



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MARINHAS TROPICAIS**

**EDIE PINHEIRO CARVALHO LIMA**

**CARACTERIZAÇÃO TERMOHALINA DOS VÓRTICES DA  
RETROFLEXÃO DA CORRENTE NORTE DO BRASIL POR MEIO  
DE DADOS OBSERVACIONAIS**

**FORTALEZA, CEARÁ**

**2017**

**EDIE PINHEIRO CARVALHO LIMA**

**CARACTERIZAÇÃO TERMOHALINA DOS VÓRTICES DA  
RETROFLEXÃO DA CORRENTE NORTE DO BRASIL POR MEIO  
DE DADOS OBSERVACIONAIS**

Monografia apresentada à coordenação do curso de graduação em Oceanografia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia.

Área de concentração: Oceanografia Física

Orientador: Profa. PhD. Ana Paula Morais  
Krelling

**FORTALEZA, CEARÁ**

**2017**

A000z Lima E.P.C..  
CARACTERIZAÇÃO TERMOHALINA DOS VÓRTICES DA RETROFLEXÃO DA CORRENTE NORTE DO BRASIL POR MEIO DE DADOS OBSERVACIONAIS / Edie Pinheiro Carvalho Lima. 2017.  
52p.;il. color. enc.  
Orientador: Profa. PhD. Ana Paula Morais Krelling  
Co-Orientador:  
Dissertação(Graduação em Ciências Marinhas Tropicais) - Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Fortaleza, 2017.  
1. vórtices 2. CNB 3. I. Profa. PhD. Ana Paula Morais Krelling(Orient.) II. Universidade Federal do Ceará- Graduação em Ciências Marinhas Tropicais(Graduação) III. Bacharel

CDD:000.0

**EDIE PINHEIRO CARVALHO LIMA**

**CARACTERIZAÇÃO TERMOHALINA DOS VÓRTICES DA  
RETROFLEXÃO DA CORRENTE NORTE DO BRASIL POR MEIO  
DE DADOS OBSERVACIONAIS**

Monografia apresentada à coordenação do curso de graduação em Oceanografia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia. Área de concentração: Oceanografia Física

Aprovada em: \_\_/\_\_/\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

Profa. PhD. Ana Paula Morais Krelling  
Universidade Federal do Ceará - UFC  
Orientador

---

Prof. PhD. Carlos Eduardo Peres Teixeira  
Universidade Federal do Ceará - UFC

---

Prof. PhD. Antonio Geraldo Ferreira  
Universidade Federal do Ceará - UFC

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, a minha família, a minha orientadora Profa. Ana Paula por todo suporte metodológico e conhecimento da região e sua tranquilidade e disponibilidade durante a elaboração desta monografia. A todos do Laboratório de Oceanografia Física (LOF), ao Prof. Carlos Teixeira, Vitinho, Matheus, Daysiane, a Bárbara por todas as dicas e correções e a todo o corpo Docente e Discente do LABOMAR.



"Sempre pensar em ir  
Caminho do Mar  
Para os bichos e rios  
Nascer já é caminhar  
Não sei o que os rios têm de Homem do Mar  
Mais sei que se sente o mesmo e exigente  
chamar"

*(João Cabral de Mello Neto)*

## RESUMO

O estudo da caracterização dos vórtices da Corrente Norte do Brasil (CNB), por meio de dados in situ advindos dos derivadores ARGO, faz-se importante na medida em que podemos compreender melhor a massa e o calor desprendido da CNB em sua retroflexão. A partir de mapas de anomalia altimétrica da superfície do mar, foi possível identificar os vórtices da retroflexão da CNB, com números de vórtices formados, sazonalidade de geração e trajetórias. A utilização de dados de derivadores ARGO é apresentada de forma inédita, a partir da análise desses perfis hidrográficos foi possível identificar particularidades das regiões de domínio dos vórtices da retroflexão da CNB, como uma variação na assinatura de massas de água entre as regiões mais próximas e mais distantes do núcleo dos vórtices, bem como diferença na profundidade da camada de mistura. Palavras-chave: vórtices. CNB. .

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 Desenho esquemático das correntes do Atlântico Equatorial Oeste. No esquema, constam: Corrente Norte Equatorial (CNE), Contra Corrente Norte Equatorial (CCNE), Subcorrente Equatorial (SCE), Corrente Sul Equatorial (CSE), Corrente Norte do Brasil (CNB), Subcorrente Norte do Brasil (SCNB). Em vermelho, ilustração da região de formação dos vórtices da retroflexão da CNB. .... 18
- Figura 2 Desenho esquemático de seções de densidade e temperatura através de vórtices anti-ciclônicos (painel esquerdo) e ciclônico (painel direito). A densidade é indicada por  $\rho$ , sendo  $\rho_2 > \rho_1$ . .... 20
- Figura 3 Batimetria da região de estudo (ETOPO), com perfis de derivadores ARGO utilizados em vermelho e preto e anomalia positiva de altura de superfície do mar interpretados como vórtices em branco. .... 23
- Figura 4 Mapa de anomalia altimétrica, para o dia 31 março de 2014, gerado durante o processo de identificação de vórtices e seleção de perfis ARGO. Os contornos vão de 10 cm a 40 cm, em intervalos de 10 cm. Os pontos em magenta indicam máximos de anomalia altimétrica, consideradas núcleo de vórtice. Os pontos pretos indicam a localização de perfis ARGO no mesmo dia da anomalia altimétrica. .... 25
- Figura 5 Distribuição espacial dos vórtices identificados e perfis ARGO selecionados, para o ano de 2007 (painel superior) e para o ano de 2009 (painel inferior). 26
- Figura 6 Distribuição espacial dos vórtices identificados e perfis ARGO selecionados para o ano de 2011. .... 26
- Figura 7 Distribuição espacial dos vórtices identificados e perfis ARGO selecionados, na parte superior para o ano de 2013, na parte inferior para o ano de 2014. 27
- Figura 8 Perfis de temperatura (painel superior esquerdo), salinidade (painel superior direito) e local de amostragem dos dados (painel inferior) de um perfil descartado. No painel inferior, a localização do perfil em questão é destacada em vermelho. Os asteriscos em preto mostram a localização dos demais perfis hidrográficos selecionados. .... 28

Figura 9	Perfis de temperatura (painel superior esquerdo), salinidade (painel superior direito) e local de amostragem dos dados (painel inferior) de um perfil mantido. No painel inferior, a localização do perfil em questão é destacada em vermelho. Os asteriscos em preto mostram a localização dos demais perfis hidrográficos selecionados. ....	29
Figura 10	Perfis de temperatura (painel esquerdo) e salinidade (painel direito) para o ano de 2014. Em vermelho é destacado um perfil classificado como tipo A. ...	30
Figura 11	Perfis de temperatura (painel esquerdo) e salinidade (painel direito) para o ano de 2014. Em vermelho é destacado um perfil classificado como tipo B. ...	31
Figura 12	Trajetória do vórtice identificado no ano de 2006. Data de início: 08/01; data de término: 29/03 (Painel esquerdo). Para o ano de 2007, Data de início 04/09; data de término: 30/12.(Painel direito). ....	33
Figura 13	Trajetória dos vórtices identificados no ano de 2009. Em azul, data de início 17/01; data de término: 10/03. Em vermelho data de início 29/10; data de término: 30/12. Em verde data de início 22/02; data de término: 14/05 (Painel esquerdo). Para o ano de 2010. data de início 05/01; data de término: 29/01.(Painel direito) ....	34
Figura 14	Trajetória dos vórtices identificados no ano de 2011. Em azul, data de início 10/05; data de término: 14/06. Em verde, data de início 18/04; data de término: 02/06 (Painel esquerdo). Para o ano de 2012. Em azul, data de início 24/04; data de término: 13/05. Em vermelho, data de início 11/02; data de término: 31/03. Em verde, data de início 26/03; data de término: 13/05 (Painel direito). ....	35
Figura 15	Trajetória dos vórtices identificados no ano de 2013. Em azul, data de início 14/01; data de término: 23/02; Em vermelho, data de início 26/03; data de término: 03/05; Em verde, data de início 18/04; data de término: 01/05; Em amarelo, data de início 24/09; data de término: 26/10; Em azul claro, data de início 11/12; data de término: 30/12; Em preto, data de início 13/05; data de término: 28/05 (Painel esquerdo). Para o ano de 2014. Em azul, data de início 11/01; data de término: 11/04; Em vermelho, data de início 19/03; data de término: 25/05; Em verde, data de início 24/02; data de término: 29/04; Em azul claro, data de início 01/09; data de término: 15/09; Em preto, data de início 21/11; data de término: 16/12 (Painel direito). ....	36

Figura 16	Perfis de temperatura (painel superior esquerdo) e salinidade (painel superior direito) do tipo B selecionados para análise no ano de 2007. No painel inferior, a localização dos perfis amostrados é indicada em asteriscos vermelhos, e a localização de vórtices em pontos pretos. ....	37
Figura 17	Diagrama TS (painel superior esquerdo) e a variação da densidade ao longo da profundidade (painel superior direito) de perfis do tipo B selecionados para análise no ano de 2007. No painel inferior, a localização dos perfis amostrados é indicada em asteriscos vermelhos, e a localização de vórtices em pontos pretos. ....	37
Figura 18	Perfis de temperatura (painel superior esquerdo) e salinidade (painel superior direito) do tipo B selecionados para análise no ano de 2009. No painel inferior, a localização dos perfis amostrados é indicada em asteriscos vermelhos, e a localização de vórtices em pontos pretos. ....	38
Figura 19	Diagrama TS (painel superior esquerdo) e a variação da densidade ao longo da profundidade (painel superior direito) de perfis do tipo B selecionados para análise no ano de 2009. No painel inferior, a localização dos perfis amostrados é indicada em asteriscos vermelhos, e a localização de vórtices em pontos pretos. ....	38
Figura 20	Perfis de temperatura (painel superior esquerdo) e salinidade (painel superior direito) do tipo A selecionados para análise no ano de 2013. No painel inferior, a localização dos perfis amostrados é indicada em asteriscos vermelhos, e a localização de vórtices em pontos pretos. ....	39
Figura 21	Perfis de temperatura (painel superior esquerdo) e salinidade (painel superior direito) do tipo B selecionados para análise no ano de 2013. No painel inferior, a localização dos perfis amostrados é indicada em asteriscos vermelhos, e a localização de vórtices em pontos pretos. ....	39
Figura 22	Diagrama TS (painel superior esquerdo) e a variação da densidade ao longo da profundidade (painel superior direito) de perfis do tipo A selecionados para análise no ano de 2013. No painel inferior, a localização dos perfis amostrados é indicada em asteriscos vermelhos, e a localização de vórtices em pontos pretos. ....	40
Figura 23	Diagrama TS (painel superior esquerdo) e a variação da densidade ao longo	

	da profundidade (painel superior direito) de perfis do tipo B selecionados para análise no ano de 2013. No painel inferior, a localização dos perfis amostrados é indicada em asteriscos vermelhos, e a localização de vórtices em pontos pretos. ....	41
Figura 24	Perfis de temperatura (painel superior esquerdo) e salinidade (painel superior direito) do tipo A selecionados para análise no ano de 2014. No painel inferior, a localização dos perfis amostrados é indicada em asteriscos vermelhos, e a localização de vórtices em pontos pretos. ....	41
Figura 25	Perfis de temperatura (painel superior esquerdo) e salinidade (painel superior direito) do tipo B selecionados para análise no ano de 2014. No painel inferior, a localização dos perfis amostrados é indicada em asteriscos vermelhos, e a localização de vórtices em pontos pretos. ....	42
Figura 26	Diagrama TS (painel superior esquerdo) e a variação da densidade ao longo da profundidade (painel superior direito) de perfis do tipo A selecionados para análise no ano de 2014. No painel inferior, a localização dos perfis amostrados é indicada em asteriscos vermelhos, e a localização de vórtices em pontos pretos. ....	42
Figura 27	Diagrama TS (painel superior esquerdo) e a variação da densidade ao longo da profundidade (painel superior direito) de perfis do tipo B selecionados para análise no ano de 2014. No painel inferior, a localização dos perfis amostrados é indicada em asteriscos vermelhos, e a localização de vórtices em pontos pretos. ....	43
Figura 28	Seção de temperatura (painel superior) e salinidade (painel inferior) na Radial B da Comissão Oceano Norte III (radial com orientação sudoeste-nordeste, com início em cerca de 4°N, 50°W e fim em 7°N, 48°W). A isopicnal de 24.5kg/m <sup>3</sup> é mostrada em azul, como indicadora do topo da termoclina ....	45
Figura 29	Perfis de temperatura (paineis ao lado esquerdo) e salinidade (paineis ao lado direito) de perfis tipo A (paineis superiores), e tipo B (paineis superiores). Para o ano de 2014. ....	46
Figura 30	Diagrama T-S dos perfis tipo A amostrados no ano de 2014. O traçado em preto foi feito manualmente e representa as propriedades da maioria dos perfis na porção superior da coluna de água. Na Figura são indicadas: AT (Água Tropical); AMS (Água de Máxima Salinidade); ACAS (Água Central do Atlântico	

Sul); AIA-ACPS (Água Intermediária Antártica e Água Circumpolar Antártica Superior); APAN (Água Profunda do Atlântico Norte). . . . . 47

Figura 31 Diagrama T-S dos perfis tipo B amostrados no ano de 2014. O traçado em preto foi feito manualmente e representa as propriedades da maioria dos perfis na porção superior da coluna de água. Na Figura são indicadas: AT (Água Tropical); AMS (Água de Máxima Salinidade); ACAS (Água Central do Atlântico Sul); AIA-ACPS (Água Intermediária Antártica e Água Circumpolar Antártica Superior); APAN (Água Profunda do Atlântico Norte). . . . . 48

Figura 32 Diagrama T-S da base de dados LEVITUS para as 4 estações do ano: 9.5°N, 41.5°O (linhas contínuas); 0.5°S, 41.5°O (linhas tracejadas); 10.5°S, 35.5°O (pontos) . . . . . 49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Quantificação anual dos vórtices .....	32
Tabela 3.2	Ocorrências de vórtices por mês, para toda a série temporal analisada (2005 a 2014) .....	33

## LISTA DE SIGLAS

ACAS	Água Central do Atlântico Sul
AT	Água Tropical
ACAN	Água Central do Atlântico Norte
AMS	Água de Máxima Salinidade
CNB	Corrente Norte do Brasil
CCSE	Contra Corrente Sul Equatorial
CSE	Corrente Sul Equatorial
CSEc	Ramo Central da Corrente Sul Equatorial
CSEn	Ramo Norte da Corrente Sul Equatorial
CSEs	Ramo Sul da Corrente Sul Equatorial
CSEe	Ramo Equatorial da Corrente Sul Equatorial
CNE	Corrente Norte Equatorial
CCNE	Contra Corrente Norte Equatorial
SNB	Subcorrente Norte do Brasil
SCE	Subcorrente Equatorial
SSE	Subcorrente Sul Equatorial

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	17
<b>1.1</b>	<b>Corrente Norte do Brasil e suas retroflexões</b> .....	17
<b>1.2</b>	<b>Massas de Água na região da Corrente Norte do Brasil</b> .....	19
<b>1.3</b>	<b>Vórtices da Retroflexão da Corrente Norte do Brasil</b> .....	19
<b>1.4</b>	<b>Objetivo Geral</b> .....	21
1.4.1	Objetivos Específicos .....	21
<b>2</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	22
<b>2.1</b>	<b>Dados Altimétricos - AVISO</b> .....	23
<b>2.2</b>	<b>Dados Hidrográficos - ARGO</b> .....	24
<b>2.3</b>	<b>Identificação de vórtices e seleção de perfis ARGO</b> .....	24
2.3.1	Tratamento dos perfis hidrográficos .....	27
2.3.2	Classificação dos perfis hidrográficos .....	29
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	32
<b>3.1</b>	<b>Trajetória e quantificação dos vórtices - Dados AVISO.</b> .....	32
<b>3.2</b>	<b>Estrutura Termohalina - Perfis ARGO</b> .....	36
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	50
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	51

## 1 INTRODUÇÃO

A Corrente Norte do Brasil (CNB) encontra-se em uma importante região do Oceano Atlântico Tropical, no sentido de transferência de massa e calor entre os hemisférios e da movimentação da célula meridional de circulação global (JOHNS; ZANTOPP; GONI, 2003). O desprendimento de vórtices da retroflexão da CNB pode se configurar como um importante catalisador para essas transferências. Trata-se dos maiores vórtices do planeta com raio superficial de até 250 km (WILSON; JOHNS; GARZOLI, 2002) e raio de velocidade máxima de 125 a 150 km, podendo chegar a velocidade de até 1m/s (FRATANTONI; JOHNS; TOWNSEND, 1995)

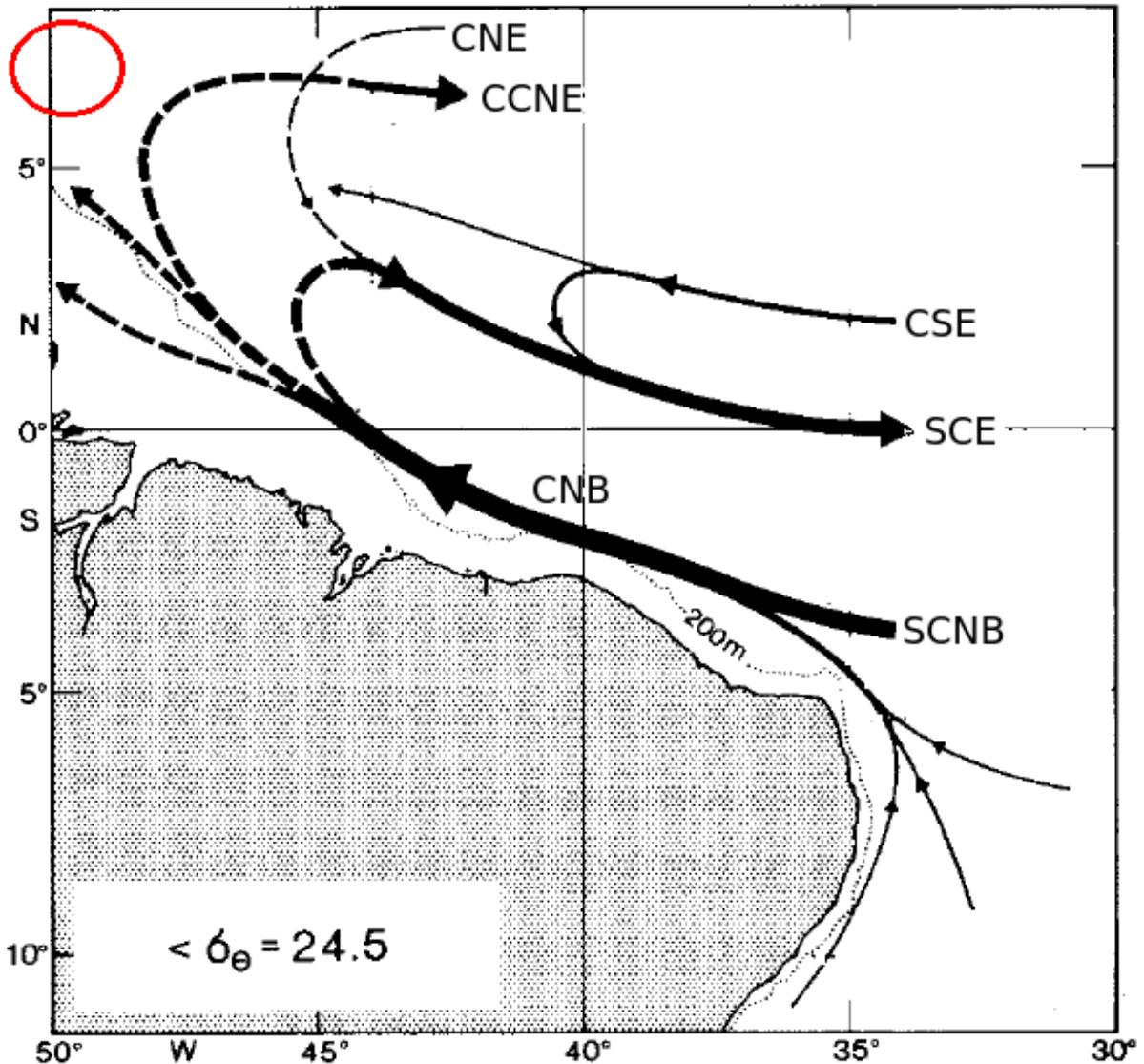
O estudo da caracterização dos vórtices da CNB faz-se importante na medida em que podemos compreender melhor a massa e o calor desprendido da CNB em sua retroflexão. A literatura indica um transporte médio de 1,1 Sv ( $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ) por vórtice gerado pela CNB (JOHNS; ZANTOPP; GONI, 2003). Este trabalho busca contribuir ao estudo de transporte interhemisférico que é estimado em 14 Sv (SCHMITZ, 1996), por meio de dados in-situ dos derivadores ARGO.

### 1.1 Corrente Norte do Brasil e suas retroflexões

A Corrente Norte do Brasil carrega, principalmente, águas superficiais, da termoclina e intermediárias do Oceano Atlântico Sul (FRATANTONI; RICHARDSON, 2006), que por meio do complexo sistema equatorial de correntes foram conduzidas até a CNB. Em superfície, a Corrente Sul Equatorial - ramo central (CSEc) e a Corrente Sul Equatorial- ramo equatorial (CSEe) seguem para oeste, influenciando uma coluna de água que se estende da superfície até 400 metros de profundidade (SCHOTT et al., 2005), com a Subcorrente Sul Equatorial (SSE) entre elas delineando seus limites.

Com os ramos superficiais da CSEc e CSEe sobrepostos, ao largo da costa nordeste brasileira, um núcleo em superfície é formado. É na fusão deste núcleo de superfície com o núcleo de subsuperfície da Sub Corrente Norte do Brasil (SNB) que já era alimentada pela Corrente Sul Equatorial - ramo sul (CSEs) que se dá a CNB(SCHOTT et al., 2003). Esta, por conta da sua origem, apresenta uma preponderante forçante termohalina com as feições de uma Corrente de Contorno Oeste, assim como também uma sazonalidade forçada pela ZCIT (Zona de Convergência Intertropical) (RODRIGUES; ROTHSTEIN; WIMBUSH, 2007), que altera a direção e magnitude dos ventos alíseos.

Figura 1: Desenho esquemático das correntes do Atlântico Equatorial Oeste. No esquema, constam: Corrente Norte Equatorial (CNE), Contra Corrente Norte Equatorial (CCNE), Subcorrente Equatorial (SCE), Corrente Sul Equatorial (CSE), Corrente Norte do Brasil (CNB), Subcorrente Norte do Brasil (SCNB). Em vermelho, ilustração da região de formação dos vórtices da retroflexão da CNB.



Adaptação de Schott et al (1998)

A CNB possui uma profundidade de até 1000 metros, velocidade de 1,5m/s em superfície e um transporte de 36 Sv. considerando seus dois núcleos (SCHOTT; FISCHER; STRAMMA, 1998). Quanto a suas retroflexões, temos uma de superfície localizada entre 6° e 7° N e 49° - 53° W alimentando a CCNE (FLAGG; GORDON; MCDOWELL, 1986). Uma importante característica desta retroflexão de superfície é seu fluxo não linear (JOCHUM; MALANOTTE-RIZZOLI, 2003), que pode penetrar até 2 raios de deformação de Rossby entre os hemisférios sem ajuste de vorticidade potencial (KILLWORTH, 1991). Na profundidade da termoclina há uma retroflexão da CNB em cerca de 45 ° W, próximo ao equador, originando assim a Sub

Corrente Equatorial (SCE) e ao mesmo tempo alimentando a Sub Corrente Norte Equatorial (SCNE) (BARNIER et al., 2001).

## 1.2 Massas de Água na região da Corrente Norte do Brasil

Na região equatorial, a Água Tropical (AT) possui temperatura média de 27 °C na camada de mistura. Em 50 m de profundidade, a temperatura diminui de 25 °C para 15 °C, e em 20 °C considera-se uma boa representação do limite inferior da AT (STRAMMA; SCHOTT, 1999). Presente na AT encontra-se uma Água de Máxima Salinidade (AMS), também chamada de Água Subtropical, essa água é formada por subducção na região do giro subtropical do Atlântico Sul, que é transportada por meio da CSE para a região oeste do Atlântico Tropical (STRAMMA; SCHOTT, 1999). Trata-se de uma água de alta salinidade em sub-superfície diferenciando-se da água de baixa salinidade da AT advinda da região equatorial.

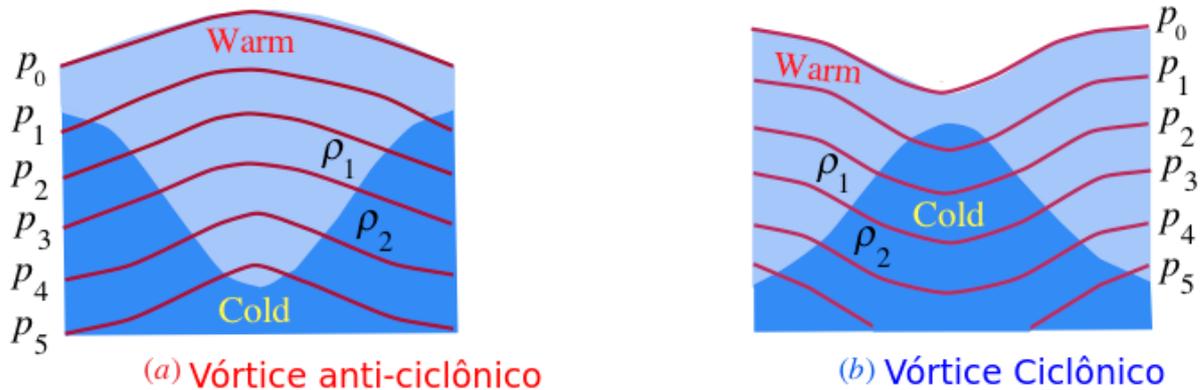
Duas qualidades de Água Central do Atlântico Sul (ACAS) são encontradas nesta região: a menos densa, formada na região subtropical sudoeste e que circula no giro subtropical do Atlântico Sul; E a mais densa, originária do Atlântico Sul, com contribuição de água do Índico advec-tada pela Corrente de Benguela. O mínimo de oxigênio encontrado na profundidade de 300-500m é atribuído à baixa renovação de água e indica o limite inferior da ACAS (STRAMMA; SCHOTT, 1999). A literatura indica a presença, nessa região, da Água Central do Atlântico Norte (ACAN), que apresenta uma maior salinidade e temperatura em relação a ACAS, e uma menor solubilidade de oxigênio. (Tomczak and Godfrey, 1994).

## 1.3 Vórtices da Retroflexão da Corrente Norte do Brasil

A Figura 2 apresenta uma comparação entre vórtices ciclônicos e anticiclônicos. De forma geral, os ciclônicos rotacionam no sentido horário (hemisfério sul), e os anticiclônicos rotacionam no sentido anti-horário (hemisfério sul). Tal padrão rotacional define a estrutura vertical do vórtice, sendo que o anticiclônico apresenta uma anomalia positiva da superfície do nível do mar e um deslocamento das isopicnais para uma maior profundidade, já o ciclônico apresenta uma anomalia negativa da superfície do nível do mar e um deslocamento das isopicnais mais próximo a superfície.

A não linearidade de um vórtice é definida por meio de uma razão entre a velocidade rotacional e a velocidade de propagação. Se tal razão for maior do que 1, a velocidade rotacional é maior do que a velocidade de propagação do vórtice, resultando assim em sua não linearidade (CHELTON D. B.; GAUBE, 2011). Um vórtice não linear é capaz de manter sua estrutura semi-independente das condições de seu entorno, transportando em seu interior massa e calor. Esta é uma importante característica dos vórtices que podem, juntamente com o transporte de água, transportar biota e nutrientes por exemplo. Assim, vórtices atuam como reguladores do balanço térmico e ecológico nos oceanos. Os vórtices da retroflexão da CNB são quentes, anticiclônicos, com anomalia altimétrica positiva e um aprofundamento da camada de mistura.

Figura 2: Desenho esquemático de seções de densidade e temperatura através de vórtices anti-ciclônicos (painel esquerdo) e ciclônico (painel direito). A densidade é indicada por  $\rho$ , sendo  $\rho_2 > \rho_1$ .



Adaptação de <http://nptel.ac.in/courses/>

Alguns estudos buscam a compreensão da hidrodinâmica responsável pela formação dos vórtices da retroflexão da CNB. Por meio de abordagem teórica, indica-se que o fluxo de quantidade de movimento da CNB paralelo à costa não pode ser balanceado, a não ser que vórtices sejam gerados e removam quantidade de movimento da corrente média (NOF; PICHEVIN, 1996). A utilização da modelagem numérica sugere que o desprendimento de vórtices seria causado por reflexão na costa brasileira de ondas de Rossby de primeiro modo baroclínico causadas por instabilidade barotrópica na CCNE com período de 50 dias (GONI; JOHNS, 2003). Tal sugestão foi verificada por Johns (1990) observado em  $52^\circ\text{W}$  período de 40-60 dias.

As estimativas sobre a taxa de desprendimento dos vórtices na literatura variam entre 2 e 7 vórtices por ano. Com a utilização de três anos de dados de altimetria estimou-se um desprendimento de dois a três vórtices por ano (FRATANTONI; JOHNS; TOWNSEND, 1995). Com dados relativos a 6 anos de altimetria indicou-se uma estimativa de 5 a 3 vórtices por ano, entretanto o mesmo grupo de pesquisadores utilizando 10 anos de dados de altimetria chegaram a uma estimativa de 3 a 7 vórtices por ano (GONI; JOHNS, 2001).

Uma outra abordagem, utilizando 3 anos de dados referentes à cor do mar, chegou a um indicativo de 6 vórtices por ano (FRATANTONI; GLICKSON, 2002). Finalmente por meio de dados de 1,5 ano de fundeio e cruzeiro oceanográfico estimou-se de 5 a 6 vórtices por ano (JOHNS; ZANTOPP; GONI, 2003).

Quanto à estrutura vertical dos vórtices, um estudo de 2002 identificou influência na profundidade de até 600 m, e velocidade máxima encontrada a 150 m (WILSON; JOHNS; GARZOLI, 2002). Em 2003, foi identificada velocidade máxima a 800m de profundidade, e uma extensão vertical dos 200 m até os 1000 m (GONI; JOHNS, 2003). Stramma et al (2005) verificaram velocidade máxima a 500 m de profundidade, e uma extensão vertical de 1200 m (STRAMMA et al., 2005).

Um indicativo para essa significativa diferença encontrada na estrutura vertical dos vórtices é a variação do transporte da CNB. No período de maior transporte da CNB, encontra-se uma

estrutura vertical mais profunda, e da mesma forma, vórtices de menor profundidade são encontrados em períodos de baixo transporte da CNB (JOHNS; ZANTOPP; GONI, 2003). Entretanto Garraffo et al (2003) indicaram que a determinação da estrutura vertical é mais complexa e determinada por processos distintos.

## **1.4 Objetivo Geral**

Caracterizar o perfil hidrográfico dos vórtices da retroflexão da Corrente Norte do Brasil, por meio de dados in situ advindos dos derivadores ARGO.

### **1.4.1 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos do presente estudo são:

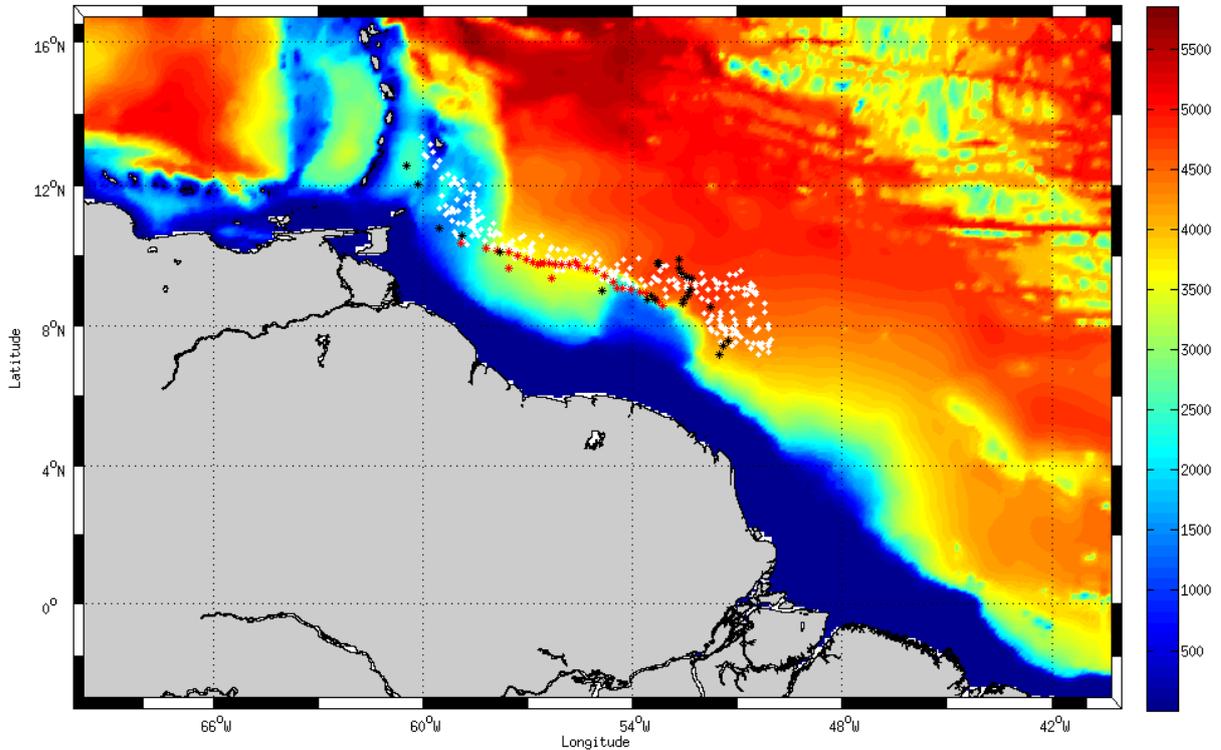
- Quantificar os vórtices formados detectáveis por anomalia da altura da superfície do mar.
- Identificar sazonalidade na ocorrência de vórtices.
- Identificar a trajetória dos vórtices formados.
- Caracterizar do ponto de vista hidrográfico os vórtices da retroflexão da CNB.
- Identificar as massas de água transportadas pelos vórtices da retroflexão da CNB.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

A investigação da estrutura de vórtices por meio da combinação de dados de satélite e dados in situ ARGO vem sendo utilizada amplamente com sucesso nos últimos anos (CHAIGNEAU A.; PIZARRO, 2011; CASTELAO, 2014; PEGLIASCO C.; MORROW, 2015; YANG G.; LIN, 2013; YANG G.; DUAN, 2015). De forma geral, com algumas diferenças, estes autores utilizaram um algoritmo automático que identifica os vórtices diariamente, registrando seu deslocamento. Para a consolidação dos perfis ARGO, Yang et al (2013) e Yang et al (2015) utilizaram para a composição dos vórtices a distância relativa meridional e zonal ( $dX, dY$ ) dos perfis ARGO adquiridos em relação ao centro do vórtice ( $dX_0 = dY_0 = 0$ ). Já Pegliasco et al (2015) utilizaram a técnica de classificação hierárquica ascendente (*Hierarchical Ascending Classification - HAC*). Em Castelao (2014) os perfis ARGO foram linearmente interpolados em 201 níveis regulares de 10 metros de espaçamento, da superfície até os 2000 metros de profundidade. Assim foi executada uma média climatológica geral de todos os perfis e calculada a anomalia para cada vórtice, método este diferente dos demais citados, nos quais a climatologia é retirada por meio do CARS (Atlas of Regional Seas 2009).

A principal diferença em relação ao nosso trabalho é a área de amostragem. De forma geral as áreas descritas pela literatura são amplas como por exemplo o noroeste do Oceano Pacífico, ou o Oceano Índico Tropical, ou ainda as Correntes de Contorno Leste. Nosso trabalho circunscreve-se a uma reduzida área do Atlântico Oeste Tropical, assim a quantidade de perfis de salinidade e temperatura advindos da plataforma ARGO é reduzida em relação aos demais trabalhos. A Figura 3 ilustra a região de estudo com a indicação dos dados ARGO utilizados para o ano de 2014.

Figura 3: Batimetria da região de estudo (ETOPO), com perfis de derivadores ARGO utilizados em vermelho e preto e anomalia positiva de altura de superfície do mar interpretados como vórtices em branco.



Desta maneira, optamos pela identificação manual dos vórtices por meio da anomalia altimétrica mínima de 10 cm e raio entre 100 e 250 km. Tal identificação foi feita de forma visual e diariamente, como apresentado na Figura 4. Definimos os limites para a localização dos vórtices superficiais entre 6° e 9° N e 49° - 53° W que é a localidade da retroflexão superficial da CNB. Neste estudo, diferentemente dos listados na literatura e considerando a quantidade de perfis ARGO, optamos em fazer estudos individuais, categorizando perfil a perfil, a fim de extrair uma estrutura representativa dos vórtices que desprendem-se da CNB.

## 2.1 Dados Altimétricos - AVISO

Os dados de sensoriamento remoto referentes a altimetria foram adquiridos por meio da distribuição Aviso+ (<http://www.aviso.altimetry.fr>) Trata-se do catálogo SSALTO/Duacs - (*Data Unification and Altimeter Combination System*) - resultado de processamento e homogeneização de multimissões, a saber: HY2, Saral/AltiKa, Cryosat-2, Jason-2, Jason-1, T/P, ENVISAT, GFO, ERS1/2. Assim o processamento de cada missão é feito pelo mesmo modelo matemático de correções, a calibração remove qualquer erro residual quanto à órbita do satélite, assim como o enviesamento dos dados devido a grande escala espacial. Após esta longa análise é calculada a média altimétrica para cada satélite e finalmente apresentada a anomalia dentro de uma grade com interpolação ótima ao qual permite agregar todos os satélites/missões em uma única grade referencial com resolução horizontal de 1/4 de grau, resolução temporal diária, desde 1993.

Nossa base de dados de anomalia altimétrica (MSLA) especificamente possui a terminologia "dt" que significa *Delayed Time reprocessing*. Trata-se de dados gerados com resolução global, utilizando as missões já citadas de forma gridada e homogeneizada.

A partir de 2016 houve uma migração da distribuição AVISO+ para o catálogo COPERNICUS dos dados de altimetria utilizados neste trabalho (<http://marine.copernicus.eu>). Foram adquiridos, para o presente trabalho, dados de 2005 a 2014.

## 2.2 Dados Hidrográficos - ARGO

A origem do projeto ARGO circunscreve-se ao período de 1990-1997 no âmbito do *World Ocean Circulation Experiment* (WOCE) que faz parte do World Climate Research Programme (WCRP). ARGO é uma série de derivadores adquirindo dados de temperatura, salinidade e localização geográfica, registrando um perfil de até 2000 m de profundidade, em todos os oceanos. Trata-se de um contínuo monitoramento do estado físico dos oceanos. Em 15-09-2016 estavam ativos 3739 plataformas ARGO. Desde 1999 até o ano de 2012 foram coletados 1 000 000 de perfis, possibilitando um grande avanço em pesquisas oceanográficas.

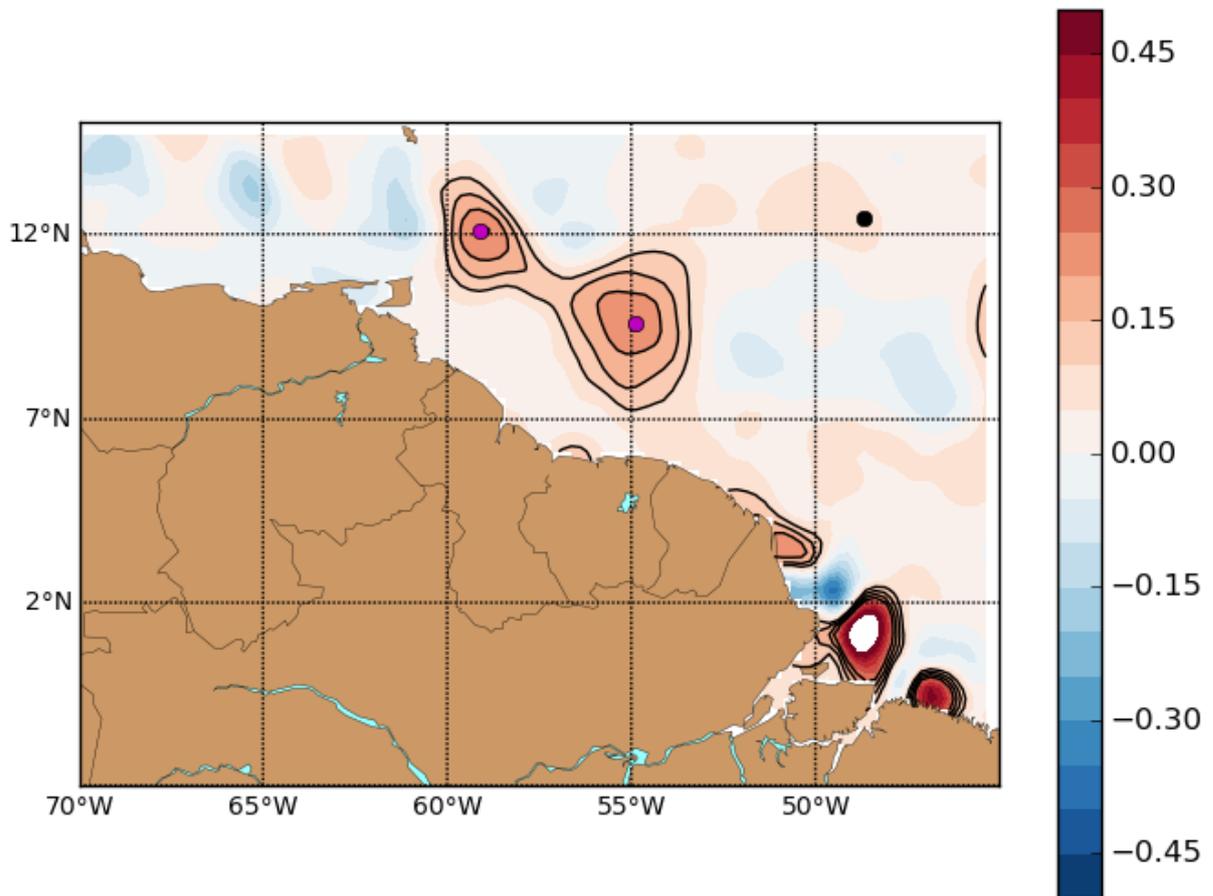
Para este trabalho foram adquiridos 10 anos dados de 2005 até 2014 no catálogo GODAE - (*Global Ocean Data Assimilation Experiment* - <http://www.usgodae.org/argo/argo.html>). Entretanto, apenas 4 anos foram aproveitados após o processamento dos dados, pois apresentaram ao menos um derivador/perfil dentro do domínio de vórtices da retroflexão da CNB.

## 2.3 Identificação de vórtices e seleção de perfis ARGO

Para os fins do presente estudo, consideramos vórtices da retroflexão da CNB as feições, nos mapas diários de anomalia de altura do nível do mar, com contornos fechados positivos e valores máximos iguais ou superiores a 10 cm, a oeste de 52 °W. Após a localização do vórtice ser identificada para cada dia (1/1/2005 - 31/12/2014), verificamos se havia(m) perfil(is) ARGO, nas proximidades dos vórtices identificados. Consideramos apenas os perfis ARGO a no máximo 250 km do máximo de altimetria.

Como resultado, obtivemos a localização dos vórtices, o tempo em que se apresentavam formados na região, assim como os perfis ARGO próximos aos vórtices. Neste momento não consideramos se os perfis ARGO se encontravam efetivamente no domínio de determinado vórtice ou fora dele. A Figura 4, mostra um exemplo de mapa altimétrico utilizado para determinação de vórtices.

Figura 4: Mapa de anomalia altimétrica, para o dia 31 março de 2014, gerado durante o processo de identificação de vórtices e seleção de perfis ARGO. Os contornos vão de 10 cm a 40 cm, em intervalos de 10 cm. Os pontos em magenta indicam máximos de anomalia altimétrica, consideradas núcleo de vórtice. Os pontos pretos indicam a localização de perfis ARGO no mesmo dia da anomalia altimétrica.



As Figuras 5 a 7 apresentam a localização dos vórtices identificados e dos perfis ARGO selecionados para a análise em cada ano. Vale destacar que para os anos de 2005, 2006, 2008, 2010 e 2012 não foi selecionado nenhum perfil ARGO para análise.

Figura 5: Distribuição espacial dos vórtices identificados e perfis ARGO selecionados, para o ano de 2007 (painel superior) e para o ano de 2009 (painel inferior).

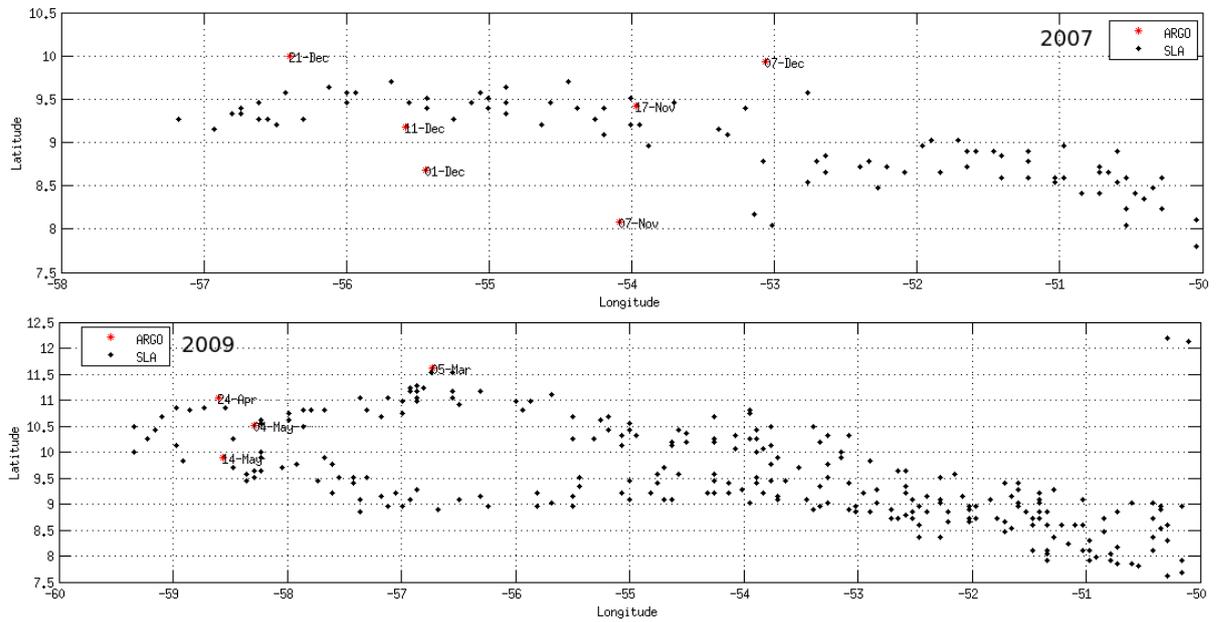


Figura 6: Distribuição espacial dos vórtices identificados e perfis ARGO selecionados para o ano de 2011.

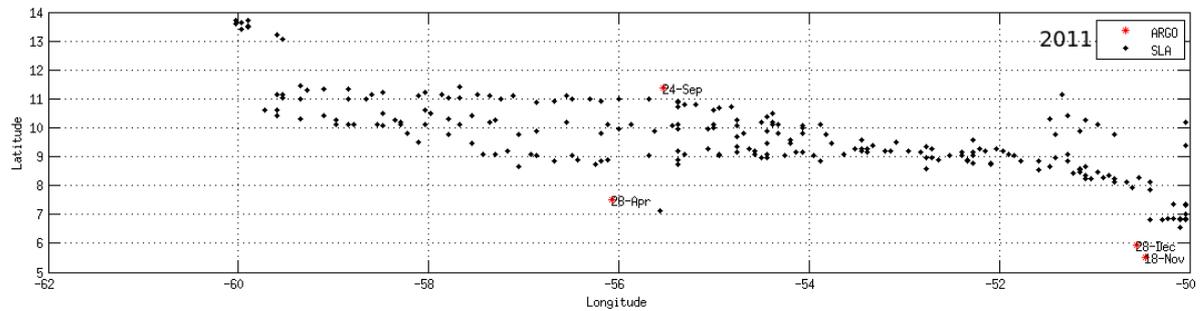
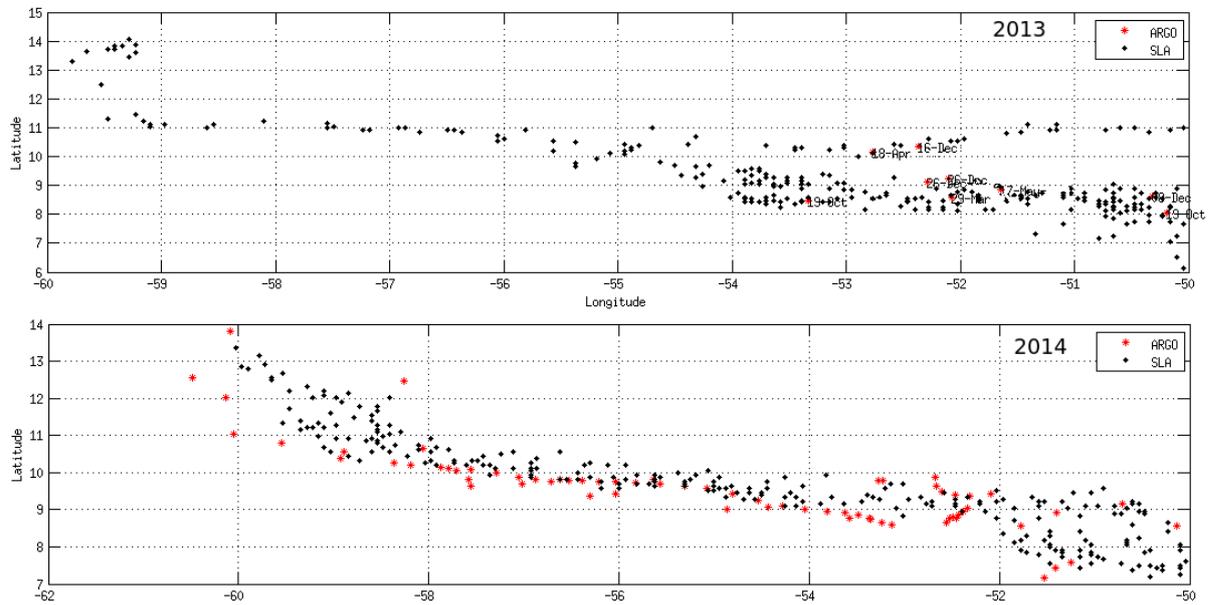


Figura 7: Distribuição espacial dos vórtices identificados e perfis ARGO selecionados, na parte superior para o ano de 2013, na parte inferior para o ano de 2014.



### 2.3.1 Tratamento dos perfis hidrográficos

Após a seleção dos perfis ARGO para o estudo, foi feito o tratamento dos dados, no sentido de descartar dados espúrios e perfis mais rasos que 1000 metros (Figuras 8 e 9).

Figura 8: Perfis de temperatura (painel superior esquerdo), salinidade (painel superior direito) e local de amostragem dos dados (painel inferior) de um perfil descartado. No painel inferior, a localização do perfil em questão é destacada em vermelho. Os asteriscos em preto mostram a localização dos demais perfis hidrográficos selecionados.

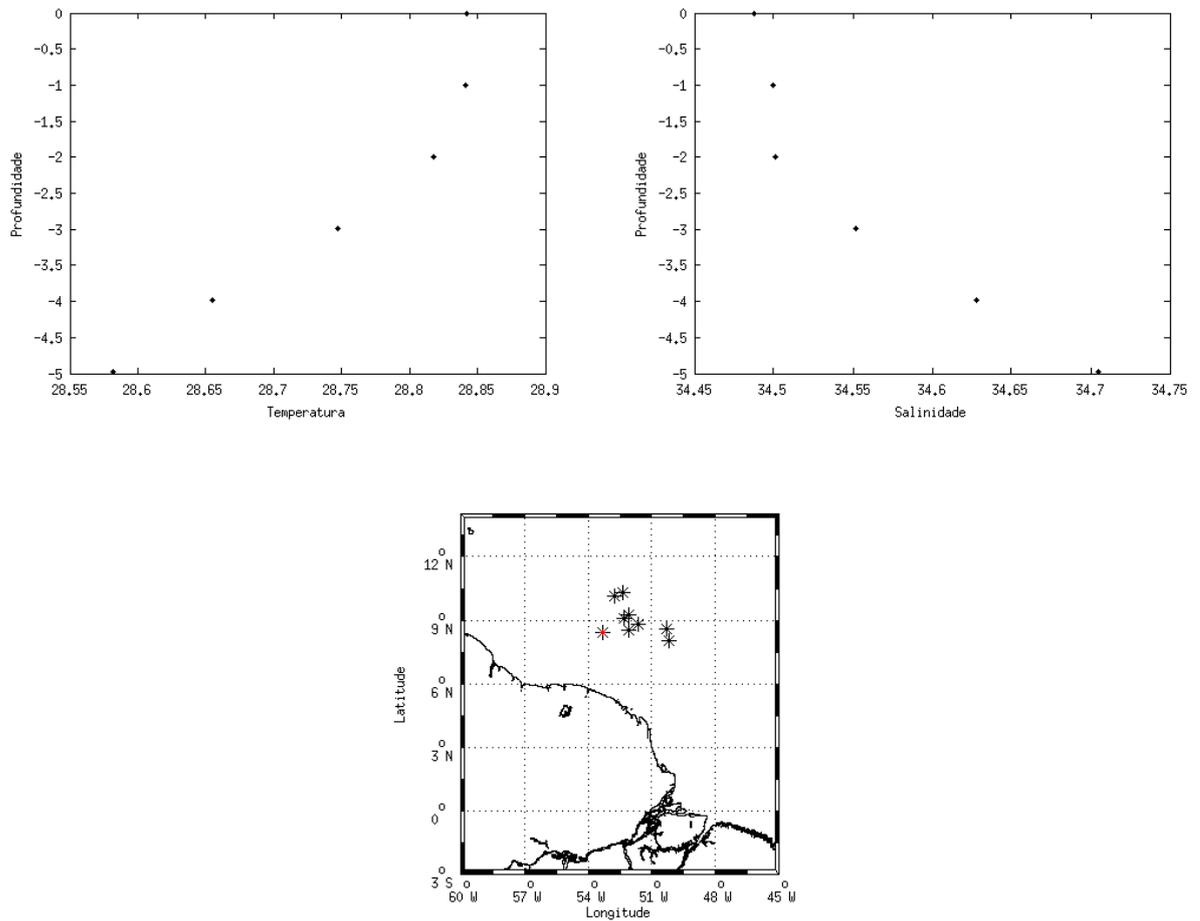
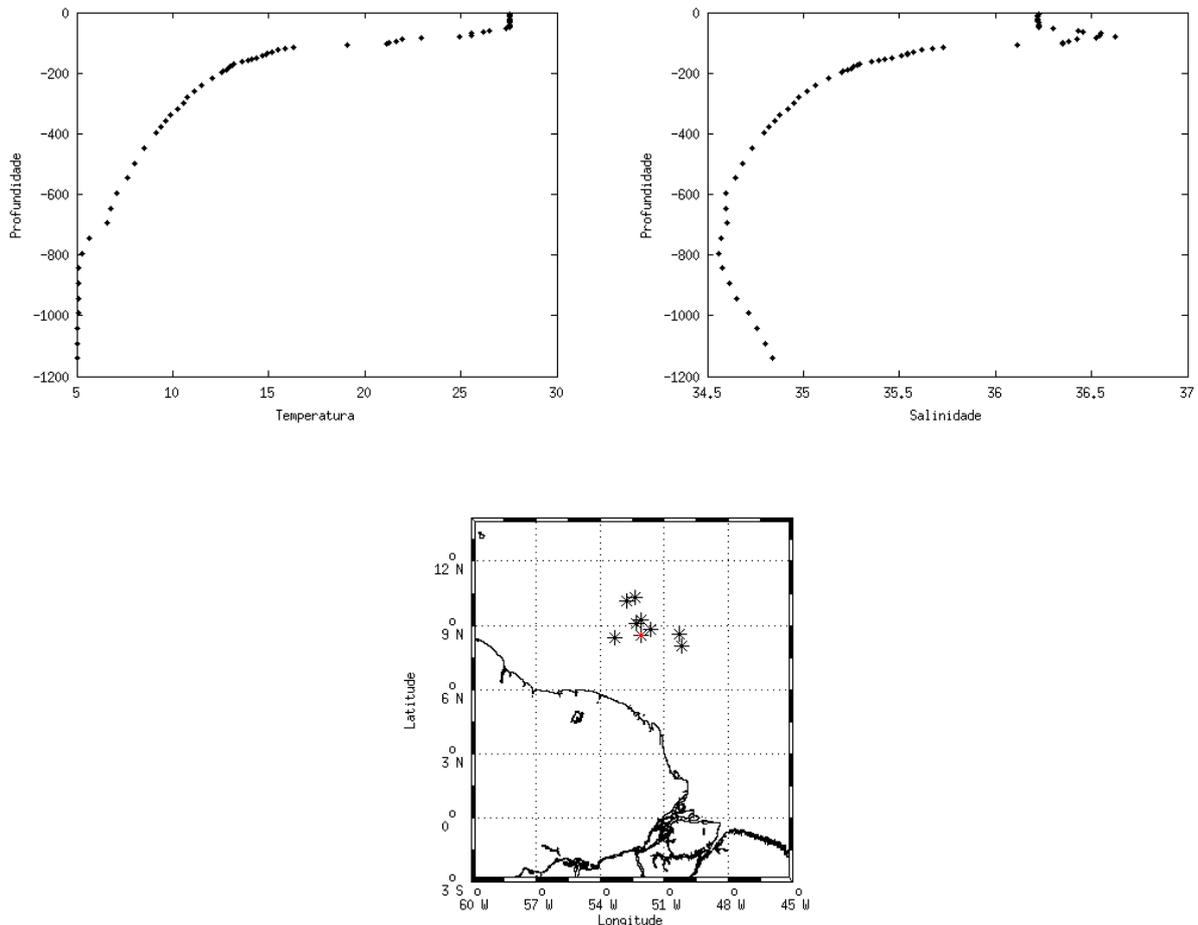


Figura 9: Perfis de temperatura (painel superior esquerdo), salinidade (painel superior direito) e local de amostragem dos dados (painel inferior) de um perfil mantido. No painel inferior, a localização do perfil em questão é destacada em vermelho. Os asteriscos em preto mostram a localização dos demais perfis hidrográficos selecionados.



### 2.3.2 Classificação dos perfis hidrográficos

Realizamos uma classificação visual dos perfis hidrográficos, na qual cada perfil foi analisado individualmente com base em suas características termohalinas nos primeiros 200 m da coluna de água. Foram identificados dois tipos de perfis na base de dados. Um primeiro, que chamaremos tipo A, com termoclina mais profunda e salinidade menor em relação aos perfis que chamaremos de tipo B, com uma camada de mistura menor e alta salinidade. Vale ressaltar que, por se tratar de uma classificação visual, sem a utilização de algoritmo computacional, há uma incerteza envolvida no método, que neste momento não podemos quantificar.

As Figuras 10 e 11 mostram exemplos de perfis caracterizados como A e B. Como comentado no parágrafo anterior, nota-se que o perfil tipo A possui uma camada de mistura mais espessa que o tipo B, bem como um menor valor na profundidade do máximo de salinidade, aproximadamente 100 a 200 m.

Figura 10: Perfis de temperatura (painel esquerdo) e salinidade (painel direito) para o ano de 2014. Em vermelho é destacado um perfil classificado como tipo A.

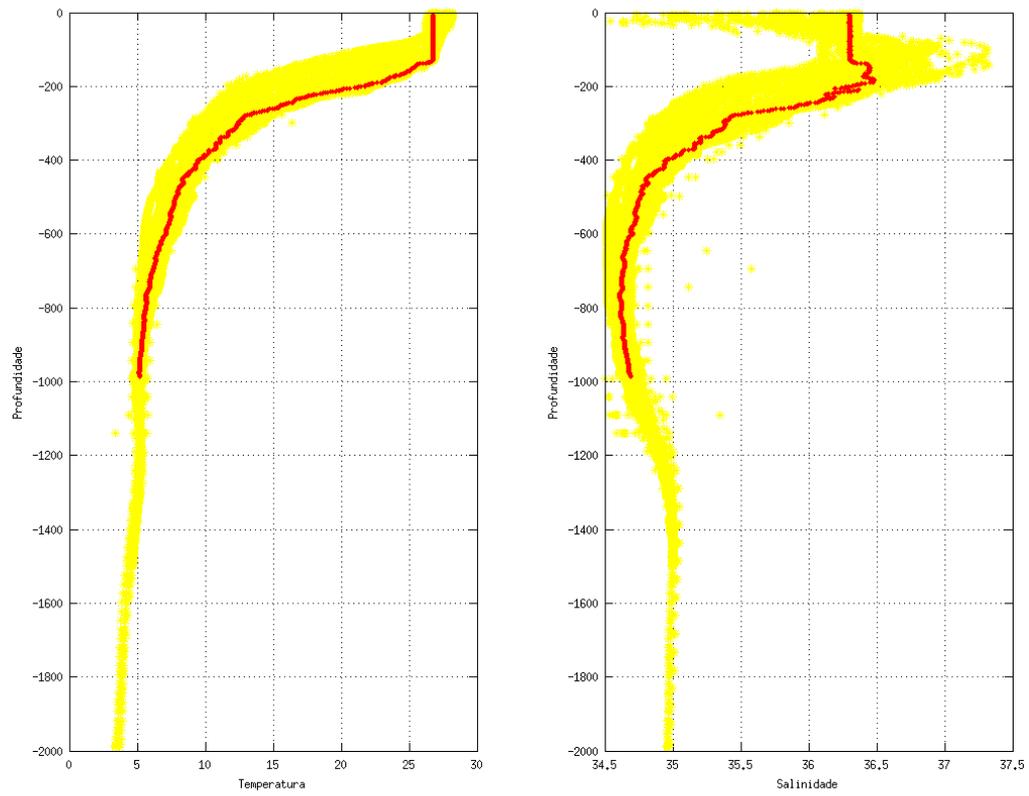
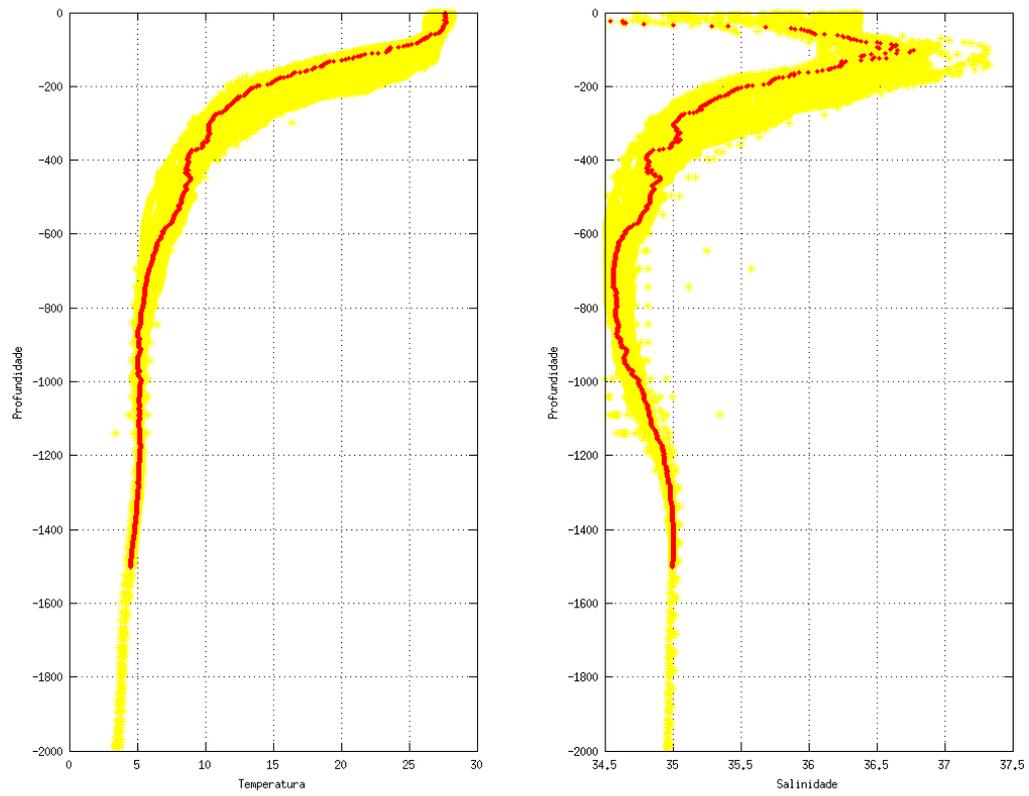


Figura 11: Perfis de temperatura (painel esquerdo) e salinidade (painel direito) para o ano de 2014. Em vermelho é destacado um perfil classificado como tipo B.



### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, apresentaremos primeiramente a quantificação e as trajetórias dos vórtices para cada ano, por meio dos dados altimétricos. Em seguida, apresentaremos e discutiremos os perfis hidrográficos.

#### 3.1 Trajetória e quantificação dos vórtices - Dados AVISO.

A Tabela 3.1 apresenta a quantificação dos vórtices identificados. Os anos de 2006, 2007, 2008 e 2010 apresentaram uma ocorrência menor que a mínima identificada na literatura (FRATAN-  
TONI; JOHNS; TOWNSEND, 1995) que é de 2 vórtices por ano. Os anos com mais vórtices foram os de 2013 e 2014, com 6 e 5 vórtices respectivamente. Como discutido na introdução, o número máximo de vórtices por ano apontado na literatura é de 7 vórtices (GONI; JOHNS, 2001)

Tabela 3.1: Quantificação anual dos vórtices

Ano	Total Vórtices
2006	1
2007	1
2008	0
2009	3
2010	1
2011	2
2012	3
2013	6
2014	5

Fonte: O autor (2017)

Por meio da Tabela 3.2 verifica-se que os meses de Julho e Agosto não apresentam nenhuma ocorrência de vórtice. Já nos meses Setembro a Novembro identifica-se a ocorrência crescente de vórtices. Tal evento está de acordo com o estudo de JOHNS et al. (2003), que aponta que os vórtices de maiores diâmetro e extensão vertical são formados no período em que a CNB está na fase de declínio do transporte máximo, ou seja nos meses de setembro-outubro.

JOHNS et al. (1998) indicam que nos meses de março a junho, o fluxo da CNB é confinado principalmente acima de 150 m de profundidade, gerando vórtices rasos. Os meses de março, abril e maio, segundo a Tabela 3.2, apresentam o maior índice de ocorrência de vórtices, o que é consistente com o autor citado. A maior quantidade de ocorrências justifica-se por serem vórtices de superfície, gerando uma assinatura altimétrica mais evidente.

As Figuras de 12 a 15 estão identificados os vórtices, a data de início e final, assim como sua localização. Pode-se aferir a trajetória dos vórtices no sentido noroeste, paralela ao talude da costa norte da América do Sul, ao longo de uma faixa de cerca de 300 km, em acordo com a literatura (FRATANTONI e RICHARDSON, 2006).

Tabela 3.2: Ocorrências de vórtices por mês, para toda a série temporal analisada (2005 a 2014)

Vórtices	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Ocorrências	6	7	9	9	10	2	0	0	3	3	4	4

Fonte:O autor (2017)

Figura 12: Trajetória do vórtice identificado no ano de 2006. Data de início: 08/01; data de término: 29/03 (Painel esquerdo). Para o ano de 2007, Data de início 04/09; data de término: 30/12.(Painel direito).

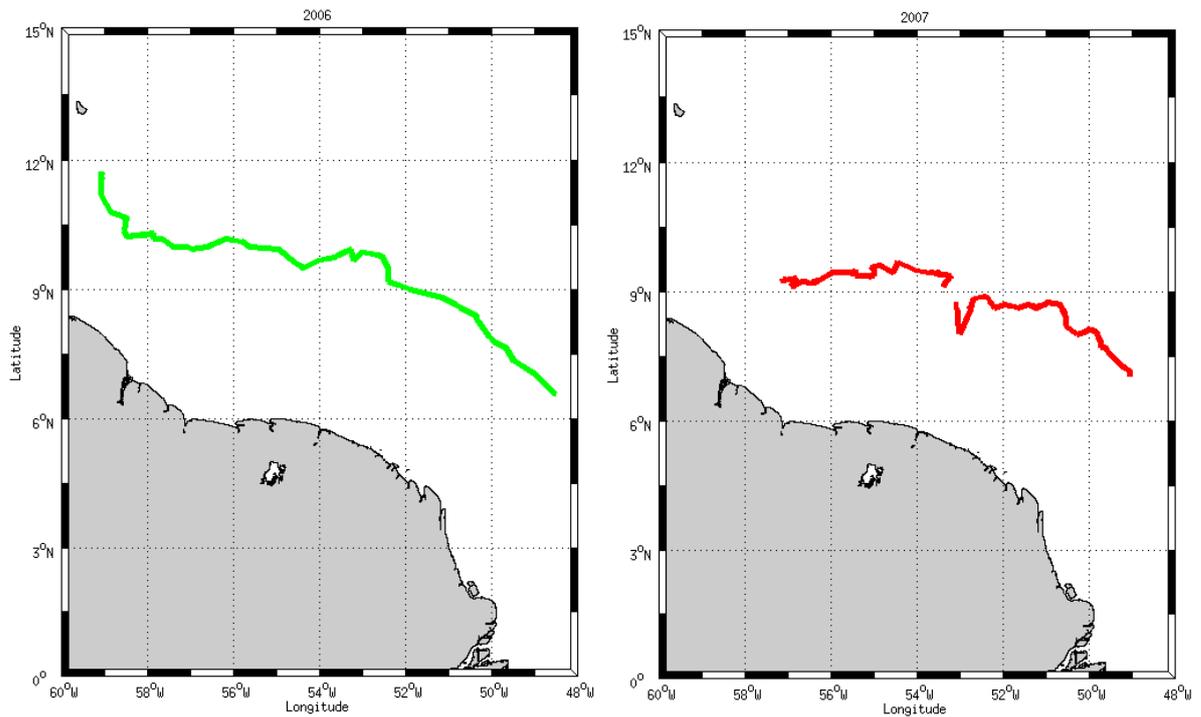


Figura 13: Trajetória dos vórtices identificados no ano de 2009. Em azul, data de início 17/01; data de término: 10/03. Em vermelho data de início 29/10; data de término: 30/12. Em verde data de início 22/02; data de término: 14/05 (Painel esquerdo). Para o ano de 2010. data de início 05/01; data de término: 29/01.(Painel direito)

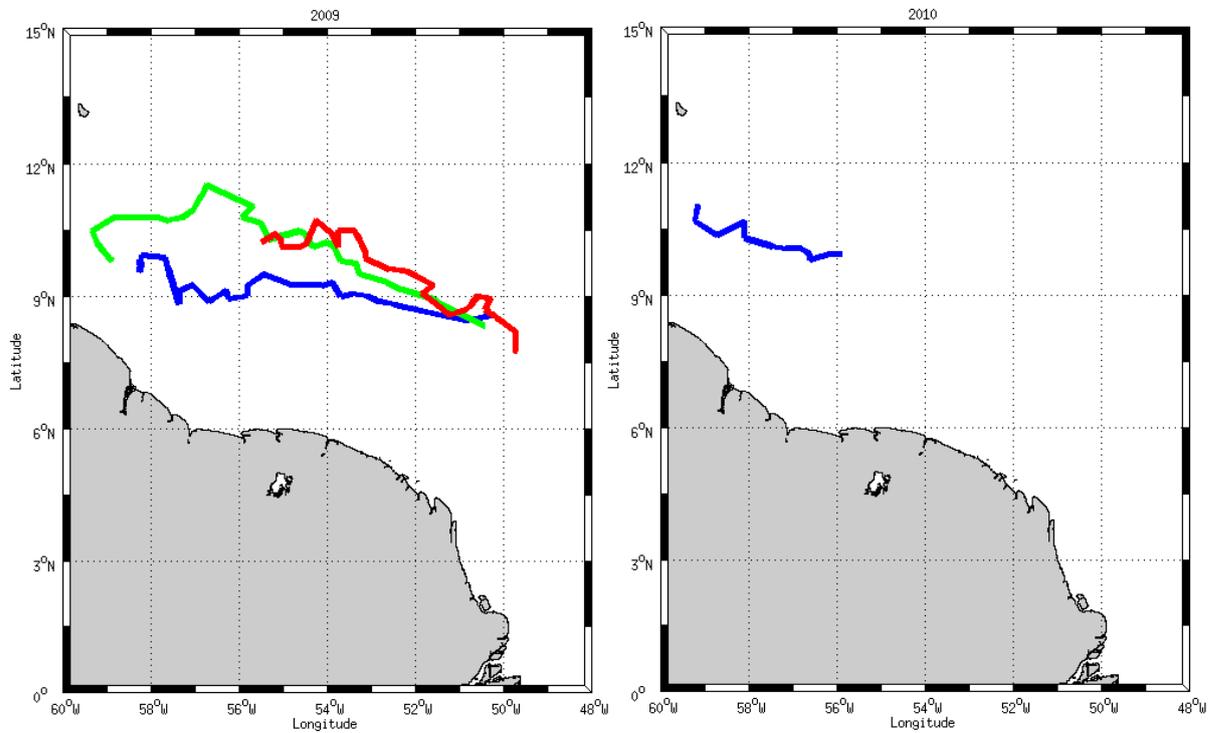


Figura 14: Trajetória dos vórtices identificados no ano de 2011. Em azul, data de início 10/05; data de término: 14/06. Em verde, data de início 18/04; data de término: 02/06 (Painel esquerdo). Para o ano de 2012. Em azul, data de início 24/04; data de término: 13/05. Em vermelho, data de início 11/02; data de término: 31/03. Em verde, data de início 26/03; data de término: 13/05 (Painel direito).

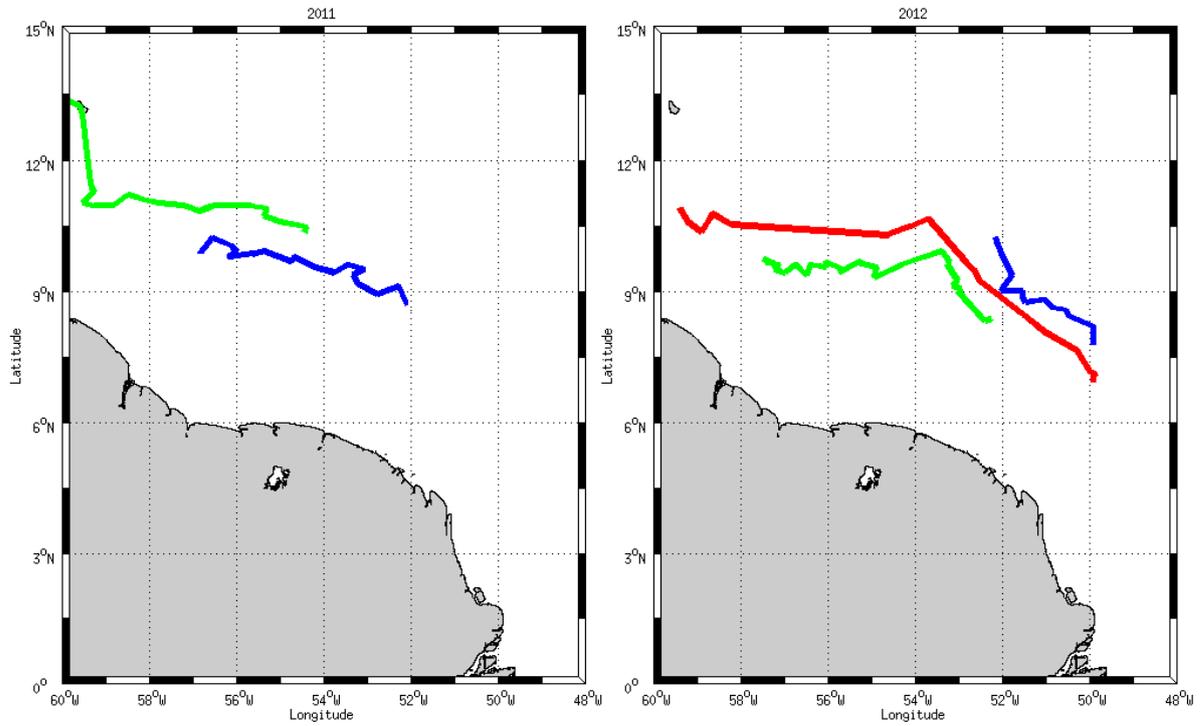
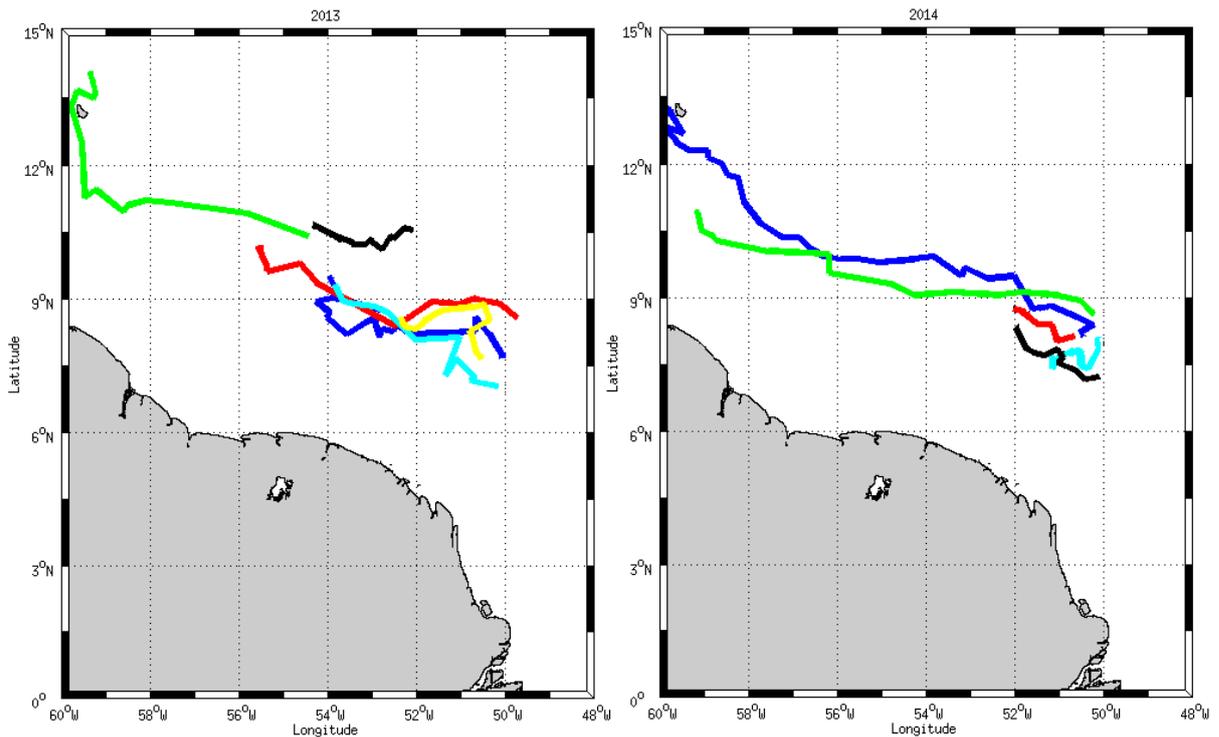


Figura 15: Trajetória dos vórtices identificados no ano de 2013. Em azul, data de início 14/01; data de término: 23/02; Em vermelho, data de início 26/03; data de término: 03/05; Em verde, data de início 18/04; data de término: 01/05; Em amarelo, data de início 24/09; data de término: 26/10; Em azul claro, data de início 11/12; data de término: 30/12; Em preto, data de início 13/05; data de término: 28/05 (Painel esquerdo). Para o ano de 2014. Em azul, data de início 11/01; data de término: 11/04; Em vermelho, data de início 19/03; data de término: 25/05; Em verde, data de início 24/02; data de término: 29/04; Em azul claro, data de início 01/09; data de término: 15/09; Em preto, data de início 21/11; data de término: 16/12 (Painel direito).



### 3.2 Estrutura Termohalina - Perfis ARGO

Nesta seção são apresentados os perfis hidrográficos selecionados para o estudo (Figuras de 16 a 27). Vale ressaltar que, de todos os anos de dados analisados (2005-2014), somente os anos de 2007, 2009, 2013 e 2014 apresentaram perfis selecionados para a análise pois apresentaram ao menos um derivador/perfil dentro do domínio de vórtices da retroflexão da CNB.

Figura 16: Perfis de temperatura (painel superior esquerdo) e salinidade (painel superior direito) do tipo B selecionados para análise no ano de 2007. No painel inferior, a localização dos perfis amostrados é indicada em asteriscos vermelhos, e a localização de vórtices em pontos pretos.

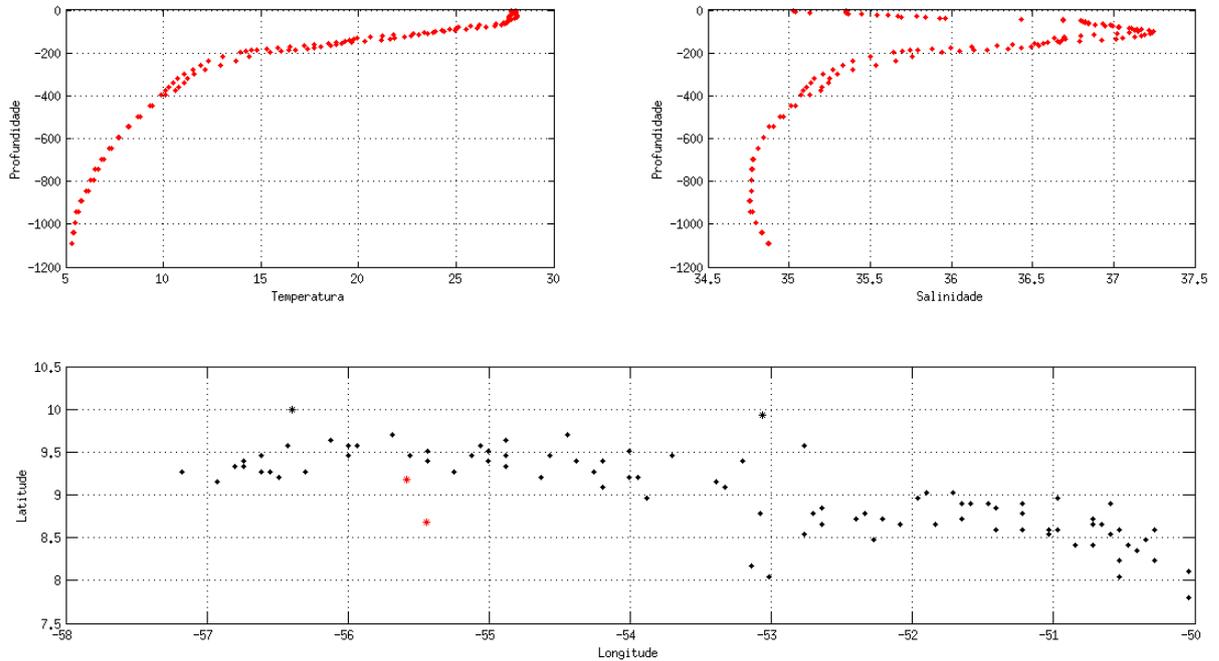


Figura 17: Diagrama TS (painel superior esquerdo) e a variação da densidade ao longo da profundidade (painel superior direito) de perfis do tipo B selecionados para análise no ano de 2007. No painel inferior, a localização dos perfis amostrados é indicada em asteriscos vermelhos, e a localização de vórtices em pontos pretos.

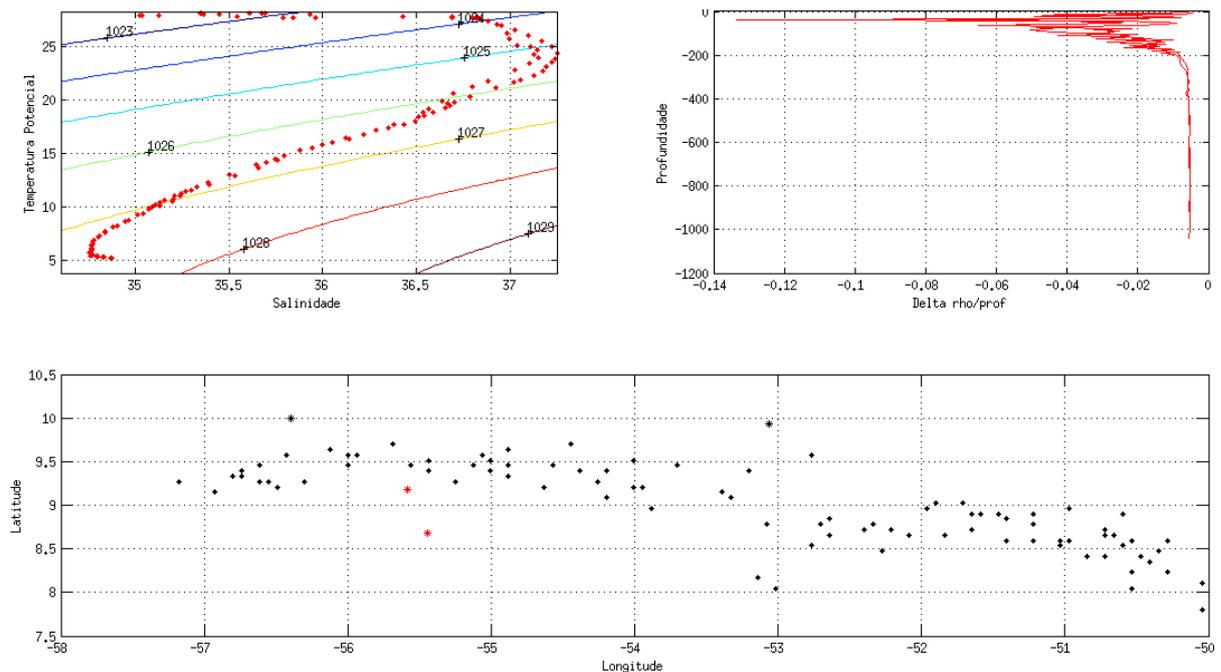


Figura 18: Perfis de temperatura (painel superior esquerdo) e salinidade (painel superior direito) do tipo B selecionados para análise no ano de 2009. No painel inferior, a localização dos perfis amostrados é indicada em asteriscos vermelhos, e a localização de vórtices em pontos pretos.

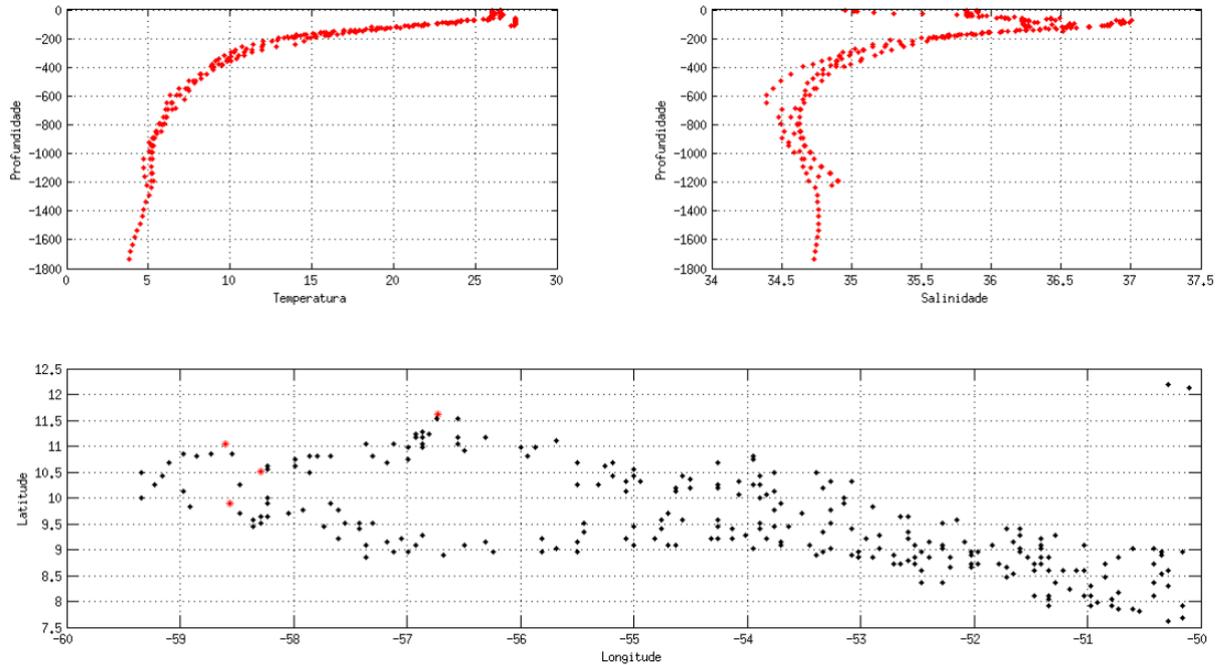


Figura 19: Diagrama TS (painel superior esquerdo) e a variação da densidade ao longo da profundidade (painel superior direito) de perfis do tipo B selecionados para análise no ano de 2009. No painel inferior, a localização dos perfis amostrados é indicada em asteriscos vermelhos, e a localização de vórtices em pontos pretos.

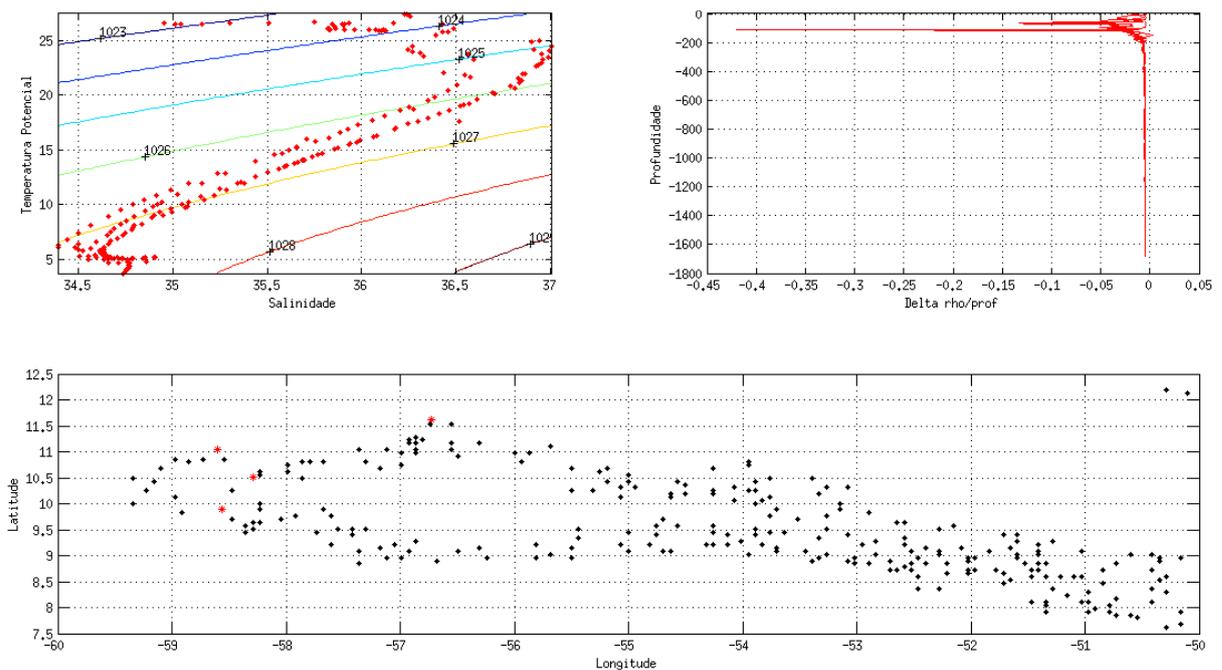


Figura 20: Perfis de temperatura (painel superior esquerdo) e salinidade (painel superior direito) do tipo A selecionados para análise no ano de 2013. No painel inferior, a localização dos perfis amostrados é indicada em asteriscos vermelhos, e a localização de vórtices em pontos pretos.

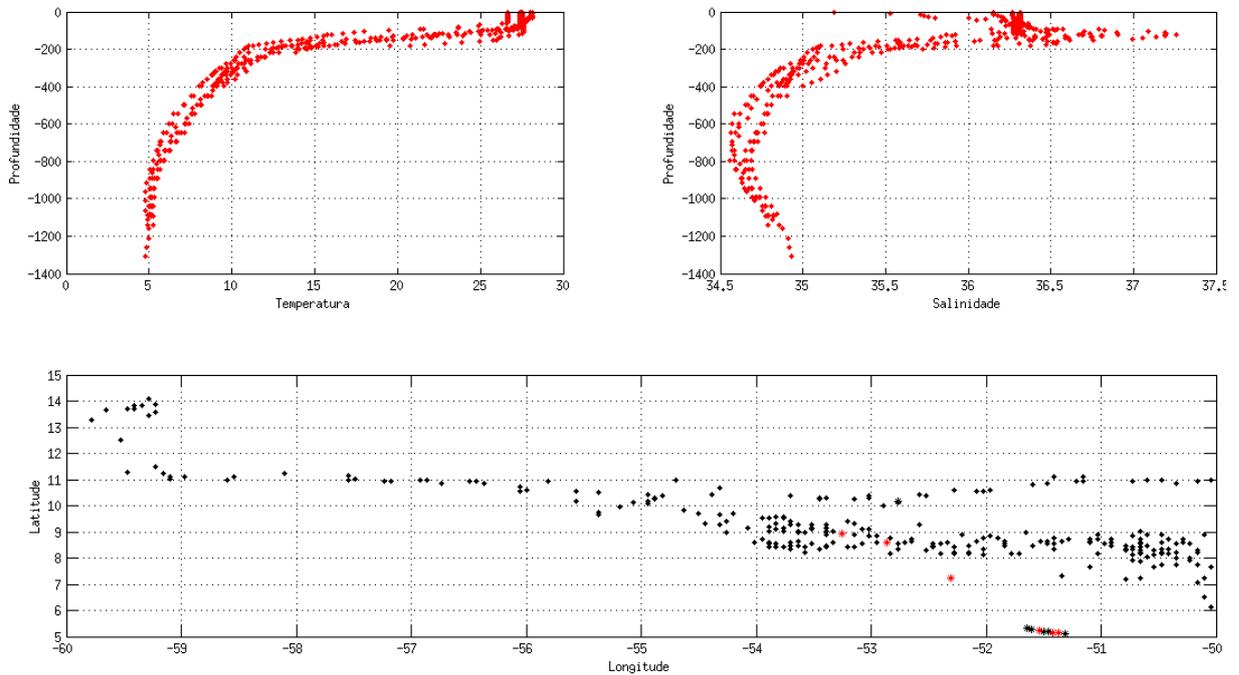


Figura 21: Perfis de temperatura (painel superior esquerdo) e salinidade (painel superior direito) do tipo B selecionados para análise no ano de 2013. No painel inferior, a localização dos perfis amostrados é indicada em asteriscos vermelhos, e a localização de vórtices em pontos pretos.

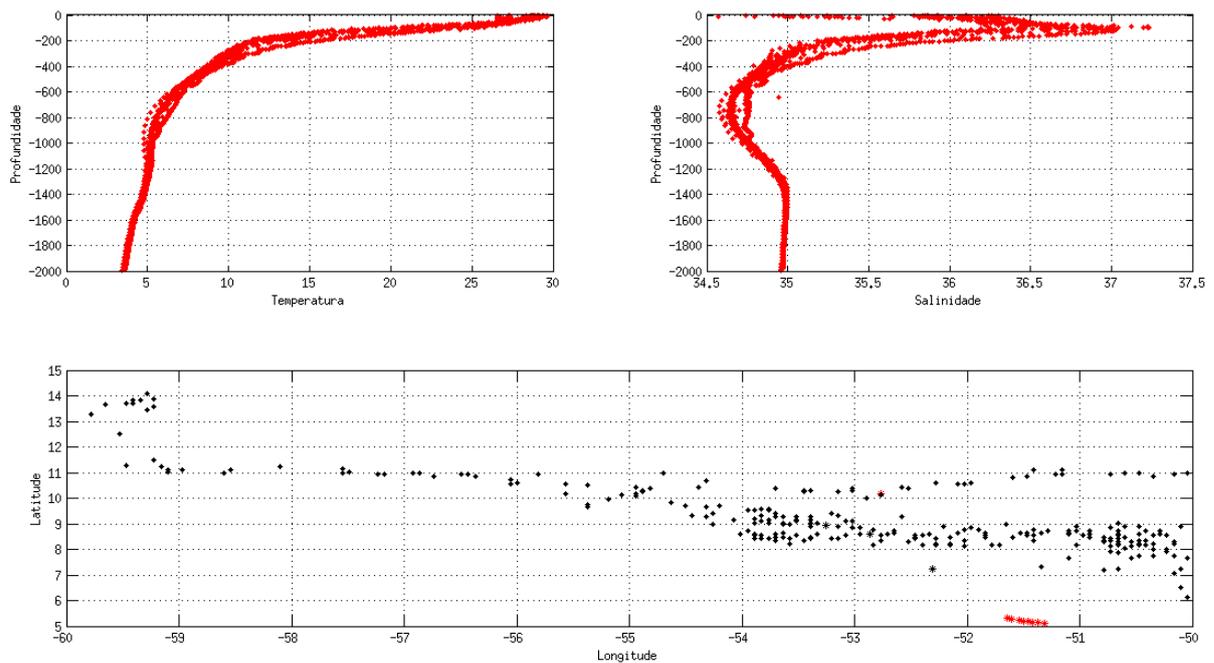


Figura 22: Diagrama TS (painel superior esquerdo) e a variação da densidade ao longo da profundidade (painel superior direito) de perfis do tipo A selecionados para análise no ano de 2013. No painel inferior, a localização dos perfis amostrados é indicada em asteriscos vermelhos, e a localização de vórtices em pontos pretos.

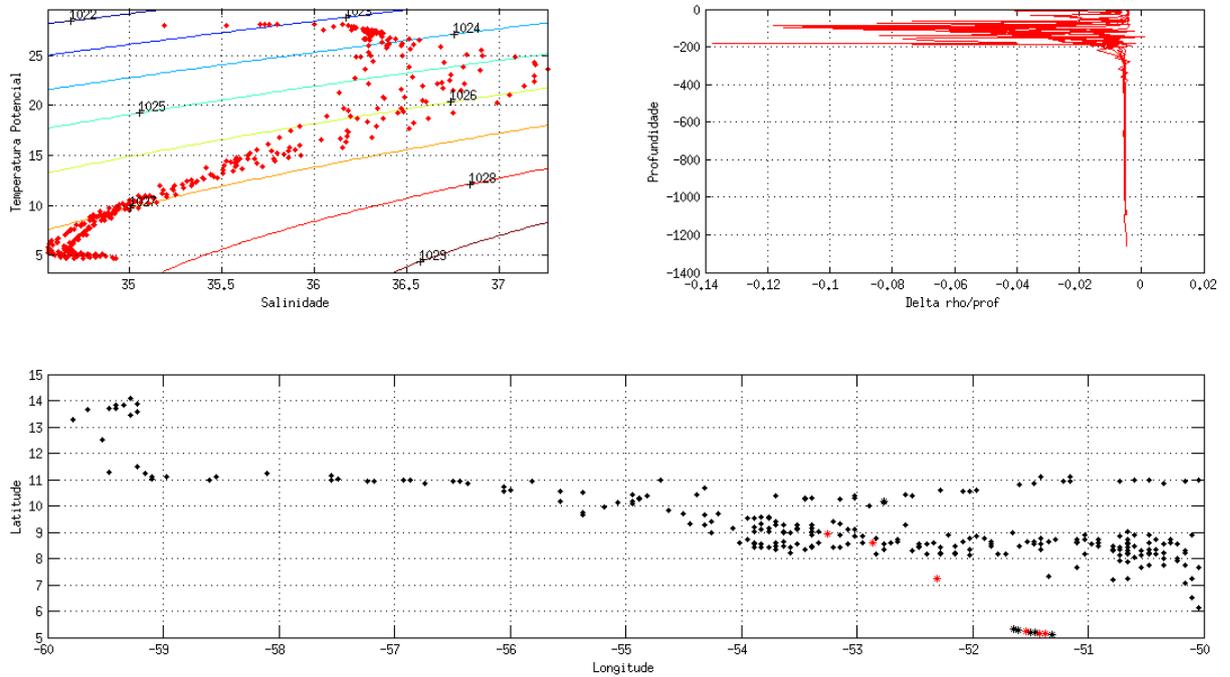


Figura 23: Diagrama TS (painel superior esquerdo) e a variação da densidade ao longo da profundidade (painel superior direito) de perfis do tipo B selecionados para análise no ano de 2013. No painel inferior, a localização dos perfis amostrados é indicada em asteriscos vermelhos, e a localização de vórtices em pontos pretos.

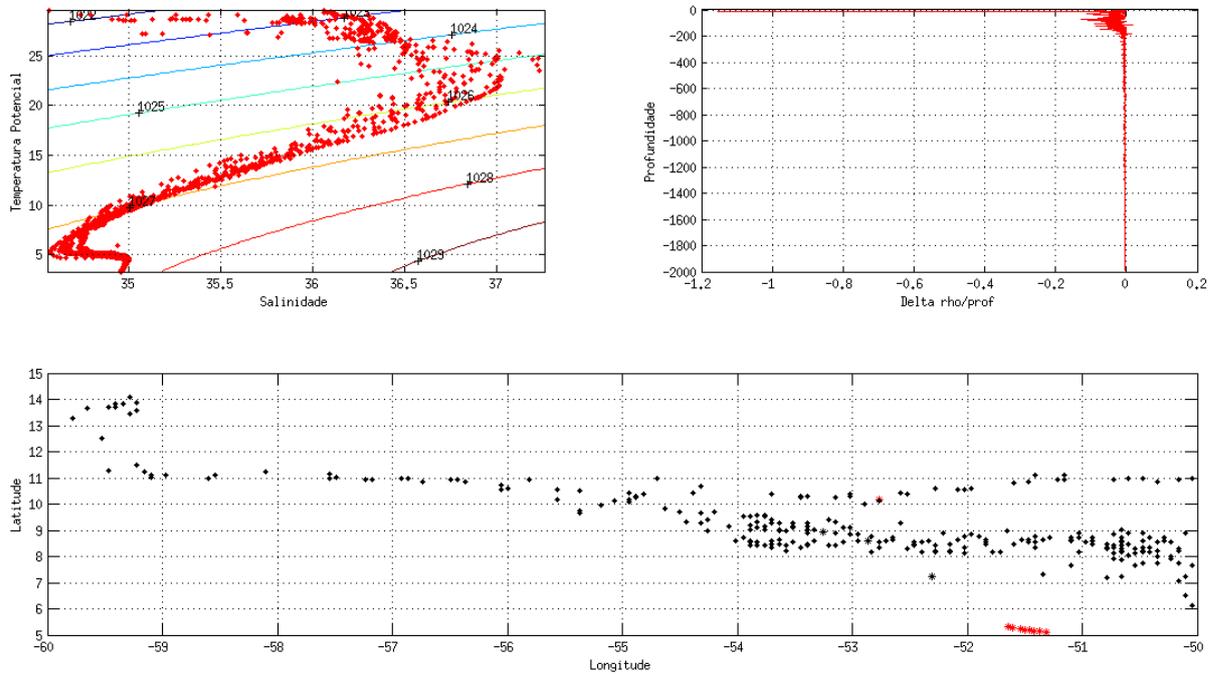


Figura 24: Perfis de temperatura (painel superior esquerdo) e salinidade (painel superior direito) do tipo A selecionados para análise no ano de 2014. No painel inferior, a localização dos perfis amostrados é indicada em asteriscos vermelhos, e a localização de vórtices em pontos pretos.

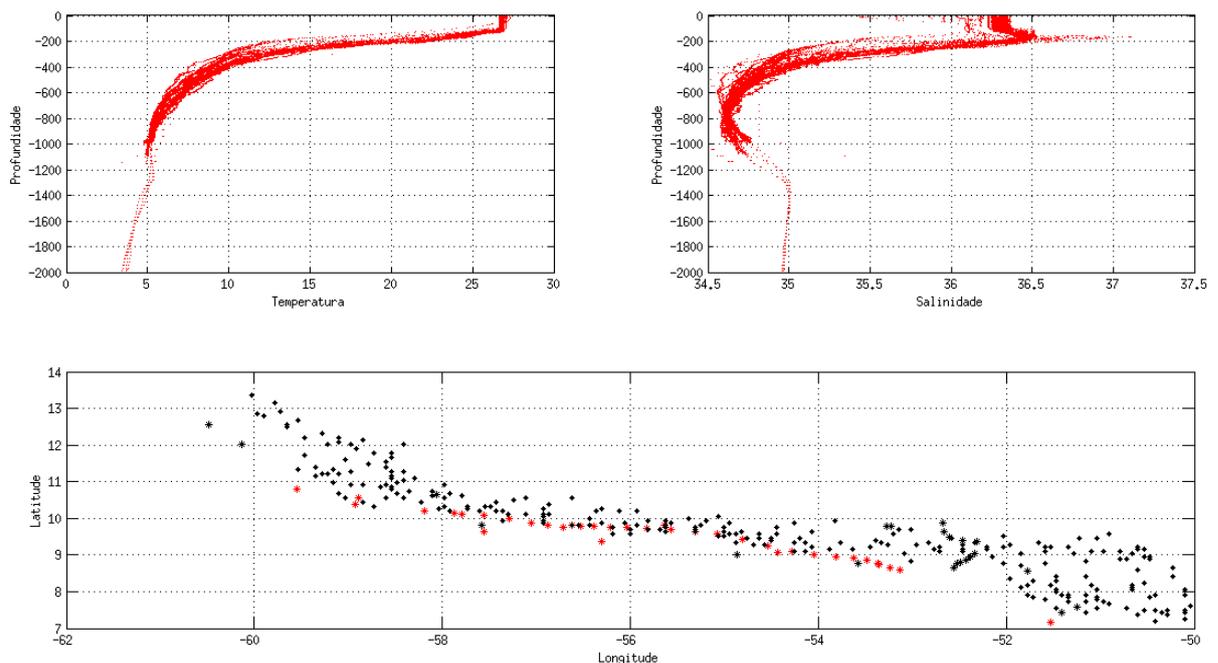


Figura 25: Perfis de temperatura (painel superior esquerdo) e salinidade (painel superior direito) do tipo B selecionados para análise no ano de 2014. No painel inferior, a localização dos perfis amostrados é indicada em asteriscos vermelhos, e a localização de vórtices em pontos pretos.

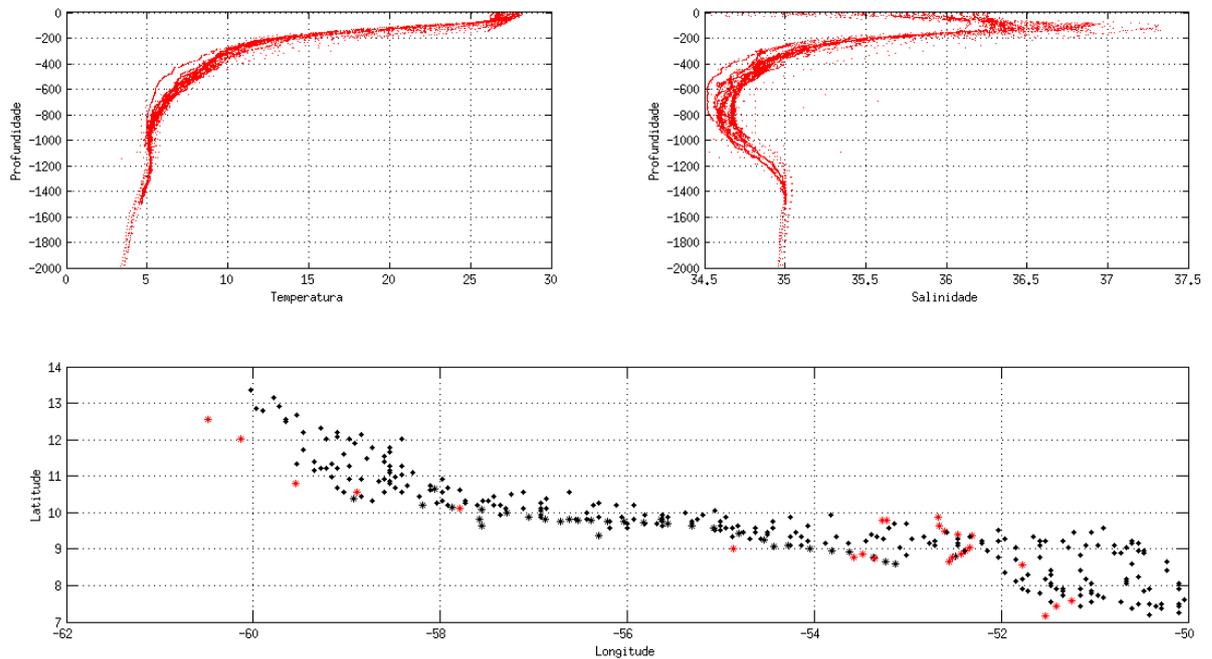


Figura 26: Diagrama TS (painel superior esquerdo) e a variação da densidade ao longo da profundidade (painel superior direito) de perfis do tipo A selecionados para análise no ano de 2014. No painel inferior, a localização dos perfis amostrados é indicada em asteriscos vermelhos, e a localização de vórtices em pontos pretos.

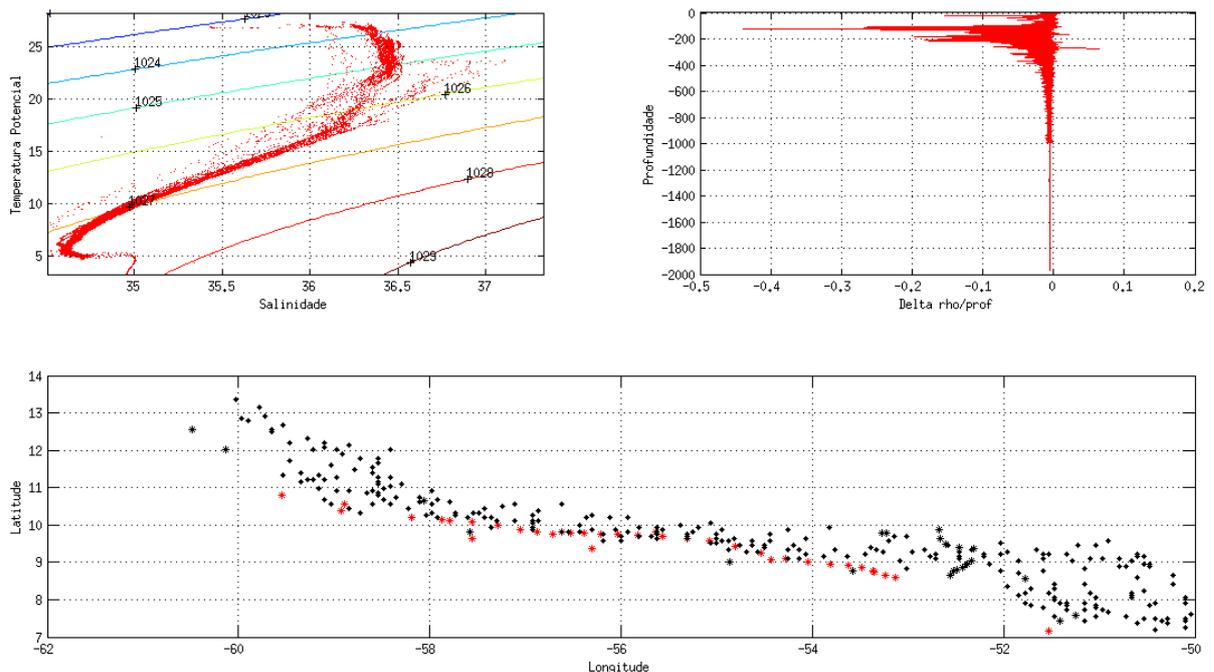
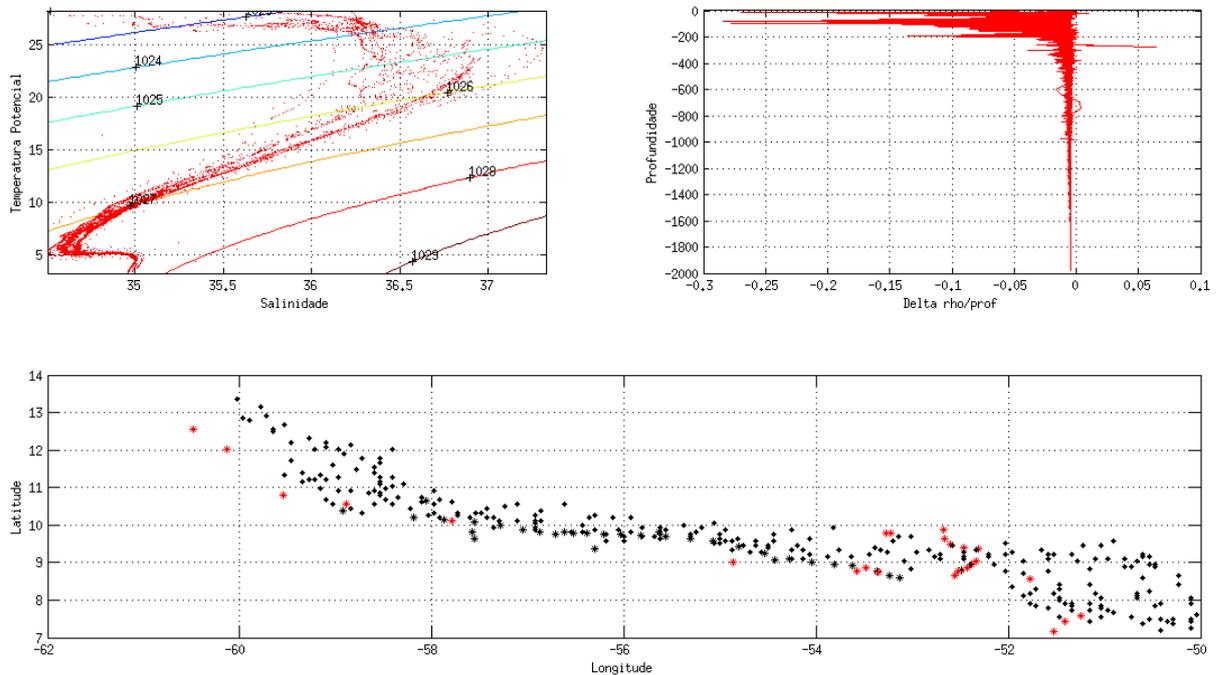


Figura 27: Diagrama TS (painel superior esquerdo) e a variação da densidade ao longo da profundidade (painel superior direito) de perfis do tipo B selecionados para análise no ano de 2014. No painel inferior, a localização dos perfis amostrados é indicada em asteriscos vermelhos, e a localização de vórtices em pontos pretos.



De posse dos perfis de temperatura e salinidade fomos compará-los com a literatura, a fim de termos uma compreensão regional das feições observadas. A Figura 28 ilustra seções de temperatura e salinidade, aproximadamente na região da retroflexão da CNB (a porção mais externa das seções encontra-se na latitude aproximadamente de  $6.5^{\circ}\text{N}$ ). Nas figuras citadas (MORAES, 2011), o topo da termoclina, determinada pela autora como a isopical de  $24,5 \text{ kg/m}^3$ , que é acompanhada pela temperatura  $25^{\circ}\text{C}$ , se encontra em aproximadamente 120 m de profundidade na porção mais externa das seções.

Este é um comportamento semelhante ao demonstrado nos perfis do tipo A (Figura 29, painéis superiores), evidenciado nos perfis de temperatura, que mostram a temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$  em cerca de 150 metros e a base da camada de mistura em aproximadamente 100 m. Já os perfis tipo B apresentaram de forma geral a temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$  mais próximo da superfície, em cerca de 95 m de profundidade.

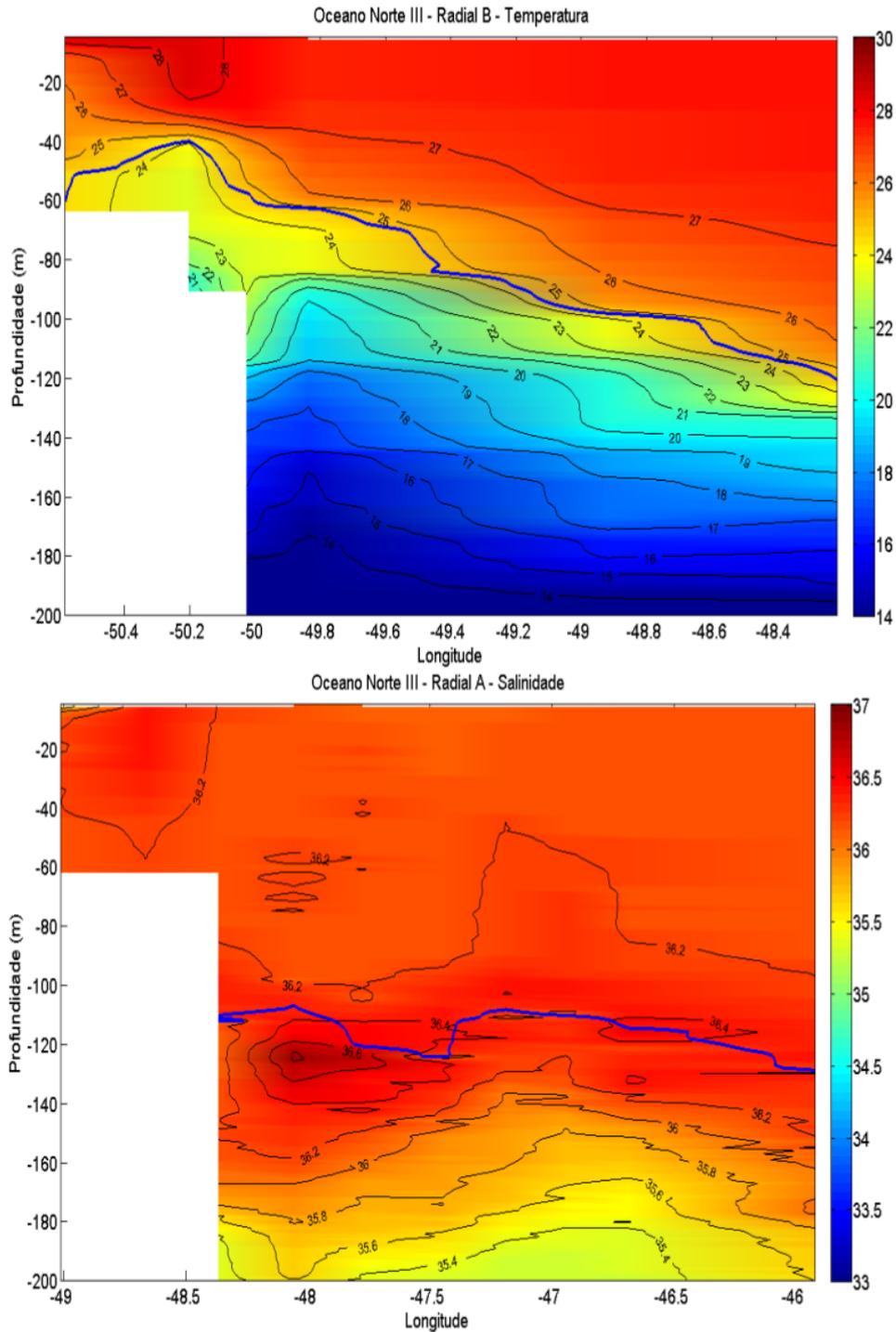
Apesar da evidente semelhança, podemos identificar uma nítida diferença entre as seções (Figura 28) e os perfis (Figura 29), no caso do tipo A, a isoterma de  $25^{\circ}\text{C}$  ocorre 30 metros mais profunda, coerente com a hidrografia de um vórtice anti-ciclônico. Já o perfil B apresentou uma profundidade 25 metros mais rasa na isoterma de  $25^{\circ}\text{C}$ .

No caso da salinidade, a seção apresentada por (MORAES, 2011) (Figura 28), mostra um núcleo de alta salinidade (36.8) em cerca de 120 metros de profundidade, feição esta já discutida anteriormente na introdução. Este núcleo é assinatura da AMS, formada no giro subtropical do Atlântico Sul (STRAMMA; SCHOTT, 1999).

Os perfis tipo A apresentaram uma salinidade máxima de 36.4 a 180 metros de profundidade (Figura 29), ou seja, pelo menos 40 metros mais profundo ao estudo de Moraes (2011). Quanto aos perfis tipo B, apresentaram uma salinidade máxima de 37, mais compatíveis com os valores de salinidade de AMS, na profundidade de 100 metros.

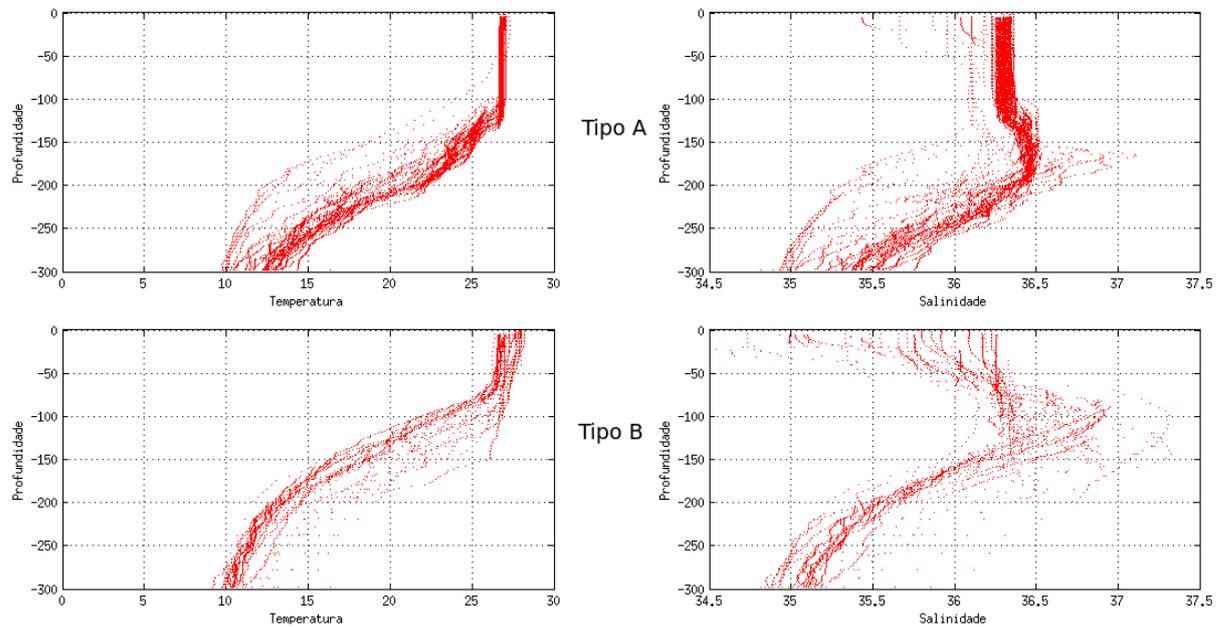
Assim, valores compatíveis com a água de máxima salinidade são encontrados em ambos os tipos de perfis hidrográficos estudados, preferencialmente nos do tipo B. Isso sugere que os perfis do tipo B tenham sido coletados em locais com grande quantidade de água oriunda do giro subtropical do Atlântico Sul.

Figura 28: Seção de temperatura (painel superior) e salinidade (painel inferior) na Radial B da Comissão Oceano Norte III (radial com orientação sudoeste-nordeste, com início em cerca de 4°N, 50°W e fim em 7°N, 48°W). A isopical de 24.5kg/m<sup>3</sup> é mostrada em azul, como indicadora do topo da termoclina



Fonte: Moraes (2011)

Figura 29: Perfis de temperatura (painéis ao lado esquerdo) e salinidade (painéis ao lado direito) de perfis tipo A (painéis superiores), e tipo B (painéis inferiores). Para o ano de 2014.



As Figuras 30 e 31 mostram os diagramas TS dos perfis amostrados no ano de 2014. Essencialmente, como já mostrados nos perfis de salinidade para todos os anos (Figuras 16 a 27), a principal diferença entre os tipos de perfis concentra-se na porção superior da coluna de água, especialmente na camada de mistura (AT) e o topo da termoclina (AMS). Nota-se que nos perfis tipo B a água de máxima salinidade se encontra mais concentrada. Uma vez que essa massa de água é formada no Atlântico Sul, isso sugere que estes perfis foram amostrados no domínio da CNB (cujá água provém do Atlântico Sul) e/ou da CCNE, que tem a CNB como principal fonte. Os menores valores de salinidade dos perfis tipo A, por outro lado, sugerem que os mesmos tenham sido amostrados na parte interior dos vórtices, contendo ainda água proveniente do hemisfério sul, porém mais diluída.

Figura 30: Diagrama T-S dos perfis tipo A amostrados no ano de 2014. O traçado em preto foi feito manualmente e representa as propriedades da maioria dos perfis na porção superior da coluna de água. Na Figura são indicadas: AT (Água Tropical); AMS (Água de Máxima Salinidade); ACAS (Água Central do Atlântico Sul); AIA-ACPS (Água Intermediária Antártica e Água Circumpolar Antártica Superior); APAN (Água Profunda do Atlântico Norte).

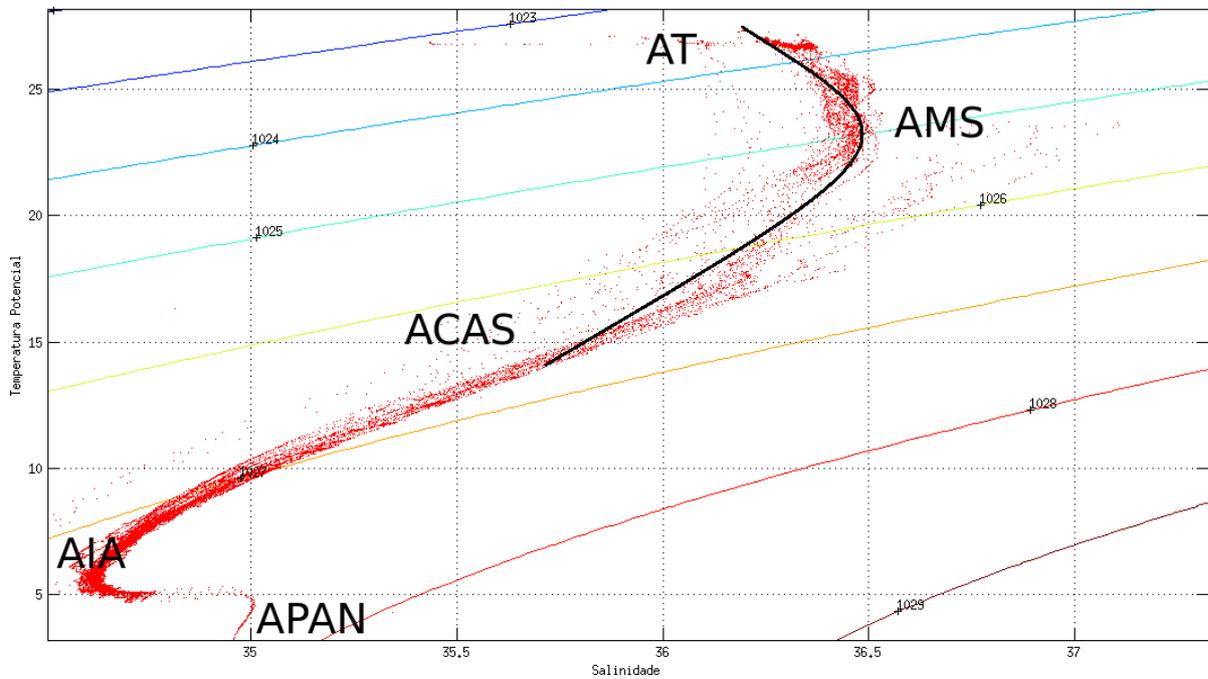
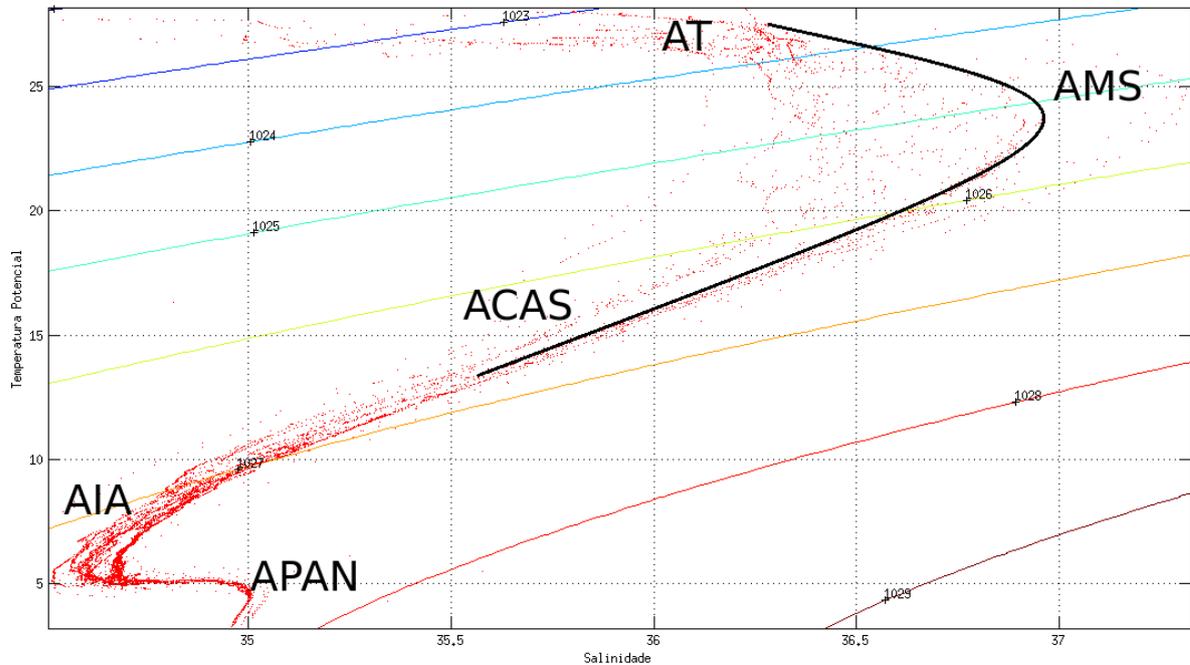
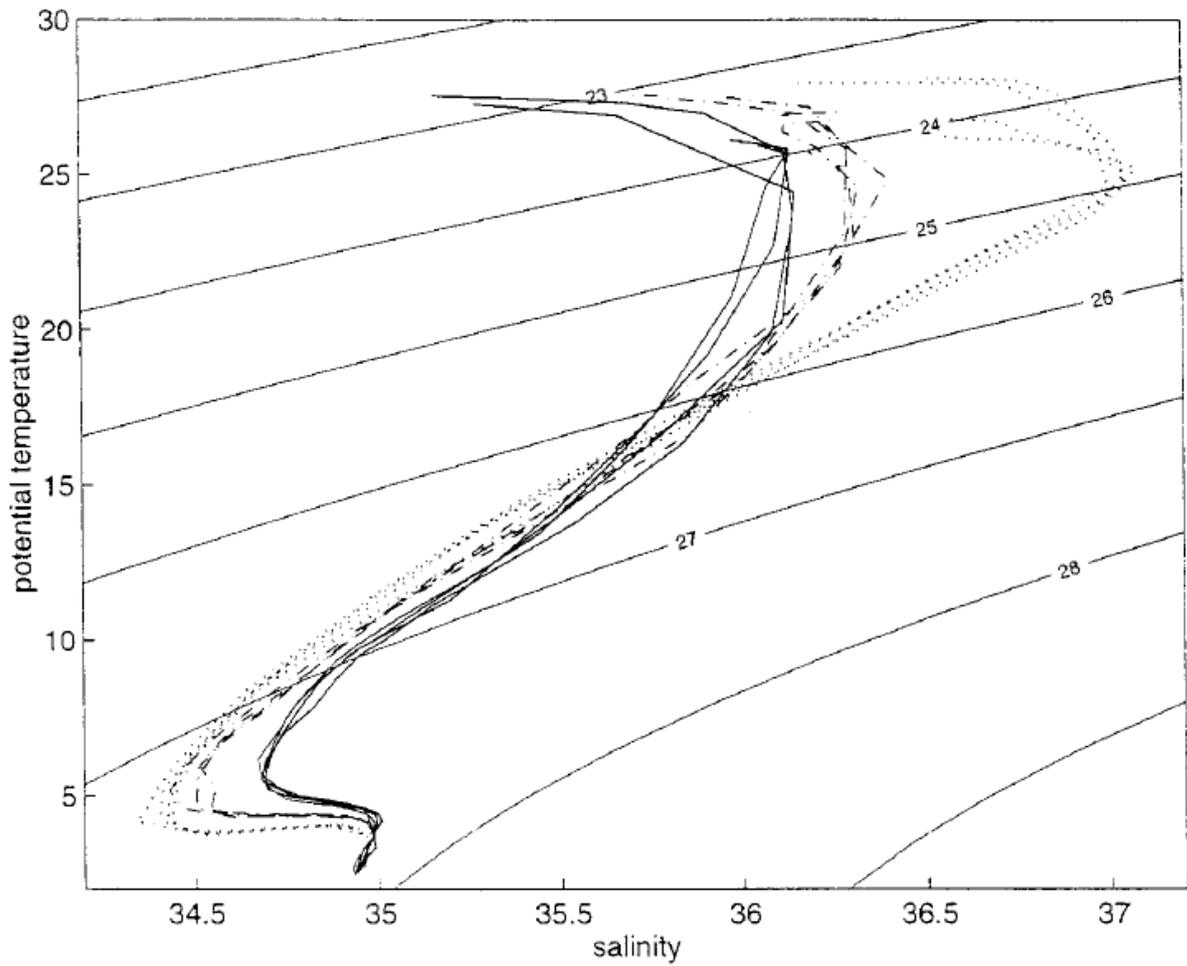


Figura 31: Diagrama T-S dos perfis tipo B amostrados no ano de 2014. O traçado em preto foi feito manualmente e representa as propriedades da maioria dos perfis na porção superior da coluna de água. Na Figura são indicadas: AT (Água Tropical); AMS (Água de Máxima Salinidade); ACAS (Água Central do Atlântico Sul); AIA-ACPS (Água Intermediária Antártica e Água Circumpolar Antártica Superior); APAN (Água Profunda do Atlântico Norte).



Considerando a Figura 32, o diagrama de curva T-S da base de dados LEVITUS (SCHOTT; FISCHER; STRAMMA, 1998) pode-se aferir que o perfil tipo A possui uma alta similaridade com os perfis em linhas tracejadas, referente ao Oceano Atlântico Equatorial Oeste  $0.5^{\circ}\text{S}$ ,  $41.5^{\circ}\text{O}$ . Já os perfis tipo B possuem similaridade com os perfis em pontos, referentes ao Atlântico Sul  $10.5^{\circ}\text{S}$ ,  $35.5^{\circ}\text{O}$ , com uma alta salinidade, podendo ser associado à AMS que está presente na região de estudo. Esta similaridade corrobora a sugestão feita anteriormente, de que os perfis tipo B tenham sido amostrados no domínio da CNB ou CCNE (na periferia dos vórtices), e os perfis tipo A tenham sido amostrados na região interior dos vórtices, próximo ao seu núcleo.

Figura 32: Diagrama T-S da base de dados LEVITUS para as 4 estações do ano: 9.5°N, 41.5°O (linhas contínuas); 0.5°S, 41.5°O (linhas tracejadas); 10.5°S, 35.5°O (pontos)



Fonte: Schott et al(1998)

## 4 CONCLUSÃO

A partir de mapas de anomalia altimétrica da superfície do mar, foi possível identificar os vórtices da retroflexão da CNB, com números de vórtices formados e sazonalidade de ocorrências compatíveis com a literatura, embora tenha apresentado uma subestimação quanto à quantidade de vórtices desprendidos para alguns anos, indicando uma ausência de padrão no desprendimento. Pudemos ainda acompanhar a trajetória de cada vórtice, que também foram corroboradas pela literatura sobre o assunto.

A utilização de dados de derivadores ARGO, segundo o conhecimento dos autores, é apresentada de forma inédita para estudar os vórtices da retroflexão da CNB neste trabalho. A partir da análise desses perfis hidrográficos foi possível identificar particularidades das regiões de domínio dos vórtices da retroflexão da CNB, especialmente na porção superior da coluna de água. Especificamente, identificamos variação na assinatura de massas de água entre as regiões mais próximas e mais distantes do núcleo dos vórtices, bem como diferença na profundidade da camada de mistura. Com base na dinâmica geostrófica, podemos interpretar essas feições como sendo pertinentes a regiões do domínio da CNB/CCNE (perfis tipo B), ou do interior de vórtices (perfis tipo A). Os resultados deste estudo, aliados a dados como extensão horizontal de vórtices, podem auxiliar em um cálculo mais preciso do fluxo de massa, calor e sal pelos vórtices da retroflexão da CNB, por exemplo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARNIER, B. et al. On the seasonal variability and eddies in the North Brazil Current: insights from model intercomparison experiments. *Progress in Oceanography*, v. 48, p. 195–230, 2001.
- CASTELAO, R. M. Mesoscale eddies in the South Atlantic Bight and the Gulf Stream Recirculation region: Vertical structure. *Journal of Geophysical Research*, v. 119, n. 119, p. 2048–2065, 2014.
- CHAIGNEAU A., M. L. T. G. E. C. G.; PIZARRO, O. Vertical structure of mesoscale eddies in the eastern South Pacific Ocean: A composite analysis from altimetry and Argo profiling floats. *Journal of Geophysical Research*, v. 116, n. 116, 2011.
- CHELTON D. B.; GAUBE, P. S. M. G. E. J. J. . S. R. M. The Influence of Nonlinear Mesoscale Eddies on Oceanic Chlorophyll. *Science*, n. 334, p. 328–332, 2011.
- FLAGG, C. N.; GORDON, R. L.; MCDOWELL, S. Hydrographic and Current Observations on the Continental Slope and Shelf of the Western Equatorial Atlantic. *Journal of Physical Oceanography*, v. 16, p. 1412–1429, 1986.
- FRATANTONI, D. M.; GLICKSON, D. A. North Brazil Current ring generation and evolution observed with seaWiFS. *Journal of physical oceanography*, v. 32, p. 1058–1074, 2002.
- FRATANTONI, D. M.; JOHNS, W. E.; TOWNSEND, T. L. Rings of the North Brazil Current: their structure and behavior inferred from observations and a numerical simulation. *Journal of Geophysical Research*, v. 100, p. 10633–10654, 1995.
- FRATANTONI, D. M.; RICHARDSON, P. L. The evolution and demise of North Brazil Current rings. *Journal of Physical Oceanography*, v. 36, p. 1241–1264, 2006.
- GONI, G. J.; JOHNS, W. E. A census of North Brazil Current rings observed from TOPEX/POSEIDON altimetry: 1992-1998. *Geophysical Research Letters*, v. 28, p. 1–4, 2001.
- GONI, G. J.; JOHNS, W. E. Synoptic study of warm rings in the North Brazil Current retroflection region using satellite altimetry. In: JOCHUM, M.; MALANOTTE-RIZZOLI, P. (Ed.). *Interhemispheric Water Exchange*. [S.l.]: Elsevier Oceanographic Series, 2003. v. 68.
- JOCHUM, M.; MALANOTTE-RIZZOLI, P. On the generation of North Brazil Current rings. *Journal of Marine Research*, v. 61, p. 147–173, 2003.
- JOHNS, W. E.; ZANTOPP, R. J.; GONI, G. J. Cross-gyre transport by North Brazil Current rings. In: JOCHUM, M.; MALANOTTE-RIZZOLI, P. (Ed.). *Interhemispheric Water Exchange*. [S.l.]: Elsevier Oceanographic Series, 2003. v. 68.
- KILLWORTH, P. Cross-equatorial geostrophic adjustment. *Journal of Physical Oceanography*, v. 21, p. 1581–1601, 1991.
- MORAES, S. O. C. Caracterização da Corrente Norte do Brasil na região da retroflexão. *Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica*, 2011, p. 66, 2011.

- NOF, D.; PICHEVIN, T. The retroflection paradox. *Journal of Physical Oceanography*, v. 26, p. 2344–2358, 1996.
- PEGLIASCO C., A. C.; MORROW, R. Main eddy vertical structures observed in the four major Eastern Boundary Upwelling Systems. *Journal of Geophysical Research*, v. 120, n. 120, 2015.
- RODRIGUES, R. R.; ROTHSTEIN, L. M.; WIMBUSH, M. Seasonal Variability of the South Equatorial Current Bifurcation in the Atlantic Ocean: A Numerical Study. *Journal of Physical Oceanography*, v. 37, n. 1, p. 16–30, jan. 2007. ISSN 0022-3670. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JPO2983.1>>.
- SCHMITZ, W. J. *On the world ocean circulation: volume 1. Some global features of the North Atlantic Circulation*. [S.l.], jun. 1996.
- SCHOTT, F. a. et al. The zonal currents and transports at 35°W in the tropical Atlantic. *Geophysical Research Letters*, v. 30, n. 7, p. 1349, 2003. ISSN 0094-8276. Disponível em: <<http://www.agu.org/pubs/crossref/2003/2002GL016849.shtml>>.
- SCHOTT, F. a. et al. The Shallow and Deep Western Boundary Circulation of the South Atlantic at 5° – 11° S. *Journal of Physical Oceanography*, v. 35, p. 2031–2053, 2005.
- 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, p. 1904–1928, 1998.
- STRAMMA, L. et al. Upper ocean circulation in the western tropical Atlantic in Boreal fall 2000. *Deep-sea Research I*, v. 52, p. 221–240, 2005.
- STRAMMA, L.; SCHOTT, F. A. The mean flow field of the tropical Atlantic Ocean. *Deep-sea Research II*, v. 46, p. 279–303, 1999.
- WILSON, W. D.; JOHNS, W. E.; GARZOLI, S. L. Velocity structure of North Brazil Current rings. *Geophysical Research Letters*, v. 29, p. 1273, doi:10.1029/2001GL013869., 2002.
- YANG G., F. W. Y. L.; LIN, P. Mesoscale eddies in the northwestern subtropical Pacific Ocean: Statistical characteristics and three-dimensional structures. *Journal of Geophysical Research*, v. 118, n. 118, p. 1906–1925, 2013.
- YANG G., W. Y. Y. X. Z. F. W. G. C. L. L.; DUAN, Y. Characteristics, vertical structures, and heat/salt transports of mesoscale eddies in the southeastern tropical Indian Ocean. *Journal of Geophysical Research*, v. 120, n. 120, 2015.