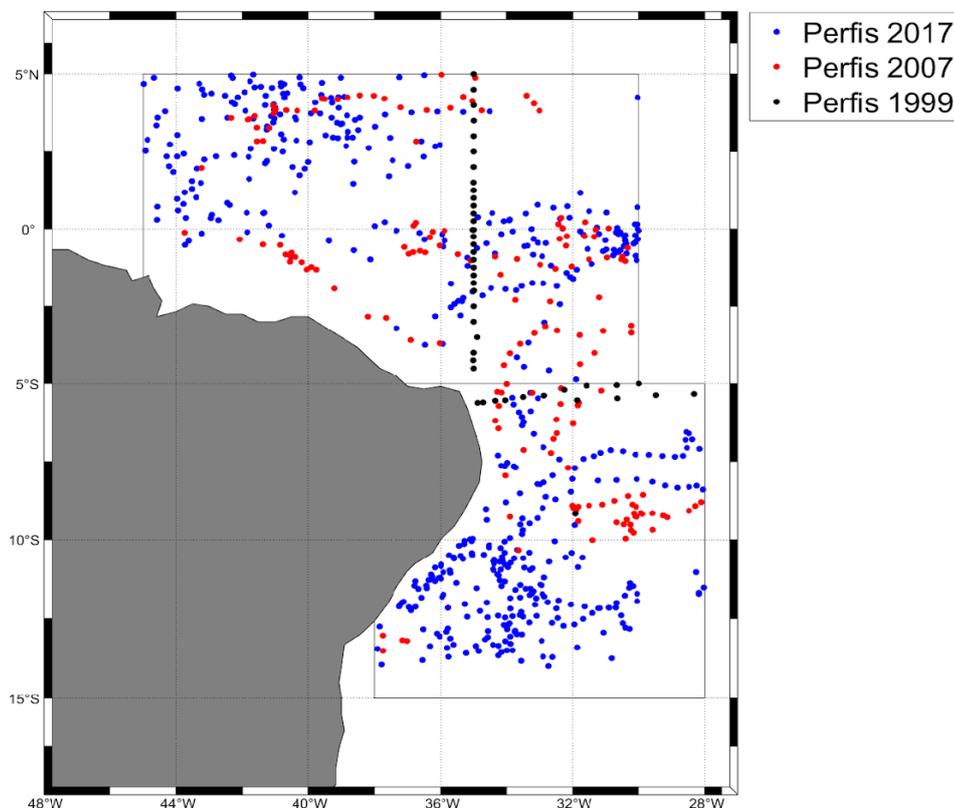
*Figura 3 - Subdivisão da área de estudo. A zona equatorial sudoeste será dividida entre uma parcela central representada pelo retângulo azul e uma parcela sul adjacente representada pelo retângulo vermelho.*



*Fonte: A autora*

Foram analisados perfis para os anos de 1999, 2007 e 2017 entre a superfície e 2000m de profundidade. A Figura 4 mostra a localização dos perfis escolhidos para análise, onde os pontos azuis correspondem aos perfis amostrados em 2017, os pontos vermelhos amostrados em 2007 e os pontos pretos referentes aos perfis amostrados em 1999. Foram selecionados 512 perfis para o ano de 2017, 179 para o ano de 2007 e 46 para o ano de 1999.

Figura 4 - Localização dos perfis encontrados na região equatorial sudoeste. A divisão esquemática para o trabalho está representada pela linha sólida preta. Os pontos azuis representam os perfis encontrados em 2017, os pontos vermelhos representam os perfis encontrados em 2007 e os pontos pretos representam os perfis encontrados em 1999.



Fonte: A autora.

É importante frisar que os dados coletados não possuem distribuição homogênea da área de estudo, então isso deve ser levado em consideração na interpretação dos resultados. Os dados de 2017 e 2007 são semelhantes quanto a área de abrangência no mapa, porém quanto ao número de perfis, o ano de 2017 registra maior valor. Já no caso do ano de 1999, há apenas duas sessões de dados, uma zonal aproximadamente ao longo de 6°S e uma meridional aproximadamente ao longo de 35°W. Um único perfil de 1999 se encontra na latitude de 8°S e 32°W. A intenção inicial do trabalho envolvia analisar os dados coletados em 1997 também, porém, os perfis referentes a este ano na base de dados escolhida eram bem escassos, o que dificulta a interpretação. Desta forma, foram selecionados os perfis coletados em 1999 para contemplar os objetivos do estudo.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de dados foi feita a partir da criação de gráficos que continham: Todos os perfis de cada ano, de salinidade e temperatura, com finalidade de registrar os valores médio, máximos e mínimos daquele ano; Diagramas TS para cada região para identificação das massas d'água e os locais por elas ocupados, mapas com a distribuição de valores de temperatura e salinidade, para profundidades específicas, e também gráficos com os perfis médios anuais para comparar os 3 anos. Foi feito o cálculo da densidade a partir de uma função simples em um software de análise de dados, que utiliza os valores de salinidade, temperatura e profundidade. Não serão mostradas gráficos com esses dados, porém estes serão relatados quando se fizer necessário.

A seguir, a coluna de água será descrita a partir dos dados de 2017 e comparados, quando possível, com dados anteriores. A diferença entre a região central e a região sul também será discutida a seguir. E após isso, será feita análise semelhante para os anos de 1999 e 2007, onde poderá ser feita a comparação entre os anos.

A identificação de massas de água foi feita com base principalmente nos trabalhos de SCHOTT e STRAMMA 1999 e de MORAES 2011. O uso dos perfis permitiu identificar a termoclina e haloclina visualmente, além de utilizar a diferença entre os valores a cada dez metros para indicar um último valor para o limite inferior dessas regiões. Por exemplo, para temperatura, diferenças acima de  $0,1^{\circ}\text{C}$  entre um ponto de profundidade e outro foram consideradas dentro da termoclina. A tabela 1 mostra os limites e valores encontrados para essas regiões da coluna d'água, e a discussão sobre as diferenças entre as regiões será feita após a explanação de cada ano.

#### **4.1 - DADOS DE 2017**

A ATS verificada possuiu médias de salinidade superficial de 36,04 para a região central e 36,77 para região sul e máximas de 36,63 e 37,52 respectivamente. Esses valores são esperados uma vez que a precipitação na região central é maior que na região sul, diluindo a água superficial. A AMS pôde ser percebida a 80m de profundidade na região central, com valor médio de 36,30 e a 100m na região sul, com média de 37,09. As Figuras 5a e 5c mostram em detalhe as diferenças entre as regiões estudadas, e principalmente na região da AMS.

Respeitando o limite inferior da ATS como a isoterma de  $20^{\circ}\text{C}$ , a ATS se estendeu até 110m de profundidade na região central, sendo mais profunda na região sul, onde se estendeu até 160m de profundidade. Essa observação foi feita utilizando as Figuras 6a e 6c.

A densidade aumentou de 10m até 200m de profundidade, variando os valores de 23 kg/m<sup>3</sup> a 26 kg/m<sup>3</sup>. A isopical de 24 kg/m<sup>3</sup>, segundo MORAES (2011) caracteriza bem a AMS, e essa densidade pôde ser vista entre 70 e 90m de profundidade nas duas regiões. MORAES (2011) registrou ATS até 140m, sendo que a AMS foi registrada entre 120 e 140m. Os dados da autora são referentes a região central dividida no presente estudo, mas variam entre 44°W e 50°W, o que é próximo da pluma do Rio Amazonas. O aporte do rio pode diluir as águas superficiais oceânicas, tornando-as menos densas.

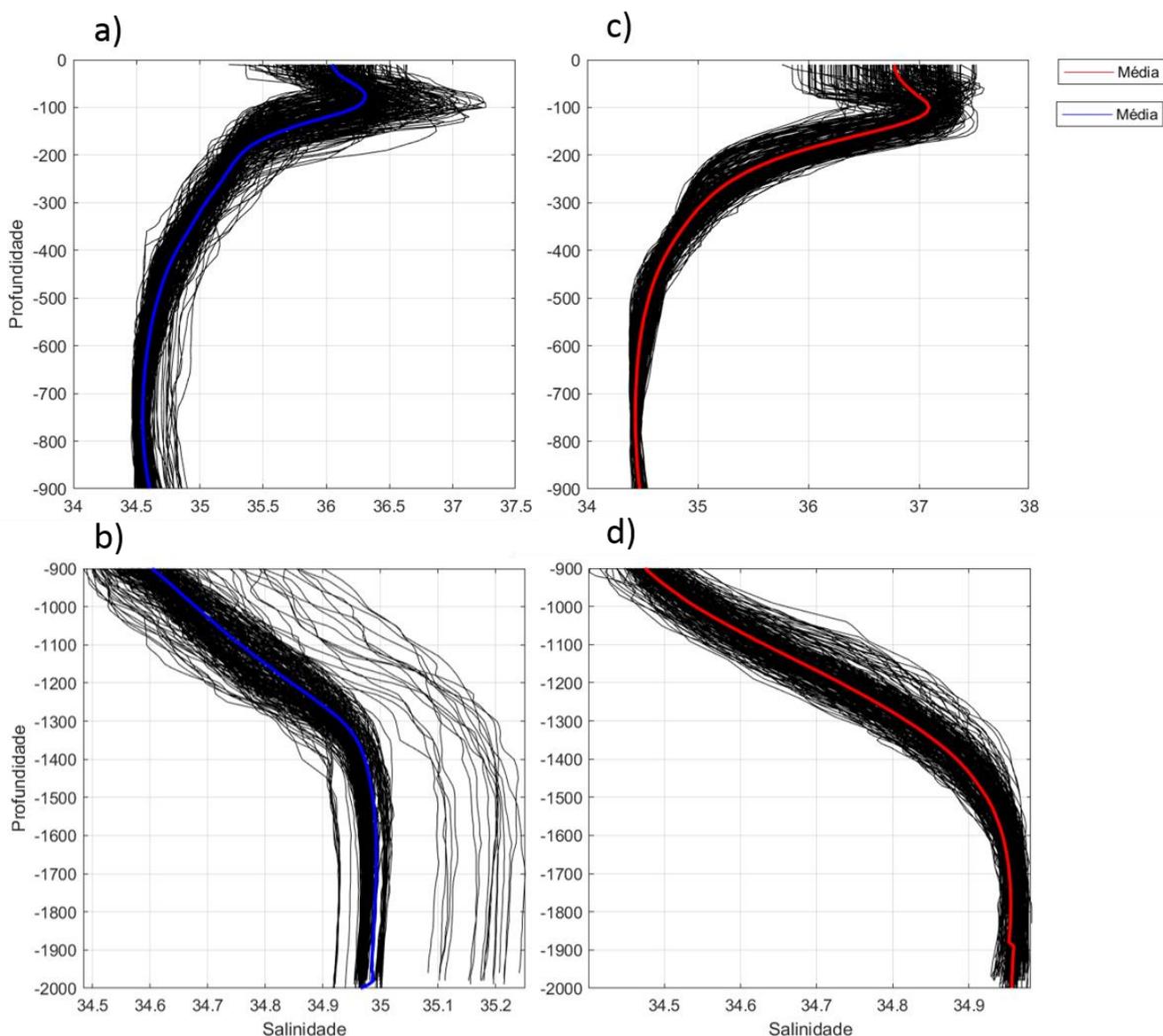
A ACAS, que se caracteriza por uma variação grande de temperatura com o aumento da profundidade, pode ser notada entre 150m e 500m de profundidade. Segundo PETERSON e STRAMA e (1991), para limitar a ACAS pode se usar como limite inferior a isoterma de 10°C para o oceano Atlântico Sul em geral, enquanto STRAMMA e SCHOTT (1999), caracterizaram a ACAS entre o limite superior da termoclina e isopical de 27,1 kg/m<sup>3</sup>. A isoterma de 10°C aparece em ambas as regiões em 340m de profundidade, o que relacionado a literatura parece uma extensão vertical pequena para a ACAS. As Figuras 6a) e 6c) mostram a temperatura desde a superfície até 900m de profundidade. Tanto para região central quanto para a tropical, a densidade média ente 500m e 600m de profundidade foi de 27,1kg/m<sup>3</sup>, então poderíamos caracterizar a profundidade de 600m como limite inferior da ACAS. A salinidade média encontrada em seu limite inferior foi de 34,5 para ambas as regiões, o que está abaixo dos valores esperados entre 36 e 35.

A partir de 80m na região central e de 100m na região sul, a salinidade diminui até cerca de 790m, como pode ser visto na Figura 5a), com mínimos de 34,55 e 34,44 para cada região respectivamente, e abaixo dessa profundidade há aumento progressivo de salinidade. As características da AIA, como uma região de mínima salinidade, podem ser percebidas entre 800m e 1400m de profundidade. Na região central, a temperatura média variou de 5,1 a 4,5°C para os limites superior e inferior da AIA, enquanto que na região sul os valores foram de 4,4 e 4,2°C demonstrando menor variação. As Figuras 6b e 6d mostram melhor a região da AIA. A média de temperatura entre 800 e 1400m foi de 4,1 para região sul e 4,7°C para região central. A temperatura máxima registrada para este ano, na profundidade de 800m metros foi de 5,7°C para região central e para a região sul 5°C. A densidade média entre 800 e 1400m de profundidade para ambas regiões variou de 27,3 a 27,7kg/m<sup>3</sup>.

Krelling, (2015) observou que a SNB transporta ATS, ACAS e AIA entre 800 e 1100m de profundidade, através de sessões que cruzavam a região da SNB utilizando simulações de modelo e perfis de ADCP. A SNB flui com sentido para norte, e em torno de 4°S recebe o aporte do ramo central da CSE, o que pode alterar alguns parâmetros nas massas

de água aqui relatadas. A partir da região central as correntes espalham calor para outras regiões do globo, então à medida que há entrada de água na região central proveniente de região adjacente, existe mistura de água. Essa mistura pode está resultando num aumento de temperatura observada na região da AIA.

*Figura 5 - Perfis Argo de salinidade coletados em 2017 na região equatorial sudoeste. As Figuras a) e b) correspondem a região central e as Figuras c) e d) correspondem a região sul.*

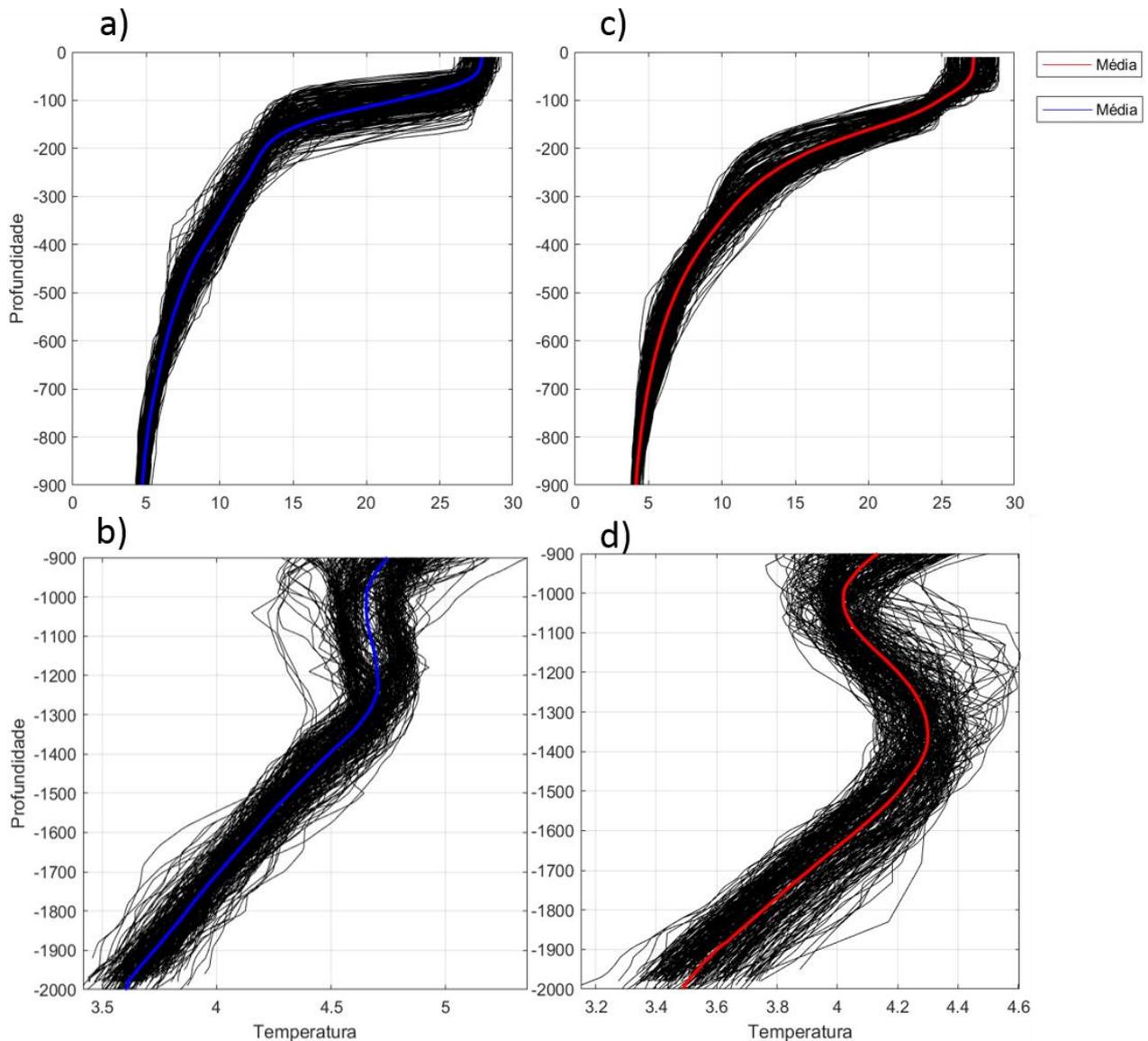


*Fonte: A autora.*

A cerca de 1400m profundidade pode ser percebido um aumento de salinidade nas Figuras 5b e 5d e uma diminuição de temperatura nas Figuras 6b e 6d, então com isso pode se

identificar a massa de água APAN. A APAN foi observada até a profundidade de 2000m, onde atingiu os valores de 3,5°C para temperatura e 34,96 para salinidade para ambas as regiões. O limite superior da APAN pode ser descrito como 1400m pelo aumento progressivo de salinidade desde a profundidade de 900m. As temperaturas máxima e mínima foram maiores para a região central (3,84°C e 3,44°C) em 0,2°C do que para a região sul (3,69°C e 3,29°C) para a profundidade de 2000m

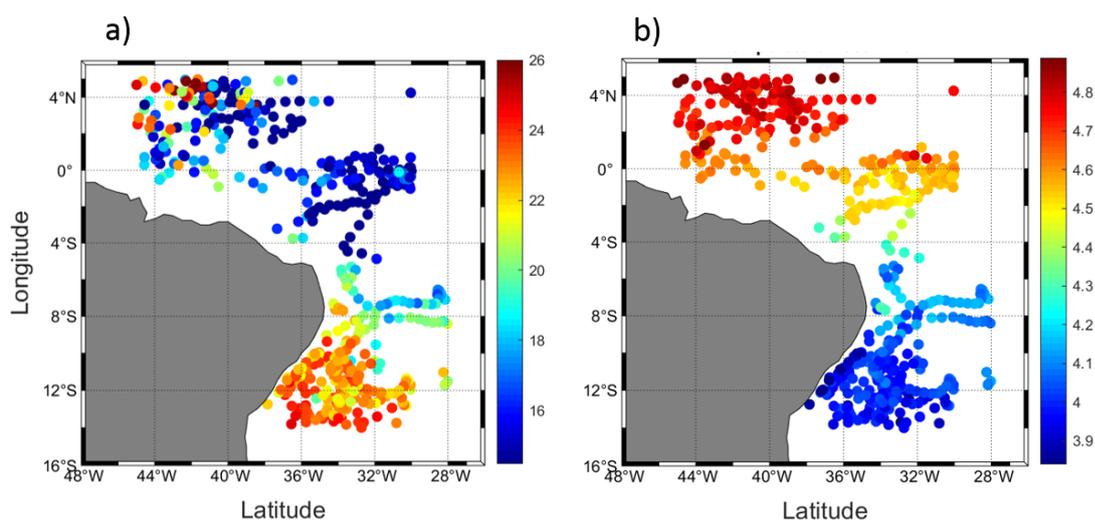
*Figura 6 - Perfis Argo de Temperatura coletados em 2017 na região equatorial sudoeste. As Figuras a) e b) correspondem à região central e as Figuras c) e d) correspondem à região sul.*



*Fonte: A autora.*

O objetivo da Figura 7 é mostrar que existe diferença de temperatura entre as regiões meridionalmente, tanto a 130m quanto a 1000m de profundidade, com variações de 10° e 1°C respectivamente. Superficialmente, a região central é mais quente do que a região sul, porém com o aumento da profundidade, em torno de 80m de profundidade os valores de temperatura para a região sul passam a serem maiores que os encontrados na equatorial, isso pode ser visto comparando a Figura 6a com a 6b. Na Figura 7a, foi escolhida a profundidade de 130m por ter a maior diferença entre médias das regiões (5,2°C). Na Figura 7b é mostrado que a 1000m de profundidade a região central é mais fria que a tropical, mesmo que apenas 1° entre a máxima e a mínima temperatura registrada. A diferença entre as médias da região foi de 0,6°C. Para facilitar o entendimento dos próximos mapas, será descrita a situação da região central ser mais fria em superfície e mais quente em profundidade como inversão. Nomenclatura essa apenas para este trabalho.

*Figura 7 - Mapas da distribuição de temperatura em de perfis coletados em 2017 na região equatorial sudoeste. a) a 130m de profundidade b) a 1000m de profundidade com perfis do ano todo.*



*Fonte: A autora.*

FREITAS (2003) caracterizou a coluna de água do Nordeste desde a superfície à 1000m, para cada uma das estações do ano, com limites de 0° a 14°S. Em seus mapas, é possível ver que há diferenças entre as regiões no presente trabalho divididas, para as profundidades de 100m, 150m e 900m. As variações meridionais que foram observadas por FREITAS (2003) dividiam o mapa na latitude de 4°S, e as maiores foram durante o verão e o outono, sendo que essa última estação registrou diferença de 8°C entre a latitude de 12°S e a

de 4°S. As mínimas também foram registradas no outono, com a isoterma de 22°C a 100m de profundidade. Durante a primavera, não foi vista variação meridional para as profundidades de 100m e 150m, porém foi visto diferença zonal, que o autor atribuiu a passagem de correntes junto ao talude continental. Em 900m de profundidade também havia diferença meridional, de forma que ao sul da latitude 8°S a temperatura média foi 3°C e ao norte, foi 4°C. No inverno essa diferença é mínima e na primavera, é insignificante.

Existem diferenças sazonais em todos os mapas mostrados no presente trabalho, que podem acentuar diferenças aqui indicadas. O esperado são que as médias de temperatura durante o verão sejam maiores que as médias das demais estações. Quando plotado o diagrama TS de todos os perfis (não apresentado) para ambas as regiões, é possível perceber através da dispersão dos pontos que as massas de água que mais variam principalmente, quanto a salinidade, são a ATS e ACAS. Os valores de temperatura variaram entre 29,2 e 25,2°C na superfície e entre 27,9 a 13,7°C para a profundidade de 100m, enquanto que os de salinidade variaram entre 37,5 e 35 na superfície e 37,5 e 35,3 a 100m.

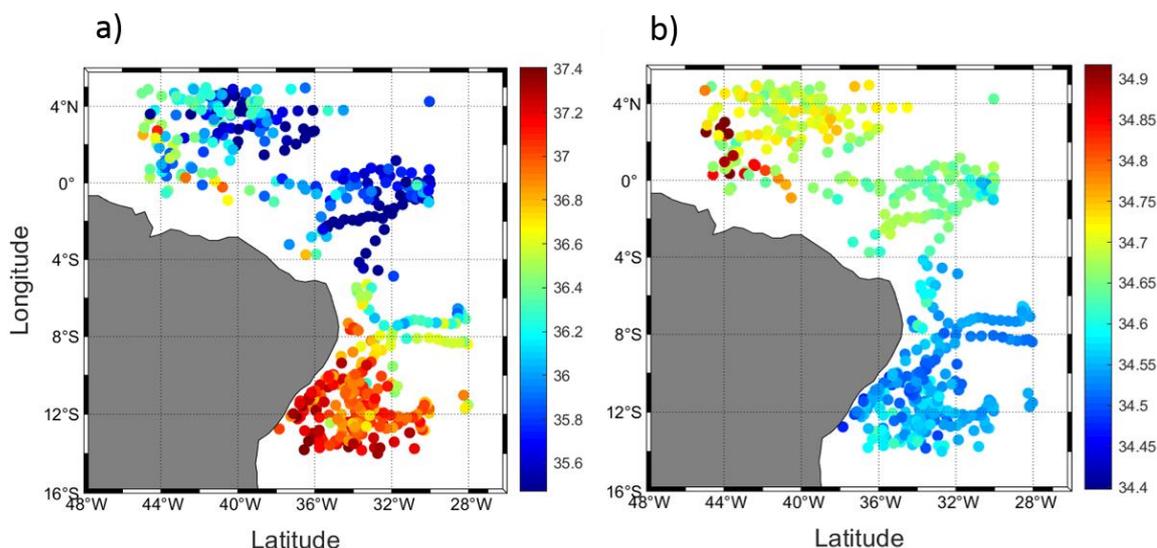
Os valores de temperatura da ATS na região sul têm variação anual menor que a da região central, o que pode ser explicado porque na região central a precipitação é maior que na região sul, causando menor estratificação. Porém, a profundidade da região de máxima salinidade ocupada pela AMS, variou muito mais na região sul do que na equatorial, o que pode ser visto nas Figuras 5a e 5c. Na primeira imagem, os máximos de salinidade são encontrados em cerca de 100m ou 10m abaixo, enquanto na segunda Figura podem tanto estar bem acima de 100m de profundidade (50m), como abaixo (120m). A ACAS presente na região central também varia mais anualmente do que na região sul, sendo que as médias possuem valores menos salinos no equador do que na região adjacente. Os valores de temperatura que correspondem a região ocupada pela massa de água AIA também não possuem tanta variação anual quanto as das outras massas de água, sendo a diferença maior quanto a as médias das regiões, que serão melhor discutidas mais adiante no texto.

A inversão de valores entre as regiões também é percebida a partir da profundidade 500m, com máxima diferença na profundidade de 1000m para as médias de salinidade. Esta informação é mostrada na Figura 8. Onde em 8a a variação observada foi de 1,8 para a região sul, mais salina, que a região central. Na Figura 8b, a região mais salina é a equatorial com uma diferença pequena de 0,5; entretanto, alguns autores consideram suficiente para separar massas de água em águas modais. A diferença entre as médias a 130m de profundidade foi de 1 e a 1000m de profundidade foi de 0,13.

Nos mapas de FREITAS (2003), as profundidades que apresentaram diferença meridional semelhante a essa mostrada, foram de 200 e 300m de profundidade para as estações de verão e inverno. No inverno os valores foram 0,5 mais salinos, com 35,5 para região a norte de 8°S e 35 para região a sul. No verão, os valores foram de 35 para região a norte de 8°S e 34,5 para região ao sul. Na primavera e no outono, foi notada também diferença meridional, nas profundidades 100 e 150m, onde a região central nessas estações foi mais salina com 0,5 de diferença tropical.

A cCSE se mistura com a SNB em torno de 4°S, onde esta última passa a se chamar CNB. As variações meridionais aqui listadas e comparadas com o trabalho de FREITAS (2003), também diferem em relação a essa latitude, o que pode ser o bastante para sugerir que o ramo central da CSE causa algumas diferenças. RODRIGUES (2007) estudou a variabilidade sazonal quanto a latitude da bifurcação do ramo sul da CSE, e verificou que essa variabilidade termina por influenciar na quantidade de calor que é transportado pelas CB e SNB. Parece razoável, inferir que a CSE também tenha influencia no transporte de calor da CNB.

*Figura 8 - Mapas da distribuição de salinidade de perfis coletados em 2017 na região equatorial sudoeste. (a) a 130m de profundidade e (b) a 1000m de profundidade para o ano de 2017.*



*Fonte: A autora.*

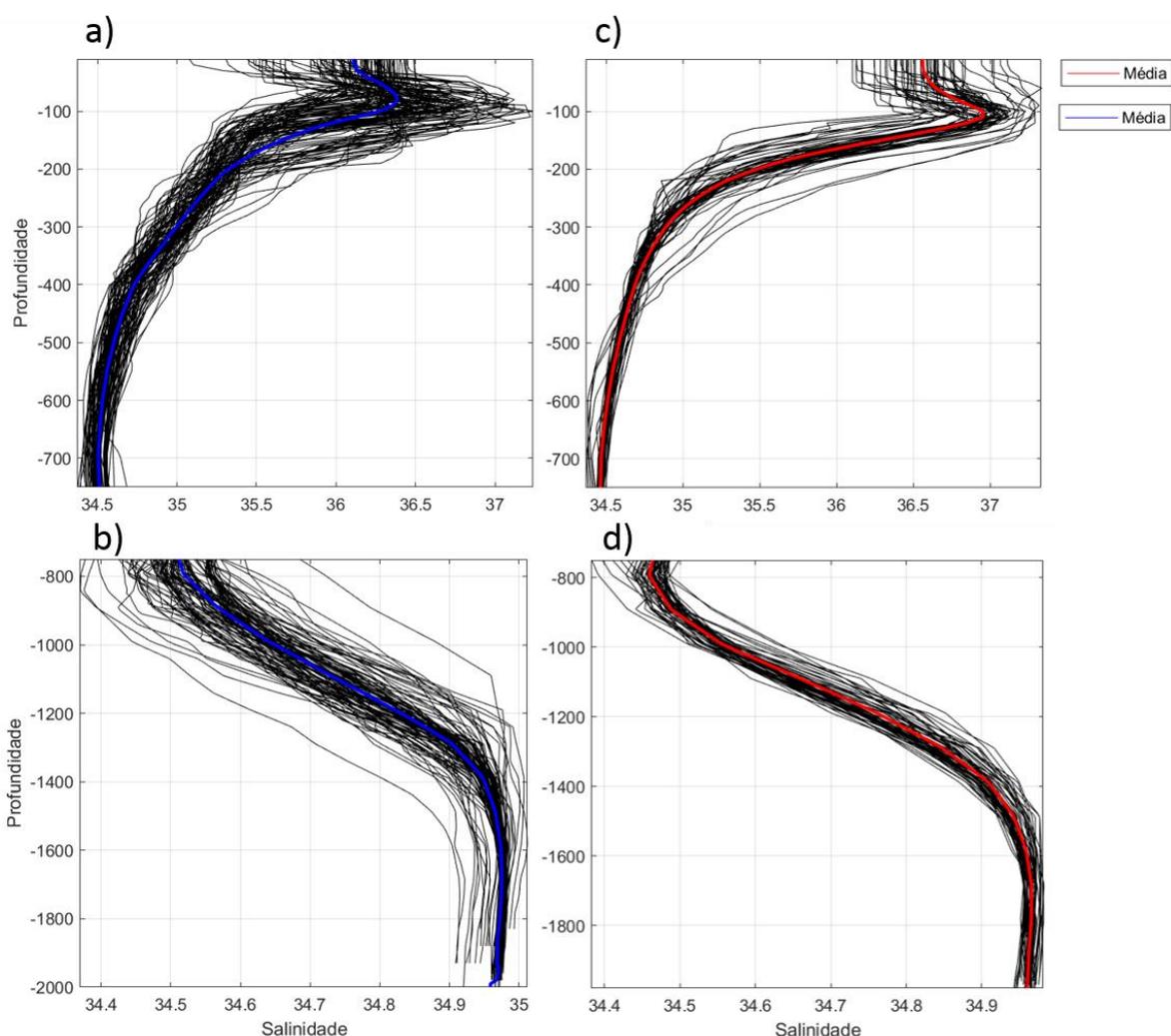
#### 4.2 – DADOS DE 2007

Os valores médios de salinidade para a superfície da água do mar são 36,1 para a região central e 36,6 para a região sul. A temperatura média superficial foi de 27,5°C para a

região central e de  $27,3^\circ$  para região sul. Esses valores estão parecidos com os observados em 2017.

Utilizando a isoterma de  $20^\circ\text{C}$  como o limite inferior da ATS, temos sua distribuição vertical desde a superfície até 110m de profundidade na região central e até 140m de profundidade na região sul. A AMS foi observada em 80m de profundidade na região central e a 110m na região sul e a isopicnal de  $24\text{kg/m}^3$  ficou entre 70m e 100m de profundidade para ambas as regiões. Essas diferenças são mostradas nas Figuras 9a e 9c. Os valores máximo e mínimo de salinidade para a AMS registrada em 2007 esse ano foram de: 37,29 e 36,37 na região sul e 37,12 e 35,47.

*Figura 9 - Perfis Argo de Salinidade coletados em 2007 na região equatorial sudoeste. As Figuras a) e b) correspondem a região central e as Figuras c) e d) correspondem a região sul*

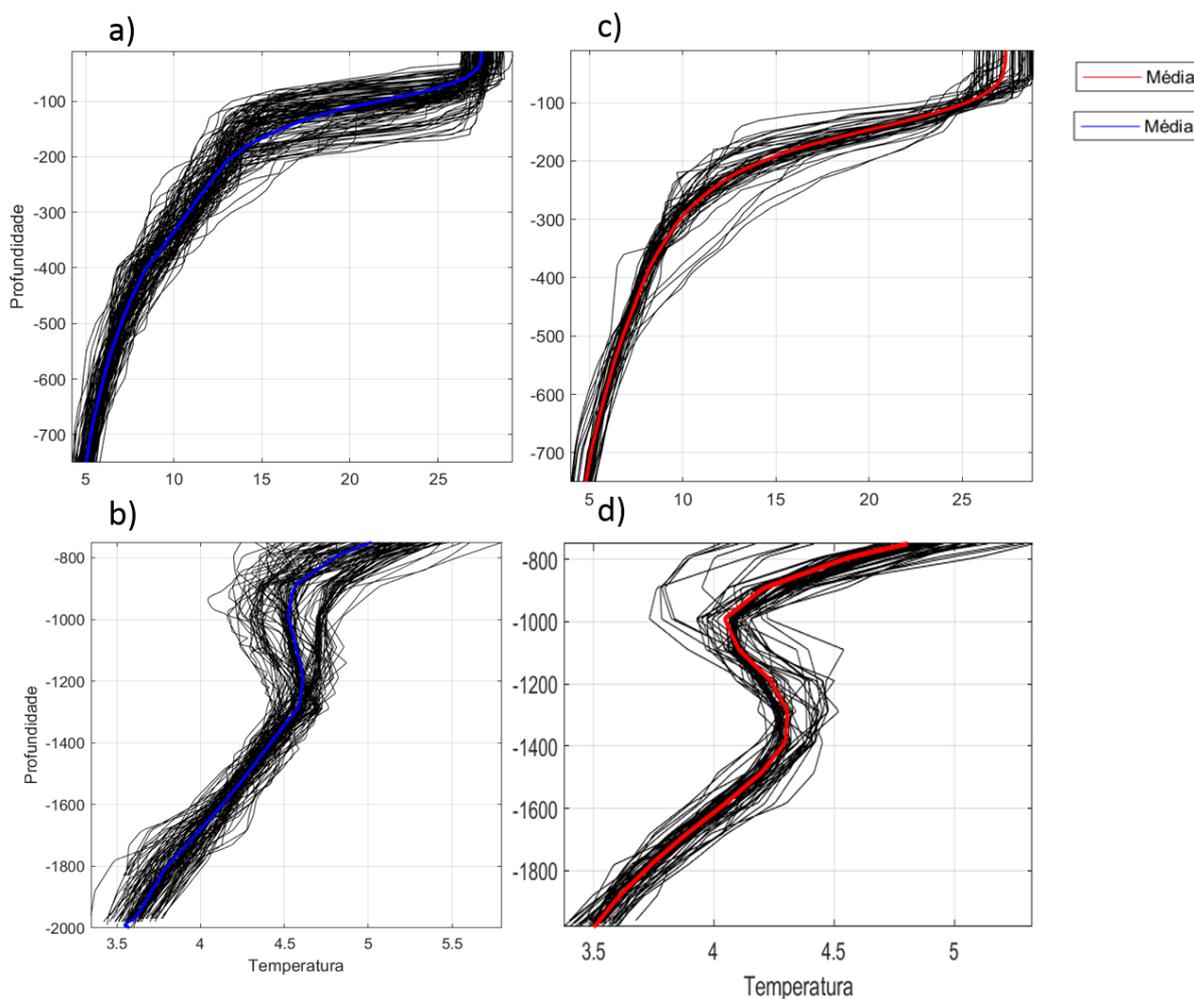


*Fonte: A autora.*

A isoterma de 10°C se encontrou a 330m de profundidade na região central e a 290m de profundidade na região sul. Então, os limites da ACAS foram a isoterma de 20°C como superior e a isopicnal de 27,1kg/m<sup>3</sup> como inferior. Deste modo, a ACAS teve extensão vertical variando de 110m a 600m de profundidade na região central e de 140m a 600m de profundidade na região sul.

As variações sazonais são demonstradas pelos perfis em preto nas Figuras 5, 6, 9, 10, 12 e 13. A AMS variou mais os valores de salinidade e temperatura na região central que na região sul, assim como a ACAS. Porém, a profundidade em que foi encontrado o núcleo da AMS variou mais na região sul do que na região central.

*Figura 10 - Perfis Argo de Temperatura coletados em 2007 na região equatorial sudoeste. As Figuras a) e b) correspondem a região central e as Figuras c) e d) correspondem a região sul.*



*Fonte: A autora.*

A partir de 90m a salinidade decai nos perfis de ambas as regiões, sendo os mínimos encontrados à 700m de profundidade na região central e à 790m de profundidade na região sul, com valores de 34,5 e 34,4 respectivamente. Essas isohalinas foram usadas para representar os limites superiores da AIA em cada região. E o limite inferior, a profundidade de 1400m, onde é possível perceber nas Figuras 9b) e 9d) que há aumento de salinidade, caracterizando a massa de água APAN. A AIA na região do equador é mais quente do que na região sul, com valores médios de 4,6 e 4,1°C respectivamente.

Calixto (2013) analisou radiais que saiam da costa brasileira até 32°W, no segundo semestre de 2004, com distribuição latitudinal 0° a 12°S, e utilizou como limite inferior da ACAS a isopicnal de 26,9kg/m<sup>3</sup> e como limite inferior da AIA a isopicnal de 27,3kg/m<sup>3</sup>. A ACAS observada por ele teve extensão vertical de 150m a 300m de profundidade e a AIA de 300 a 900m de profundidade. Nos dados coletados nos três anos observados por nós, as isopicnais de 26,9kg/m<sup>3</sup> e 27,3kg/m<sup>3</sup> estavam a cerca de 395m e 845m de profundidade, porém utilizamos limites inferiores mais profundos para ambas as massas de água. As radiais englobavam dados retirados da plataforma e talude continental, o que pode ter influência na profundidade da massa de água, enquanto que os perfis analisados no presente estudo são todos de zonas oceânicas.

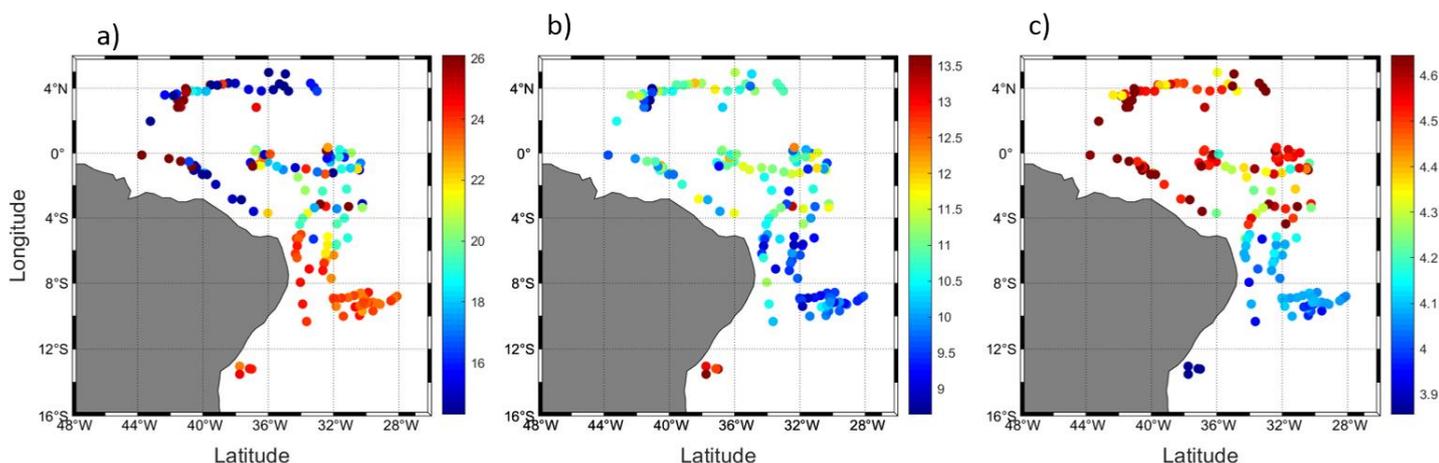
Analisando as Figuras 10b e 10d é possível perceber que a partir de 1300m há decaimento de temperatura com o aumento da profundidade, bem como um aumento de salinidade com o aumento da profundidade, e essas duas variações juntas podem caracterizar APAN. Porém, na região central a diminuição de temperatura é em cerca de 1250m enquanto na região sul é na profundidade de 1400m. Então, podemos usar essas profundidades como limites superiores para APAN respectivamente. Existe um aumento de salinidade a partir dessas profundidades, que pode ser observado nas Figuras 9b e 9d. A diferença de extensão vertical não provoca alterações na salinidade média da massa de água, que é 34,55 para ambas as regiões, porém a temperatura média entre os limites propostos para cada região é de 4,11°C e 3,88°C.

As profundidades que apresentaram maior diferença de temperatura entre as regiões propostas foram as de 120m, 300m e 1000m e são mostradas nos mapas na Figura 11. As profundidades que possuíram maior diferença entre as regiões foram escolhidas para maior detalhe. As massas de água presentes nessas regiões são respectivamente a ATS, ACAS e AIA. É possível notar que mais próximo da superfície a região central é mais fria que a tropical, enquanto que com profundidades superiores, acontece o contrário. Essa inversão

começa a ser notada em cerca de 500m de profundidade, e pode ser observada nas Figuras 10a e 10b.

A diferença entre a máxima e mínima temperatura registrada na área de estudo inteira a 120m de profundidade, foi de 11°C, e a diferença entre as médias para as regiões foi de 4,4°C. A salinidade também foi diferente entre as regiões nessa profundidade, com 0,8 a mais na região sul do que na equatorial. Na profundidade de 300m a diferença entre a máxima e mínima temperatura registrada para toda a área de estudo foi de 4,5°C e enquanto que a diferença entre médias das regiões foi de 0,95°C. A salinidade não variou muito meridionalmente a essa profundidade. Em 1000m de profundidade, a diferença entre a máxima e mínima temperatura registrada para toda a área de estudo foi de 0,7°C e enquanto que a diferença entre médias das regiões foi 0,5°C. Assim como foi observado nos mapas de 2017, na Figura 11 também têm influência das variações sazonais para os valores mostrados.

*Figura 11 - Mapas da distribuição de temperatura coletados em 2007 na região equatorial sudoeste (a) a 120m de profundidade, (b) a 300m de profundidade e (c) a 1000m de profundidade.*



*Fonte: A autora.*

Nas Figuras 6b e 6d; 8b e 8d há um aumento de temperatura em relação a profundidade, isso se dá por que nos gráficos são usados valores de temperatura e não corrigida, que é a temperatura potencial. A partir de certa profundidade a pressão causa esse efeito nos valores de temperatura.

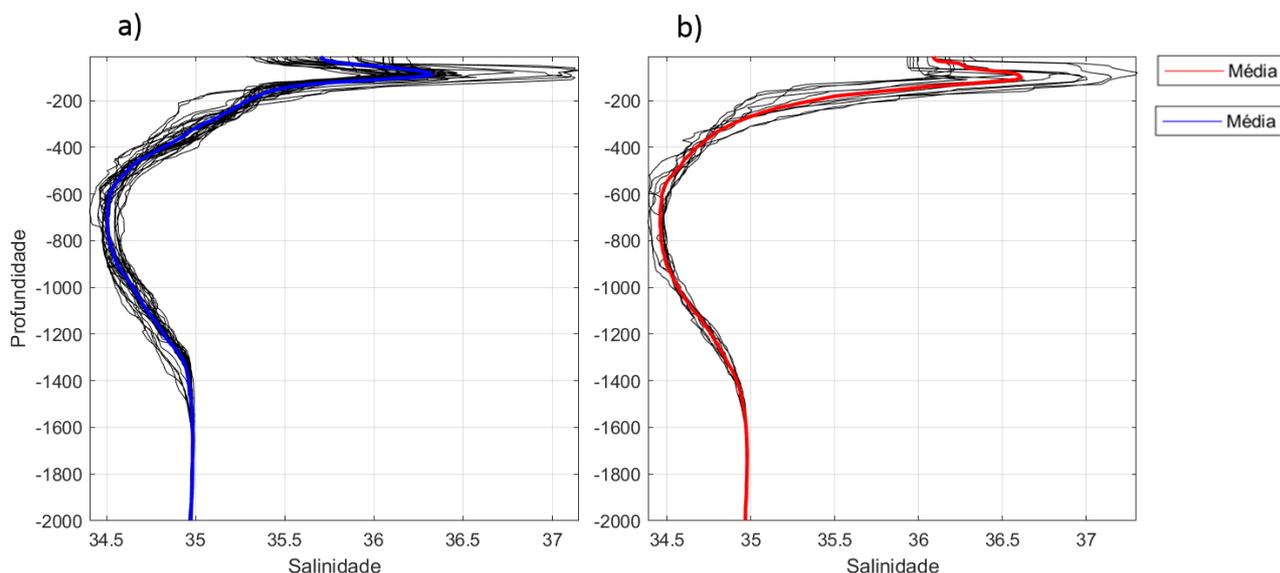
### 4.3 DADOS DE 1999

Os dados de 2007 possuem abrangência espacial parecida com os perfis de 2017, então as diferenças aqui demonstradas para esses dois anos são mais confiáveis que as de 2017 em relação a 1999.

A ATS foi percebida desde a superfície até 100 e 120m de profundidade com a presença da AMS a 90m e a 100m de profundidade nas regiões equatorial e tropical respectivamente. A isopicnal  $24\text{kg/m}^3$  coincidiu com essas profundidades para AMS. As Figuras 12a) e 12b) mostram os perfis de salinidade para o referente ano. A valores máximo e mínimo para a AMS foram 37,2 e 36,03.

A isoterma de  $10^\circ\text{C}$  estava a 350m de profundidade na região central em 1999, 20m mais profunda que os anos de 2007 e 2017, enquanto estava a 290m de profundidade na região sul assim como observada em 2007 isopicnal  $27,1\text{kg/m}^3$  se estendeu de 490m a 610m de profundidade. A ACAS foi observada com extensão vertical de 500m na região central e de 490m na região sul, usando o limite superior como a isoterma de  $20^\circ\text{C}$  e o limite inferior como a isopicnal de  $27,1\text{kg/m}^3$ . A AIA se estendeu de 600m a 1300m de profundidade na região central e 1400m de profundidade na região sul. A APAN pode ser notada abaixo dos 1300m de profundidade. E a APAN teve pouquíssima variação sazonal, mas é possível perceber que houveram alguns perfis em que quebra do aumento de salinidade foi mais profunda que a média.

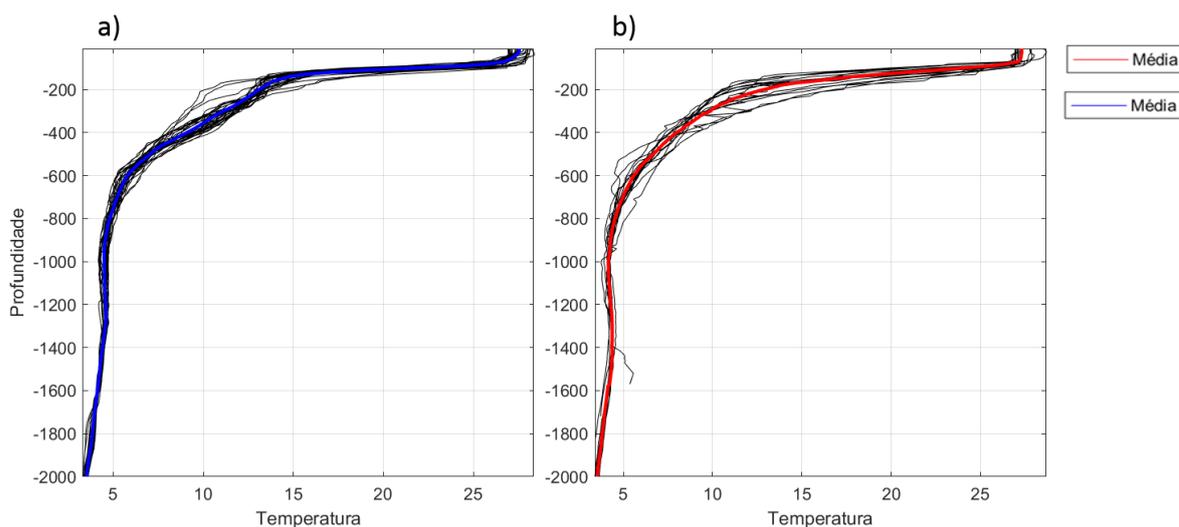
*Figura 12 - Perfis de salinidade coletados em 1999 na região equatorial sudoeste. A Figura 12(a) é referente aos perfis da região central e a Figura 12(b) é referente aos perfis da região sul.*



*Fonte: A autora.*

A despeito do número menor de perfis para o ano de 1999, ainda é possível ver a variação anual em seus perfis, representado como os perfis em preto. Na Figura 12, na região ocupada pela a AMS é possível ver que há valores bem acima da média, que se enquadrariam como a estação da primavera. Os dados por FREITAS (2003), registraram a maior média para a profundidade de 100m nesta estação com o valor de 36,76.

*Figura 13 - Perfis de Temperatura coletados em 1999 na região equatorial sudoeste. As Figuras (a) correspondente a região central enquanto que a Figura (b) corresponde a região sul.*



*Fonte: A autora.*

Os perfis de temperatura mostrados na Figura 13 são bem parecidos com os dos anos anteriormente descritos e apresentam grande diferenças entre sim. A região central é mais quente superficialmente do que a região sul, o que é esperado. A variação de temperatura na região sul é mais suave do que na região central, que em cerca de 200m possui um decréscimo abrupto.

#### 4.4 – ANÁLISE CONJUNTA

Os limites superiores e inferiores da termoclina, da haloclina e da pycnoclina são listados na tabela 1.

*Tabela 1 - Valores para os limites da termoclina e haloclina para cada região e para cada ano.*

|                |            |       | 2017     |          | 2007     |          | 1999     |          |
|----------------|------------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                |            |       | Superior | Inferior | Superior | Inferior | Superior | Inferior |
| Haloclina      | Equatorial | Prof. | 40m      | 230m     | 40m      | 200m     | 40m      | 160m     |
|                |            | S     | 36,14    | 35,23    | 36,18    | 35,32    | 35,81    | 35,40    |
|                | Tropical   | Prof. | 90m      | 270m     | 80m      | 250m     | 30m      | 210m     |
|                |            | S     | 37,07    | 35,20    | 36,77    | 35,08    | 36,11    | 35,29    |
| Termoclin<br>a | Equatorial | Prof. | 40m      | 550m     | 30m      | 570m     | 40m      | 590m     |
|                |            | °C    | 27,6     | 6,81     | 27,42    | 6,27     | 27,39    | 5,87     |
|                | Tropical   | Prof. | 50m      | 590m     | 30m      | 550m     | 80m      | 580m     |
|                |            | °C    | 26,95    | 5,81     | 27,32    | 6,28     | 26,53    | 5,77     |

*Fonte: A autora*

Analisando as Figuras 6, 10, 13 e os dados da tabela 1, é possível ver que a mudança de temperatura na termoclina é mais suave na região sul do que na região central, e em cerca de 200m há uma queda abrupta de temperatura na região central dos 3 anos analisados. Apenas para o ano de 2017, a termoclina se encontrou mais rasa, com limite inferior em 550m de profundidade, na região central do que na tropical, com limite inferior em 590m de profundidade, mostrando também maior diferença de temperatura no limite inferior com 1°C de diferença entre as regiões. O esperado é a região equatorial possuir termoclina mais profunda, uma vez que está sujeita a mais mistura. A variação sazonal da termoclina pode ser inferida com a análise das Figuras 6,10 e 13 onde é possível ver que há maior variação para a região central do que para a região sul.

Para o ano de 1999, o início da termoclina estava nas profundidades de 100m e 120m de profundidade, e seus limites inferiores a 750m de profundidade para região central e 690m de profundidade para região sul. A isoterma de 5°C foi limite inferior da termoclina em ambas as regiões.

A haloclina se encontra mais rasa na região central do que na região sul. Uma variação

observada foi quanto ao aumento de salinidade no limite superior da haloclina com o passar dos anos, sendo um aumento de 0,3 de 2007 para 2017 e de 0,9 de 1999 para 2017. Mesmo que se descarte os valores de 1999, existe diferença de 0,3 na média da salinidade aferida entre 2007 e 2017.

Os dados possuíram os seguintes valores para desvio padrão.

*Tabela 2 - Relação dos valores de desvio padrão dos dados observados.*

|      | Região central |             | Região sul |             |
|------|----------------|-------------|------------|-------------|
|      | Salinidade     | Temperatura | Salinidade | Temperatura |
| 1999 | 0,35 – 0       | 2,5 – 0     | 0,6 – 0    | 3,5 - 0,1   |
| 2007 | 0,47 – 0       | 4,3 – 0     | 0,35 – 0   | 2,3 - 0     |
| 2017 | 0,4 - 0,05     | 4,3 – 0     | 0,4 – 0    | 2,3 - 0     |

*Fonte: A autora*

Quando foi gerado o perfil resultante do cálculo de desvio padrão (não mostrado) feito com todos os perfis, pode se perceber que todos possuem desvio máximo nas regiões da haloclina e termoclina. Essa situação já é esperada, tanto porque os perfis são de diferentes meses do ano, o que gera uma termoclina/haloclina sazonal, quanto porque a profundidade dessa região de abrupta mudança, varia.

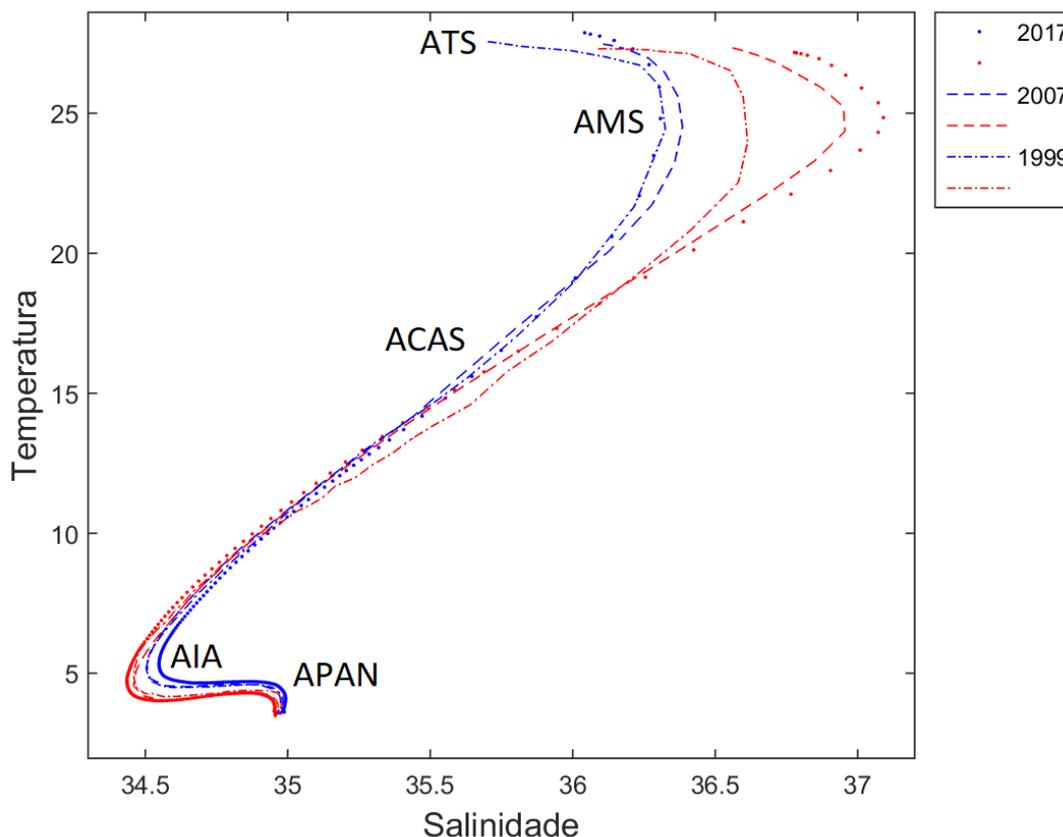
Os dados de 1999 obtiveram menor desvio padrão na região central em relação aos perfis dos outros anos. A pequena abrangência espacial dos perfis de 1999 dificulta a comparação entre perfis. Porém, deve se lembrar que os dados de 1999 possuem abrangência espacial com uma sessão zonal a 4°S e outra sessão meridional, em 35°W. Ao compararmos os valores de desvio padrão da sessão meridional da região central com os valores de desvio padrão da sessão zonal feita na região sul, pode-se inferir que as variações de temperatura e salinidade são maiores zonalmente na região sul do que meridionalmente na região central.

Se descartamos os valores de 1999, os dados que obtiveram maior desvio padrão estão na região central. Essa variação pode ser por que o efeito da sazonalidade tem maior influência na região central do que na região sul. As suposições feitas sobre as variações de massa de água durante o ano feitas no tópico anterior podem ser confirmadas com esse dado.

#### **4.4.1 – Médias**

A utilização de gráficos TS para identificação de massa de água é essencial. Na Figura 14 são mostrados os resultantes de cada ano e região, de forma a analisar mais precisamente as diferenças das massas de água temporalmente.

Figura 14 - Diagrama TS, para cada região e para cada ano. Os perfis pontilhados correspondem ao ano de 2017, os tracejados ao ano de 2007 e os intervalados entre ponto e traço são perfis de 1999. A cor azul é correspondente a região central, e a vermelha a região sul.



Fonte: A autora.

A superfície da água do mar possui valores de temperatura menor na região sul que na equatorial, com uma diferença é de 0,7°C. Em comparação com 2017, a ATS foi observada 20m acima em 2007 na região sul e a AMS 10m abaixo para a mesma região. A média de temperatura para a ATS na região sul é de 24,9°C em 2017, 25,6°C em 2007 e 25,8°C em 1999, ou que pode significar um decréscimo nos valores de temperatura com o tempo

A principal diferença observada nesse gráfico é que AMS além de ser mais salina na região sul que na equatorial, ela sofreu um aumento desde 1999 até 2017. Na Figura 15a é possível atestar esse aumento de salinidade com o passar dos anos. As máximas registradas em 2017 para a região sul, são de 37,52 em superfície e 37,48 a 100m, onde foi identificado o centro da AMS, enquanto no ano de 2007 foram 37,11 e 37,28 respectivamente. Houve aumento também nos valores mínimos, que em 2007 foram de 35,08 em superfície e 35,34 a

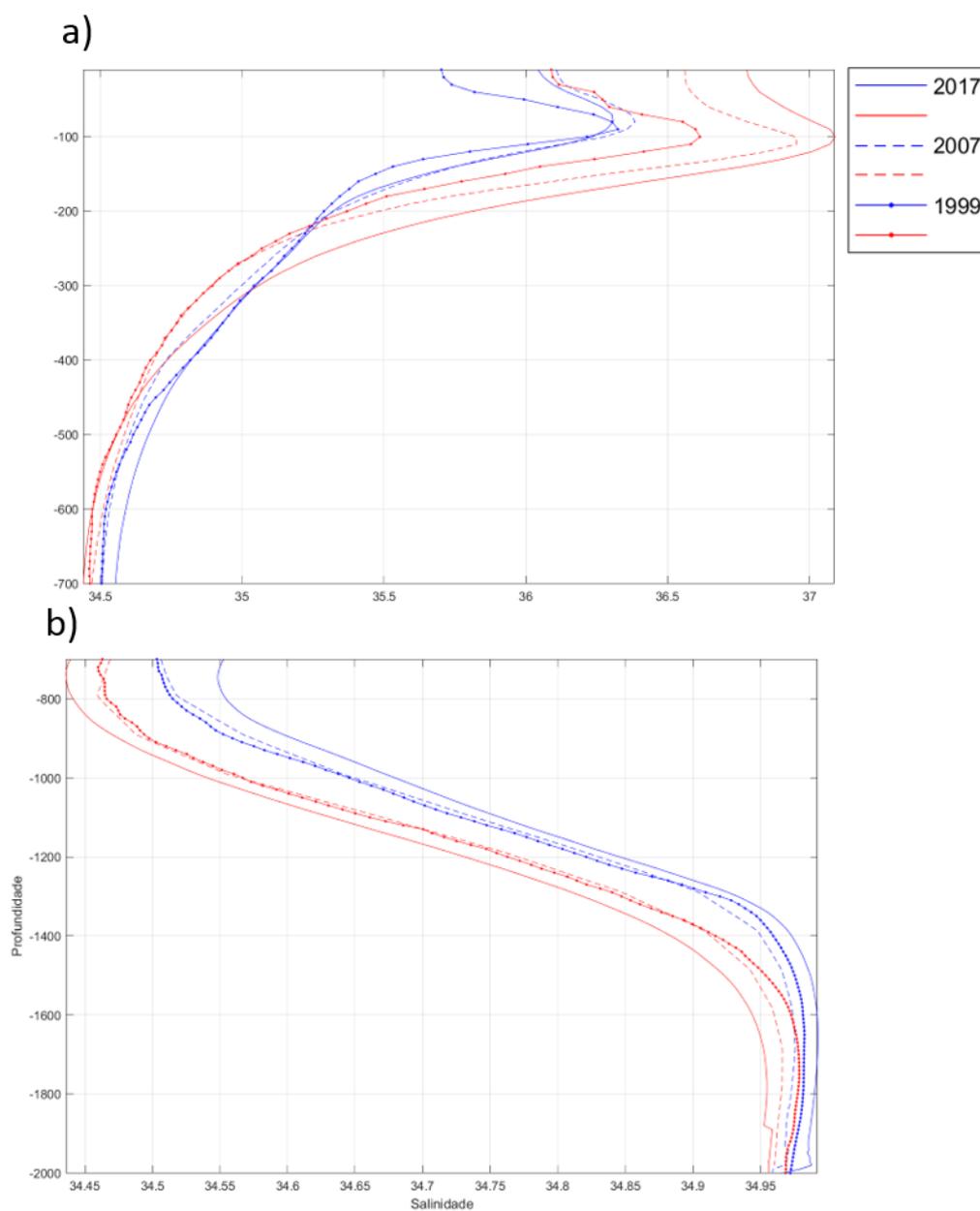
100m, enquanto que em 2017 se registrou 35,23 e 35,40 respectivamente. O núcleo da AMS ficou acima de 100m de profundidade na região central nos 3 anos, como pode ser observado na Figura 15a, enquanto que na região sul ele variou entre 100m e abaixo disso. É sutil de perceber na Figura 14, mas com o auxílio da Figura 16 é possível observar que a AMS é mais fria na região central do que na tropical. As profundidades da AMS variaram entre 80m e 100m, e os valores de temperatura relativos a região sul são mais altos nessas profundidades do que os valores da região central.

É possível perceber também que na região central, os valores de salinidade e temperatura da AIA sofreram um aumento com o tempo. Na Figura 15b e na Figura 16b é mostrado de forma mais detalhada essa observação feita no TS da Figura 14. Na região sul, o que acontece é de certa forma inverso a essa observação: A AIA sofre uma diminuição nos valores de salinidade e temperatura, que podem ser observados na Figura 14 e confirmados nas Figuras 15b e 16b.

Na Figura 16, fica mais evidente a diferença entre a variação de temperatura com a profundidade, entre as regiões. Na região sul, o decaimento é mais sutil fazendo uma curva e também começando mais raso, enquanto no equador essa diferença é abrupta. Até cerca de 200m, os valores de temperatura da região central são maiores que os valores da região sul. A variação entre uma profundidade e a logo abaixo dessa é bem maior para a região central do que para região sul. As máximas variações de todos os anos, foram na região central, entre uma profundidade e outra, com valores entre 2,5°C e 1°C.

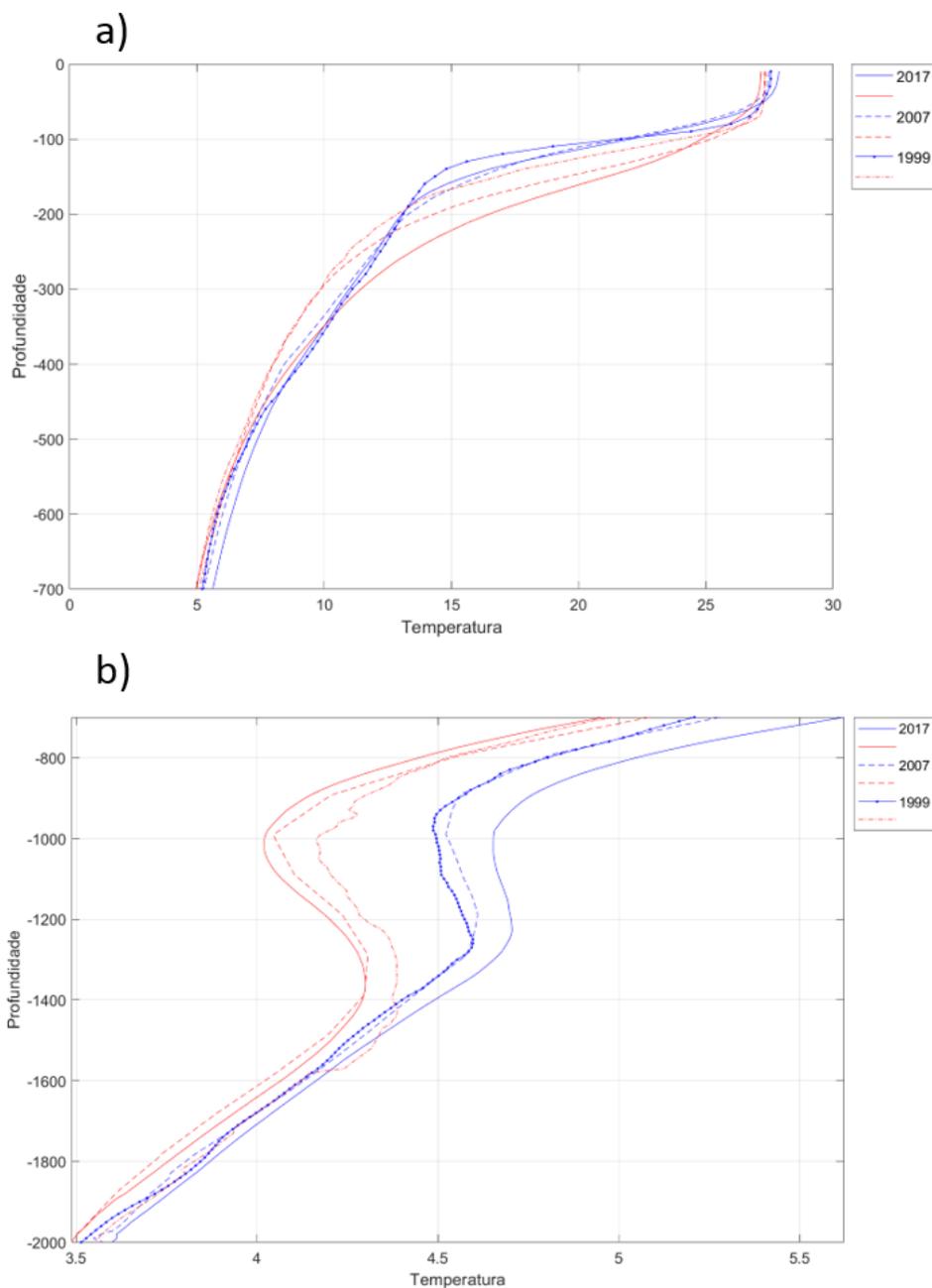
Na região sul, o que se nota é que com o passar do tempo, desde a superfície até cerca de 500m os valores de salinidade aumentaram. Após esse nível há um decréscimo nos valores com o passar dos anos. Até 100m de profundidade as salinidades máximas são observadas na região sul, isso para todos os anos, enquanto que a partir de 400m, principalmente em 500m de profundidade as salinidades maiores são encontradas na região central. As massas de água presentes na região central podem estar mais sujeitas à maior mistura vertical, o que pode ser uma explicação para a grande variação sazonal da AMS e da ACAS além para a diferença de valores da AIA entre as duas regiões estudadas.

Figura 15 - Médias de Salinidade para cada ano e região. A cor azul corresponde a região central e a vermelha a região sul. As linhas sólidas representam o ano de 2017, as tracejadas o ano de 2007 e a linha sólida com ponto o ano de 1999.



Fonte: A autora.

Figura 16 - Médias de Temperatura para cada ano e região. A cor azul corresponde a região central e a vermelha a região sul. As linhas sólidas representam o ano de 2017, as tracejadas o ano de 2007 e a linha solida com ponto o ano de 1999.



Fonte: A autora.

## 5 CONCLUSÃO

- A divisão de duas regiões foi efetiva, com resultados simples de que há diferença entre as zonas escolhidas. Ao se observar as mudanças entre uma região e outra, foi possível levantar novas perguntas quanto a extensão das massas de água e de seus valores anuais, bem como a mistura na transição de uma região para outra.
- O presente estudo englobou importantes zonas para circulação na margem brasileira, como a formação da SNB e a formação da CNB, com o resultado de acrescentar valores na literatura com os que já existem na região.
- A região compreendida entre as latitudes de 5°N e 5°S e as longitudes de 30°W e 45°W possui uma coluna de água com uma configuração de ATS (27,6°C a 21,8°C), AMS (~36,33 PSU), ACAS (19°C a 6,53°C), AIA (~34,54 UPS) e APAN (34,78 a 34,96 UPS). Valores médios encontrados para as médias de 1999,2007 e 2017.
- A região compreendida entre as latitudes de 5°S e 15°S e as longitudes de 28°W e 38°W possui uma coluna de água com uma configuração de ATS (27,2 a 20°.2, AMS (~36,88 UPS), ACAS (19°C a 6°C), AIA (~34,45 UPS) e APAN (34,78 a 34,96 UPS). Valores médios encontrados para as médias de 1999,2007 e 2017.
- A região central possivelmente possui maior mistura em grandes profundidades do que a região oceânica adjacente a sul. Uma possibilidade é da circulação zonal presente na zona equatorial influenciar na coluna de água onde há correntes meridionais, advinda de zonas tropicais.
- A AMS possui maior variação sazonal na região central, e quantidade de variáveis que podem resultar nos números encontrados por este trabalho influenciam na investigação dessa massa de água para essa região específica.
- Foi observado um aumento nas médias de salinidade e temperatura nas regiões da ATS e AMS entre os anos de 2007 e 2017.
- A AIA possui valores para temperatura menores na região sul do que na equatorial. Outros trabalhos poderiam investigar as transformações que acontecem a essa massa de água desde a sua área de formação na região polar, até onde ela deixa de ser identificada, em volta de 20°S. Os dados de EN4 podem ser suficientes para essa investigação, porém com maior quantidade de anos investigados.

## 6 REFERÊNCIAS

ARGO, 2018 Disponível em: (<http://www.argo.ucsd.edu/>) acesso em 04/12/18

CALIXTO, P. S. 2013; A subcorrente Norte do Brasil entre Fortaleza (CE) e o cabo do calcanhar (RN), Fortaleza, 2013. Monografia, Universidade Federal do Ceará.

DA SILVEIRA, I. C. A.; MIRANDA, L. B.; BROWN, W. S. - **“On the origins of the North Brazil Current”**. Journal of Geophysical Research. V. 105, pp. 22501–22512, 1994.

FRATANTONI, D. M., RICHARDSON, P. L., 2006, **“The evolution and demise of North Brazil Current rings”**, Journal of Physical Oceanography, v. 36, pp. 1241–1264.

FREITAS, I. C., 2003; **Estrutura Termohalina e Massa d’Água na Zona Econômica Exclusiva do NE-Brasileiro**. Recife, 2003. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Oceanografia Abiótica

GANACHAUD, A., 2003: **Large-scale mass transports, water mass formation, and diffusivities estimated from World Ocean circulation Experiment (WOCE) hydrographic data**. JGR, 108(3216).

GOOD, S. A., M. J. MARTIN, AND N. A. RAYNER (2013), EN4: **Quality controlled ocean temperature and salinity profiles and monthly objective analyses with uncertainty estimates**, *J. Geophys. Res. Oceans*, 118, 6704–6716, doi: 10.1002/2013JC009067.

LUMPKIN, R. & K. SPEER, 2003: **Large-scale vertical and horizontal circulation in the North Atlantic Ocean**. JPO, 33, 1902-1920

KRELLING, 2015: **The Potiguar Eddy: a subsurface anticyclone associated with the North Brazil Undercurrent at 4° S**. Tese (Doutorado) – Curso de Oceanografia Física, Universidade de São Paulo Instituto Oceanográfico, São Paulo,

MARIN, F. de O. **A Subcorrente Norte do Brasil ao Largo da Costa do Nordeste**. 2009.

140 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Oceanografia Física, Universidade de São Paulo Instituto Oceanográfico, São Paulo, 2009.

MORAES, S. O. C. **Caracterização da Corrente Norte do Brasil na região da retroflexão.** 2011. 81 f Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2011.

PETERSON R & STRAMMA L. 1991. **Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean.** *Progr. Oceanogr.* 26(1): 1-73.

RODRIGUES, R. R., L. M. ROTHSTEIN, & M. WIMBUSG, 2007: **Seasonal Variability of the South Equatorial Current Bifurcation in the Atlantic Ocean: A Numerical Study.** *Journal of Physical Oceanography*, 37, 16-30.

SCHOTT, F. A.; FISCHER, J.; STRAMMA, L. **Transports and pathways of the upper-layer circulation in the western tropical atlantic.** *Journal of Physical Oceanography*, v. 28, n. 10, p. 1904–1928, 1998.

SCHOTT, F. A.; STRAMMA, L.; FISCHER, J. **The warm water inflow into the western tropical atlantic boundary regime, spring 1994.** *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Wiley Online Library, v. 100, n. C12, p. 24745–24760, 1995.

STRAMMA L. 1991. **Geostrophic transport of the South Equatorial Current in the Atlantic,** *J. Mar. Res.*, 49(2): 281-294.

TALLEY, L. D., 2003: **Shallow, intermediate, and deep overturning components of the global heat budget.** *JPO*, 33, 530 – 560.