

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA VEGETAL



Variabilidade da camada de mistura na Corrente Norte do Brasil

Filipa Maria Marinho Viegas

Mestrado em Ciências do Mar

Dissertação orientada por:

Prof.^a. Doutora Maria de Fátima Sousa

Prof.^a. Doutora Paola Castellanos

Agradecimentos

Agradeço profundamente às minhas orientadoras, Prof^a. Doutora Fátima Sousa e Prof^a. Doutora Paola Castellanos, pelo acompanhamento ao longo deste processo. O meu especial agradecimento à Professora Doutora Fátima Sousa pela disponibilidade e paciência em responder a todas as minhas dúvidas, inclusive aos fins de semana e feriados! O meu interesse pela Oceanografia nasceu nas suas aulas e viria a mudar o rumo da minha vida. O meu profundo obrigado.

Obrigada aos meus pais e irmã, pelo esforço que fizeram para eu frequentar a faculdade e para a minha vinda para a Alemanha, assim como todo o acompanhamento no meu crescimento, e especialmente depois do diagnóstico da diabetes.

Quero expressar o meu agradecimento às minhas queridas amigas, Maria Cadima, por todas as conversas, apoio, partilha e carinho; Inês Costeira, por todas as aventuras, risadas e boas tardes ao sol, tendo sido um escape a toda a pressão causada pela tese e pela diabetes, sem ti a minha vida em 2022 tinha sido muito mais complicada; e Margarida Kercher, pois aprendo sempre consigo em cada conversa e não me canso de ouvir as suas histórias, conhecimentos e conselhos. A Margarida tem o dom de me fazer ver a vida de muitas perspetivas diferentes e isso é muito especial.

Muito obrigada (Herzlichen Dank!) aos meus queridos amigos da Alemanha, Niels Suitner, Matthias Thiele, Lars Weigang, Mingyang Tian, Lim Wei Bin, Sebastian Meckel e Axel Pirek. Vocês são a família que escolhi num país novo, muito obrigada por todos os bons momentos, aprendizagem, e por estarem ao meu lado neste percurso.

Resumo

A Corrente Norte do Brasil (NBC) é uma corrente superficial de fronteira oeste que contribui na interconexão entre hemisférios, através do transporte de águas quentes equatoriais para o Atlântico norte, influenciando o clima desta região. Uma das consequências são invernos menos severos face ao que se verifica na mesma latitude noutros pontos do globo.

É na superfície do oceano, particularmente na camada de mistura (CM), que devido à direta influência da atmosfera ocorre a maior parte do transporte e retenção de calor. Este trabalho concentra-se no estudo e análise da variabilidade da CM numa área abrangida pelo percurso da NBC, através da utilização de dados CTD recolhidos no âmbito das campanhas oceanográficas Camadas Finas III/2012 (11/10/2012 a 1/11/2012), PIRATA XVII/2017 (30/10/2017 a 14/01/2018) e PIRATA XVIII/2018 (28/09/2018 a 9/10/2018).

A partir das medições recolhidas nas três campanhas traçaram-se perfis de temperatura, salinidade e densidade, que permitiram identificar águas quentes superficiais ($T \geq 26.0\text{ }^{\circ}\text{C}$), máximos de salinidade subsuperficial ($S \geq 36.3$), e observação de água doce e oceânica numa camada superficial em estações localizadas a noroeste do rio Amazonas.

Os diagramas T/S de dispersão permitiram identificar a Água Tropical e a Água Central do Atlântico Sul definidas por Silveira *et al.* (1994), nas estações da campanha Camadas Finas III/2012; assim como a Água do Atlântico Sul definida por Araújo *et al.* (2011), nas estações das campanhas PIRATA XVII/2017 e PIRATA XVIII/2018.

Calculou-se a profundidade da CM nas três campanhas, utilizando o método *Threshold* aplicado à temperatura ($-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) e à densidade ($+0.03\text{ kg/m}^3$). A espessura da CM a partir da temperatura resultou em 61 e 145 m, no entanto o cálculo a partir da densidade demonstrou não ser o mais adequado, diferenciando em quase uma ordem de grandeza da profundidade obtida através da temperatura.

Palavras-chave: Corrente Norte do Brasil (NBC), camada de mistura, costa do Brasil, circulação superficial equatorial, sazonalidade.

Abstract

The North Brazil Current (NBC) is a western boundary surface current that contributes to the interconnection between hemispheres by transporting warm equatorial waters to the North Atlantic, influencing the climate of this region. One consequence of this influence are less severe winters in comparison to winters at the same latitude in other parts of the world.

It is at the ocean surface, particularly in the mixing layer (CM), that most of the transport and retention of heat occurs due to the direct influence of the atmosphere. This work focuses on researching and analysing the variability of the CM in an area covered by the NBC trajectory, using CTD data collected as part of the oceanographic campaigns Camadas Finas III/2012 (11/10/2012 to 1/11/2012), PIRATA XVII/2017 (30/10/2017 to 14/01/2018) and PIRATA XVIII/2018 (28/09/2018 to 9/10/2018).

Based on the measurements taken in the three campaigns, temperature, salinity and density profiles were produced, which made it possible to identify warm surface waters ($T \geq 26.0$ °C), maximum subsurface salinity ($S \geq 36.3$), and to observe fresh and oceanic water in a surface layer at stations located north-west of the Amazon River.

The T/S dispersion diagrams made it possible to identify the Tropical Water and the South Atlantic Central Water as defined by Silveira *et al.* (1994), at the stations of the Camadas Finas III/2012; as well as the South Atlantic Water as defined by Araújo *et al.* (2011), at the stations of the PIRATA XVII/2017 and PIRATA XVIII/2018.

The depth of the CM was calculated in the three campaigns using the Threshold method applied to temperature (-0.3 and -0.5 °C) and density ($+0.03$ kg/m³). The thickness of the CM from temperature resulted in 61 and 145 m, however the calculation from density proved not to be the most appropriate, differing by almost an order of magnitude from the depth obtained from temperature.

Key words: North Brazil Current (NBC), mixing layer, coast of Brazil, equatorial surface circulation, seasonality.

Índice

Lista de tabelas	I
Lista de figuras	II
Lista de abreviaturas	V
1 Introdução	1
1.1 A Corrente Norte do Brasil	1
1.1.1 Dinâmica associada à Corrente Norte do Brasil.....	3
1.1.2 Caracterização termohalina da Corrente Norte do Brasil.....	5
1.1.3 Caracterização da camada de mistura	9
1.2 Enquadramento da área de estudo	10
1.3 Objetivos	12
2 Dados e metodologias	13
2.1 Dados hidrológicos.....	13
2.1.1 Campanha Camadas Finas III/2012.....	14
2.1.2 Campanha PIRATA XVII/2017.....	15
2.1.3 Campanha PIRATA XVIII/2018.....	16
2.2 Metodologias.....	17
2.2.1 Processamento dos dados hidrológicos.....	17
2.2.2 Determinação na profundidade da camada de mistura.....	17
3 Resultados e discussão	19
3.1 Análise dos dados hidrológicos.....	19
3.1.1 Campanha Camadas Finas III/2012.....	19
3.1.2 Campanha PIRATA XVII/2017.....	24
3.1.3 Campanha PIRATA XVIII/2018.....	29
3.2 Determinação da profundidade da camada de mistura.....	36
3.2.1 Campanha Camadas Finas III/2012.....	36
3.2.2 Campanha PIRATA XVII/2017.....	44
3.2.3 Campanha PIRATA XVIII/2018.....	51
4 Conclusões	63
Bibliografia	66

Lista de tabelas

Tabela 1.1 Padrões sazonais do transporte (a) e velocidade (b) da Corrente Norte do Brasil, segundo alguns autores.	5
Tabela 1.2 Massas de água presentes na região abrangida pela Corrente Norte do Brasil, segundo vários autores. Referem-se em particular os valores característicos da temperatura e da salinidade	8
Tabela 1.3 Padrões sazonais associados ao Rio Amazonas, segundo Liang <i>et al.</i> (2020)	11
Tabela 2.1 Informações relativas às campanhas oceanográficas Camadas Finas III/2012, PIRATA XVII/2017 e PIRATA XVIII/2018.	13
Tabela 2.2 Número de estações CTD utilizadas neste trabalho obtidas durante as campanhas oceanográficas, Camadas Finas III/2012, PIRATA XVII/2017 e PIRATA XVIII/2018.	14
Tabela 2.3 Parâmetros e critérios utilizados neste trabalho para a determinação da profundidade da camada de mistura utilizando o método <i>Threshold</i> . ΔT corresponde à variação da temperatura, $\Delta \rho$ corresponde à variação da densidade e Z_0 é a profundidade de referência (à superfície).	18

Lista de figuras

- Figura 1.1.** Circulação na região equatorial do Oceano Atlântico. Estão representadas, a Corrente Norte do Brasil (do Inglês *North Brazil Current*, NBC), a Corrente Equatorial do Norte (do Inglês *North Equatorial Current*, NEC), o ramo norte da Contracorrente Equatorial do Norte (do Inglês *Northern North Equatorial Countercurrent*, nNECC), a Contracorrente Equatorial do Norte (do Inglês *North Equatorial Countercurrent*, NECC), a Subcorrente Equatorial do Norte (do Inglês *North Equatorial Undercurrent*, NEUC), o ramo norte da Corrente Equatorial do Sul (do Inglês *Northern South Equatorial Current*, nSEC), a Subcorrente Equatorial (do Inglês *Equatorial Undercurrent*, EUC), o ramo central da Corrente Equatorial do Sul (do Inglês *Central South Equatorial Current*, cSEC), a Subcorrente Equatorial do Sul (do Inglês *South Equatorial Undercurrent*, SEUC), a Subcorrente Norte do Brasil (do Inglês *North Brazil Subcurrent*, NBUC) e o ramo sul da Corrente Equatorial do Sul (do Inglês *Southern South Equatorial Current*, sSEC). Representam-se também, os anéis anticiclônicos da Corrente Norte do Brasil com a letra “R”. A região delimitada a verde representa a área de estudo deste trabalho (adaptado de Vilela *et al.*, 2018). 2
- Figura 1.2.** Representação esquemática do sistema de circulação equatorial no Oceano Atlântico. Na figura está identificada a Corrente Norte do Brasil, representada a amarelo. As correntes subtropicais, a Corrente Equatorial do Norte, a Contracorrente Equatorial do Norte, a Corrente da Guiné, a Corrente Equatorial do Sul, representadas a preto. As correntes frias, a Corrente das Canárias e a Corrente de Benguela, representadas a azul-escuro. As correntes quentes, a Corrente do Brasil e a Corrente das Caraíbas, representadas a vermelho. Estão também identificados os anéis da Corrente Norte do Brasil, a localização do sistema de correntes Equatorial, o Giro subtropical e os ventos Alísios de ambos os hemisférios. A área de estudo deste trabalho está delimitada a verde (adaptado de Sharma *et al.*, 2009). 4
- Figura 1.3.** Diagrama T/S de dispersão e representação das principais massas de água no Atlântico Sul a Água Tropical (do Inglês *Tropical water*, TW), Água Central do Atlântico Sul (do Inglês *South Atlantic Central Water*, SACW) e Água Antártica Intermédia (do Inglês *Antarctic Intermediate Water*, AAIW), segundo Silveira *et al.* (1994). 7
- Figura 1.4.** Representação de parte da costa do Brasil com a identificação das regiões A), representativa da área ocupada durante a campanha Camadas Finas III/2012, e B), representativa da área ocupada durante as campanhas PIRATA XVII/2017 e PIRATA XVIII/2018. A localização da foz do Rio Amazonas está identificada com uma estrela verde (adaptado de Alberoni *et al.*, 2020). 10
- Figura 2.1.** Localização das 44 estações CTD realizadas durante a campanha oceanográfica Camadas Finas III/2012 (adaptado de Bruto & Araújo. 2021). 14
- Figura 2.2.** Localização das 20 estações CTD realizadas durante a campanha Camadas Finas III/2012, escolhidas para o presente trabalho. A secção I (Ests. 1 a 11) está representada a preto, e a secção II (Ests. 12 a 20) está representada a lilás. 15

- Figura 2.3.** A) Localização das 65 estações CTD realizadas durante a campanha oceanográfica PIRATA XVII/2017 (Bourlès *et al.*, 2008; Bourlès *et al.*, 2019). B) Localização das 29 estações processadas da campanha PIRATA XVII/2017, a secção I (Ests. 22 a 31) está representada a preto, e a secção II (Ests. 39 a 49) está representada a lilás. 15
- Figura 2.4.** A) Localização das 77 estações CTD realizadas durante a campanha oceanográfica PIRATA XVIII/2018 (adaptado de Bruto *et al.*, 2018). B) Localização das 21 estações processadas da campanha PIRATA XVIII/2018, a secção I (Ests. 34 a 40) está representada a preto, a secção II (Ests. 9 a 22) está representada a lilás, e a secção III (Ests. 23 a 33) está representada a verde. 16
- Figura 3.1.** Perfis de temperatura obtidos nas secções I (A) e II (B) da campanha Camadas Finas III/2012. A localização das duas secções está representada em C), com a secção I a preto e a secção II a lilás. 20
- Figura 3.2.** Perfis de salinidade obtidos nas secções I (A) e II (B) da campanha Camadas Finas III/2012. 21
- Figura 3.3.** Perfis de densidade das secções I (A) e II (B) da campanha Camadas Finas III/2012. ... 22
- Figura 3.4.** Diagrama T/S de dispersão das estações das secções I (Ests. 1 a 11) e II (Ests. 12 a 20), da campanha oceanográfica Camadas Finas III/2012, representadas respectivamente a preto e a lilás. A Est. 16 não está representada pois os valores de salinidade são inferiores a 34. A cinzento estão identificadas a Água Tropical (do Inglês *Tropical Water*, TW) e a Água Central do Atlântico Sul (do Inglês *South Atlantic Central Water*, SACW), referidas em Silveira *et al.*, 1994. 23
- Figura 3.5.** Perfis de temperatura obtidos nas estações das secções I (A) e II (B) da campanha PIRATA XVII/2017. A localização das duas secções está representada em C): secção I a preto e a secção II a lilás. 25
- Figura 3.6.** Perfis de salinidade das secções I (A) e II (B) da campanha PIRATA XVII/2017. 26
- Figura 3.7.** Perfis de densidade das secções I (A) e II (B) da campanha PIRATA XVII/2017. 27
- Figura 3.8.** Diagrama T/S de dispersão das estações das secções I (22 a 31) e II (39 a 49) da campanha PIRATA XVII/2017, representadas a preto e lilás, respectivamente. A Água do Atlântico Sul (do Inglês *South Atlantic Water*, SAW), Água Tropical do Atlântico Oriental (do Inglês *Eastern Tropical Atlantic*, EAW) e a Água do Atlântico Norte (do Inglês *North Atlantic Water*, NAW), definidas por Araújo *et al.* (2011), estão representadas a cinzento. 28

Figura 3.9. Perfis de temperatura das secções I (A), II (B) e III (C), da campanha PIRATA XVIII/2018. A localização das três secções está representada em C) com a secção I a preto, secção II a lilás e secção III a verde.	30
Figura 3.10. Perfis de salinidade das secções I (A), II (B) e III (C), da campanha PIRATA XVIII/2018.	31
Figura 3.11. Perfis de densidade das secções I (A), II (B) e III (C), da campanha PIRATA XVIII/2018.	33
Figura 3.12. Diagrama T/S de dispersão das estações das Secções I (34 a 40), II (9 a 22) e III (23 a 33) da campanha PIRATA XVIII/2018, representadas a preto, lilás e verde, respectivamente. A Água do Atlântico Sul (do Inglês <i>South Atlantic water</i> , SAW), a Água Tropical do Atlântico Oriental (do Inglês <i>Eastern Tropical Atlantic Water</i> , EAW) e a Água do Atlântico Norte (do Inglês <i>North Atlantic Water</i> , NAW), definidas em Araújo <i>et al.</i> (2011), estão representadas a cinzento.	35
Figura 3.13. Determinação da profundidade da camada de mistura utilizando os perfis de temperatura da sec. I (Ests. 1 a 11) da campanha Camadas Finas III/2012. A verde $\Delta T = -0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a vermelho $\Delta T = -0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$	37
Figura 3.14. Determinação da profundidade da camada de mistura utilizando os perfis de temperatura da sec. II (Ests. 12 a 20) da campanha Camadas Finas III/2012. A verde $\Delta T = -0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a vermelho $\Delta T = -0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$	38
Figura 3.15. Variação da profundidade da camada de mistura ao longo das secções I (A) e II (B) na campanha Camadas Finas III/2012. A localização das duas secções esta representada em C. ..	40
Figura 3.16. Determinação da profundidade da camada de mistura utilizando os perfis de densidade da sec. I (Ests. 1 a 11) da campanha Camadas Finas III/2012. A amarelo $\Delta\rho = 0.03\text{ kg/m}^3$	41
Figura 3.17. Determinação da profundidade da camada de mistura utilizando os perfis de densidade da sec. II (Ests. 12 a 20) da campanha Camadas Finas III/2012. A amarelo $\Delta\rho = 0.03\text{ kg/m}^3$	42
Figura 3.18. Determinação da profundidade da camada de mistura utilizando os perfis de temperatura da sec. I (Ests. 22 a 31) da campanha PIRATA XVII/2017. A verde $\Delta T = -0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a vermelho $\Delta T = -0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$	44
Figura 3.19. Determinação da profundidade da camada de mistura utilizando os perfis de temperatura da sec. II (Ests. 39 a 49) da campanha PIRATA XVII/2017. A verde $\Delta T = -0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a vermelho $\Delta T = -0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$	45
Figura 3.20. Variação da profundidade da camada de mistura ao longo das secções I (A) e II (B) na campanha PIRATA XVII/2017. A localização das duas secções esta representada em C.	47

Figura 3.21. Determinação da profundidade da camada de mistura utilizando os perfis de densidade da sec. I (Ests. 22 a 31) da campanha PIRATA XVII/2017. A amarelo $\Delta\rho = 0.03 \text{ kg/m}^3$	48
Figura 3.22. Determinação da profundidade da camada de mistura utilizando os perfis de densidade da sec. II (Ests. 39 a 49) da campanha PIRATA XVII/2017. A amarelo $\Delta\rho = 0.03 \text{ kg/m}^3$	49
Figura 3.23. Determinação da profundidade da camada de mistura utilizando os perfis de temperatura da sec. I (Ests. 40 a 34) da campanha PIRATA XVIII/2018. A verde $\Delta T = -0.3 \text{ }^\circ\text{C}$ e a vermelho $\Delta T = -0.5^\circ\text{C}$	52
Figura 3.24. Determinação da profundidade da camada de mistura utilizando os perfis de temperatura da sec. II (Ests. 9 a 22) da campanha PIRATA XVIII/2018. A verde $\Delta T = -0.3 \text{ }^\circ\text{C}$ e a vermelho $\Delta T = -0.5^\circ\text{C}$	53
Figura 3.25. Determinação da profundidade da camada de mistura utilizando os perfis de temperatura da sec. III (Ests. 33 a 23) da campanha PIRATA XVIII/2018. A verde $\Delta T = -0.3 \text{ }^\circ\text{C}$ e a vermelho $\Delta T = -0.5^\circ\text{C}$	54
Figura 3.26. Variação da profundidade da camada de mistura ao longo das secções I (A), II (B) e III (C) na campanha PIRATA XVIII/2018. A localização das duas secções esta representada em D.	56
Figura 3.27. Determinação da profundidade da camada de mistura utilizando os perfis de densidade da sec. I (Ests. 40 a 34) da campanha PIRATA XVIII/2018. A amarelo $\Delta\rho = 0.03 \text{ kg/m}^3$	58
Figura 3.28. Determinação da profundidade da camada de mistura utilizando os perfis de densidade da sec. II (Ests. 9 a 22) da campanha PIRATA XVIII/2018. A amarelo $\Delta\rho = 0.03 \text{ kg/m}^3$	59
Figura 3.29. Determinação da profundidade da camada de mistura utilizando os perfis de densidade da sec. III (Ests. 33 a 23) da campanha PIRATA XVIII/2018. A amarelo $\Delta\rho = 0.03 \text{ kg/m}^3$	61

Lista de abreviaturas

AAIW – *Antarctic Intermediate Water* – Água Antártica Intermédia
AMOC – *Atlantic Meridional Overturning Circulation* – Circulação meridional de retorno no Atlântico
CFIII/2012 – Campanha Camadas Finas III/2012
CM – Camada de mistura
cSEC – *Central South Equatorial Current* – Ramo central da Corrente Equatorial do Sul
CTD – *Conductivity – Temperature – Depth* – Condutividade – Temperatura – Profundidade
EAW – *Eastern Tropical Atlantic Water* – Água Tropical do Atlântico Oriental
EUC – *Equatorial Undercurrent* – Subcorrente Equatorial
ITCZ – *Inter Tropical Convergence Zone* – Zona de Convergência Intertropical
NADW – *North Atlantic Deep Water* – Água Profunda do Atlântico Norte
NAW – *North Atlantic Water* – Água do Atlântico Norte
NBC – *North Brazil Current* – Corrente Norte do Brasil
NBUC – *North Brazil Undercurrent* – Subcorrente Norte do Brasil
NEC – *North Equatorial Current* – Corrente Equatorial do Norte
NECC – *North Equatorial Countercurrent* – Contracorrente Equatorial do Norte
NEUC – *North Equatorial Undercurrent* – Subcorrente Equatorial do Norte
nNECC – *Northern North Equatorial Countercurrent* – Ramo norte da Contracorrente Equatorial do Norte
nSEC – *Nouthern South Equatorial Current* – Ramo norte da Corrente Equatorial do Sul
SACW – *South Atlantic Central Water* – Água Central do Atlântico Sul
SAW – *South Atlantic Water* – Água do Atlântico Sul
SEUC – *South Equatorial Undercurrent* – Subcorrente Equatorial do Sul
sSEC – *Southern South Equatorial Current* – Ramo sul da Corrente Equatorial do Sul
TW – *Tropical Water* – Água Tropical

Símbolos

E - Evaporação
P - Precipitação
p - Pressão
S - Salinidade
Sv - Sverdrup
T - Temperatura
 ρ - Densidade

Capítulo 1

Introdução

1.1 A Corrente Norte do Brasil

No oceano global as regiões localizadas a diferentes latitudes conectam-se através de correntes e subcorrentes que possuem características e propriedades distintas. Estas correntes têm um papel essencial na redistribuição térmica e no balanço global de energia através do transporte de calor das baixas para as altas latitudes, assim como a indispensável interconexão com a atmosfera (Segar, 1998). Grande parte do transporte de calor da região equatorial para as regiões polares é realizado pelas correntes superficiais de fronteira oeste (Hogg & Johns, 1995). A água transportada pelas correntes anteriormente mencionadas, mais salina e quente, arrefece na sua trajetória para norte. Ao chegar aos polos, torna-se mais fria e densa, afundando nas camadas mais profundas da coluna de água, retomando numa trajetória para sul e integrando parte da circulação termohalina (McCarthy *et al.*, 2017). Para o Oceano Atlântico utiliza-se frequentemente a sigla AMOC, do inglês *Atlantic Meridional Overturning Circulation* (Circulação meridional de retorno no Atlântico), para designar o sistema simplificado das correntes superficiais e profundas que realizam este equilíbrio de ganho/perda de calor e energia entre hemisférios.

O transporte térmico realizado pelas correntes oceânicas tem um papel de destaque no clima. Uma das consequências no Atlântico Norte são invernos europeus menos severos face ao que se verifica na mesma latitude noutros pontos do globo (McCarthy *et al.*, 2017). Apesar do sistema da AMOC ser várias vezes descrito como tendo duas fases diferentes, abrandamento ou aceleração, qualquer desequilíbrio poderá ter consequências no clima terrestre, ainda não totalmente conhecidas pela comunidade científica (Kelly *et al.*, 2016).

A circulação tropical do Oceano Atlântico é composta por um sistema complexo de correntes e contracorrentes que se influenciam mutuamente e onde a sua localização e características tendem a ser mutáveis dependendo da estação e época do ano. As oscilações anuais estão profundamente interligadas

com a circulação atmosférica, destacando-se tanto o sistema da Zona de Convergência Intertropical (do Inglês *Inter Tropical Convergence Zone*, ITCZ), dependendo da sua espessura e localização (Pailler *et al.*, 1999), assim como da resposta ao forçamento dos ventos alísios, que tendem a ter uma maior influência nas correntes de superfície quanto mais próximas do equador estas se encontrarem (Talley *et al.*, 2011).

Parte do transporte superficial de água quente em direção ao Atlântico Norte é realizada no giro anticiclônico subtropical (Hogg & Johns, 1995). No extremo sul deste giro, localiza-se o limite norte do sistema de correntes equatorial ($\sim 10^\circ - 20^\circ$ N), que flui numa trajetória zonal este – oeste (Talley *et al.*, 2011). A Corrente Equatorial do Norte (do Inglês *North Equatorial Current*, NEC) é uma das correntes que compõe este sistema (Fig. 1.1). Na sua trajetória atravessa o Oceano Atlântico, grande parte influenciada pela interferência dos ventos alísios (Bourlès *et al.*, 1999a; Bourlès *et al.*, 1999b). Genericamente, a sul da NEC, localiza-se a Contracorrente Equatorial do Norte (do inglês *North Equatorial Countercurrent* NECC, $\sim 5^\circ - 10^\circ$ N), que se dirige de oeste para este (numa trajetória oposta à NEC, Fig. 1.1) (Talley *et al.*, 2011). A NECC manifesta diferentes padrões no transporte de água ao longo do ano. De Julho a Setembro, por exemplo, ocorre um desvio para norte e a velocidade da NECC é reforçada. Estes eventos devem-se principalmente ao forçamento do campo do vento, à posição da ITCZ (Talley *et al.*, 2011) e à retroflexão das camadas superficiais da Corrente Norte do Brasil (do Inglês *North Brazil Current*, NBC, Fig. 1.1) (Silveira *et al.*, 1994).

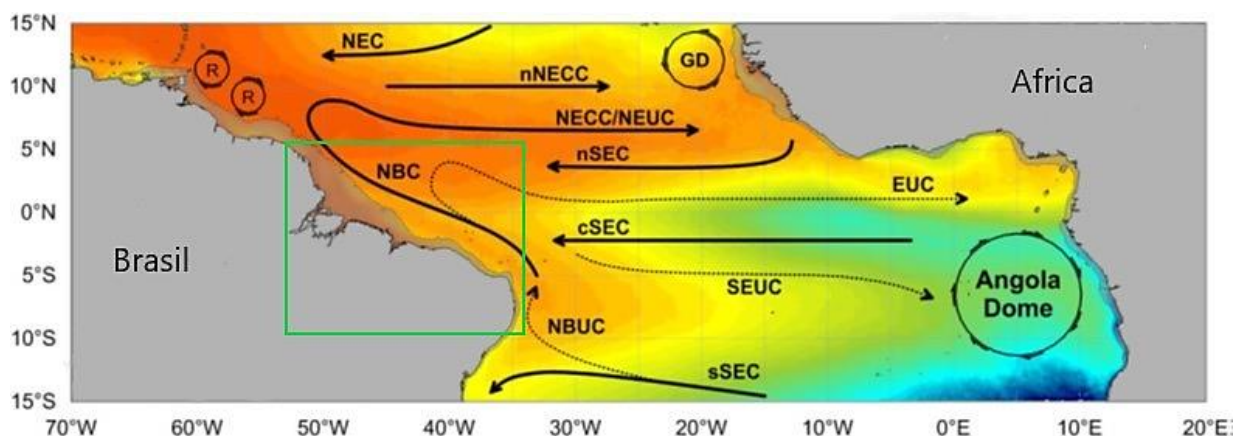


Figura. 1.1 – Circulação na região equatorial do Oceano Atlântico. Estão representadas, a Corrente Norte do Brasil (do Inglês *North Brazil Current*, NBC), a Corrente Equatorial do Norte (do Inglês *North Equatorial Current*, NEC), o ramo norte da Contracorrente Equatorial do Norte (do Inglês *Northern North Equatorial Countercurrent*, nNECC), a Contracorrente Equatorial do Norte (do Inglês *North Equatorial Countercurrent*, NECC), a Subcorrente Equatorial do Norte (do Inglês *North Equatorial Undercurrent*, NEUC), o ramo norte da Corrente Equatorial do Sul (do Inglês *Northern South Equatorial Current*, nSEC), a Subcorrente Equatorial (do Inglês *Equatorial undercurrent*, EUC), o ramo central da Corrente Equatorial do Sul (do Inglês *Central South Equatorial Current*, cSEC), a Subcorrente Equatorial do Sul (do Inglês *South Equatorial Undercurrent*, SEUC), a Subcorrente Norte do Brasil (do Inglês *North Brazil Undercurrent*, NBUC) e o ramo sul da Corrente Equatorial do Sul (do Inglês *Southern South Equatorial Current*, sSEC). Representam-se também, os anéis anticiclônicos da Corrente Norte do Brasil com a letra “R” e o vórtice ciclônico de Angola (do Inglês *Angola Dome*). A região delimitada a verde representa a área de estudo deste trabalho (adaptado de Vilela *et al.*, 2018).

A Corrente Equatorial do Sul (do Inglês *South Equatorial Current*, SEC), não é apenas uma corrente, mas um sistema complexo de correntes que pode ser dividida em três ramos principais: o ramo Norte da Corrente Equatorial do Sul (do Inglês *Northern South Equatorial Current*, nSEC) localizada a sul da

NECC, o ramo central da Corrente Equatorial do Sul (do Inglês *Central South Equatorial Current*, cSEC) e o ramo Sul da Corrente Equatorial do Sul (do Inglês *Southern South Equatorial Current*, sSEC) (Stramma & England, 1999; Damasceno *et al.*, 2022).

Entre a nSEC e a cSEC (Fig. 1.1), existe uma subcorrente (com trajetória para leste), que é formada devido aos diferentes gradientes de pressão (entre uma baixa pressão a este e uma alta pressão a oeste onde a água está ligeiramente mais elevada). A força do gradiente de pressão vai forçar o movimento da água a fluir da alta para a baixa pressão, dando origem à Subcorrente Equatorial (do Inglês *Equatorial EUC* - Fig. 1.1), localizada a 100 - 200 m de profundidade (Talley *et al.*, 2011). A EUC é uma corrente caracterizada pela sua elevada velocidade, que segundo Talley *et al.* (2011), flui a mais de 100 cm/s. Esta corrente é, em parte, alimentada pela Corrente Norte do Brasil e pela Subcorrente Norte do Brasil através de processos de retroflexão que originam por vezes anéis anticiclônicos sub-superficiais (Talley *et al.*, 2011). Uma das contribuições dos movimentos e interconexões destas correntes é o transporte de águas com valores de salinidade relativamente elevados provenientes do Atlântico Sul para o Hemisfério Norte (Silva *et al.*, 2009).

O limite norte do sistema SEC localiza-se a $\sim 4^\circ$ N (Talley *et al.*, 2011) próximo do limite sul da NECC. A sul, o limite da SEC varia dependendo da estação do ano. Ao alcançar aproximadamente 10° - 15° S, parte da Corrente Equatorial do Sul bifurca ao aproximar-se da costa do Brasil (Fig. 1.1), perto do Cabo de São Roque. Parte desta corrente dirige-se para norte, fortalecendo a Corrente Norte do Brasil (NBC, Fig. 1.1), enquanto outra parte se dirige para sul fortalecendo a Corrente do Brasil (Talley *et al.*, 2011; Silveira *et al.*, 1994).

As correntes de fronteira oeste, tal como a Corrente Norte do Brasil (Fig. 1.2), são a principal causa da interconexão de circulação entre hemisférios (Pailler *et al.*, 1999). A NBC transporta águas superficiais mais salgadas e de temperaturas mais altas do Hemisfério Sul para o Hemisfério Norte, ao mesmo tempo que abastece o sistema zonal de contra correntes (Johns *et al.*, 1998). A Corrente Profunda de Bordo Oeste (do inglês *Deep West Boundary Current*) em oposição à NBC, transporta a Água Profunda do Atlântico Norte (do Inglês *North Atlantic Deep Water*, NADW) do Hemisfério Norte para o Hemisfério Sul. Estas duas correntes como parte integrante do sistema global de circulação termohalina, sendo as suas duas principais componentes (Silva *et al.*, 2009; Gordon, 1986).

1.1.1 Dinâmica associada à Corrente Norte do Brasil

A Corrente Norte do Brasil (do Inglês *North Brazil Current*, NBC) estende-se até uma profundidade intermédia aproximada de 800 m, transportando água das camadas superficiais até camadas mais profundas da coluna de água (Talley *et al.*, 2011). Tanto a NBC como a sua componente subsuperficial, a Subcorrente Norte do Brasil (do Inglês *North Brazil Undercurrent*, NBUC) fazem parte de um sistema complexo que alimenta outras correntes a diferentes latitudes e profundidades, principalmente através de padrões de retroflexão e por vezes através da formação de grandes anéis anticiclônicos (Pailler *et al.*, 1999; Schott *et al.*, 1998; Bouchet *et al.*, 1999a), exemplificados na figura 1.2. Segundo Silva *et al.* (2009) a Subcorrente Equatorial do Sul, a Subcorrente Equatorial, a Subcorrente Equatorial do Norte, ou a Contracorrente Equatorial do Norte, são alguns exemplos de correntes que são em parte fortalecidas pelo sistema de correntes NBC/NBUC.

A NBC flui ao longo da costa noroeste do Brasil a velocidades elevadas, especialmente na superfície, sendo esta uma das suas principais características (Talley *et al.*, 2011). De uma forma geral, pode dizer-se que ao longo do seu percurso aumenta continuamente o transporte de água e a velocidade. Estes aumentos devem-se em parte, à influência da SEC, especialmente nas camadas superficiais. De Julho a Dezembro, a influência da SEC é maior, diminuindo de Janeiro a Julho (Johns *et al.*, 1990; Field, 2005;

Stramma & Schott, 1999; Johns *et al.*, 1998; Varona *et al.*, 2019). O valor médio anual do transporte da NBC é $\sim 26 \text{ Sv}$ ($1 \text{ Sv} \equiv 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), maioritariamente acima de 150 metros de profundidade (Johns *et al.*, 1998; Talley *et al.*, 2011). É também a esta profundidade aproximada que vários autores identificam a termoclina, máximos de salinidade e o núcleo desta corrente ($\sim 100 - 200 \text{ m}$) (Silveira *et al.*, 1994; Johns *et al.*, 1998; Neto & Da Silva, 2014).

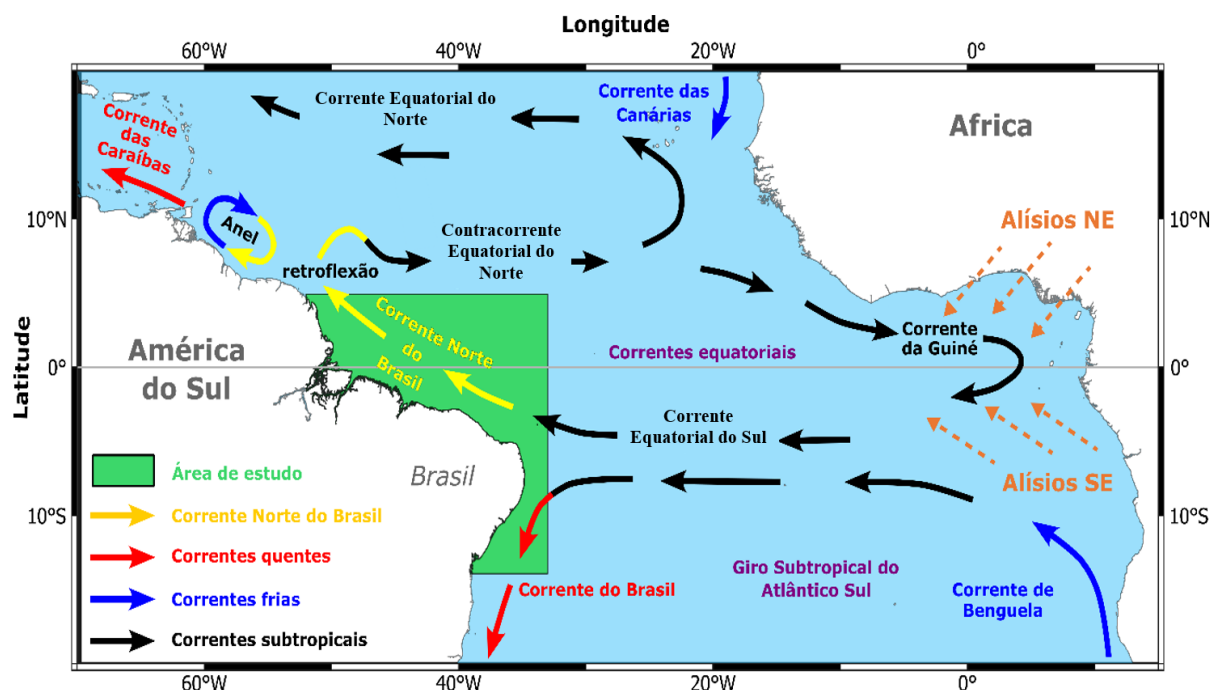


Figura 1.2 – Representação esquemática do sistema de circulação equatorial no Oceano Atlântico. Na figura está identificada a Corrente Norte do Brasil, representada a amarelo. As correntes subtropicais, a Corrente Equatorial do Norte, a Contracorrente Equatorial do Norte, a Corrente da Guiné, a Corrente Equatorial do Sul, representadas a preto. As correntes frias, a Corrente das Canárias e a Corrente de Benguela, representadas a azul-escuro. As correntes quentes, a Corrente do Brasil e a Corrente das Caraíbas, representadas a vermelho. Estão também identificados os anéis da Corrente Norte do Brasil, a localização do sistema de correntes Equatorial, o Giro subtropical e os ventos Alísios de ambos os hemisférios. A área de estudo deste trabalho está delimitada a verde (adaptado de Sharma *et al.*, 2009).

Existem alguns padrões anuais e sazonais que caracterizam a Corrente Norte do Brasil e que têm a ver sobretudo com a latitude, com a interferência de outras correntes e massas de água, com descargas de grandes quantidades de água doce dos rios nas contiguidades, à componente termohalina e a variações relacionadas com a influência do campo do vento na superfície do mar (Johns *et al.*, 1998).

O máximo de transporte e velocidade da NBC (Tabela 1.1), ocorre nos meses de Julho – Agosto e o mínimo nos meses de Abril – Maio (Johns *et al.*, 1998). Segundo vários autores a variabilidade anual está principalmente relacionada com os ventos Alísios de ambos os hemisférios e à Zona de Convergência Intertropical (ITCZ). Assim, quando a ITCZ migra para norte durante o verão e o outono Boreal, a NBC regista os seus máximos de transporte. Quando a ITCZ migra para sul, para uma zona mais próxima do equador, durante a primavera, a NBC tende a registar um abrandamento e enfraquecimento. Nesta época do ano parte da corrente nas camadas superficiais da coluna de água é também deflectida (Johns *et al.*, 1998; Mayer & Weisberg, 1993; Talley *et al.*, 2011; Fonseca *et al.*, 2004; Neto & Da Silva, 2014; Varona *et al.*, 2019).

Tabela 1.1 – Padrões sazonais do transporte (a) e velocidade (b) da Corrente Norte do Brasil, segundo alguns autores.

a) Transporte, $1 \text{ Sv} \equiv 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$

Autor	Máximo	Mínimo	Média anual
Silveira <i>et al.</i> (1994)	-	-	21 Sv
Johns <i>et al.</i> (1998)	$\geq 36 \text{ Sv}$ Julho – Agosto	$\leq 13 \text{ Sv}$ Abril - Maio	$\sim 26 \text{ Sv}$
Nittrouer & DeMaster. (1996)	$\sim 30 - 50 \text{ Sv}$	$\sim 10 \text{ Sv}$	-
Garzoli <i>et al.</i> (2004)	$32 \pm 2 \text{ Sv}$ Setembro	$- 5 \pm 2 \text{ Sv}$ Maio	$\sim 12 \pm 2 \text{ Sv}$

b) Velocidade da Corrente Norte do Brasil (m/s)

Autor	Máximo	Mínimo	Média anual
Johns <i>et al.</i> (1990)	-	-	0.1 – 0.15
Nittrouer & DeMaster. (1996)	~ 1	~ 0.75	-
Johns <i>et al.</i> (1998)	-	-	$\sim 0.5 - 1$
Neto & Da Silva. (2014)	1.2 Julho – Agosto	-	-

Durante os processos de retroflexão, parte da corrente continua numa trajetória para norte (acompanhando o contorno da costa norte do Brasil) e outra parte dirige-se para este e alimenta a Contracorrente Equatorial do Norte (Ffield, 2005). Nesta região estão também presentes plumas provenientes dos Rio Amazonas e Pará, assim como anéis anticiclônicos com cerca de 400 km de diâmetro, que segundo Talley *et al.* (2011) transportam individualmente cerca de 1 Sv e a sua velocidade de superfície é de 30 a 80 cm/s. Os anéis, têm uma trajetória para norte/noroeste em direção às Caraíbas, alcançando a Corrente da Guiana durante este percurso. Em conjunto, a Corrente da Guiana e a Corrente Norte do Brasil são a principal fonte do transporte de água da Corrente das Caraíbas (Talley *et al.*, 2011; Ffield, 2005; Garzoli *et al.*, 2004).

O transporte e conexão de águas equatoriais do Hemisfério Sul para o Hemisfério Norte é facilitado pelos anéis da NBC (Silva *et al.*, 2009), que têm um papel importante no sistema climático e no sistema da AMOC (Sharma *et al.*, 2009; Talley *et al.*, 2011; Neto & Da Silva, 2014). Frantantoni *et al.* (2000) e Talley *et al.* (2011) referem que, no sistema da AMOC, dos 14 Sv que têm uma trajetória para norte, cerca de 3 Sv são transportados pelos anéis da NBC, e cerca de 7 Sv são transportados pela própria Corrente Norte do Brasil no seu percurso até alcançar a Corrente da Guiana.

1.1.2 Caracterização termohalina da Corrente Norte do Brasil

No oceano global, a distribuição da temperatura e da salinidade nas camadas superiores da coluna de água demonstram padrões de distribuição praticamente zonal. As águas mais quentes localizam-se mais próximo do equador e as águas mais frias localizam-se nos pólos. As variações da temperatura na superfície do mar, ao longo do ano, na zona do equador são de pequena amplitude, contudo é nas latitudes médias (especialmente a oeste) que ocorrem as maiores oscilações (Stewart, 2008). A distribuição global da salinidade tende a registar os menores valores na zona do equador e nos pólos, e os mais elevados nas latitudes médias. Os parâmetros que influenciam a salinidade são a evaporação e

a precipitação (E-P), contudo em regiões costeiras, a descarga de rios é um fator que tem de se ter em conta (Stewart, 2008).

A temperatura diminui tipicamente com a profundidade. Na superfície, este parâmetro é fortemente influenciado pela interação com a atmosfera e também por movimentos nas camadas superiores, entre os quais se salientam as correntes de advecção. Dois exemplos destas influências na zona do equador são à posição da ITCZ e os movimentos associados à Corrente Norte do Brasil (Lumpkin & Garzoli, 2005; Neto & Da Silva, 2014).

Com o objetivo de estudar a temperatura da superfície do mar e a estrutura termohalina, numa localização próxima da foz dos rios Amazonas e Pará, entre 1.6° e 4° N de latitude, e 47° e 49° W de longitude, Neto & Da Silva. (2014) utilizaram dados recolhidos em campanhas observacionais (Maio a Julho de 1999 e Julho a Agosto de 2000) e dados obtidos com satélite (Janeiro de 1998 a Dezembro de 2011). Neste estudo os autores refrem que os menores valores da temperatura na superfície do mar ocorreram durante os meses de Julho e Agosto ($T \sim 25.5\text{ }^{\circ}\text{C}$), coincidindo com o aumento da velocidade da NBC e com um desvio para norte da ITCZ. As temperaturas mais elevadas ($T > 28.0\text{ }^{\circ}\text{C}$) foram registadas durante os meses de Maio e Junho, coincidindo com o período de maior descarga de água doce proveniente do Rio Amazonas e com um desvio da ITCZ para uma zona próxima do equador.

Nas regiões tropicais a salinidade tem um valor relativamente baixo à superfície, aumentando na coluna de água até cerca de 100 - 200 m de profundidade, onde atinge um máximo relativo. Este máximo subsuperficial resulta da subdução de águas mais salgadas, provenientes dos giros subtropicais, que fluem sob uma camada superficial (mais quente e menos salgada), quando se dirigem para o equador. Imediatamente abaixo deste máximo subsuperficial de salinidade, localiza-se o topo da haloclina (que coincide com a termoclina). Valores mínimos de salinidade podem ser encontrados em profundidades intermédias, devido às características de algumas massas de água, como a Água Antártica Intermédia (do Inglês *Antarctic Intermediate Water*, AAIW), e em maiores profundidades, a salinidade volta a aumentar ligeiramente até se tornar relativamente constante no oceano profundo (Talley *et al.*, 2011).

Silva *et al.* (2009) ao descrever a variabilidade espacial e sazonal da termoclina e da circulação de águas com máximos de salinidade, utilizaram modelos numéricos e dados *in situ* numa região localizada na costa norte do Brasil, na proximidade da foz dos rios Amazonas e Pará (entre as latitudes 8° N e 2.5°S, e as longitudes 40° e 52° W) e os dados analisados são referentes a Março e Maio de 1995, Maio e Junho de 1995, Julho e Agosto de 2001 e Outubro e Novembro de 1997. Neste estudo os autores apresentaram perfis verticais e secções de temperatura e salinidade, onde identificaram valores elevados de temperatura ($T \geq 28.0\text{ }^{\circ}\text{C}$) nos primeiros 50 m da coluna de água, justificando este resultado pela influência de plumas de água doce provenientes do Rio Amazonas e Pará. Abaixo da camada superficial, aproximadamente entre 90 - 170 m de profundidade (na termoclina), os mesmos autores identificaram ainda um máximo de salinidade, $S \geq 36.6$. Valores relativamente menores de salinidade, $S > 36.0$, foram identificados no mesmo artigo entre Julho e Agosto de 2001.

Num outro estudo realizado com o objetivo caracterizar parte da região percorrida pela Corrente Norte do Brasil, Silveira *et al.* (1994), utilizaram dados oceanográficos recolhidos entre Maio e Julho de 1986. O diagrama de T/S de dispersão representado na Fig. 1.3, foi obtido por Silveira *et al.* (1994) com a identificação das massas de água: Água Tropical (do Inglês *Tropical water*, TW), Água Central do Atlântico Sul (do Inglês *South Atlantic Central Water*, SACW) e a Água Antártica Intermédia (do Inglês *Antarctic Intermediate Water*, AAIW). Os autores observaram camadas de mistura com espessuras de 70 a 100 m ocupadas pela TW. A profundidades de 100 – 200 m, identificaram máximos de salinidade

($S > 37.0$), o núcleo da Corrente Norte do Brasil. Em maiores profundidades, Silveira *et al.* (1994) identificam a SACW até profundidades de ~ 700 m.

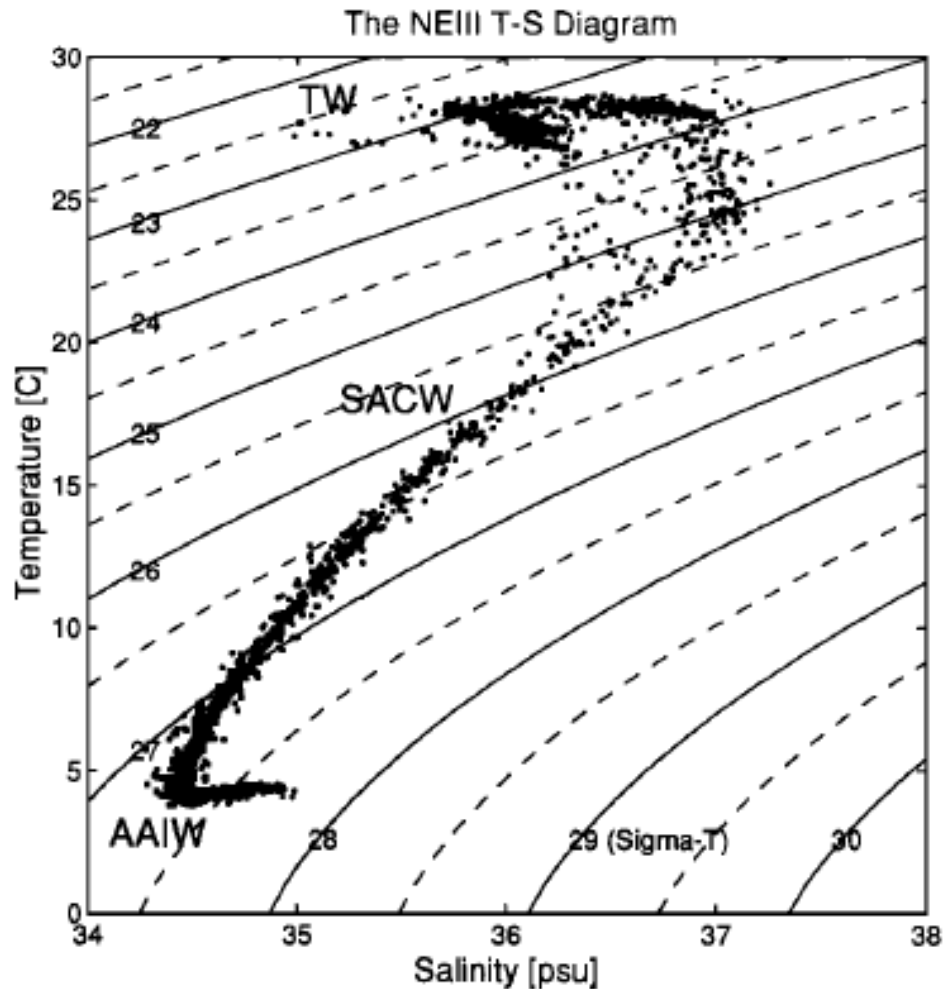


Figura 1.3 – Diagrama T/S de dispersão e representação das principais massas de água no Atlântico Sul: a Água Tropical (do Inglês *Tropical water*, TW), Água Central do Atlântico Sul (do Inglês *South Atlantic Central Water*, SACW) e Água Antártica Intermédia (do Inglês *Antarctic Intermediate Water*, AAIW), assim como o traçado de isolinhas de Sigma-T (kg/m^3), segundo Silveira *et al.* (1994).

Numa primeira tentativa de caracterização das massas de água, Emery & Meincke. (1986) apresentaram os valores presentes na Tabela 1.2, onde se identificam duas das três águas mencionadas previamente SACW e AAIW. Na mesma tabela também estão presentes informações retiradas de outros artigos sobre as propriedades termohalinas presentes na região percorrida pela Corrente Norte do Brasil.

Tabela 1.2 – Massas de água presentes na região abrangida pela Corrente Norte do Brasil, segundo vários autores. Referem-se em particular os valores característicos da temperatura e da salinidade.

Autor	Massa de Água	Profundidade (m)	Temperatura (°C)	Salinidade
Emery & Meincke. (1986)	Água Central do Atlântico Sul (SACW)	Águas superficiais (200 – 500)	5.0 – 18.0	34.3 – 35.8
	Água Antártica Intermédia (AAIW)	Águas intermédias (500 – 1500)	2.0 – 6.0	33.8 – 34.8
Johns <i>et al.</i> (1990)	Água Antártica Intermédia (AAIW)	900		
Silveira <i>et al.</i> (1994)	Água Tropical (TW)	70 – 100		~ 37.0
	Água Central do Atlântico Sul (SACW)	100 - 700		
	Água Antártica Intermédia (AAIW)			~ 34.5
Johns <i>et al.</i> (1998)		Camada superficial (0-100)	>24.0	
Schmitz & Richardson. (1991)		100 - 200	12.0 – 24.0	
		200 - 500	7.0 – 12.0	
		> 500	5.0 – 7.0	
Pailler <i>et al.</i> (1999)		60 - 120		>36.8
Silveira <i>et al.</i> (2000)	Água Tropical (TW)	Camada Superficial	~ 20.0	~ 36.0
	Água Central do Atlântico Sul (SACW)	Picnoclina	~ 6.0 – 20.0	~ 34.6 – 36.0
Silva <i>et al.</i> (2009)		Camada Superficial (0 – 50)	≥28.0	~36.0
		100 - 170		~36.6 – 36.8
Talley <i>et al.</i> (2011)	Água Central do Atlântico Sul (SACW)	Águas superficiais 200 – 1000		
	Água Antártica Intermédia (AAIW)	Águas Intermédias 500 – 1200	4.0 – 5.0	$\bar{S}$ 34.39
Araújo <i>et al.</i> (2011)	Água do Atlântico Sul (SAW)	~120	24.0 - ~ 27	36.0 - 36.5
Neto & Da Silva. (2014)		0 – 150	~ 26.5 – 28.0	

Na margem oeste da região equatorial do Oceano Atlântico, valores relativamente mais baixos de salinidade podem ser encontrados à superfície, associados principalmente à presença da ITCZ ou a mínimos devidos à proximidade do Rio Amazonas (Talley *et al.*, 2011). Segundo Bourlès *et al.* (1999) e Araújo *et al.* (2011), as três principais massas de água presentes são: a Água do Atlântico Norte (do Inglês *North Atlantic Water*, NAW), a Água Tropical do Atlântico Oriental (do Inglês *Eastern Tropical Atlantic Water*, EAW) e a Água do Atlântico Sul (do Inglês *South Atlantic Water*, SAW). Contudo, Bourlès *et al.* (1999a) referem também que a distinção entre estas três massas de água não é tão nítida na camada de mistura.

A NAW, é formada na região subtropical do Hemisfério Norte e é transportada pela Corrente Equatorial do Norte para a região Equatorial através de processos ciclônicos de recirculação (Araújo *et al.*, 2011). É caracterizada por ser uma massa de água com valores relativamente elevados de salinidade, especialmente abaixo da termoclina (Bourlès *et al.*, 1999a; Araújo *et al.*, 2011).

A EAW é caracterizada por valores relativamente baixos de salinidade na camada superficial e na termoclina (Bourlès *et al.*, 1999a). Esta massa de água é transportada para a costa do Brasil pela Corrente Equatorial do Norte e pelos ramos norte e central da Corrente Equatorial do Sul (Araújo *et al.*, 2011), oriundos da região este do Atlântico Tropical (Bourlès *et al.*, 1999a).

A SAW é caracterizada por valores relativamente altos de salinidade (mesmo em comparação com a Água do Atlântico Norte), maioritariamente localizados acima da termoclina. Numa camada abaixo da termoclina, os valores de salinidade são relativamente mais baixos (Araújo *et al.*, 2011). Esta massa de água provém do sul do Atlântico Tropical (Bourlès *et al.*, 1999a) e atinge a região costeira do Brasil por processos de subdução da ramificação sul da Corrente Equatorial do Sul (sCES) e também por influência do sistema da NBC/NBUC (Pailler *et al.*, 1999; Araújo *et al.*, 2011).

1.1.3 Caracterização da Camada de Mistura

A camada que se encontra na superfície do oceano está em contacto direto com a atmosfera e com os processos físicos e dinâmicos que dela resultam. Um exemplo dos impactos desta interação é a força e movimento exercida pelo campo do vento na superfície do mar que facilita a mistura vertical nesta camada – caracterizada por uma temperatura, salinidade e densidade constante ou praticamente constante e denominada de camada de mistura (Thomson & Fine, 2003). A profundidade pode variar com a latitude e a localização geográfica, de apenas alguns metros (num período de 24 horas) ou de algumas centenas de metros (num ciclo anual). A camada de mistura desempenha uma função essencial no estado do tempo e no clima global, retendo e transportando grandes quantidades de calor, decorrente das trocas de massa, momento (*momentum*) e energia, resultantes da proximidade com a atmosfera circundante (Kantha & Clayson, 2003).

O oceano tem capacidade para conservar o calor que é absorvido na superfície durante longos períodos de tempo. Saravanan & Chang (1999) afirmam que uma vez que as mudanças de temperatura na superfície do mar são induzidas pelo forçamento do fluxo de calor atmosférico, estas tendem a ser inversamente proporcionais à profundidade da camada de mistura. Podemos esperar que esta resposta seja ainda mais forte na camada de mistura na região tropical, caracterizada por ser geralmente pouco espessa quando comparada com as formadas a outras latitudes. Nas regiões tropicais, a presença de água doce na superfície do mar, devido a rios como o Amazonas por exemplo, e concentrações de salinidade numa camada subsuperficial, podem resultar em condições favoráveis à existência de uma haloclina evidente (Pailler *et al.*, 1999). Este processo poderá atenuar o arrefecimento da camada de mistura através da indução da picnoclina e dependendo da sua estabilidade, impedindo os movimentos de água na vertical (Pailler *et al.*, 1999).

O sistema Oceano – Atmosfera na região tropical do Atlântico é dominado por um padrão anual harmônico. As variações sazonais estão fortemente ligadas ao forçamento por parte dos ventos alísios e à Zona de Convergência Intertropical. No outono e verão boreal, a humidade é elevada e os ventos são fracos, enquanto no inverno e primavera, os níveis de humidade são menores e os ventos alísios são mais fortes, coincidindo também com uma localização da ITCZ mais próxima do equador (Foltz *et al.*, 2003). Estas diferenças sazonais refletem alterações termodinâmicas no oceano, assim como em diferenças nas propriedades radiativas na atmosfera (Foltz *et al.*, 2003). Segundo Araújo *et al.* (2011), no bordo este da região tropical do Atlântico, a espessura da camada de mistura é menor no verão austral (que corresponde ao inverno boreal) quando comparada com a que se forma durante o inverno.

1.2 Enquadramento da área de estudo

A NBC flui ao longo da margem norte do Brasil, estendendo-se pela plataforma e vertente continentais até cerca de 100 – 200 km da costa (Nittrover & DeMaster, 1996), atingindo profundidades próximas de 800 m (Talley *et al.*, 2011). Neste trabalho, a área de estudo, foi definida considerando a localização de algumas estações obtidas em três campanhas oceanográficas e englobando parte do percurso da Corrente Norte do Brasil. Na Fig. 1.4 destacam-se duas regiões: A) e B), diferenciadas consoante a localização das estações realizadas durante as campanhas Camadas Finas III/2012, PIRATA XVII/2017 e XVIII/2018, e utilizadas neste estudo.

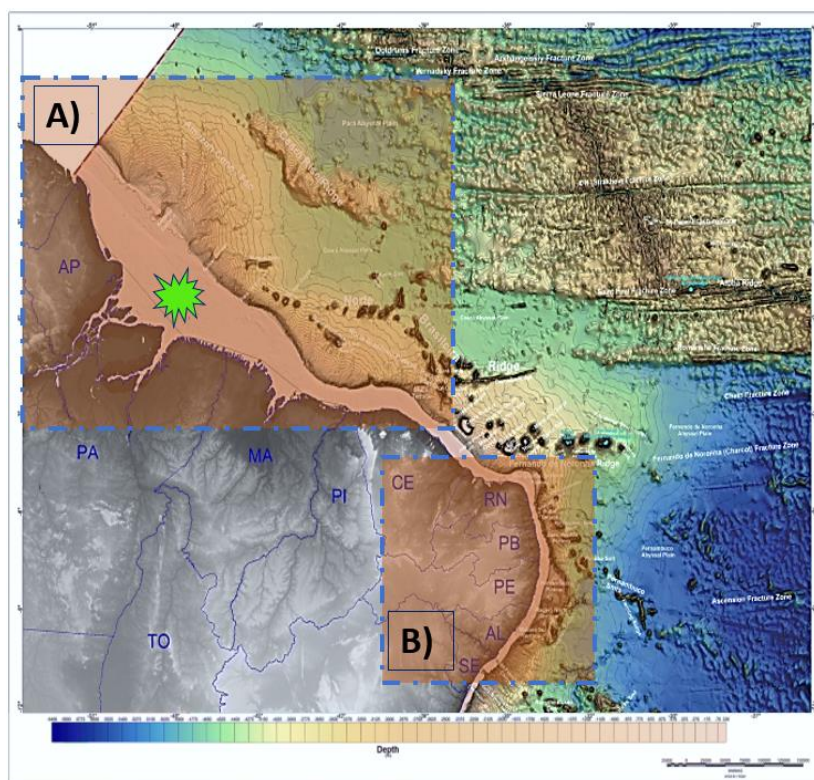


Figura 1.4 – Representação de parte da costa do Brasil com a identificação das regiões A), representativa da área ocupada durante a campanha Camadas Finas III/2012, e B), representativa da área ocupada durante as campanhas PIRATA XVII/2017 e XVIII/2018. A localização da foz do Rio Amazonas está identificada com uma estrela verde (Adaptado de Alberoni *et al.*, 2020).

Na plataforma continental da margem Brasileira a largura diminui genericamente de norte para sul (Alberoni *et al.*, 2020). A região de estudo deste trabalho (Fig. 1.4) localiza-se entre a Guiana Francesa (a Noroeste, região A) e o Estado Federal da Bahia (região B). Existe uma grande diferença nas larguras da plataforma continental entre a região A e B, com variações compreendidas entre 320/330 e 40 km. As maiores dimensões da plataforma continental situam-se na região A), nas imediações da foz do Rio Amazonas, sendo as maiores da margem Atlântica deste país, caracterizada também pela sua inclinação suave (Alberoni *et al.*, 2020; Goes & Ferreira.Jr., 2017). A região B) é em geral caracterizada pela menor largura da plataforma continental e também pela sua inclinação mais acentuada (Alberoni *et al.*, 2020).

A influência de águas provenientes de rios nas regiões costeiras é um fator importante nas propriedades físicas e biogeoquímicas das camadas superficiais do oceano, em particular nas características da camada de mistura (Liang *et al.*, 2020). Na área de estudo, salienta-se a presença do Rio Amazonas que é considerado o rio com a maior descarga do mundo (Gibbs. 1976; Liang *et al.*, 2020). Talley *et al.* (2011) referem o valor de $\sim 0.2 Sv$ correspondente à água deste rio que é transportada pela NBC durante o seu trajecto.

O Rio Amazonas transporta um grande volume de água doce para a região tropical do Atlântico, dando origem a menores salinidades na superfície (Masson & Delecluse, 2001). Ao longo do ano existem variações sazonais associadas às descargas de água proveniente do Amazonas, Liang *et al.* (2020) referem no seu estudo que as maiores descargas ocorrem em Junho e as menores em Novembro (Tabela 1.3).

Tabela 1.3 - Padrões sazonais associados ao Rio Amazonas, segundo Liang *et al.* (2020).

Padrões sazonais associados ao Rio Amazonas	Maiores valores	Menores valores
Precipitação média na Amazônia	Janeiro, Fevereiro, Março Máximo: Março	Julho, Agosto, Setembro Mínimo: Agosto
Descarga do rio Amazonas	Máximo em Junho	Mínimo: Novembro

A NBC e as águas provenientes do Rio Amazonas têm uma influência mútua, destacando-se o transporte de águas superficiais com temperaturas elevadas e salinidades relativamente baixas, assim como o transporte de plumas (Liang *et al.*, 2020). A influência de água do Amazonas também têm variações sazonais e podendo atingir milhares de quilómetros, quer através de processos de retroflexão (meses Julho a Dezembro) ou através de processos de advecção ou incorporação em vórtices anticiclónicos (geralmente associados aos meses de Janeiro a Junho) (Johns *et al.*, 1990; Lentz.,1995; Nittrouer & DeMaster,1996; Varona *et al.*, 2019). A localização da Zona de Convergência Intertropical e o campo do vento, têm influência nos padrões anuais da NBC e também nos padrões de trajetória das plumas provenientes do Rio Amazonas: da primavera ao outono (boreal) têm uma trajetória para norte/noroeste (nesta altura do ano, as águas do Amazonas são em parte incorporadas na NECC) e no inverno (boreal) têm uma trajetória para este/sudoeste (Nittrouer & DeMaster, 1996; Varona *et al.*, 2019).

1.3 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é estimar e a variabilidade da espessura da camada de mistura na margem continental do Brasil, numa área abrangida pelo percurso da Corrente Norte do Brasil (NBC). Este estudo analisa a informação recolhida por meio de um aparelho CTD (do Inglês *Conductivity – Temperature – Depth*, Condutividade - Temperatura - Profundidade) em várias estações, durante as campanhas oceanográficas Camadas Finas III/2012, PIRATA XVII/2017 e PIRATA XVIII/2018, caracterizando a hidrologia da região através da informação teorica já existente.

A motivação deste estudo foca-se na profundidade da camada de mistura devido à importância que desempenha na regulação climática através da interação direta com a atmosfera e dos processos que dela resultam. A região escolhida para analisar a espessura desta camada está enquadrada em parte do trajeto realizado pela Corrente Norte do Brasil rumo ao equador, assim como na foz dos rios Amazonas e Pará, sendo uma área bastante dinâmica que requer uma análise abrangente do enquadramento hidrologico, atmosférico e dos padrões associados ao transporte e velocidade da NBC, caracterizados no primeiro capítulo.

O enquadramento das campanhas oceanográficas Camadas Finas III/2012, PIRATA XVII/2017 e PIRATA XVIII/2018 é descrito no segundo capítulo, assim como os métodos utilizados para o processamento dos dados recolhidos nas estações CTD das três campanhas.

No terceiro capítulo são apresentados os resultados obtidos e a sua discussão, focando nas características hidrologicas e termohalinas observadas, assim como na espessura da camada de mistura obtida nos perfis de temperatura e densidade. Os resultados foram ainda comparados com a informação teórica e investigação científica já existente sobre a região.

Capítulo 2

Dados e metodologias

2.1 Dados hidrológicos

Os dados utilizados foram recolhidos durante três campanhas oceanográficas que tiveram lugar nos anos de 2012, 2017 e 2018, e que decorreram ao largo da costa norte do Brasil. Os parâmetros utilizados de temperatura (T, °C), de salinidade (S), e da profundidade (m), foram obtidos com sonda CTD (do Inglês *Conductivity, Temperature and Depth* - Condutividade, temperatura e profundidade). A densidade (ρ , kg/m³) foi posteriormente calculada.

A tabela 2.1 apresenta algumas informações relativas às três campanhas oceanográficas aqui analisadas, Camadas Finas III/2012, PIRATA XVII/2017 e PIRATA XVIII/2018.

Tabela 2.1 – Informações relativas às campanhas oceanográficas, Camadas Finas III/2012, PIRATA XVII/2017 e PIRATA XVIII/2018.

Campanha	Época do ano	Coordenadas	Nº total de estações realizadas
Camadas Finas III/2012	Outono (Boreal) 11 Out - 1 Nov 2012	9° N - 3° S 36° - 52° W	44
PIRATA XVII/2017	Outono (Boreal) 30 Out 2017 – 14 Jan 2018	20° N - 20° S 25° - 45° W	65
PIRATA XVIII/2018	Outono (Boreal) 28 Set - 9 Out 2018	20° N - 20° S 25° - 45° W	77

Para este estudo foi feita uma seleção das estações CTD realizadas durante as três campanhas acima descritas, de modo que a sua localização correspondesse à área percorrida pela Corrente Norte do Brasil no seu trajeto para noroeste, ao longo da costa Brasileira. O número de estações selecionadas e a área geográfica correspondente estão descritos na tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Número de estações CTD utilizadas neste trabalho obtidas durante as campanhas oceanográficas, Camadas Finas III/2012, PIRATA XVII/2017 e PIRATA XVIII/2018.

Campanha	Coordenadas	Nº de estações utilizadas
Camadas FinasIII/ 2012	4.5° N - 3° S 38° - 52° W	20
PIRATA XVII/ 2017	5° - 11° S 33° - 36° W	21
PIRATA XVIII/ 2018	5° - 11° S 33° - 36° W	29

2.1.1 Campanha Camadas Finas III/2012

A campanha Camadas Finas III/2012, decorreu a bordo do navio oceanográfico NHo Cruzeiro do Sul da Marinha do Brasil e teve lugar de 11 de Outubro a 1 de Novembro de 2012. O objetivo da campanha consistiu no estudo da região circundante ao Rio Amazonas focando em particular a influência das elevadas descargas deste mesmo rio numa região ao largo da costa norte do Brasil (Araújo *et al.*, 2021).

Durante a campanha realizaram-se 44 estações oceanográficas ao longo da costa norte do Brasil, numa zona envolvente ao estuário do Rio Amazonas, numa localização compreendida entre as latitudes 9° N e 3° S e as longitudes 36° W e 52° W, representada na Fig. 2.1 (Araújo *et al.*, 2021).

Os dados hidrológicos foram adquiridos com uma sonda CTD (Seabird, modelo SBE 25 *plus*) e processados através do *software* SBE, versão *Seasave* 7.17 (Araújo *et al.*, 2021).



Figura 2.1 – Localização das 44 estações CTD realizadas durante a campanha oceanográfica Camadas Finas III/2012 (adaptado de Araújo *et al.*, 2021).

Da totalidade das estações CTD realizadas durante a referida campanha, escolheram-se para o presente trabalho um conjunto de 20 estações. A sua localização está compreendida entre as latitudes 4.5° N e 3° S e as longitudes 38° e 52° W. As estações processadas foram divididas em duas secções: sec. I (Ests. 1 a 11) e sec. II (Ests. 12 a 20), representadas na Fig. 2.2.

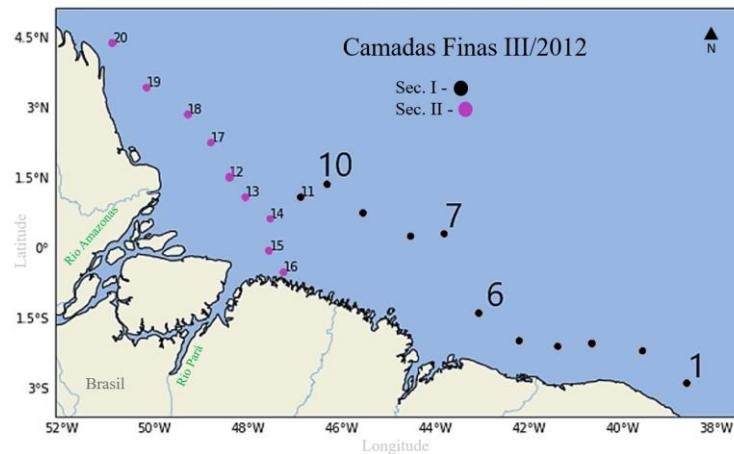


Figura 2.2 – Localização das 20 estações CTD realizadas durante a campanha Camadas Finas III/2012, escolhidas para o presente trabalho. A secção I (Ests. 1 a 11) está representada a preto, e a secção II (Ests. 12 a 20) está representada a lilás.

2.1.2 Campanha PIRATA XVII/2017

A campanha oceanográfica PIRATA XVII/2017 decorreu a bordo do navio oceanográfico NPqHo Vital de Oliveira, da Marinha do Brasil e teve lugar entre os dias 30 de outubro de 2017 e 14 de janeiro de 2018. A campanha realizou-se no âmbito do projeto PIRATA - *Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic*, que teve como objetivo estudar as interações oceano-atmosfera no Atlântico Tropical, em diferentes escalas temporais e regionais, contando com uma colaboração internacional (Bourlès *et al.*, 2008; Bourlès *et al.*, 2019).

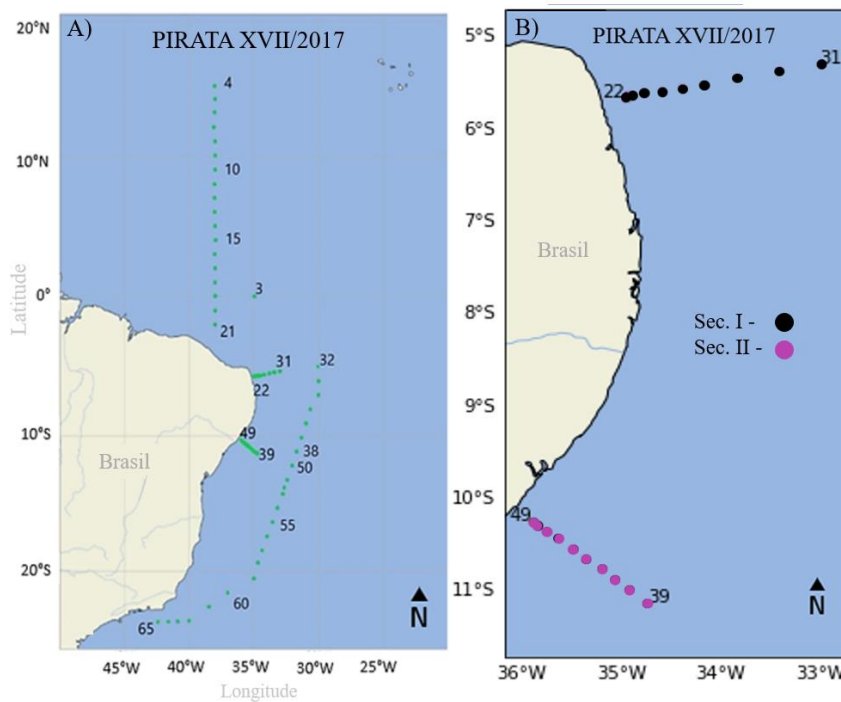


Figura 2.3 – A) Localização das 65 estações CTD realizadas durante a campanha oceanográfica PIRATA XVII/2017 (Bourlès *et al.*, 2008; Bourlès *et al.*, 2019). B) Localização das 29 estações escolhidas para o presente trabalho, a secção I (Ests. 22 a 31) está representada a preto e a secção II (Ests. 39 a 49) está representada a lilás.

Durante a referida campanha realizaram-se 65 estações distribuídas numa área compreendida entre as latitudes 20° N e 20° S e as longitudes 25° e 45° W (Fig. 2.3A). Os dados foram obtidos com a utilização de uma sonda CTD (Seabird, modelo SBE 9 plus) e processados com o *software Seasave*, versão 7.23.2.

No presente trabalho processaram-se apenas os dados de 21 estações CTD realizadas durante a campanha PIRATA XVII/2017 (Fig. 2.3B). Estas estações localizam-se numa área compreendida entre as latitudes 5° e 11° S e as longitudes 33° e 36° W, e foram agrupadas na secção I (Ests. 22 a 31) e na secção II (Ests. 39 a 49), representadas na Fig. 2.3B.

2.1.3 Campanha PIRATA XVIII/2018

A campanha oceanográfica PIRATA XVIII/2018, decorreu a bordo do navio oceanográfico NPqHo Vital de Oliveira, da Marinha do Brasil. A campanha teve lugar entre os dias 28 de Setembro e 9 de Outubro de 2018. Esta campanha realizou-se também no âmbito do projeto PIRATA - *Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic*, que teve como objetivo estudar as interações oceano-atmosfera no Atlântico Tropical, considerando diferentes escalas temporais e regionais, contando com colaboração internacional (Paulo, 2018).

Os dados foram obtidos utilizando uma sonda CTD (Seabird, modelo SBE 9 plus) e processados com o *software Seasave*, versão 7.23.2 (Paulo, 2018).

Durante a campanha PIRATA XVIII/2018, realizaram-se 77 estações CTD, localizadas numa área compreendida entre as latitudes 20° N e 20° S e as longitudes 25° e 45° W (Fig.2.4A) (Paulo, 2018).

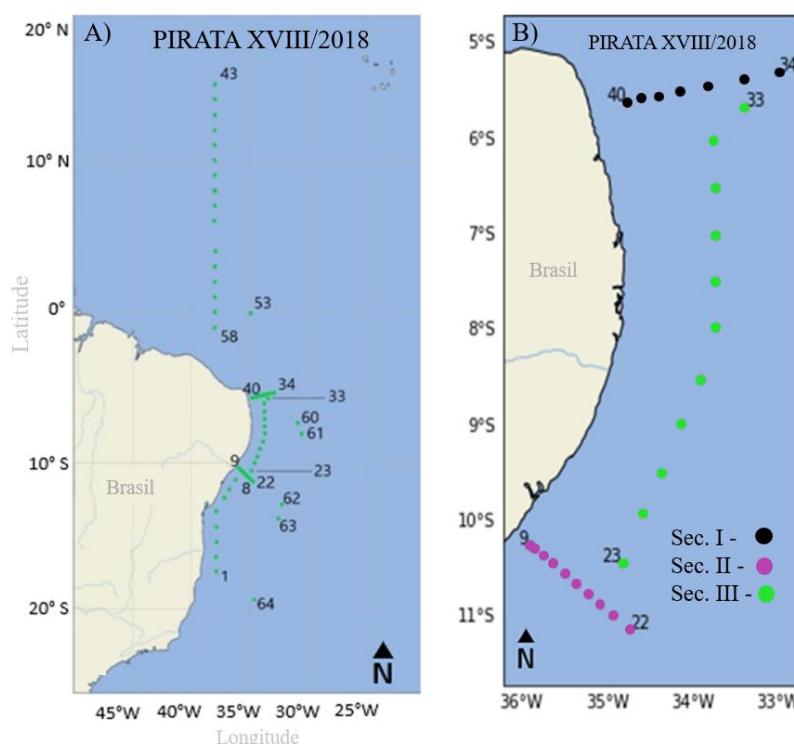


Figura 2.4 – A) Localização das 77 estações CTD realizadas durante a campanha oceanográfica PIRATA XVIII/2018 (adaptado de Paulo, 2018). B) Localização das 21 estações escolhidas para o presente trabalho, a secção I (Ests. 34 a 40) está representada a lilás, a secção II (Ests. 9 a 22) está representada a preto, e a secção III (Ests. 23 a 33) está representada a verde.

No presente trabalho foram processadas apenas 29 estações CTD, realizadas durante a campanha oceanográfica PIRATA XVIII/2018 (Fig.2.4. B), localizadas numa área compreendida entre as latitudes 5° S e 11° S e as longitudes 33° e 36° W de longitude, e agrupadas nas secções I (Ests. 34 a 40), II (Est. 23 a 33) e III (Ests. 9 a 22), representadas na Fig. 2.4B.

2.2 Metodologias

2.2.1 Processamento dos dados hidrologicos

Aos dados das 70 estações CTD analisados no presente trabalho, 20 da campanha oceanográfica Camadas Finas III/2012, 21 da campanha PIRATA XVII/2017 e 29 da campanha PIRATA XVIII/2018, foram aplicados um conjunto de programas de cálculo em linguagem Python 3.8.

Recorrendo ao *Pandas Library*, foi possível selecionar os parâmetros com interesse para o presente estudo: profundidade (m), temperatura (T, °C), salinidade (S) e densidade (ρ , kg/m³). Eliminaram-se valores nulos e/ou negativos e foram mantidos apenas os dados correspondentes às descidas do CTD. Mantiveram-se também as coordenadas referentes a cada estação.

Os ficheiros que continham os dados recolhidos nas campanhas PIRATA XVII/2017 e PIRATA XVIII/2018 estavam em formato *cnv* e para a sua leitura ser possível no *Python* foi necessário utilizar a *pycnv library*. Nestas campanhas, utilizaram-se e mantidos os dados das profundidades até 200 m. Estes critérios foram definidos com a intenção de uma melhor interpretação e comparação dos resultados, uma vez que um dos objetivos principais deste trabalho é calcular a profundidade da camada de mistura e, não ser expectável que esta atinja profundidades superiores a 200 m nesta região.

Para cada estação CTD procedeu-se ao traçado de perfis verticais de T, S e ρ . Neste trabalho utilizou-se a densidade *in situ* (ρ , kg/m³) que resulta do cálculo de temperatura, salinidade e pressão. Para a elaboração dos perfis verticais foi necessário importar a *library Matplotlib*. Para os perfis de T e ρ , foi posteriormente adicionada e calculada a profundidade da camada de mistura utilizando o método *Threshold*. Neste contexto foi ainda necessário importar a *Numpy library*.

Foram elaborados diagramas T/S de dispersão para cada campanha. Estes diagramas facilitam a compreensão e visualização de massas de água com diferentes características termohalinas, presentes e características da região em estudo.

2.2.2 Determinação da profundidade da camada de mistura

Com base nos perfis verticais de T e ρ , calculou-se a profundidade da camada de mistura utilizando o método *Threshold*. Este método consiste na observação da diferença vertical nos valores dos referidos parâmetros, tendo como referência a superfície do mar (Z_0), para a qual se encontram as variações de -0.3 °C, -0.5 °C na temperatura e +0.03 kg/m³ na densidade (Thomson & Fine, 2003).

Na tabela 2.3 estão representados os critérios do método *Threshold* que foram aplicados no presente trabalho para a determinação da profundidade da camada de mistura.

Tabela 2.3 – Parâmetros e critérios utilizados neste trabalho para a determinação da profundidade da camada de mistura utilizando o método *Threshold*. ΔT corresponde à variação da temperatura, $\Delta \rho$ corresponde à variação da densidade e Z_0 é a profundidade de referência (à superfície).

Parâmetros	Critério <i>Threshold</i>	Profundidade de referência
Temperatura	$\Delta T(Z_0) = -0.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $\Delta T(Z_0) = -0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$Z_0 = 0 \text{ m}$
Densidade	$\Delta \rho(Z_0) = +0.03 \text{ kg/m}^3$	$Z_0 = 0 \text{ m}$

Capítulo 3

Resultados e discussão

Os dados processados neste trabalho foram obtidos durante as campanhas oceanográficas Camadas Finas III/2012 (11 de Outubro a 1 de Novembro de 2012), PIRATA XVII/2017 (30 de Outubro de 2017 a 14 de Janeiro de 2018) e PIRATA XVIII/2018 (18 de Setembro a 9 de Outubro de 2018). A análise dos parâmetros recolhidos em cada estação durante as campanhas foi iniciado pelo estudo dos perfis de temperatura, salinidade e densidade, assim como diagramas T/S de dispersão. Calculou-se ainda para cada estação a profundidade da camada de mistura utilizando o método *Threshold* para os parâmetros da temperatura (T) e da densidade (ρ).

3.1 Análise dos dados hidrológicos

3.1.1 Campanha Camadas Finas III/2012

Perfis de Temperatura, Salinidade e Densidade

Processaram-se 20 estações CTD realizadas durante a campanha Camadas Finas III/2012 (CFIII/2012), distribuídas pelas secções I (Ests. 1 a 11) e II (Ests.12 a 20), e localizadas numa região compreendida entre as latitudes 4.5° N e 3° S e as longitudes 38° e 52° W. A partir dos dados recolhidos das diversas estações foram feitos perfis de temperatura, salinidade e densidade.

Os perfis de temperatura representados na figura 3.1A (secção I) e B (secção II), mostram duas secções com características bastante diferentes tanto na profundidade amostrada das estações que as compõem, como no comportamento dos próprios perfis ao longo da coluna de água.

A Fig. 3.1A correspondente à sec. I, mostra um conjunto de perfis de temperatura com um comportamento muito semelhante ao longo da coluna de água. A temperatura mantém-se sensivelmente constante na maioria das estações, com valores de $T > 25.0$ °C, até profundidades de 50 - 150 m. A uniformidade da temperatura neste intervalo pode sugerir que a água aqui presente se encontra bem misturada. Destacam-se na Fig. 3.1A, dois perfis correspondentes às

Ests. 3 (a verde) e 6 (a laranja). Estes perfis apresentam, respectivamente, as menores (50 m) e maiores (145 m) profundidades onde a temperatura se mantém constante.

Em profundidades superiores a 50 - 150 m, observa-se nos perfis da sec. I (Fig. 3.1A), uma camada com forte gradiente vertical da temperatura e duas inclinações diferentes: entre 150 - 250 m, ocorre uma transição acentuada das características térmicas entre as águas superficiais e as águas subjacentes (variando cerca de 12 °C), e entre 250 - 500 m, onde a temperatura segue uma variação gradual até atingir as maiores profundidades amostradas, com valores de $T < 8.0$ °C.

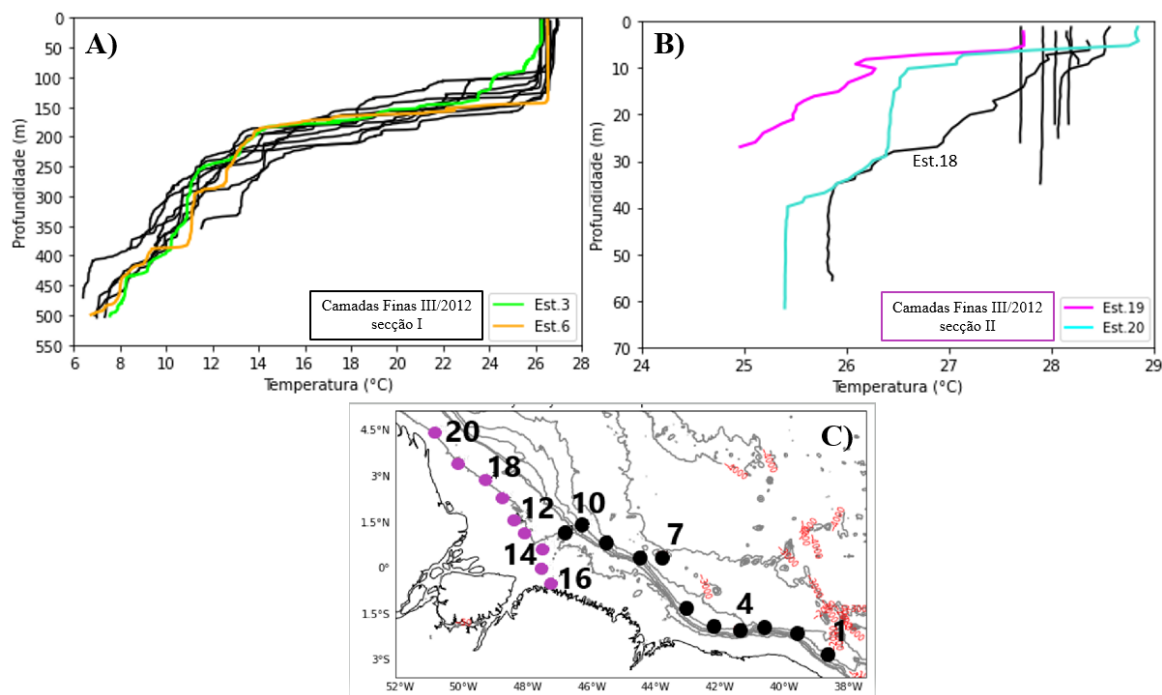


Figura 3.1 – Perfis de temperatura obtidos nas secções I (A) e II (B) da campanha Camadas Finas III/2012. A localização das duas secções está representada em C), com a secção I a preto e a secção II a lilás.

As estações da sec. II (Fig. 3.1B), localizam-se numa região próxima da desembocadura da confluência dos rios Amazonas e Pará. A profundidade amostrada das estações pertencentes a esta secção não ultrapassa 70 m. Observa-se nos perfis representados na Fig. 3.1B dois comportamentos diferentes da temperatura ao longo da coluna de água, que sugerem estar relacionados com a localização das respectivas estações.

Os perfis das estações Ests. 13 a 16 (Fig. 3.1B), localizados na foz dos rios Amazonas e Pará, mostram uma única camada onde os valores de temperatura se mantêm constantes ($\cong 28.0$ °C) desde a superfície até ao último nível amostrado (30 - 40 m).

As Ests. 18 a 20 (Fig. 3.1B), localizadas a noroeste da desembocadura dos rios Amazonas e Pará, mostram perfis onde se observam duas camadas com inclinações diferentes. Na camada superficial, até ≈ 9 m, as temperaturas mantêm-se constantes ($T > 27.5$ °C). Abaixo da camada superficial observa-se uma diminuição brusca da temperatura a cerca de 10 m, correspondente ao início da termoclina. Em maiores profundidades a termoclina adquire um comportamento em “degrau”.

Os perfis de salinidade das estações da campanha CFIII/2012, estão representados na Figs. 3.2 A (sec. I) e B (sec. II), e mostram duas secções com características muito diferentes.

Os perfis de salinidade da sec. I, mantêm valores sensivelmente constantes ($S \sim 36.3$) na camada superficial, até profundidades de 50 - 150 m (semelhante ao observado nos perfis de temperatura, Fig. 3.1A). Na Fig. 3.2A estão também identificados os perfis das estações 3 (a verde) e 6 (a laranja), por mostrarem respectivamente as menores e maiores espessuras da camada superficial.

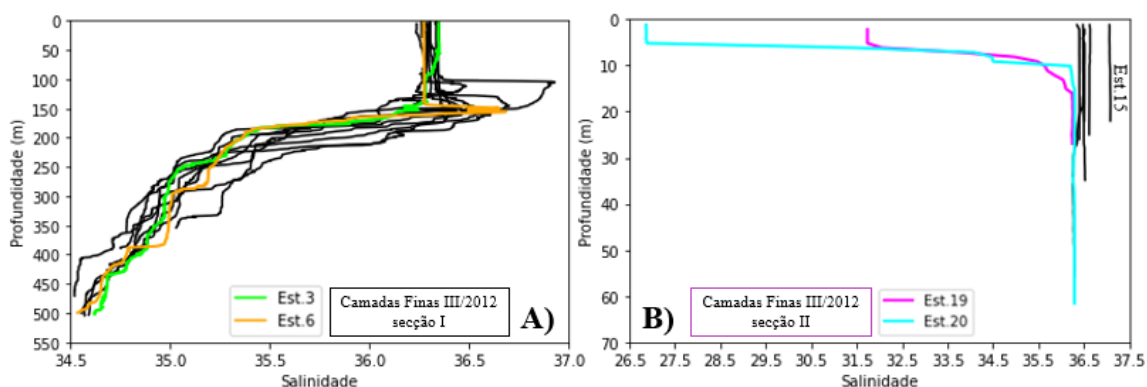


Figura 3.2 – Perfis de salinidade obtidos nas secções I (A) e II (B) da campanha Camadas Finas III/2012.

Na Fig. 3.2A observa-se, que em quase todos os perfis das estações da sec. I, ocorre um máximo subsuperficial, com $S \geq 36.5$ entre 100 e 170 m, que coincide com o início da termoclina (Fig. 3.1A). Este resultado está de acordo com um estudo de Silva *et al.* (2009) realizado na mesma região, onde os autores identificaram um máximo de salinidade ($S \geq 36.2$), a profundidades compreendidas entre 100 e 170 m. Outros autores como Silveira *et al.*, (1994) e Neto & Da Silva, (2014), identificaram nesta região a presença da Corrente Norte do Brasil, caracterizada por um máximo subsuperficial de salinidade, cujo “núcleo” se encontra a 100 - 150 m de profundidade.

Imediatamente abaixo os perfis das estações da sec. I (Fig. 3.2A) mostram um decréscimo da salinidade com duas inclinações diferentes: entre 150 - 250 m a salinidade diminui bruscamente, correspondendo ao início da haloclina, e entre 250 - 500, a haloclina adquire uma inclinação suave e a salinidade diminui gradualmente até ao último nível amostrado, onde $S \sim 34.5$.

Os perfis de salinidade das estações da sec. II, representados na Fig. 3.2B, mantêm valores praticamente homogêneos na maioria das estações. A Est. 15 está localizada na foz do Rio Amazonas e, apesar da sua localização, é a estação da sec. II onde se observa os maiores valores de salinidade, com $S \geq 37.0$. Destacam-se ainda na Fig. 3.2B, os perfis das Ests. 19 (a rosa) e 20 (a azul-claro), cujas salinidades são relativamente constantes até uma profundidade aproximada de 5 m, com $S < 32.5$, seguindo-se um aumento abrupto até ~ 10 m ($S > 36.5$). Os valores de salinidade e as duas diferentes inclinações nos perfis, sugerem a presença de dois tipos de águas presentes na camada superficial e subsuperficial, sendo estas, respectivamente, doce e oceânica. Estes resultados vão ao encontro de um estudo de Silva *et al.* (2009), realizado numa região próxima, onde os autores identificaram um máximo de temperatura (≥ 28.0 °C) e mínimos de salinidade nos primeiros 50 m da coluna de água. Silva *et al.* (2009) justificam os valores observados pela influência de plumas de água doce associadas às descargas do rio Amazonas.

Autores como Johns *et al.* (1990, 1998 e 2003), Fonseca *et al.* (2004) ou Talley *et al.* (2011), referem ainda que, durante a primavera e outono, águas superficiais com menores valores de salinidade são advetadas para este com a NBC, entre $\sim 5^\circ$ N e 10° N de latitude, alimentando a Contracorrente Equatorial do Norte, e incorporando em grandes anéis anticiclônicos.

Em profundidades superiores, observa-se nos perfis das estações 19 e 20 da sec. II (Fig. 3.2B), que a salinidade se torna novamente uniforme até aos últimos níveis amostrados.

Os perfis de densidade das estações da campanha CFIII/2012 e distribuídas pelas secções I e II, estão representados na Fig. 3.3A e B, respectivamente. Como seria de esperar verifica-se um aumento deste parâmetro com a profundidade. As duas secções são muito diferentes, tanto nos valores amostrados, como no comportamento ao longo da coluna de água.

Nos perfis da sec. I (Fig. 3.3A), a densidade tem uma pequena variação até cerca de 150 m com valores de 1024 kg/m^3 . Em profundidades superiores a 150 m, observa-se uma picnoclina com duas inclinações diferentes: $\sim 100 - 200$ m e $\sim 200 - 500$ m. Tal como se procedeu nos perfis de T (Fig. 3.1A) e de S (Fig. 3.2A), aqui também se destacam os perfis das Ests. 3 (a verde) e 6 (a laranja) na Fig. 3.3A, por mostrarem respectivamente as menores e maiores profundidades onde se observa o topo da picnoclina.

O conjunto de perfis de densidade da sec. II, está representado na Fig. 3.3B. A densidade mostra valores sensivelmente constantes na maioria das estações, de cerca de 1024 kg/m^3 . Identifica-se na Fig. 3.3B o perfil da Est. 16, com valores de densidade muito baixos à superfície. A profundidade amostrada é de apenas 9 m e os valores de densidade variam entre 1007 e 1012 kg/m^3 . Como a Est. 16 se localiza-se na foz da confluência dos rios Amazonas e Pará, esta deve ser a razão pela qual os valores são característicos de água doce.

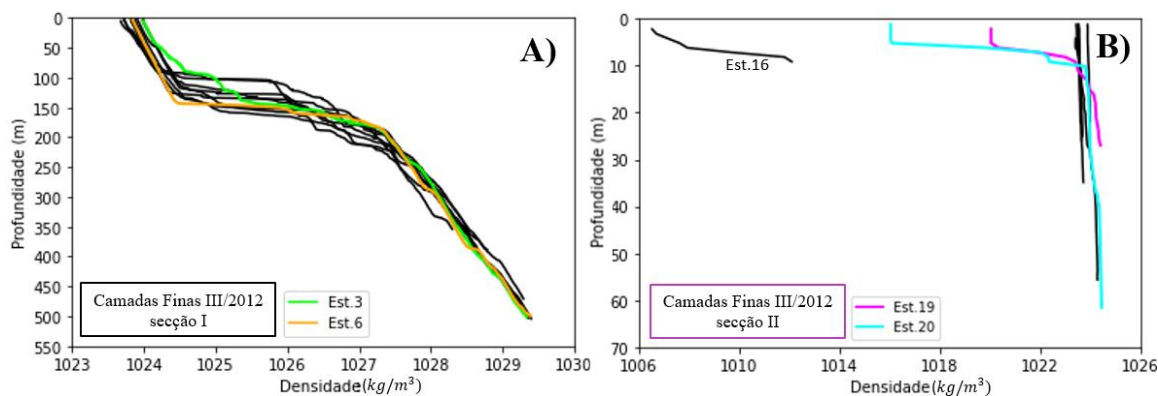


Figura 3.3 – Perfis de densidade das secções I (A) e II (B) da campanha Camadas Finas III/2012.

Na figura 3.3B destacam-se também, os perfis das Ests. 19 e 20, representados a rosa e azul-claro, respectivamente. A densidade é relativamente constante até aos 6 m, com valores de 1016 kg/m^3 na Est. 19 e 1020 kg/m^3 na Est. 20. Sob a camada superficial observa-se o maior gradiente vertical de densidade em ambas as estações, entre $\sim 7 - 16$ m. Para maiores profundidades verifica-se um aumento gradual até atingir o último nível amostrado, onde $\rho \approx 1024 \text{ kg/m}^3$. Os perfis de ρ das Ests. 19 e 20 (Fig. 3.3B), em conjunto com a informação para as mesmas estações nos perfis de T (Fig. 3.1B) e de S (Fig. 3.2B), indicam a presença de dois tipos de águas, doce e oceânica, presentes respectivamente na camada superficial e, na termoclina e haloclina. Silva *et al.* (2009), referem no seu estudo numa região a noroeste da plataforma

amazônica, que numa camada superficial a água oceânica que se encontra sob a influência da pluma do rio Amazonas, tende a afundar para baixo da pluma devido às diferenças termohalinas entre estas duas águas. As Ests. 19 e 20 da sec. II, mostram perfis de T, S e ρ , que parecem ir ao encontro dos resultados do estudo de Silva *et al.* (2009).

Diagrama T/S de dispersão

O diagrama T/S de dispersão da campanha Camadas Finas III/2012 (secções I e II), está representado na Fig. 3.4. Na mesma figura estão também representadas a cinzento, as duas massas de água identificadas por Silveira *et al.* (1994) numa localização próxima da área de estudo, a Água Tropical (do Inglês *Tropical Water*, TW) e a Água Central do Atlântico Sul (do Inglês *South Atlantic Central Water*, SACW).

Observa-se no diagrama T/S de dispersão (Fig. 3.4), um conjunto de pontos com temperaturas semelhantes ($T > 27.0\text{ }^{\circ}\text{C}$), mas diferenças acentuadas nos valores de salinidade relativamente às águas representadas a cinzento. Estes resultados indicam a presença de águas com diferentes características termohalinas na camada superficial: água doce, identificada em algumas estações da sec. II, com salinidades menores que 34.5, e água oceânica, identificada maioritariamente na sec. I. Alguns pontos das estações das secs. I e II, coincidem com a Água Tropical (TW) identificada por Silveira *et al.* (1994).

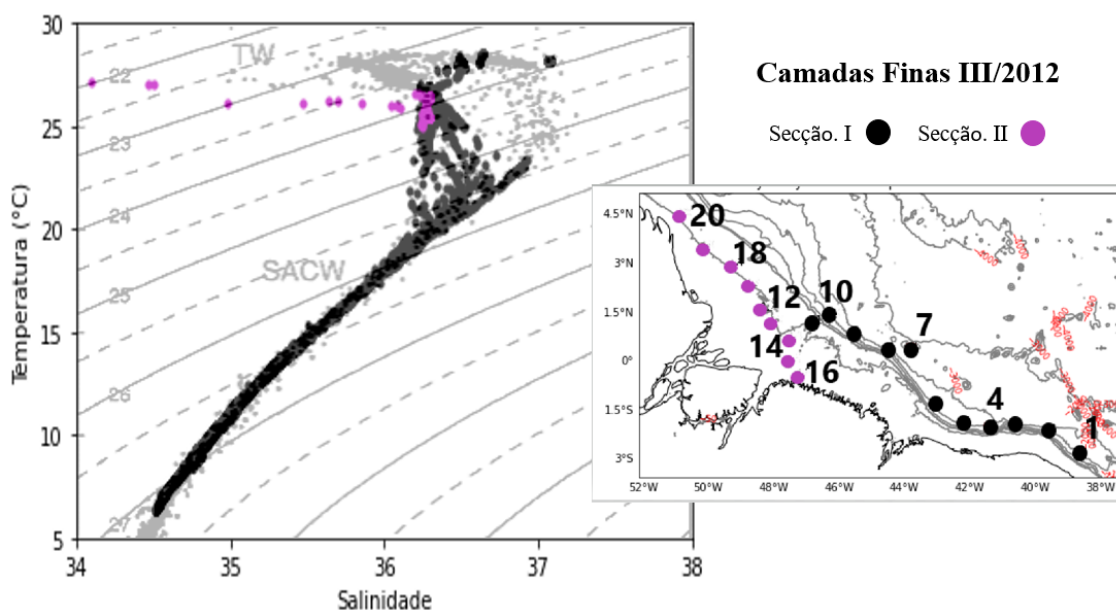


Figura 3.4 – Diagrama T/S de dispersão das secções I (Ests. 1 a 11) e II (Ests. 12 a 20) da campanha Camadas Finas III/2012, representadas respectivamente a preto e lilás. A Est. 16 (sec. II) não está representada pois os valores de salinidade são inferiores a 34. Com pontos cinzento estão identificadas a Água Tropical (do inglês *Tropical Water*, TW) e a Água Central do Atlântico Sul (do inglês *South Atlantic Central Water*, SACW), referidas em Silveira *et al.*, 1994.

Sob a camada superficial, observa-se uma nuvem de pontos pretos dispersos (sec. I), onde a temperatura diminui gradualmente entre ~ 25.0 e $20.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, e os valores de salinidade aumentam na maioria das estações até atingirem um máximo subsuperficial, com $S \geq 36.5$. Nestas

profundidades a Água Tropical (TW) e a Água Central do Atlântico Sul (SACW) definidas por Silveira *et al.* (1994), parecem coexistir entre a base da camada superior (com características térmicas constantes) e o topo da termoclina.

O máximo de salinidade identificado no diagrama T/S de dispersão nas estações da sec. I, vai ao encontro do artigo de Silveira *et al.* (1994), onde os autores identificaram valores muito altos de salinidade ($S > 37.0$) na base da camada superficial, especialmente nas estações localizadas perto da costa. A estas profundidades tudo parece indicar a presença da Corrente Norte do Brasil, que é uma corrente costeira caracterizada por ter o seu núcleo e máximos de salinidade a ~100 – 200 m de profundidade (Johns *et al.*, 1998; Silveira *et al.*, 1994 e Neto & Da Silva. 2014).

Em profundidades superiores, observa-se uma mudança significativa na forma do diagrama. Os pontos situam-se entre as temperaturas 22.0 e 6.0 °C e as salinidades 36.5 e 34.5, seguindo a Água Central do Atlântico Sul (SACW), definida por Silveira *et al.* (1994). Outros autores como Stramma & England. (1999) e Medeiros *et al.* (2009), explicam nos seus artigos que a SACW é transportada para a plataforma continental Brasileira pelos ramos sul e central da Corrente Equatorial do Sul, que no seu trajeto contacta a diferentes profundidades com o sistema de correntes NBC/NBUC.

3.1.2 Campanha PIRATA XVII/2017

Perfis de Temperatura, Salinidade e Densidade

Processaram-se 21 estações CTD realizadas durante a campanha PIRATA XVII/2017, distribuídas pelas secções I (Ests. 22 a 31) e II (Ests. 39 a 49), localizadas numa área enquadrada entre as latitudes 5° e 11° S e as longitudes 33° e 36° W. Para cada uma das estações, traçaram-se perfis de temperatura, salinidade e densidade.

A Fig. 3.5 mostra os perfis de temperatura obtidos nas secções I (Fig. 3.5A) e II (Fig. 3.5B), bem como a respetiva localização geográfica representada na Fig. 3.5C. Observa-se na Fig. 3.5A (sec. I) que a temperatura à superfície é praticamente igual em todas as estações, $T \approx 27.0$ °C. No entanto, nos perfis da sec. II (Fig. 3.5B), parece existir dois grupos de estações com diferentes temperaturas à superfície.

Os perfis da sec. I (Fig. 3.5A) mostram diferentes profundidades onde a temperatura se mantém constante, entre 50 e 130 m. Como exemplos das menores e maiores profundidades desta camada, destacam-se, respectivamente os perfis obtidos na Est. 24 (a vermelho na Fig. 3.5A), localizada próxima da costa, e na Est. 31 (a verde na Fig. 3.5A), localizada mais ao largo. Para profundidades superiores à camada superficial com temperatura constante, verifica-se um decréscimo de T com a profundidade, definindo o início da termoclina.

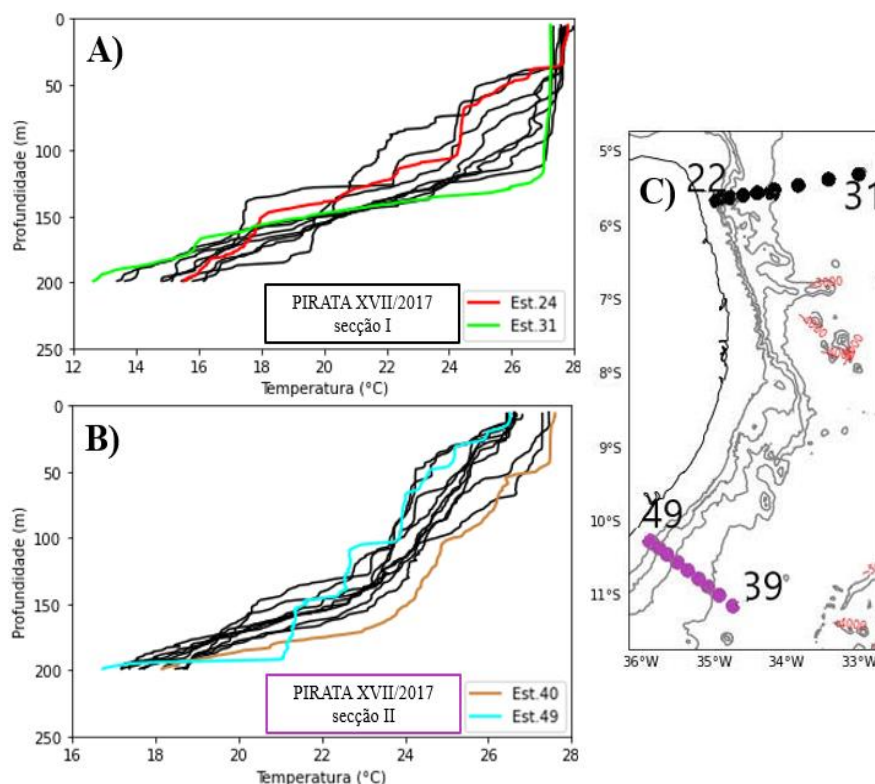


Figura 3.5 – Perfis de temperatura obtidos nas estações das secções I (A) e II (B) da campanha PIRATA XVII/2017. A localização das duas secções está representada em C): secção I a preto e secção II a lilás.

Os perfis de temperatura das estações da sec. II (Fig. 3.5B), mostram dois grupos com diferentes temperaturas à superfície. O grupo de estações localizado mais próximo da costa e $T \sim 26.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ e, como exemplo deste grupo o perfil da Est. 49 (a azul-claro na Fig. 3.5B), que mostra uma camada de apenas 5 m de espessura com temperatura constante; O perfil da Est. 40 (a castanho na Fig. 3.5B), é o exemplo do grupo das estações localizadas mais ao largo, onde a temperatura à superfície se mantêm constante ($T \cong 27.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) até maiores profundidades, aproximadamente 55 m.

Os resultados observados à superfície nos perfis das secs. I e II, vão ao encontro de um estudo de Araújo *et al.* (2011) numa região próxima. Os autores observaram que durante o inverno/primavera austral de 1995 (Agosto – Outubro), a camada superficial com temperatura constante foi pouco espessa, variando entre 70 a 80 m e atingindo 135 m localmente. Contudo, na campanha PIRATA XVII/2017, realizaram-se estações localizadas muito próximo da costa, o que pode também explicar a pequena espessura desta camada identificada em alguns dos perfis.

Abaixo da camada superficial com temperatura constante, os perfis das secs. I e II mostram um decréscimo da temperatura com a profundidade, correspondendo à termoclina. A sec. II mostra, no geral, maiores temperaturas comparativamente às da sec. I, cerca de $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ superior a 200 m de profundidade.

Os perfis de salinidade obtidos nas estações da campanha PIRATA XVII/2017 estão representados nas Figs. 3.6A (secção I) e B (secção II), onde se observam valores de salinidade semelhantes entre as duas secções, mas diferentes comportamentos à mesma profundidade.

Observa-se nos perfis da sec. I (Fig. 3.6A) que os valores de salinidade à superfície são ≈ 36.5 . Destacam-se na mesma secção os perfis das Ests. 24 (a vermelho) e 31 (a verde), por apresentarem a menor (50 m) e maior (145 m) profundidade até onde a salinidade se mantém relativamente constante.

Numa camada subsuperficial, entre 50 - 150 m, observa-se um máximo de salinidade ($S > 36.7$) nos perfis das estações da sec. I. Como exemplo, identifica-se na Fig. 3.6A o perfil da Est. 26, por apresentar valores de salinidade particularmente altos, $S > 37.0$, numa profundidade de 100 – 150 m.

Os valores de salinidade observados numa camada subsuperficial na sec. I (Fig. 3.6A), vão novamente ao encontro do estudo de Araújo *et al.* (2011), onde os autores identificaram um máximo de salinidade, $S \geq 36.5$, numa profundidade próxima de 120 m. Outros autores como Silveira *et al.* (1994), também identificaram na mesma região um máximo de salinidade subsuperficial, $S \sim 37.0$, a cerca de 150 m.

Em profundidades superiores a 150 m, os perfis de salinidade da sec. I (Fig. 3.6A), mostram um decréscimo ao longo da coluna de água, com $S \leq 35.7$ a cerca de 200 m.

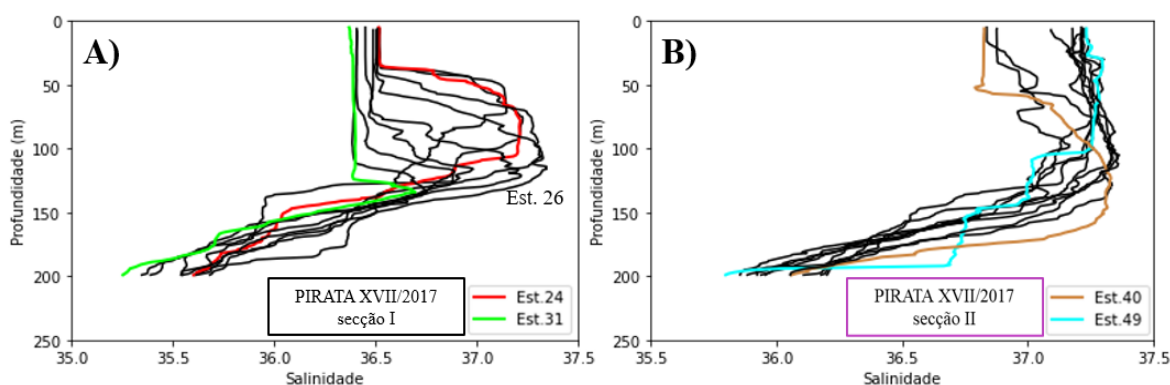


Figura 3.6 – Perfis de salinidade obtidos nas estações das secções I (A) e II (B) da campanha PIRATA XVII/2017.

Os perfis de salinidade das estações da sec. II (Fig. 3.6B), mostram uma camada superficial com dois agrupamentos de estações, que diferem tanto nos valores de salinidade à superfície, como no comportamento dos perfis ao longo da coluna de água. A Est. 40 (a castanho na Fig. 3.6B) é um exemplo do grupo de estações localizadas mais ao largo. O perfil mostra a maior espessura da camada superficial (~ 50 m) com valores de S constantes (~ 36.8). Por outro lado, o perfil da Est. 49 (a azul-claro na Fig. 3.6B) é um exemplo do grupo de estações, localizadas mais próximas da costa. Este perfil mostra uma camada superficial muito reduzida (≤ 5 m) com valores de salinidade relativamente constantes ($S \approx 37.3$).

Entre 50 e 150 m, os valores de salinidade nas estações da sec. II (Fig. 3.6B) mostram um aumento subsuperficial, $S \geq 37.0$, as estações localizadas perto da costa mostram aumento mais suave relativamente às estações localizadas mais ao largo, como exemplos na Fig. 3.6B as Ests. 49 e 40, respectivamente.

Em profundidades superiores a 150 m os perfis de S da sec. II agrupam-se adquirindo uma inclinação semelhante, onde a salinidade diminui com a profundidade até cerca de 200 m.

Quando comparada com a sec. II (Fig. 3.6B), a sec. I (Fig. 3.6A) apresenta de uma forma geral, valores de S ligeiramente menores, assim como maiores diferenças no comportamentos dos perfis ao longo da coluna de água. Contudo, tanto a sec. I como a sec. II, mostram valores elevados de salinidade numa camada subsuperficial, entre 100 - 150 m. Johns *et al.* (1998) justificam os máximos subsuperficiais de salinidade nesta região costeira, pela presença da Corrente Norte do Brasil, caracterizada por máximos de salinidade subsuperficial (Silveira *et al.*, 1994). Deste modo, os resultados observados nas secs. I e II (Figs. 3.6A e B), parecem indicar a presença da NBC a diferentes profundidades, onde o sinal parece ser mais evidente quanto mais perto da costa a estação se localizar.

Os perfis de densidade obtidos nas estações distribuídas pelas secções I e II estão representados nas Figs. 3.7A e B, respectivamente. Como seria de esperar, verifica-se nas duas secções que a densidade aumenta com o aumento da profundidade. Os perfis das estações da sec. I mostram diferentes comportamentos de ρ em diferentes profundidades. Já os perfis de ρ da sec. II, mostram, no geral, um comportamento semelhante.

Observa-se na Fig. 3.7A, representativa dos perfis da sec. I, alguma homogeneidade nos valores de densidade na superfície ($\approx 1024 \text{ kg/m}^3$). Segue-se um aumento abrupto de ρ na camada da picnoclina, que ocorre a diferentes profundidades consoante a estação analisada. Destacam-se na Fig. 3.7A, as estações 24 (a vermelho) e 31 (a verde), por apresentarem respectivamente as menores ($\sim 50 \text{ m}$) e as maiores ($\sim 140 \text{ m}$) profundidades do início da picnoclina. Em profundidades superiores a 150 m, a picnoclina adquire uma inclinação mais suave até 200 m. Mais uma vez, o comportamento dos perfis das estações da sec. I mostram alguma semelhança com os perfis de temperatura (Fig. 3.5A) e salinidade (Fig. 3.6B) analisados anteriormente.

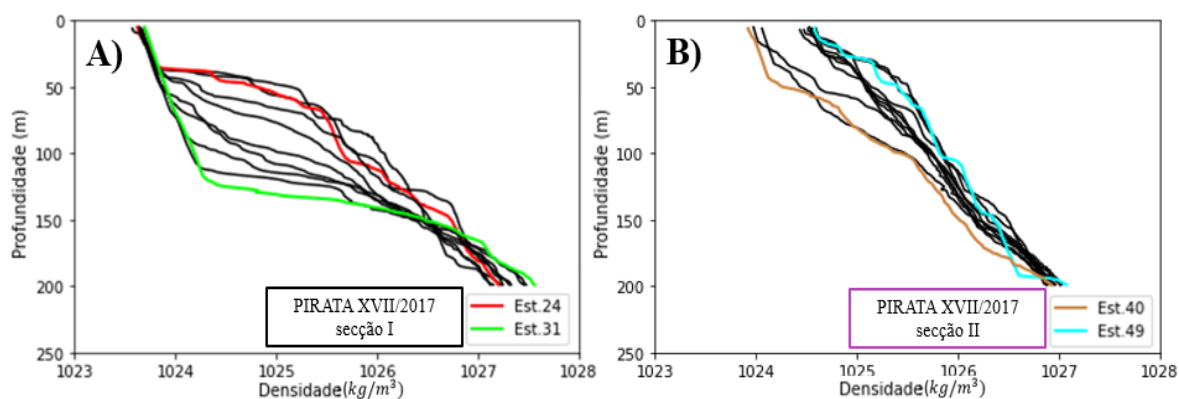


Figura 3.7 – Perfis de densidade das secções I (A) e II (B) da campanha PIRATA XVII/2017.

Os perfis de ρ da sec. II (Fig. 3.7B), mostram valores de densidade e inclinações semelhantes ao longo da coluna de água. Destaca-se o perfil da Est. 40, representado a castanho, por mostrar uma diminuição lenta nos valores de densidade ($\rho \approx 1024 \text{ kg/m}^3$) até uma maior profundidade, cerca de 55 m. Por outro lado, o perfil da Est. 49 representado a azul-claro (Fig. 3.7B), mostra um aumento praticamente linear da densidade desde os primeiros metros da coluna de água.

A comparação dos valores de densidade, das estações das seções I e II (Figs. 3.7A e B), com os valores de temperatura (Figs. 3.5A e B) e salinidade (Figs. 3.6A e B) correspondentes, indica que as estações da sec. II, apresentam maiores valores de ρ , T e S ao longo da coluna de água, quando comparados com os valores dos mesmos parâmetros nas estações da sec. I.

Diagrama T/S de dispersão

O diagrama T/S de dispersão das 21 estações CTD da campanha PIRATA XVII/2017, está representado na Fig. 3.8, onde se distinguem dois diagramas, um a preto (secção I) e outro a lilás (secção II). A Água do Atlântico Sul (do Inglês *South Atlantic Water*, SAW), a Água Tropical do Atlântico Oriental (do Inglês *Eastern Tropical Atlantic Water*, EAW) e a Água do Atlântico Norte (do Inglês *North Atlantic Water*, NAW), definidas por Araújo *et al.* (2011) estão representadas a cinzento, para uma região próxima da área do presente estudo.

A Fig. 3.8 mostra que na camada superficial, as estações da sec. I (a preto) e da sec. II (a lilás), têm valores de temperatura muito semelhantes, mas as salinidade da sec. II são relativamente mais elevadas, cerca de 1 ou 1,5 unidades.

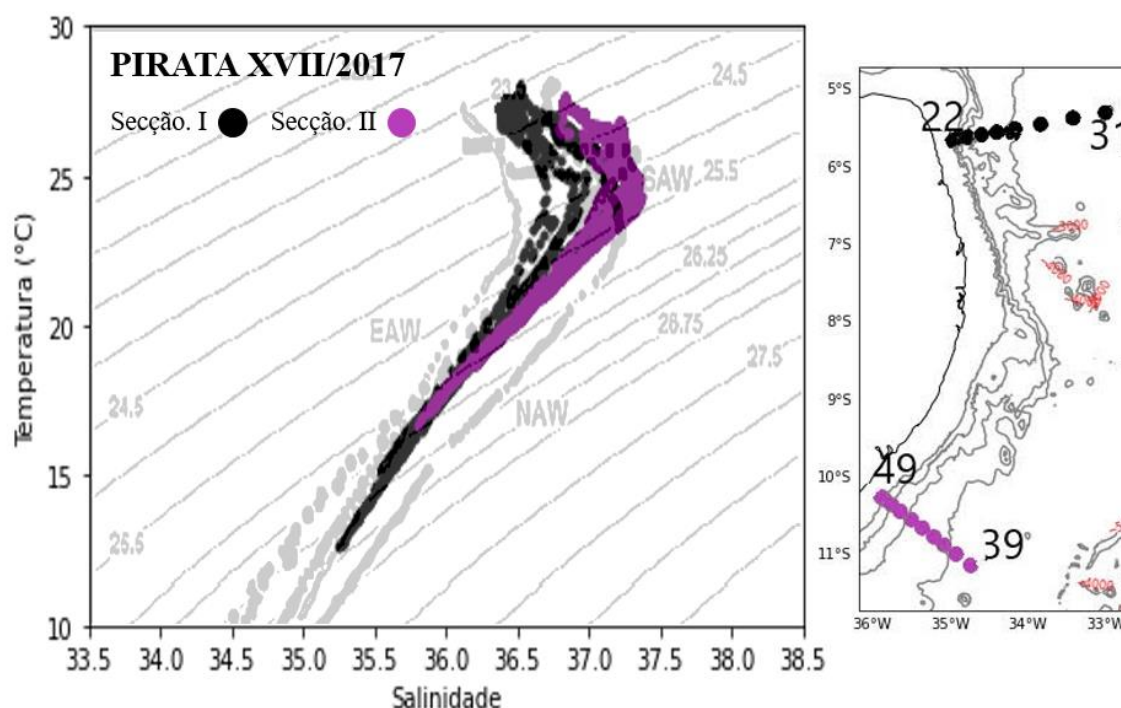


Figura 3.8 - Diagrama T/S de dispersão das estações das Secções I (22 a 31) e II (39 a 49) da campanha PIRATA XVII/2017, representadas a preto e lilás, respectivamente. A Água do Atlântico Sul (do Inglês *South Atlantic Water*, SAW), Água Tropical do Atlântico Oriental (do Inglês *Eastern Tropical Atlantic Water*, EAW) e a Água do Atlântico Norte (do Inglês *North Atlantic Water*, NAW), definidas por Araújo *et al.* (2011) estão representadas por pontos a cinzento.

Observa-se um aumento subsuperficial nos valores de salinidade nas estações das secs. I e II. Os valores superficiais e subsuperficiais, identificados nas secs. I e II, assemelham-se à Água do Atlântico Sul (SAW), definida por Araújo *et al.* (2011). Segundo estes autores, a SAW é

transportada para esta região através de processos de subdução do ramo sul da Corrente Equatorial do Sul (sSEC). Araújo *et al.*, (2011) explicam ainda que os valores elevados de salinidade na camada subsuperficial, observados numa região próxima da área estudo, são causados por uma intensificação dos ventos alísios de sudeste e a evaporação excede a precipitação na zona do equador, devido à presença da Zona de Convergência Intertropical (ITCZ) na faixa equatorial. O sistema de correntes do equador, especialmente os ramos central e sul (cSEC e sSEC), transportam estas águas de origem tropical para a costa do Brasil, contribuindo para a Corrente Norte do Brasil no seu percurso para norte (Lumpkin & Garzoli, 2005; Vallès-Casanova *et al.*, 2022). Outros autores, como Rodrigues *et al.* (2007), explicam ainda no seu artigo que no inverno (altura do ano em que a campanha PIRATA XVII/2017 foi realizada), a observação de valores máximos de salinidade na camada subsuperficial, se deve à intensificação da Subcorrente Norte do Brasil (NBUC), que transporta a SAW para o equador (Vallès-Casanova *et al.*, 2022).

Para maiores profundidades, os diagramas das estações das duas secções apresentam valores de temperatura e salinidade muito semelhantes, variando entre ~ 23.0 e 13.0 °C e entre ~ 37.5 e 35.3 , respectivamente. Nesta camada os valores de T e S seguem a Água do Atlântico Sul (SAW), definida por Araújo *et al.* (2011).

3.1.3 Campanha PIRATA XVIII/2018

Perfis de Temperatura, Salinidade e Densidade

Processaram-se 29 estações CTD realizadas durante a campanha PIRATA XVIII/2018, distribuídas pelas secções I (Ests. 34 a 40), II (Ests. 9 a 22) e III (Ests. 23 a 33), localizadas numa região compreendida entre as latitudes 5° e 11° S e as longitudes 33° e 36° W. Para todas as estações das secs. I, II e III, traçaram-se perfis de temperatura, salinidade e densidade.

Nas Figs. 3.9A, B e C estão representados os perfis de temperatura de todas as estações das secs. I, II e III. Observam-se semelhanças entre os perfis das secs. I e III, tanto na temperatura amostrada, como no comportamento da temperatura ao longo da coluna de água. Os perfis de T da sec. II, mostram diferentes comportamentos que parecem variar dependendo da estação observada e da distância a que esta se encontra da costa.

Os perfis de temperatura das estações das secs. I e III (Figs. 3.9A e C), mostram duas inclinações bem definidas. A camada superficial, com temperaturas relativamente constantes ($T \approx 26.0$ °C), estende-se até cerca de 45 - 125 m. Identificam-se os perfis das Ests. 34 a amarelo na Fig. 3.9A (sec. I) e o perfil da Est. 31 (sec. III) a laranja na Fig. 3.9C, por mostrarem a maior espessura desta camada superficial. Por outro lado, os perfis das Ests. 24 e 39, representados respectivamente a azul-escuro e azul-claro nas Figs. 3.9A (sec. I) e C (sec. III), mostram as menores profundidades desta camada superficial com temperaturas uniformes.

Sob a camada superficial, observa-se nos perfis das estações das secs. I e III (Figs. 3.9A e C), uma camada onde a temperatura diminui cerca de 14 °C até 200 m. Esta camada corresponde ao início da termoclina e está de acordo com um estudo de Medeiros *et al.* (2009), realizado numa região próxima, onde os autores identificaram a maior variação de temperatura, correspondente ao início da termoclina a cerca de 100 m, com uma amplitude de ~ 12 °C.

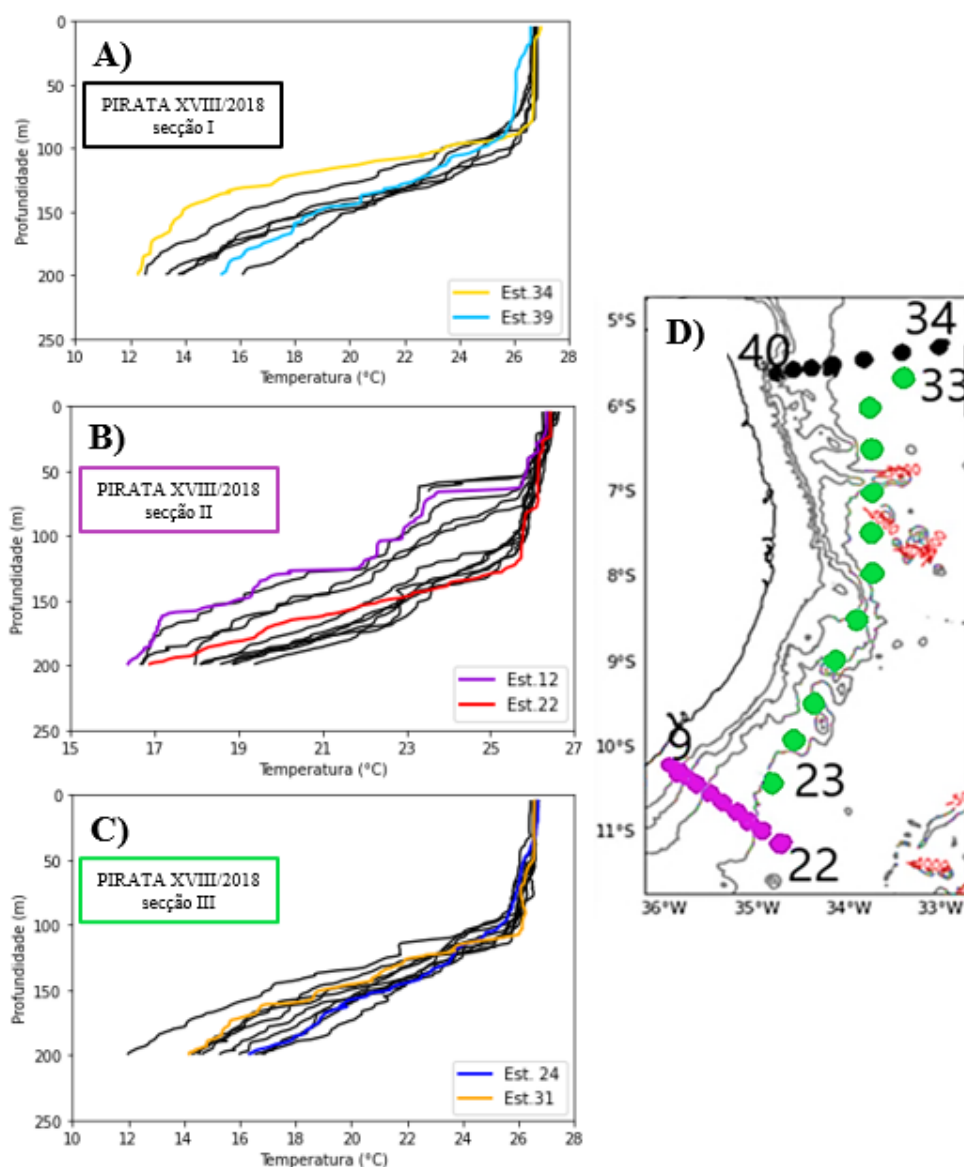


Figura 3.9 - Perfis de temperatura das secções I (A), II (B) e III (C) da campanha PIRATA XVIII/2018. A localização das secções está representada em D) com a secção I a preto, a secção II a lilás e a secção III a verde.

Os perfis de temperatura das estações da sec. II (Fig. 3.9B) mostram uma camada superficial, com temperatura constante ($T \approx 26.0^\circ\text{C}$) e uma espessura inferior a 90 m de profundidade. Abaixo da camada superficial, observa-se uma diminuição rápida da temperatura correspondente à termoclina, que ocorre a diferentes profundidades dependendo da estação observada. É possível distinguir dois grupos diferentes de estações, a Est. 12 (a lilás na Fig. 3.9B), exemplo do grupo de estações localizadas mais perto da costa, com o início da termoclina a cerca de 65 m de profundidade, e um comportamento em “degraus” até 200 m. Por outro lado, o perfil da Est. 22 (a vermelho na Fig. 3.9B) é um exemplo do grupo de estações localizadas ao largo, com uma termoclina com duas inclinações bem definidas: até cerca de 150 m a temperatura mostra uma pequena variação, mas em profundidades superiores os valores de temperatura variam bruscamente até 200 m.

As campanhas PIRATA XVII/2017 (Fig. 3.5C) e PIRATA XVIII/2018 (Fig. 3.9C) tiveram lugar numa região muito semelhante, em particular as secções I e II. No entanto, os perfis das estações pertencentes a estas secções mostram ser bastante diferentes, tanto na temperatura amostrada, que parece ser mais elevada nos perfis da campanha PIRATA XVIII/2018, como no comportamento dos perfis ao longo da coluna de água. Contudo, observa-se em ambas as campanhas que a profundidade da camada superficial, com temperatura constante, tende a aumentar quanto mais a oeste (ou ao largo) a estação se localizar. Esta observação vai ao encontro do estudo de Medeiros *et al.* (2009).

Os perfis de salinidade das estações das secs. I, II e III, estão representados nas Figs. 3.10A, B e C. Observaram-se valores elevados de salinidade em todas as estações das três secções, especialmente nas camadas superficial e subsuperficial. Uma das causas destes valores pode estar relacionada com a altura do ano em que a campanha PIRATA XVIII/2018 foi realizada, entre setembro e outubro, coincidindo com a estação seca do litoral nordeste Brasileiro, que ocorre de junho a novembro (Medeiros *et al.*, 2009). Nesta estação do ano, os níveis de evaporação excedem os níveis de precipitação, resultando em maiores concentrações de salinidade nas camadas superiores da coluna de água.

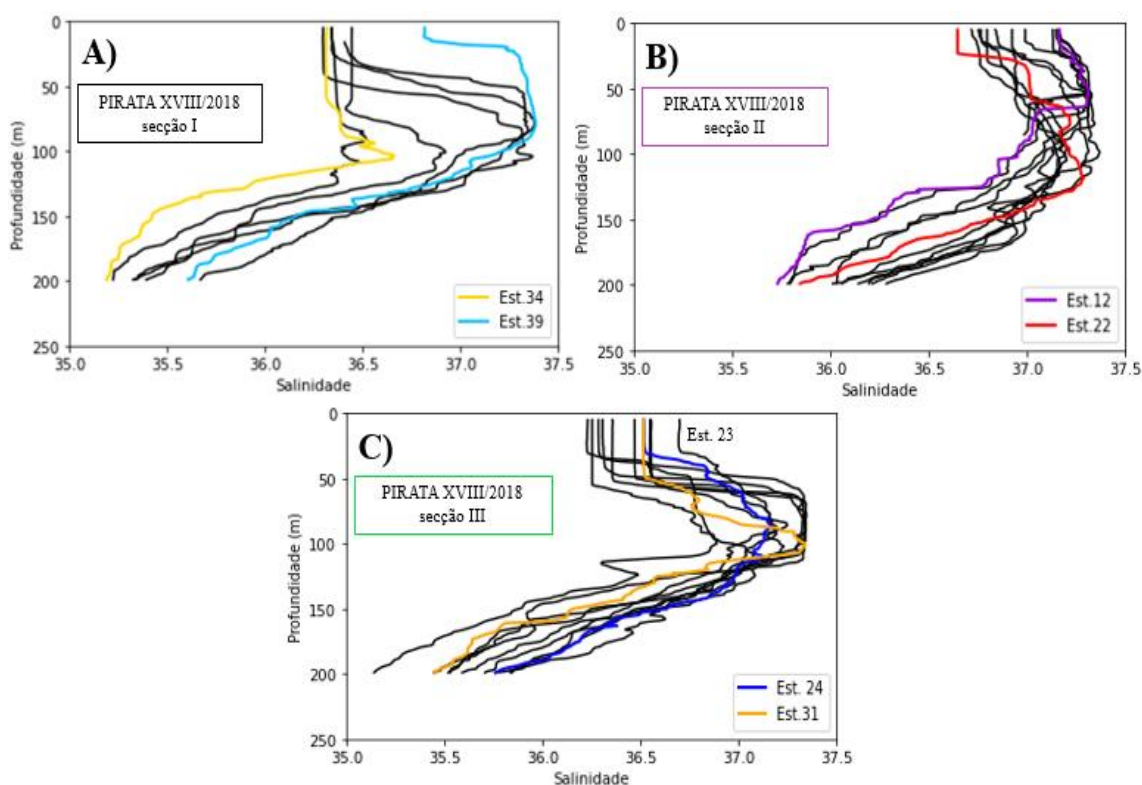


Figura 3.10 - Perfis de salinidade das secções I (A), II (B) e III (C) da campanha PIRATA XVIII/2018.

Os perfis de salinidade das estações da sec. I (Fig. 3.10A), mostram que a profundidade da camada superficial com valores relativamente constantes de salinidade ($S > 36.0$), varia conforme a estação observada. Destacam-se na Fig. 3.10A, o perfil da Est. 34 (a amarelo), por mostrar a maior espessura desta camada superficial, cerca de 65 m. Por outro lado, é também exemplo o perfil da Est. 39 (a azul-claro), por mostrar a uma profundidade < 20 m. A Est. 39, localizada

próxima da costa, é particularmente interessante pois mostra ser a estação com maiores valores de salinidade de toda a sec. I.

Sob a camada superficial, os perfis da sec. I (Fig. 3.10A), mostram um aumento de salinidade subsuperficial em todas as estações ($S > 36.7$). Note-se que à semelhança do que acontece na sec. I da campanha PIRATA XVII/2017 (ver Fig. 3.6A), o máximo de salinidade ocorre maioritariamente entre 50 - 150 m. Contudo, os valores mais elevados de salinidade ocorrem a diferentes profundidades conforme a estação observada. Tudo parece indicar, que a diferença entre estações, poderá estar relacionada com a presença da Corrente Norte do Brasil a diferentes profundidades. As menores profundidades onde o máximo de S ocorre, e as maiores salinidades registadas ao longo da coluna de água, pertencem ainda às estações localizadas perto da costa. Estes resultados vão ao encontro de um estudo de Medeiros *et al.*, (2009) realizado numa região próxima da área de estudo, onde os autores observaram este mesmo padrão.

Em profundidades superiores a 150 m, os perfis de salinidade da sec. I (Fig. 3.10A), mostram o início da haloclina que se prolonga pelo menos até 200 m, onde $S \leq 35.7$.

A sec. II é a secção localizada mais a sul de toda a campanha PIRATA XVIII/2018. A Fig. 3.10B é representativa dos perfis de salinidade desta secção e mostra que, de forma geral, se observam valores relativamente mais elevados de salinidade quando comparando com as secs. I e III (Figs. 3.10 A e C).

Observa-se na Fig. 3.10B uma camada superficial pouco espessa (< 30 m), onde os valores de salinidade são constantes ($S > 36.5$). Destaca-se a Est. 12 (a roxo), localizada perto da costa, por mostrar a menor profundidade desta camada superficial (< 10 m). Por outro lado, o perfil da Est. 22 (a vermelho na Fig. 3.10B), mostra a maior espessura desta camada superficial, cerca de 30 m. Esta estação localiza-se ao largo e mostra também menores valores de salinidade à superfície, $S \sim 36.5$, quando comparada com as restantes estações da sec. II.

Sob a camada superficial, os perfis das estações da sec. II (Fig. 3.10B), mostram um máximo da salinidade, $S \sim 37.3$, que ocorre a diferentes profundidades dependendo da estação observada, mas variando entre $\sim 50 - 155$ m. A sec. II localiza-se entre $10^\circ - 11^\circ$ S, latitude onde autores como Lumpkin & Garzoli. (2005), referem no seu estudo ser a latitude aproximada onde a Corrente Norte do Brasil, no seu percurso para norte ao longo da costa, contacta com o ramo sul da Corrente Equatorial do Sul (sSEC). Outros autores como Araujo *et al.* (2011) ou Vallès-Casanova *et al.* (2022), referem que a sSEC no seu percurso para noroeste, transporta águas do Atlântico Sul caracterizadas por valores elevados de salinidade numa camada subsuperficial. Esta conclusão, pode ser uma justificação para os valores relativamente altos subsuperficiais de salinidade observados na sec. II da campanha PIRATA XVIII/2018.

Na sec. II (Fig. 3.10B), observa-se que os perfis das estações localizadas mais perto da costa (por ex., a Est. 12 a roxo), mostram que o aumento de salinidade subsuperficial ocorre a partir de menores profundidades quando comparadas com as estações localizadas mais ao largo. Os valores observados nesta camada subsuperficial, vão ao encontro dos valores observados na sec. II da campanha PIRATA XVII/2017 (ver Fig. 3.6B). Em profundidades superiores, os valores de salinidade observados na sec. II (Fig. 3.10B) diminuem até 200 m, onde $S \leq 36.3$.

Os perfis das estações da sec. III (Fig. 3.10C), mostram uma camada superficial com uma espessura de aproximadamente 40 m, onde a salinidade se mantém relativamente constante.

Contudo, nesta camada superficial, os valores de salinidade são relativamente mais elevados (cerca de 1,5), quanto mais a sul a estação se localizar. Como exemplo, a Est. 23 (Fig. 3.10C) localizada na posição mais a sul da sec. III, mostra as maiores salinidades superficiais ($S \approx 37.0$). O aumento da salinidade com a latitude numa região próxima, foi também mencionado num estudo de Medeiros *et al.*, (2009). No entanto são exceções as Ests. 24 e 31, representadas respectivamente a azul-escuro e laranja na Fig. 3.10C, por mostrarem valores semelhantes de salinidade à superfície, apesar da sua distância geográfica.

Numa camada subsuperficial, compreendida entre $\sim 50 - 140$ m, observa-se um aumento na salinidade em todos os perfis das estações da sec. III (Fig. 3.10C), com $S > 36.5$. Medeiros *et al.*, (2009), referem que o máximo de salinidade numa região próxima, foi observado entre 50 e 150 m. Aqueles autores, explicam ainda que um dos motivos para a existência desta camada, com máximos de salinidade subsuperficial, é a subdução de águas salinas devido a fortes níveis de evaporação à superfície, especialmente observados no inverno (austral).

Para profundidades superiores, os perfis da sec. III (Fig. 3.10C), mostram uma diminuição dos valores de salinidade e uma haloclina que se estende até 200 m, onde $S \leq 35.8$.

Os perfis de densidade das estações das secções I, II e III estão representadas nas Figs. 3.11A, B e C. Os três conjuntos de perfis mostram um comportamento semelhante da densidade ao longo da coluna de água, com valores compreendidos entre 1024 e 1027 kg/m^3 .

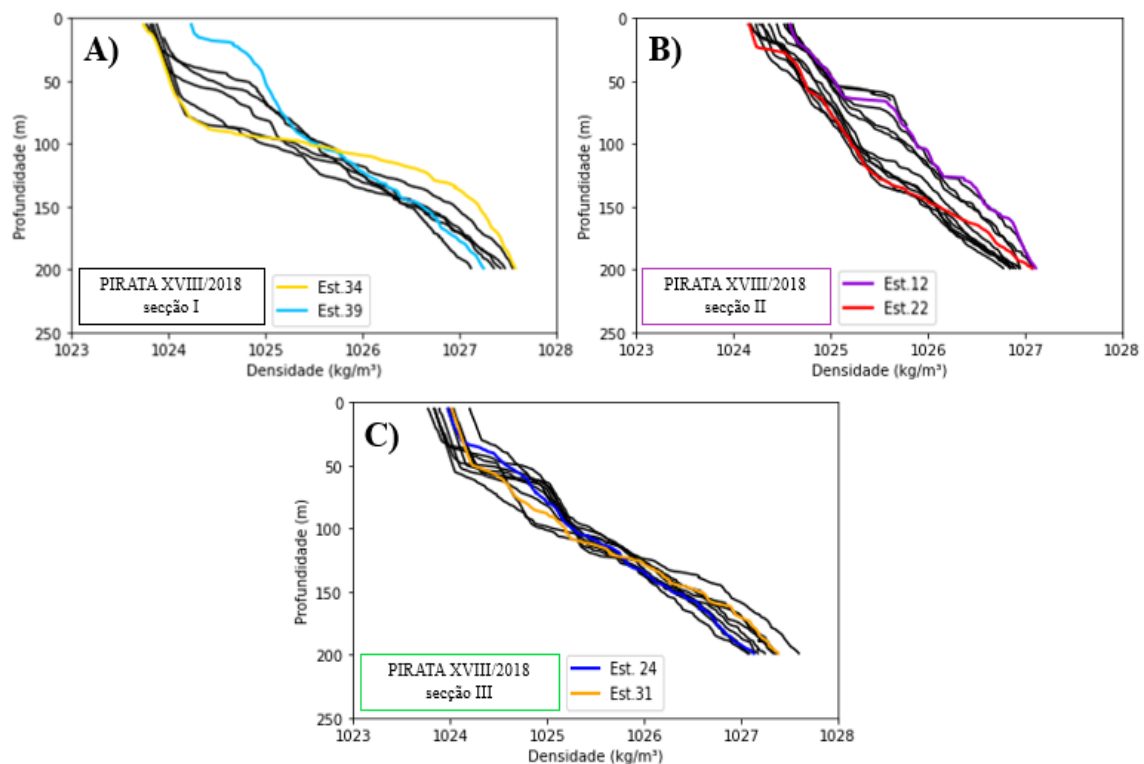


Figura 3.11 - Perfis de densidade das secções I (A), II (B) e III (C), da campanha PIRATA XVIII/2018.

Na Fig. 3.11A (sec. I), observa-se uma camada superficial onde os valores diminuem lentamente com a profundidade. Esta camada tem diferentes espessuras dependendo dos perfis observados. O perfil da Est. 34 (a amarelo na Fig. 3.11A), é um exemplo de uma camada

superficial com aproximadamente 100 m. Já o perfil da Est. 39 (a azul-claro na Fig. 3.11A), mostra uma espessura < 20 m. Mais uma vez, observa-se que os perfis das estações localizadas ao largo apresentam uma maior espessura da camada superficial, comparando com estações localizadas perto da costa.

Sob a camada superficial, os perfis das estações da sec. I (Fig. 3.11A) mostram uma maior inclinação causada por um maior aumento da densidade até 200 m, onde $\rho \geq 1027 \text{ kg/m}^3$. Contudo, a Est. 34 (a amarelo na Fig. 3.11A), mostra uma picnoclina com duas inclinações diferentes, a 100 - 150 m, onde ocorre um rápido aumento da densidade; e até 200 m, onde a inclinação do perfil de torna mais suave e a densidade aumenta mais lentamente.

Os perfis de densidade da sec. I das campanhas PIRATA XVII/2017 (ver Fig. 3.7A) e PIARATA XVIII/2018 (Fig. 3.11A), mostram valores semelhantes, mas comportamentos diferentes ao longo da coluna de água.

Os perfis de densidade das estações da sec. II, estão representados na Fig. 3.11B. Observa-se alguma uniformidade entre os perfis das várias estações, tanto no comportamento ao longo da coluna de água como nos próprios valores de densidade. Dois exemplos são os perfis das estações 12 e 22, representados respectivamente a roxo e vermelho na Fig. 3.11B, que apesar da sua distância apresentam pequenas diferenças nos valores de densidade. No entanto, no perfil da estação 12, nota-se uma forma em “graus”, especialmente visível a cerca de 65 m, enquanto o perfil da estação 22 mostra um maior aumento a partir de ~ 25 m, seguido de um aumento gradual com uma inclinação suave, até 200 m.

Os perfis de densidade das secs. II das campanhas PIRATA XVII/2017 (ver Fig. 3.7B) e PIRATA XVIII/2018 (Fig. 3.11B), mostram valores de densidade muito parecidos. Contudo, os perfis das estações da campanha PIRATA XVII/2017, mostram dois grupos distintos de estações à superfície que se agrupam em profundidade. Os perfis das estações da sec. II, da campanha PIRATA XVIII/2018, não mostram diferenças significativas entre si.

As estações da sec. III localizam-se totalmente ao largo ao longo da costa do Brasil. Os perfis de densidade destas estações, estão representados na Fig. 3.11C, e mostram valores e inclinações muito semelhantes ao longo da coluna de água. O maior aumento de densidade verifica-se a cerca de 50 m, na maioria das estações. Destacam-se na Fig. 3.11C as estações 24 (a azul- escuro) e 31 (a laranja), como exemplos de perfis muito semelhantes, apesar da distância geográfica que os separa.

Diagrama T/S de dispersão

O diagrama T/S de dispersão das 29 estações CTD da campanha PIRATA XVIII/2018, está representado na Fig. 3.12, onde se distinguem três diagramas, um a preto (sec. I), um a lilás (sec. II) e outro a verde (sec. III). A Água do Atlântico Sul (do Inglês *South Atlantic Water*, SAW), a Água Tropical do Atlântico Oriental (do Inglês *Eastern Tropical Atlantic Water*, EAW) e a Água do Atlântico Norte (do Inglês *North Atlantic Water*, NAW), definidas por Araújo *et al.* (2011) estão representadas a cinzento para uma região próxima da área do presente estudo.

No diagrama T/S de dispersão (Fig. 3.12), observa-se que de uma forma geral as estações das secções I, II e III, apresentam inclinações e valores muito parecidos ao longo de toda a coluna de água.

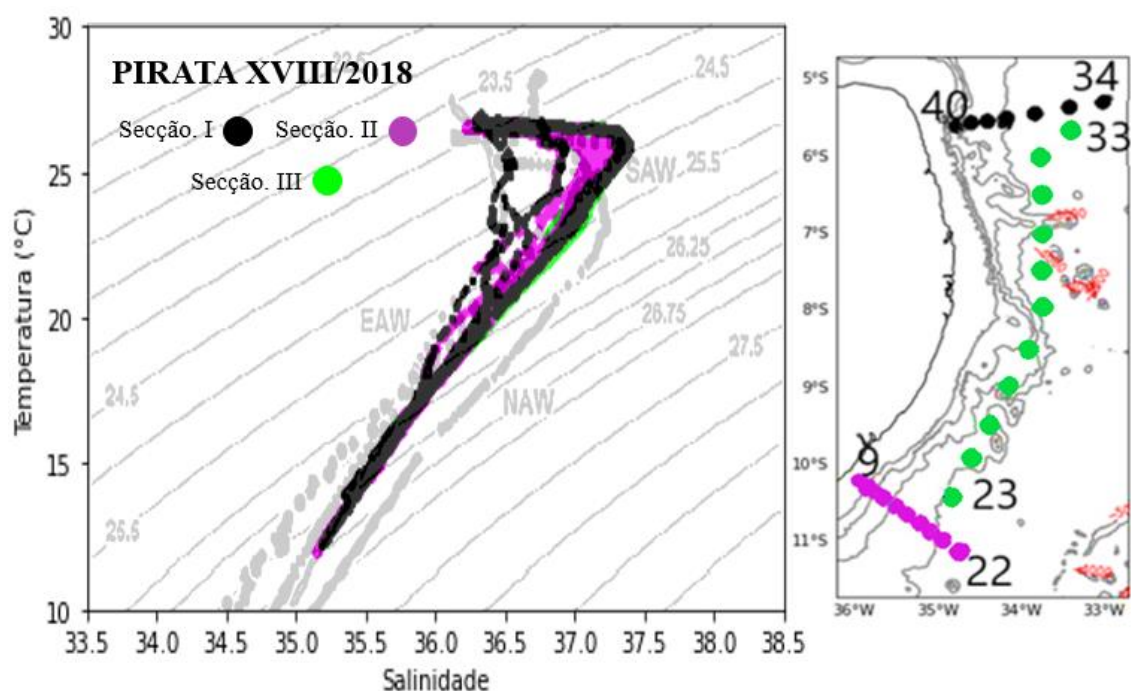


Figura 3.12 - Diagrama T/S de dispersão das estações das Secções I (34 a 40), II (9 a 22) e III (23 a 33) da campanha PIRATA XVIII/2018, representadas a preto, lilás e verde, respectivamente. A Água do Atlântico Sul (do Inglês *South Atlantic Water*, SAW), a Água Tropical do Atlântico Oriental (do Inglês *Eastern Tropical Atlantic*, EAW) e a Água do Atlântico Norte (do Inglês *North Atlantic Water*, NAW), definidas em Araújo *et al.* (2011), estão representadas por pontos a cinzento.

A camada superficial as estações das secs. I, II e III (Fig. 3.12), apresentam uma temperatura semelhante de cerca de 26.0 °C. Porém, apresentam salinidades com valores compreendidos entre 36.0 e 37.5. As diferenças de salinidade nesta camada parecem estar relacionadas com a distância à costa (secs. I e II) e com a latitude (sec. III). Ou seja, as estações localizadas mais próximas da costa, mostram maiores valores de salinidade, assim como as estações localizadas mais a sul, conforme previamente discutido para os perfis de temperatura e salinidade.

Sob a camada superficial (Fig. 3.12), observa-se uma inclinação bem definida nos pontos representativos das secções I, II e III, com temperaturas e salinidades a diminuir com a profundidade. Os pontos seguem novamente uma inclinação semelhante à curva representativa da Água do Atlântico Sul, definida por Araújo *et al.* (2011). Segundo Vallès-Casanova *et al.* (2022), a Água do Atlântico Sul, é transportada para esta região através do ramo sul da Corrente Equatorial do Sul (sSEC). Ao alcançar a costa brasileira (10° - 15° S) a sSEC bifurca-se: parte da corrente dirige-se para norte, fortalecendo o sistema de correntes NBC/NBUC, e a outra parte dirige-se para sul, fortalecendo a Corrente do Brasil (Talley *et al.*, 2011; Bourlès *et al.*, 1999b; Silveira *et al.*, 1994).

3.2 Determinação da profundidade da camada de mistura

Na camada superficial da coluna de água, que está em contacto direto com a atmosfera, localiza-se a camada de mistura (CM), que tal como referido anteriormente, é caracterizada por apresentar temperaturas, salinidades e densidades constantes ou praticamente constantes, tendo uma espessura dependente das condições circundantes (Kantha & Clayson, 2003). Neste trabalho,

a CM foi calculada utilizando o método *Threshold*, aplicado aos perfis de T e ρ , das campanhas Camadas Finas III/2012, PIRATA XVII/2017 e PIRATA XVIII/2018. Este método consiste na determinação da profundidade para a qual a variação da temperatura tem um valor de $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ relativamente ao valor à superfície (Z_0) e, no caso da densidade o valor é de $+0.03\text{ kg/m}^3$ relativamente ao valor à superfície.

$$CM = \Delta T(Z_0) = -0.3\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ ou } -0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta \rho(Z_0) = +0.03\text{ kg/m}^3$$

3.2.1 Campanha Camadas Finas III

Profundidade da camada de mistura calculada a partir dos perfis de temperatura

Aplicou-se o método *Threshold* na temperatura ($\Delta T(Z_0) = -0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) das 20 estações das secções I (Ests. 1 a 11) e II (Ests.12 a 20). A profundidade da camada de mistura (CM) está representada nas Figs. 3.13 (sec. I) e 3.14 (sec. II), onde o critério de $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ está identificado a verde e o critério de $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ está identificado a vermelho. A Fig. 3.15 representa a variação da profundidade da CM ao longo das secs. I e II, onde, de um modo geral, pode observar-se que os dois critérios resultam em profundidades semelhantes.

Na Fig. 3.13, representativa da CM calculada para as estações da sec. I, observa-se que a menor espessura é de $\sim 61\text{ m}$ (Est. 3), e a maior é de cerca de 145 m (Est. 6). A Est. 6, localiza-se a 3° S , 43° W , próximo da foz do Rio Mearim e é neste local onde Lumpkin & Garzoli. (2005) referem que o ramo central da Corrente Equatorial do Sul (cSEC), na sua trajetória para oeste alcança a costa do Brasil, e contacta com a NBC. Tudo parece indicar que a espessura da CM observada no perfil da Est.6, está relacionada com a grande mistura de água doce transportada pelo Rio Mearim e pela presença da cSEC identificada por alguns autores nesta região.

Os dois critérios de T aqui utilizados $\Delta T = -0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $\Delta T = -0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ resultam em profundidades semelhantes na maioria das estações da sec. I. Tal como mostram as Figs. 3.13 e 3.15, as Ests. 7 e 9, apresentam as maiores diferenças entre os dois critérios, cerca de 21 m . A Est. 11 foi a única estação da sec. I onde nenhum dos critérios do método *Threshold* foi aplicado, indicando que a camada de mistura ocupa toda a coluna de água amostrada.

A espessura da camada de mistura observada na sec. I vai ao encontro de um estudo de Varona *et al.* (2019) realizado numa região próxima, onde os autores observaram que a profundidade da CM oscilava entre 100 m e 120 m .

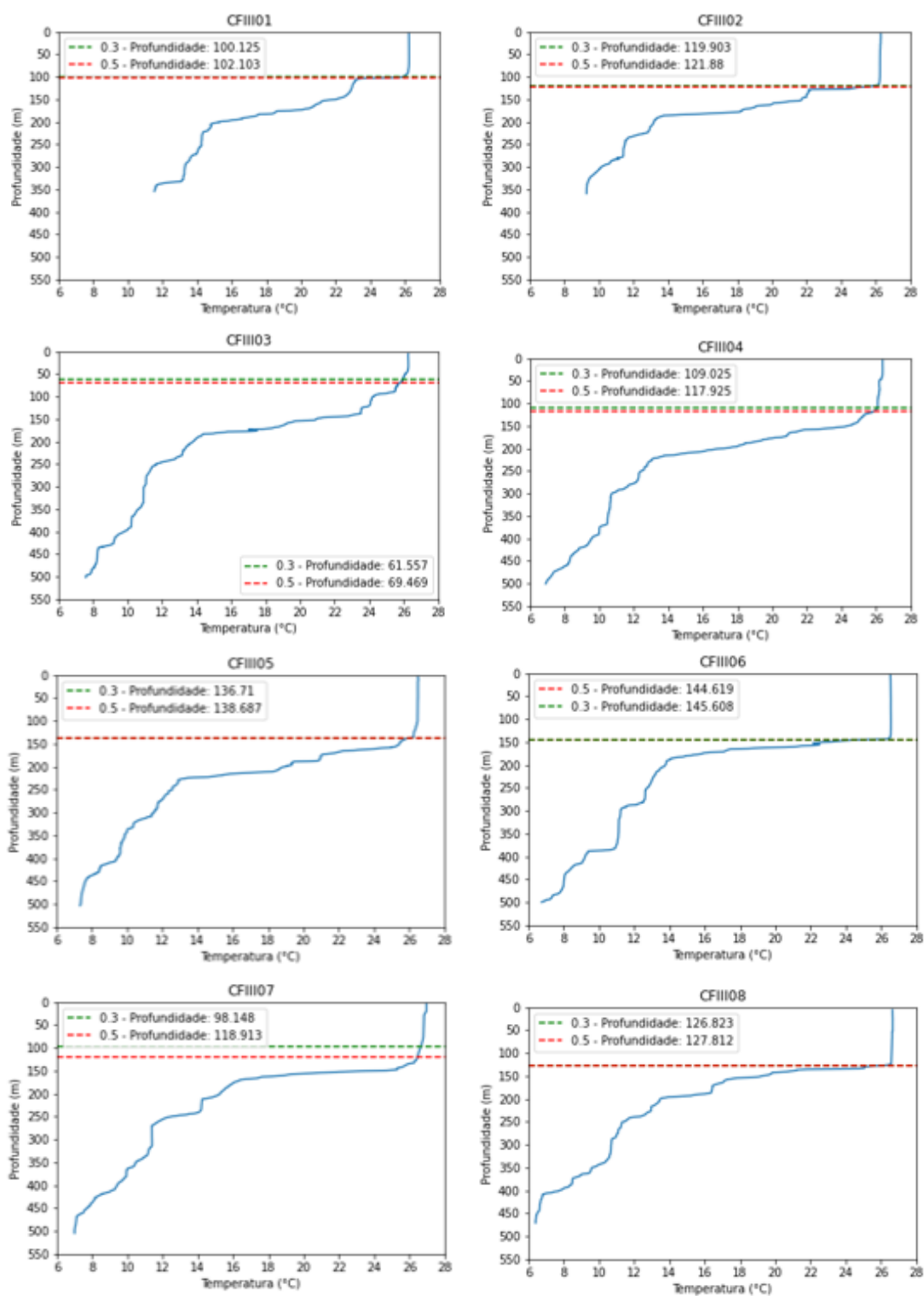


Figura 3.13 – Determinação da profundidade da camada de mistura utilizando os perfis de temperatura da sec. I (Ests. 1 a 11) da campanha Camadas Finas III/2012. A verde $\Delta T = -0.3^\circ\text{C}$ e a vermelho $\Delta T = -0.5^\circ\text{C}$.

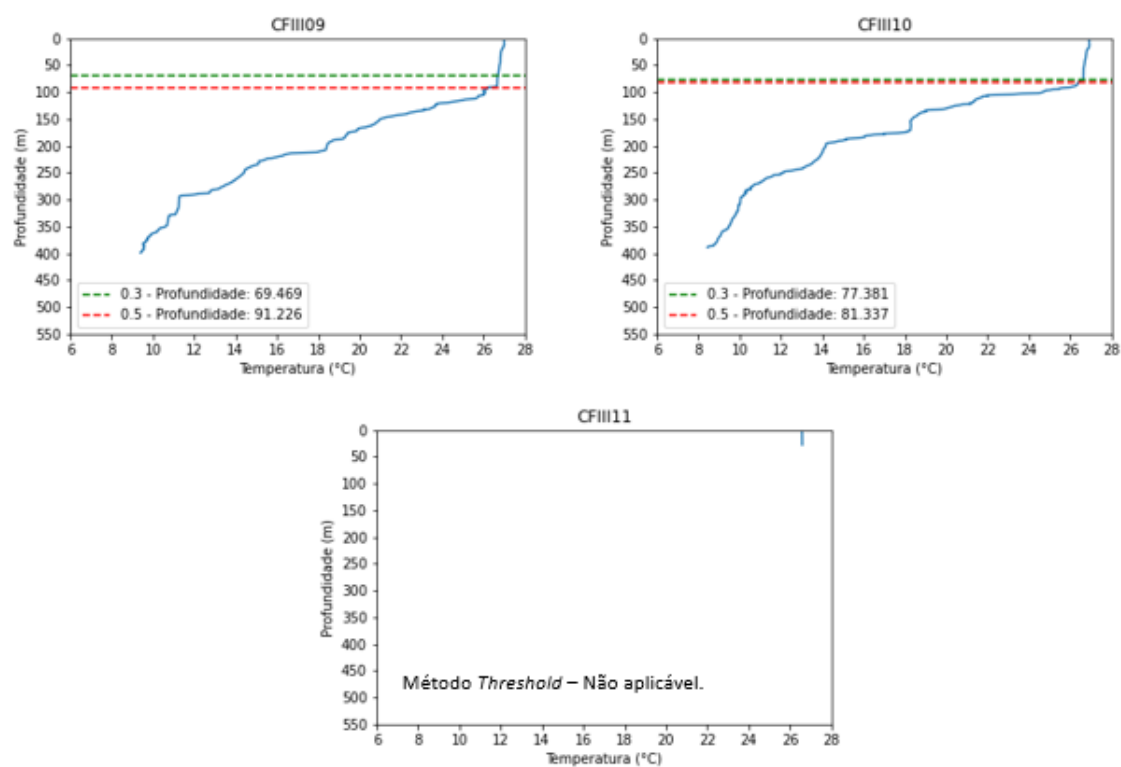


Figura 3.13 - (continuação).

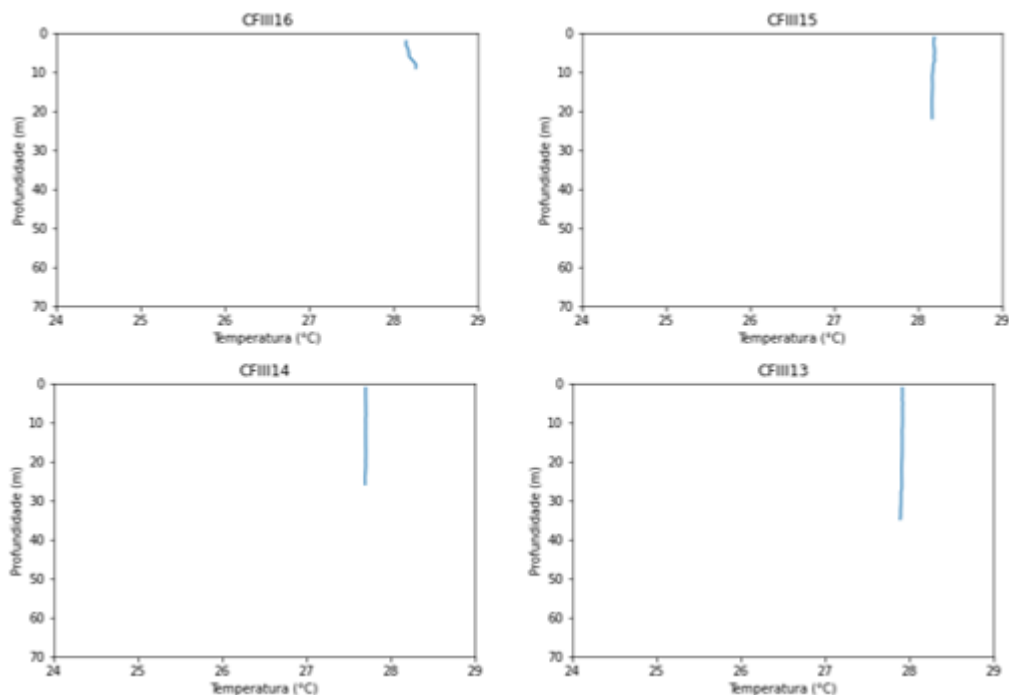


Figura 3.14 – Determinação da profundidade da camada de mistura utilizando os perfis de temperatura da sec. II (Ests. 12 a 20) da campanha Camadas Finas III/2012. A verde $\Delta T = -0.3^\circ\text{C}$ e a vermelho $\Delta T = -0.5^\circ\text{C}$.

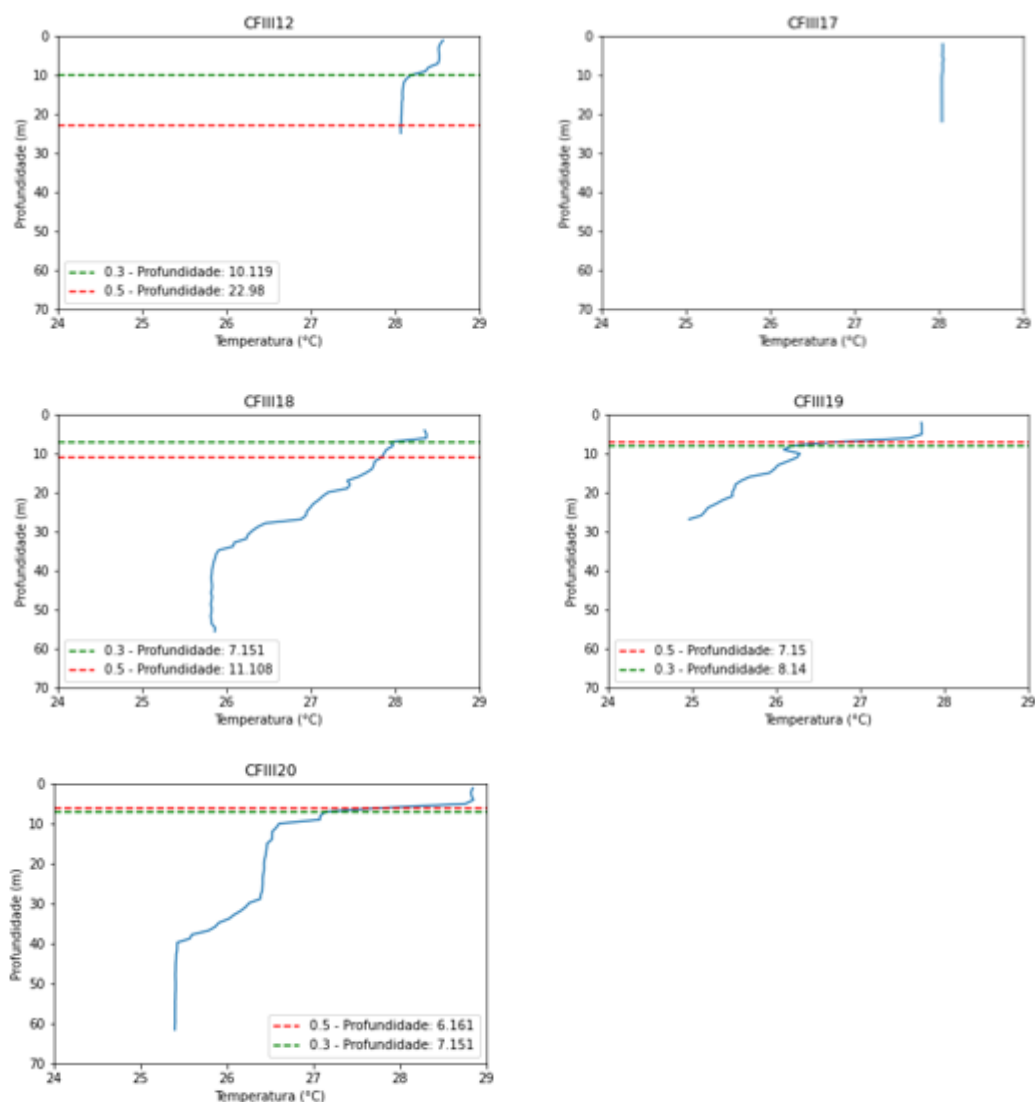


Figura 3.14 - (continuação).

A profundidade da camada de mistura para as estações da sec. II, através dos critérios do método *Threshold* para T, está representada na Figura 3.14. As estações representadas na Fig. 3.14 estão ordenadas de acordo com a sua posição geográfica.

As Ests. 13 a 17 localizam-se na foz dos rios Amazonas e Pará. A profundidade máxima amostrada nestas estações não ultrapassa 35 m. Sendo assim a camada de mistura corresponde a toda a coluna de água amostrada, variando entre ~35 m (Est. 13) e ~9 m (Est. 16).

Na Est. 12, com uma localização próxima das estações referidas anteriormente, foi possível aplicar os critérios do método *Threshold*. Contudo, as profundidades calculadas diferem cerca de 13 m. Com a aplicação do critério de -0.3°C , a profundidade calculada é de ~ 10 m e com o critério de -0.5°C a profundidade é de 23 m (ver Figs. 3.14 e 3.15).

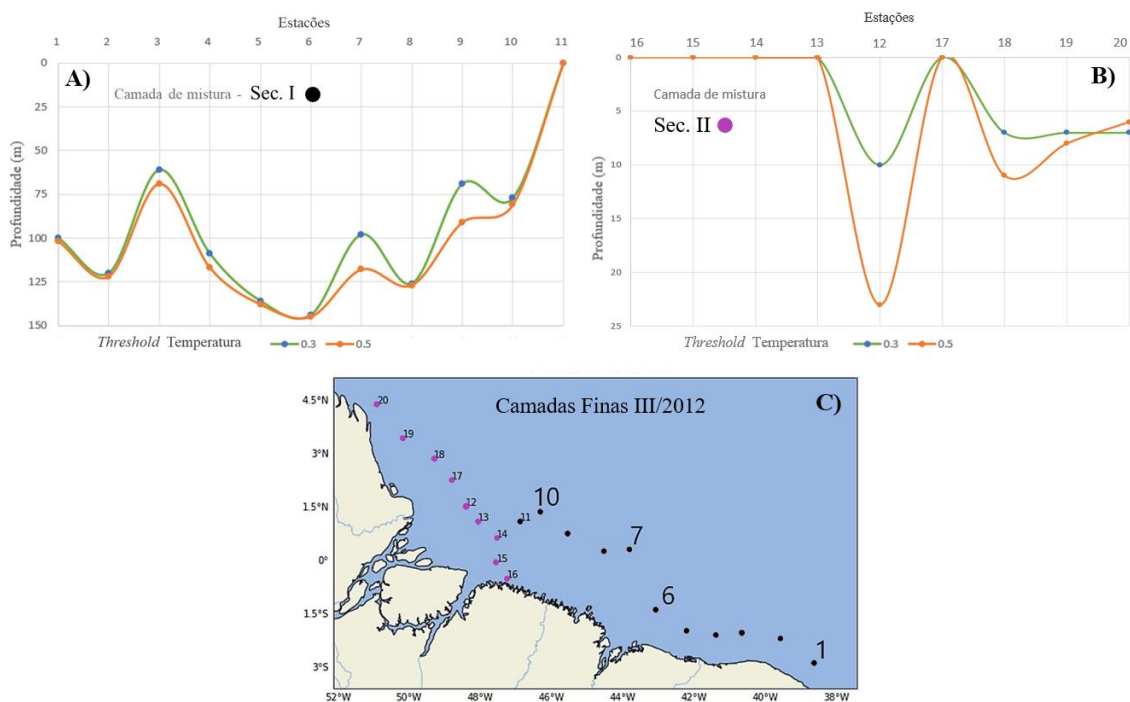


Figura. 3.15 – Variação da profundidade da camada de mistura ao longo das secções I (A) e II (B) na campanha Camadas Finas III/2012. A localização das duas secções esta representada em C.

As Ests. 18, 19 e 20 (Figs. 3.14 e 3.15), localizadas mais a noroeste, mostram uma espessura da camada de mistura < 12 m, onde os dois critérios, $\Delta T = -0.3$ °C e $\Delta T = -0.5$ °C, resultam em profundidades muito próximas (diferindo até 4 m na Est. 18).

No ponto anterior (ver 3.1.1), observou-se que o conjunto de perfis de temperatura, salinidade e densidade, assim como o diagrama T/S de dispersão, indicavam a presença de dois tipos de águas numa camada superficial na sec. II (Figs. 3.1B, 3.2B, 3.3B e 3.4). Pailler *et al.* (1999) explicam no seu artigo que a presença de água doce numa camada superficial ou de um máximo subsuperficial de salinidade, poderá induzir uma haloclina e, consequentemente uma picnoclina, evidentes, que impedem qualquer tipo de arrefecimento causado pela subida de águas mais profundas. De facto, é possível observar nas Ests. 18, 19 e 20 (Fig. 3.14), que mesmo sendo pouco espessa, existe uma divisão clara entre a camada de mistura e a camada imediatamente abaixo.

Profundidade da camada de mistura calculada a partir dos perfis de densidade

A profundidade da camada da mistura foi calculada com o método *Threshold*, aplicado à densidade ($\Delta\rho(Z_0) = +0.03$ kg/m³), para as estações das secs. I e II da campanha Camadas Finas III/2012, representadas, respectivamente, nas Figs. 3.16. e 3.17. As Figs. mostram que a espessura calculada com o critério da densidade varia entre 15 m (Fig. 3.16, Est. 8) e 2 m (Fig. 3.17, Est. 12). Verifica-se que nas profundidades calculadas com o critério da densidade, nas secs. I e II, existe alguma discordância com as profundidades obtidas para a CM utilizando o critério da temperatura ($\Delta T = -0.3$ °C e -0.5 °C), chegando a variar cerca de uma ordem de grandeza. A Est. 6 (sec. I) representada na Fig. 3.16, é um exemplo onde as profundidades obtidas para a CM foram de 11 com o critério da densidade e de 145 m com o critério da temperatura (Fig. 3.13).

Na sec. II (Fig. 3.17) observa-se também alguma diferença na espessura da CM obtida a partir da densidade em comparação com a espessura da CM através do parâmetro da temperatura. Dois exemplos são as Ests. 14 e 17 onde os critérios do método *Threshold* não foram aplicados na temperatura mas, resultaram em espessuras de 2 m na Est. 14 e 11 m na Est. 17 através da utilização do critério da densidade. As diferenças entre os dois critérios na espessura da CM nestas estações, podem ser devidas à interferência de diferentes tipos de águas nesta região (doce e oceânica), uma vez que a sec. II se localiza na desembocadura dos rios Amazonas e Pará (ver Fig. 3.15).

Autores como Pailler *et al.* (1999) referem que, na maior parte do oceano mundial, a variação da espessura da camada de mistura é primeiramente controlada pela temperatura. Desta forma, e contrariamente ao observado, seria de esperar que a profundidade calculada para a CM nas secs. I e II, a partir do critério da densidade fosse semelhante aos resultados obtidos com o critério da temperatura.

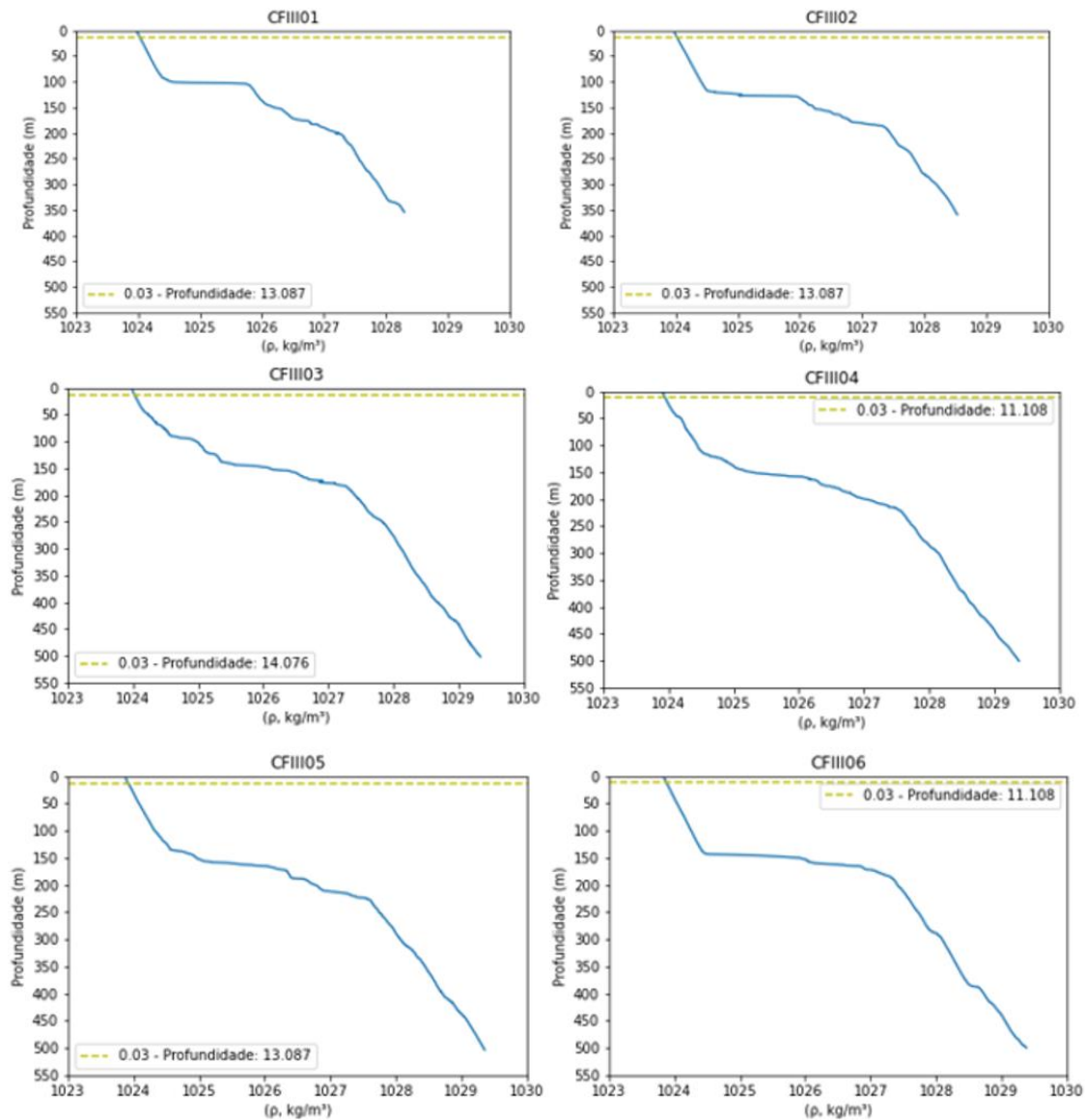


Figura 3.16 – Determinação da profundidade da camada de mistura utilizando os perfis de densidade da sec. I (Ests. 1 a 11) da campanha Camadas Finas III/2012. A amarelo $\Delta\rho = 0.03 \text{ kg/m}^3$.

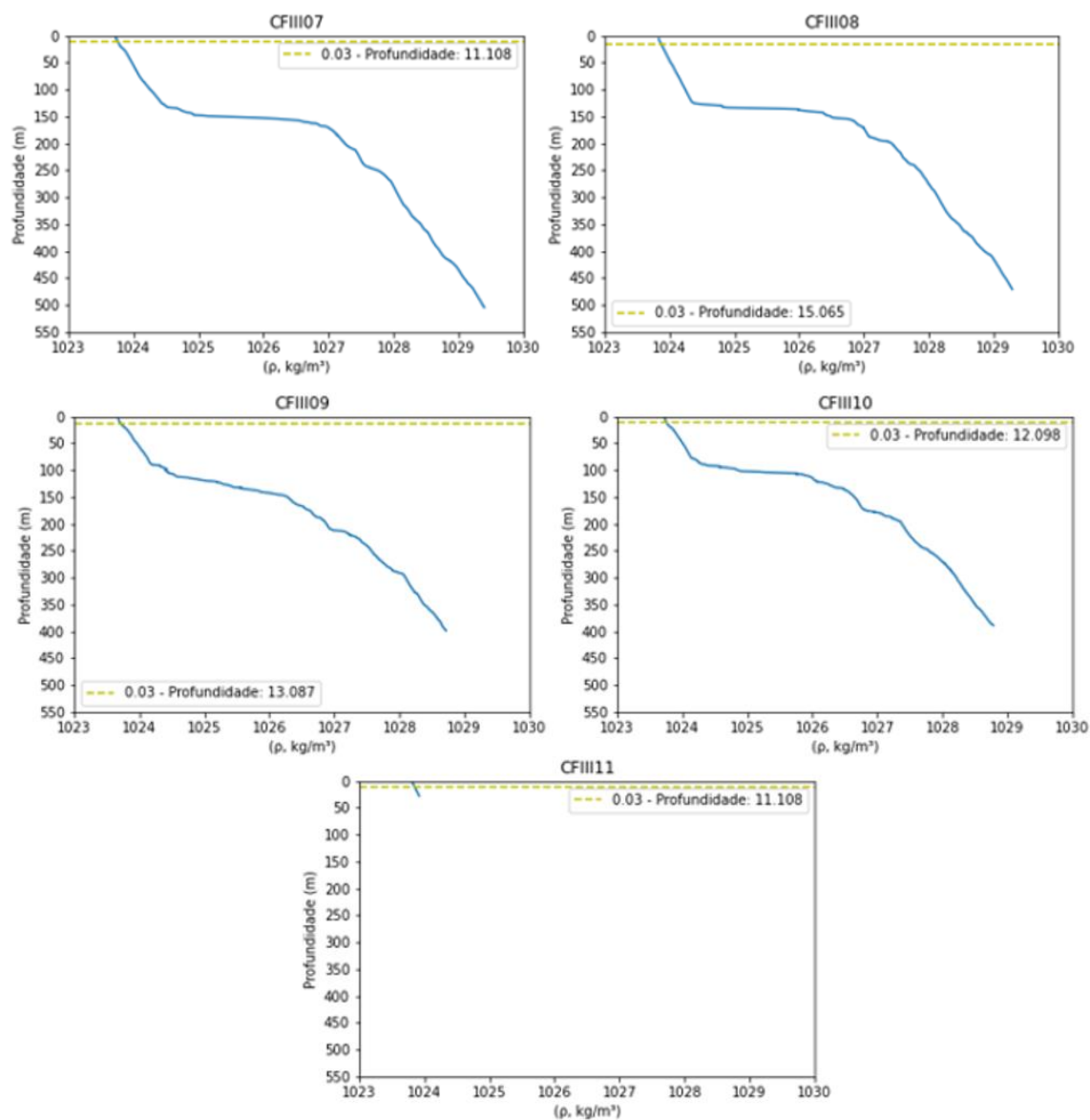


Figura 3.16 – (continuação).

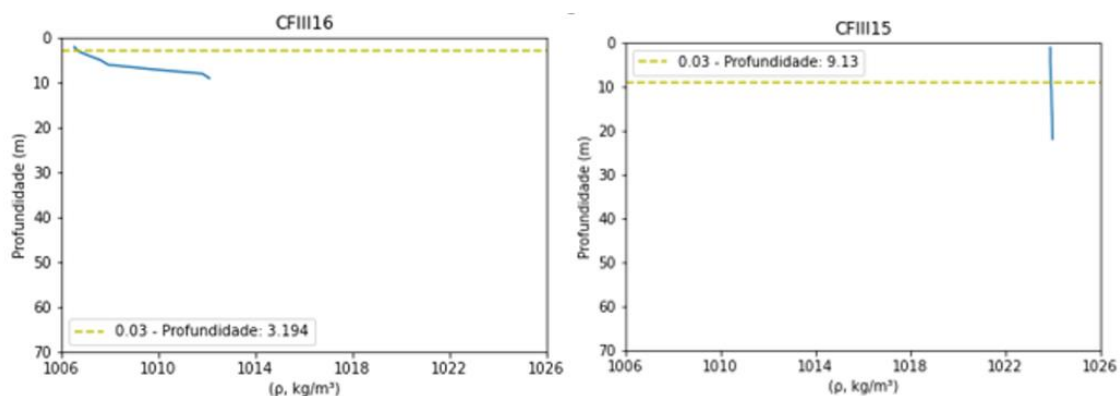


Figura 3.17 – Determinação da profundidade da camada de mistura utilizando os perfis de densidade da sec. II (Ests. 12 a 20) da campanha Camadas Finas III/2012. A amarelo $\Delta\rho = 0.03$ kg/m³.

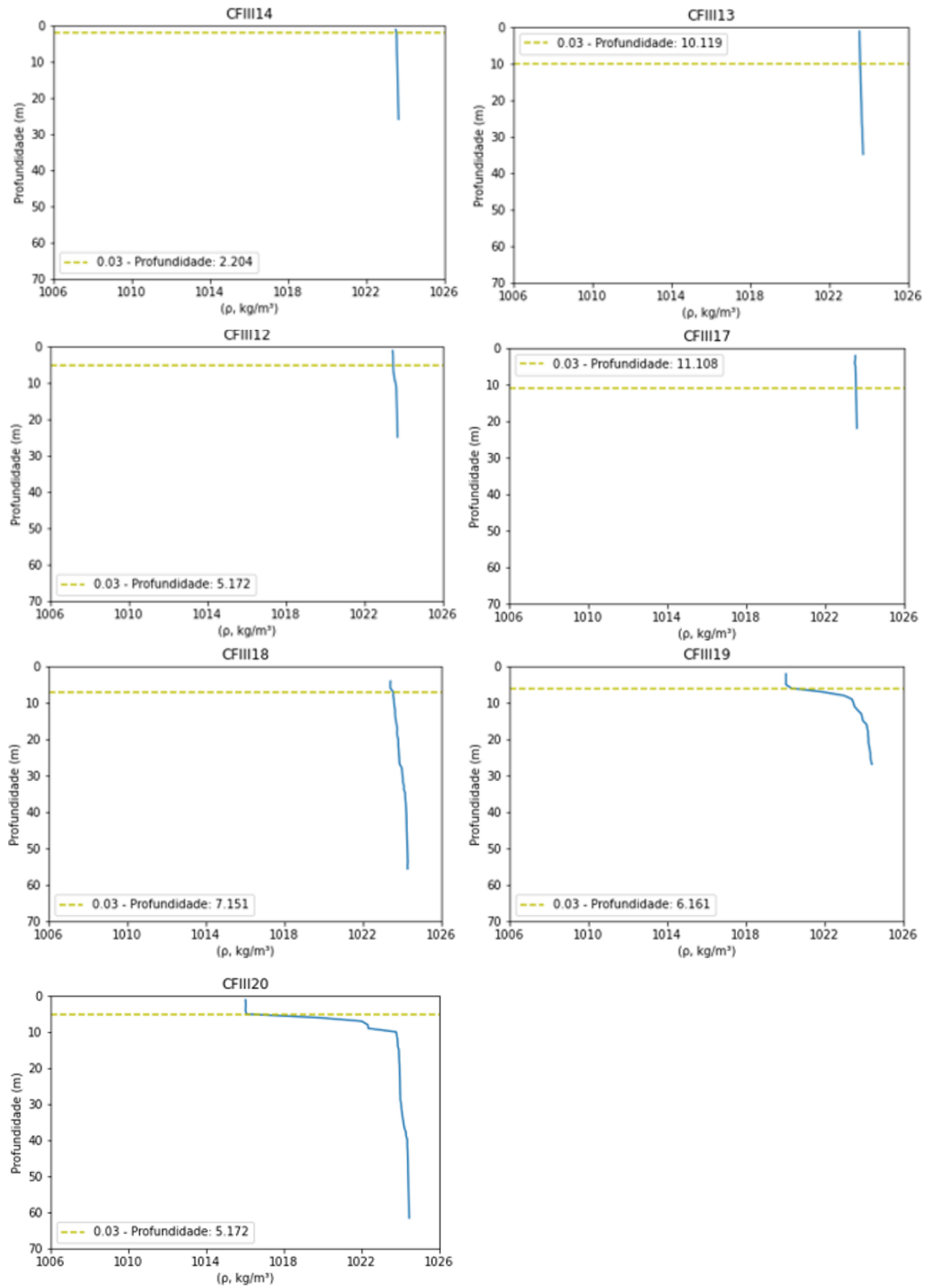


Figura 3.17 – (continuação).

3.2.2 Campanha PIRATA XVII/2017

Profundidade da camada de mistura calculada a partir dos perfis de temperatura

Aplicou-se o método *Threshold* à temperatura ($\Delta T(Z_0) = -0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) nas 21 estações distribuídas pelas secções I (Ests. 22 a 31) e II (Ests. 39 a 49). A profundidade da camada de mistura (CM) está representada nas Figs. 3.18 (sec. I) e 3.19 (sec. II), onde o critério de $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ está identificado a verde e o critério de $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ está identificado a vermelho. Os dois critérios parecem resultar em profundidades semelhantes, nas duas secções. Verifica-se também um aumento da espessura da camada de mistura, quanto mais ao largo a estação se localizar (Figs. 3.18, 3.19).

A variação da espessura da CM na sec. I parece aumentar da costa para o largo (ver Fig. 3.20). Por exemplo, a Est. 22 (Fig. 3.18), está localizada perto da costa e tem a menor profundidade calculada: 17 m com o critério de $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ e cerca de 38 m com o critério de $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Já a Est. 31, localizada mais ao largo, tem as maiores profundidades calculadas com os dois critérios do método *Threshold*, cerca de 120 m.

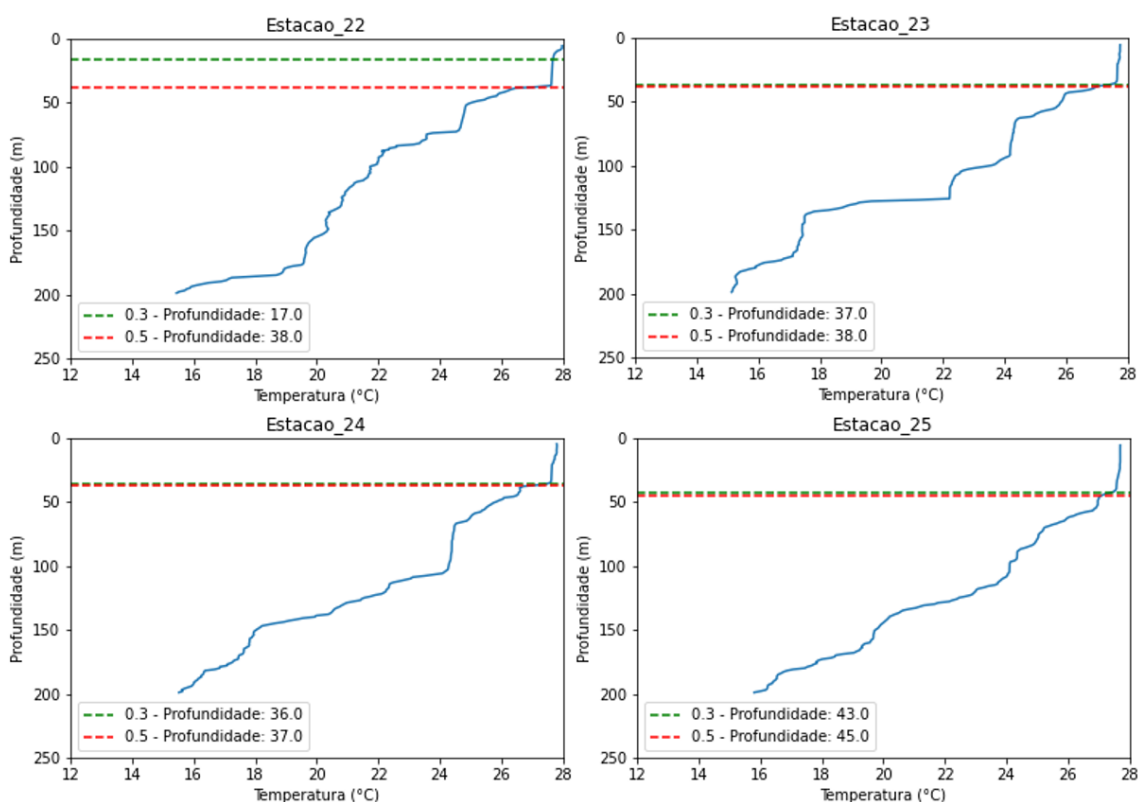


Figura 3.18 – Determinação da profundidade da camada de mistura utilizando os perfis de temperatura da sec. I (Ests. 22 a 31) da campanha PIRATA XVII/2017. A verde $\Delta T = -0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a vermelho $\Delta T = -0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

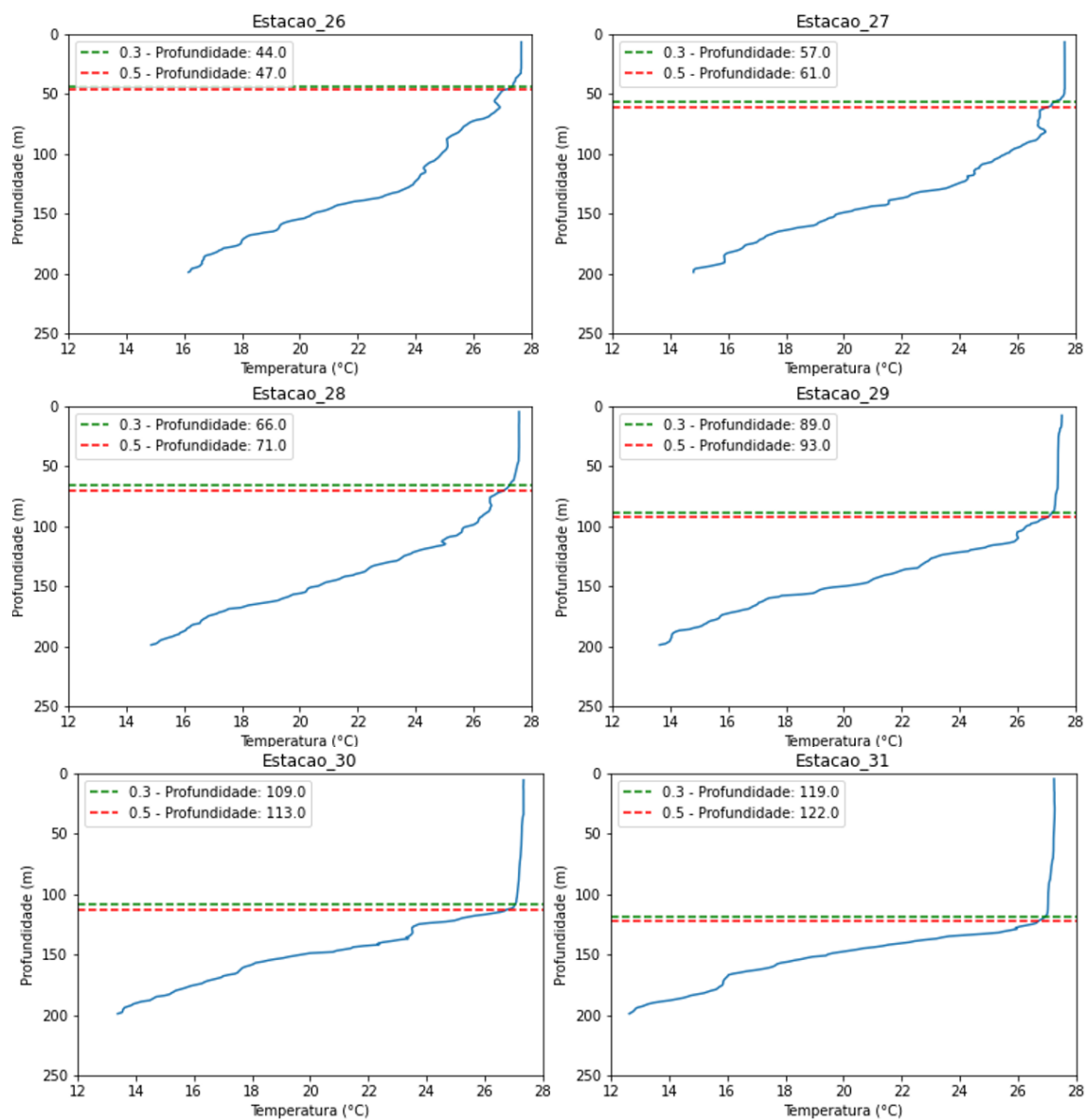


Figura 3.18 – (continuação).

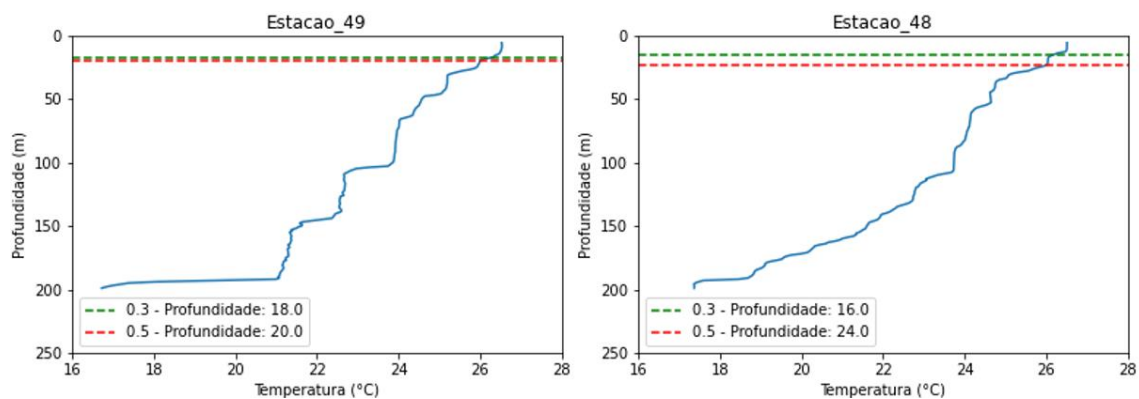


Figura 3.19 – Determinação da profundidade da camada de mistura utilizando os perfis de temperatura da sec. II (Ests. 39 a 49) da campanha PIRATA XVII/2017. A verde $\Delta T = -0.3^\circ\text{C}$ e a vermelho $\Delta T = -0.5^\circ\text{C}$.

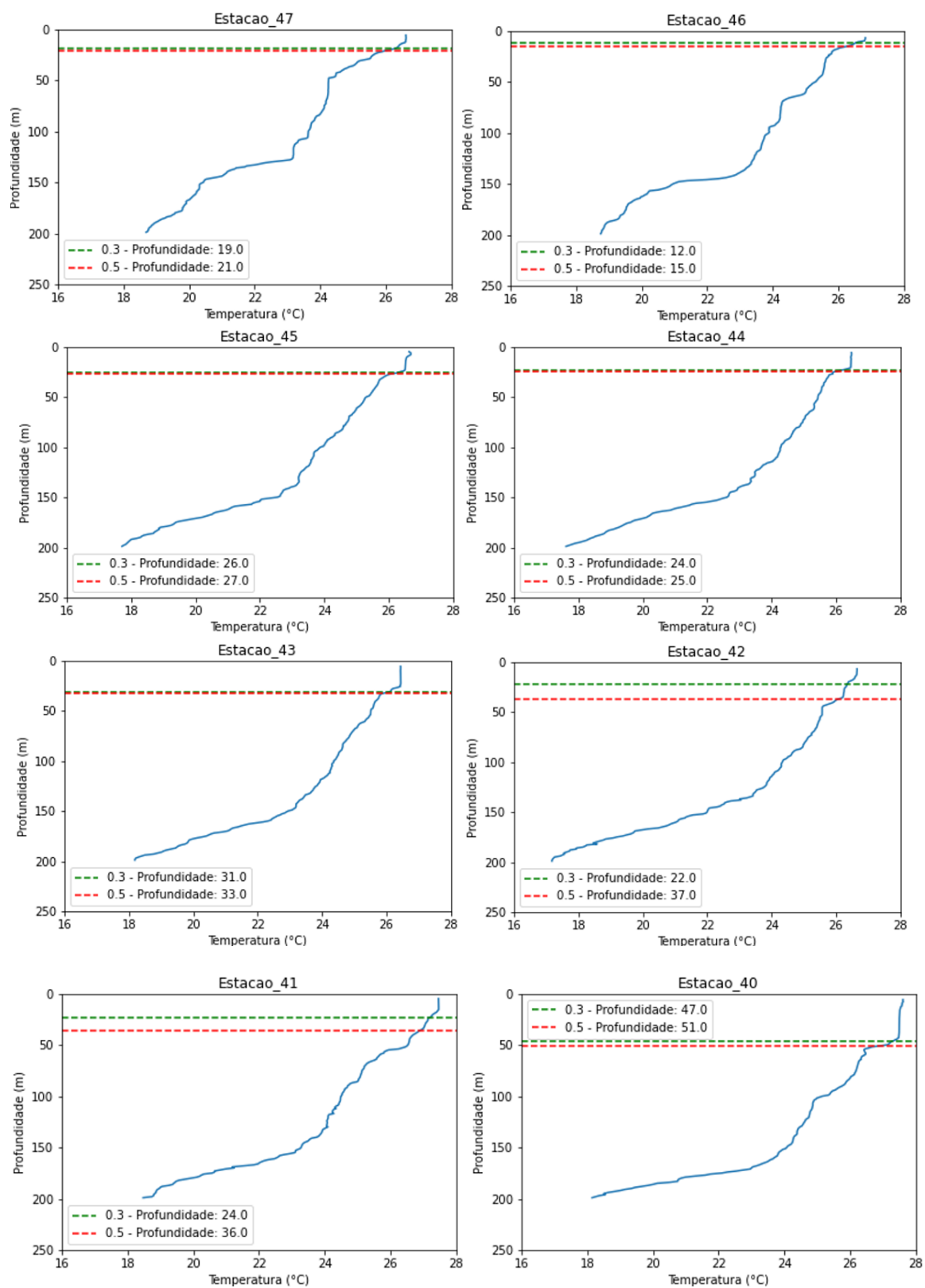


Figura 3.19 – (continuação).

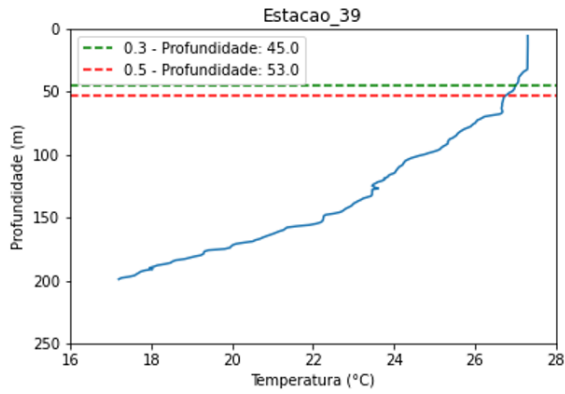


Figura 3.19 – (continuação).

Os resultados obtidos no cálculo da CM estão de acordo com os resultados de um estudo de Araújo *et al.* (2011) numa região próxima, realizado durante os meses de agosto a outubro de 1995, onde os autores identificaram uma espessura média de 70 m, atingindo até cerca de 135 m localmente. Araújo *et al.* (2011), explicam que a espessura da camada de mistura identificada é influenciada pela presença da Zona de Convergência Intertropical (ITCZ) no equador, e o consequente aumento de precipitação nesta zona, que induz menores salinidades à superfície. Os autores acrescentam ainda que, nesta altura do ano, existe tipicamente um aumento do transporte do sistema de correntes NBC/NBUC em direção ao equador que, de acordo com Araújo *et al.* (2011), contribui em grande parte para os máximos de salinidade subsuperficial e para a espessura relativamente pequena da camada de mistura observada nesta época do ano.

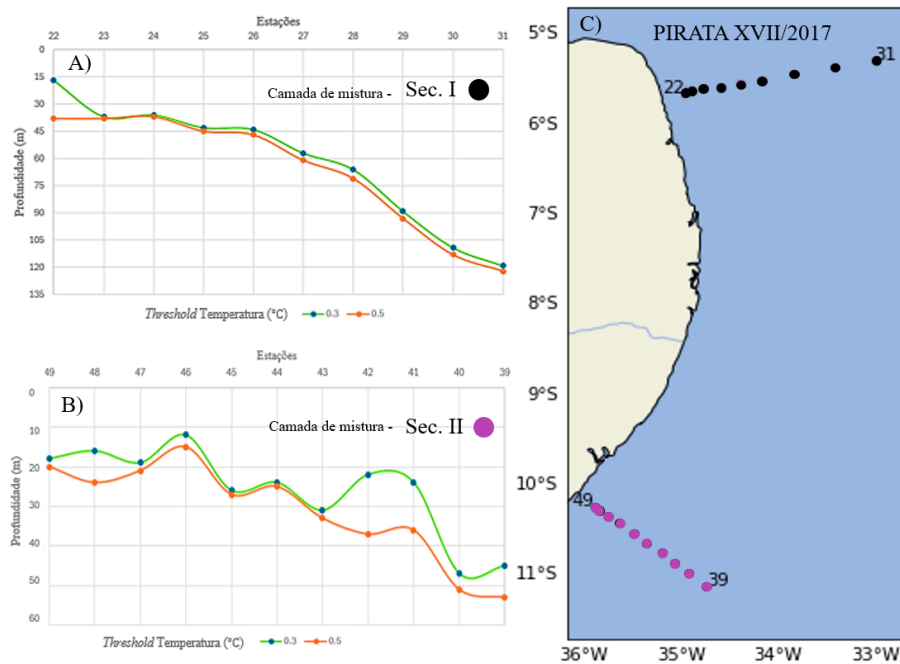


Fig. 3.20 - Variação da profundidade da camada de mistura ao longo das secções I (A) e II (B) na campanha PIRATA XVII/2017. A localização das duas secções esta representada em C.

Observa-se na Fig. 3.19 que as profundidades da camada de mistura na sec. II são menores do que as da sec. I (Fig. 3.18). A profundidade da CM varia entre cerca de 13 m (Est. 46, localizada próximo da costa) e 40 m (Ests. 39 e 40, localizadas mais ao largo). As profundidades da camada de mistura na sec. II (especialmente nas estações localizadas mais ao largo), estão de acordo com os resultados obtidos por Medeiros *et al.* (2009), numa região próxima, onde os autores referem que a espessura da CM ronda os 50 m.

Profundidade da camada de mistura calculada a partir dos perfis de densidade

A profundidade da camada da mistura foi calculada com o método *Threshold*, aplicado à densidade ($\Delta\rho = 0.03 \text{ kg/m}^3$), para as estações da sec. I e II, da campanha PIRATA XVII/2017, representadas nas Figs. 3.21. e 3.22, respectivamente. As espessuras da CM nas duas secções são muito semelhantes, 13 - 14 m. As Figs. 3.21 e 3.22 mostram, mais um vez, grandes diferenças nas profundidades obtidas com o critério de ρ e de T . Um exemplo na sec. I é a Est. 31, que tem espessuras de 12 m com o critério da densidade (Fig. 3.21), e espessuras de cerca de 120 m com o critério da temperatura (Fig. 3.18). Na sec. II, a Est. 39 é outro exemplo de desigualdade entre os dois critérios. Nesta estação, a profundidade da CM calculada a partir de ρ resulta em profundidades de 14 m (Fig. 3.21), enquanto com o critério da temperatura a espessura da camada de mistura é de cerca de 50 m (Fig. 3.19).

O critério da densidade ($\Delta\rho(Z_0) = 0.03 \text{ kg/m}^3$) mostra, mais uma vez, resultados muito diferentes dos resultados obtidos a partir do critério da temperatura ($\Delta T(Z_0) = -0.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ou $-0.5 \text{ }^\circ\text{C}$), sugerindo não ser o critério mais adequado.

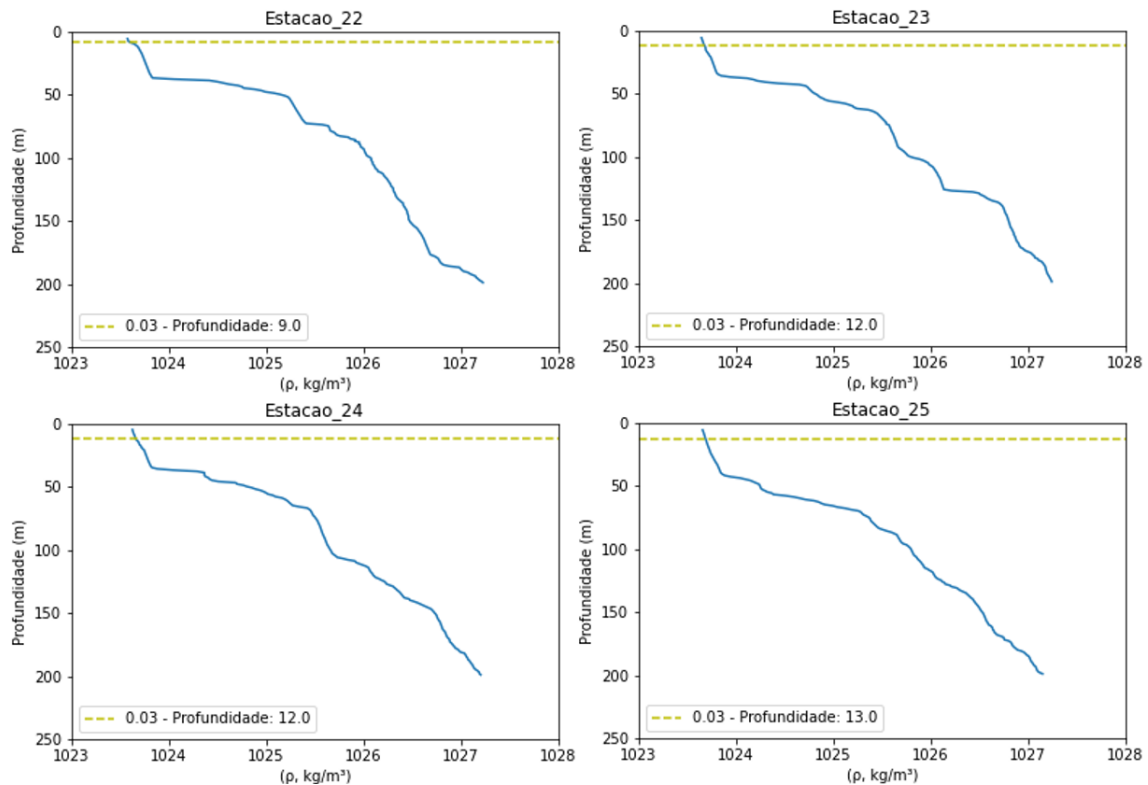


Figura. 3.21 - Determinação da profundidade da camada de mistura utilizando os perfis de densidade da sec. I (Ests. 22 a 31) da campanha PIRATA XVII/2017. A amarelo $\Delta\rho = 0.03 \text{ kg/m}^3$.

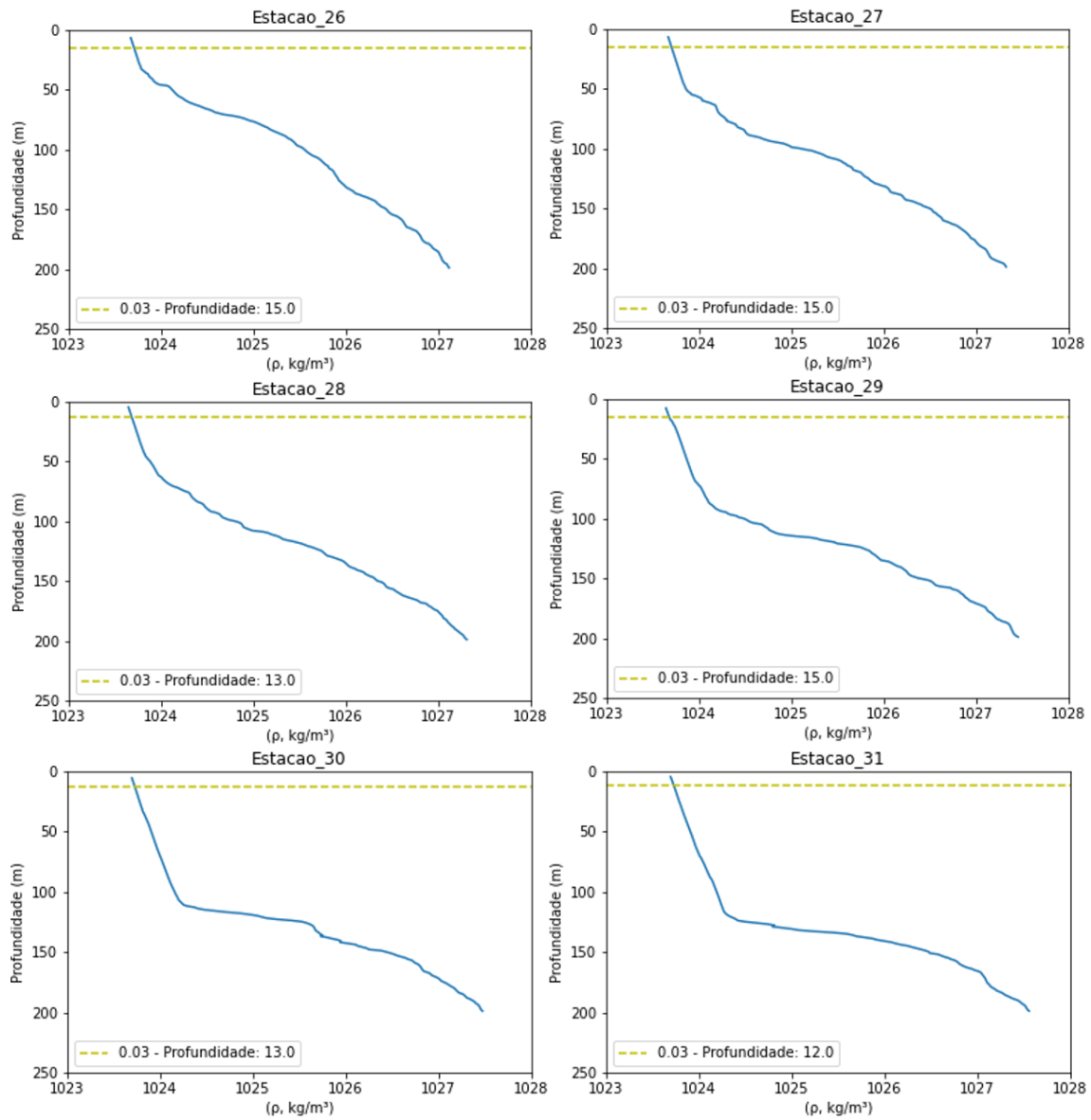


Figura. 3.21 – (continuação).

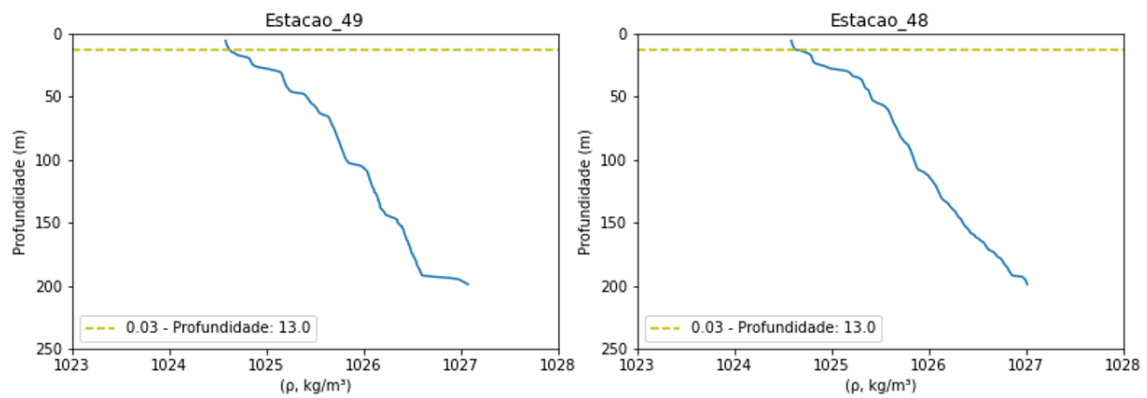


Figura. 3.22 - Determinação da profundidade da camada de mistura utilizando os perfis de densidade da sec. II (Ests. 39 a 49) da campanha PIRATA XVII/2017. A amarelo $\Delta\rho = 0.03 \text{ kg/m}^3$.

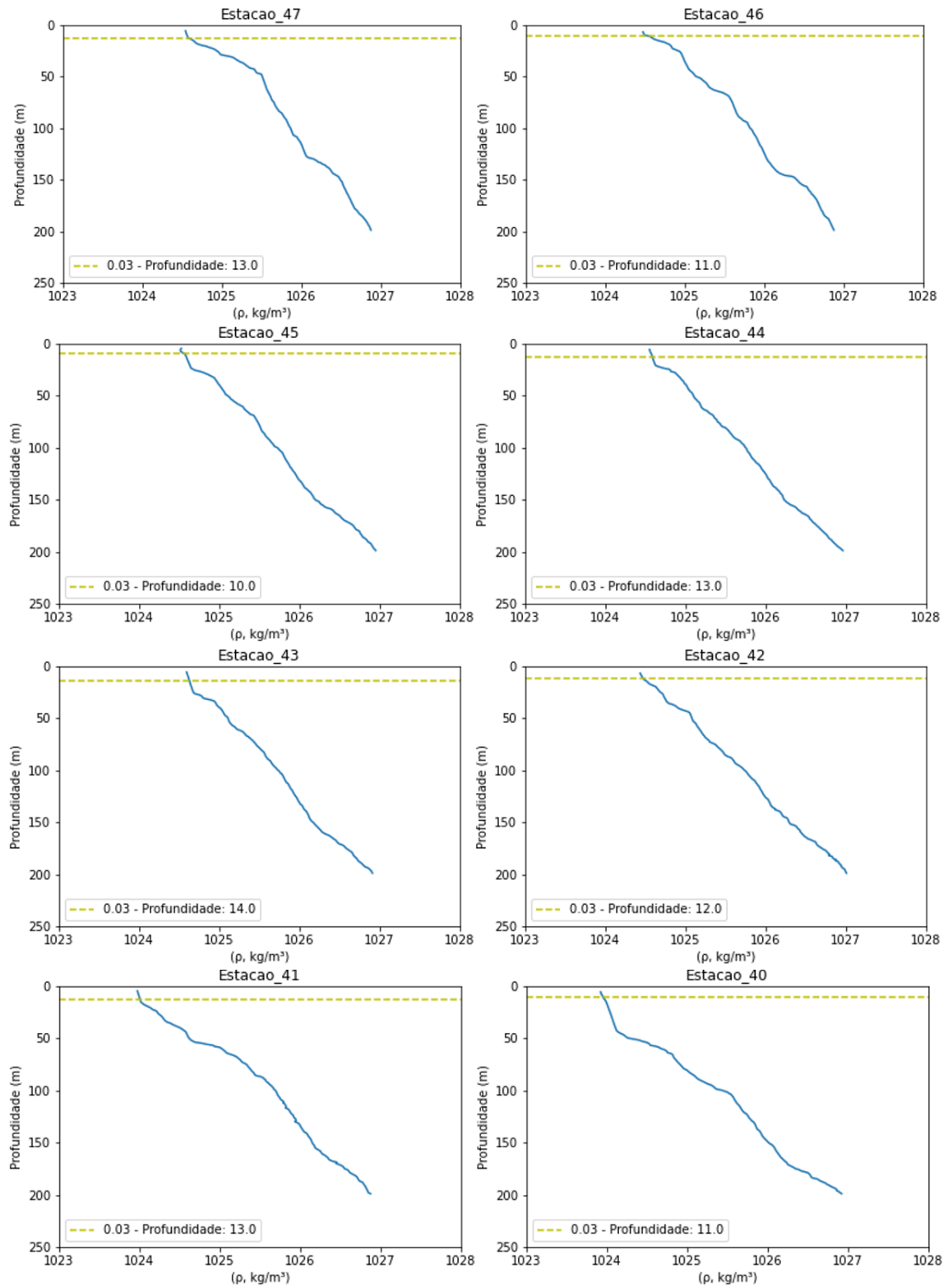


Figura. 3.22 – (continuação).

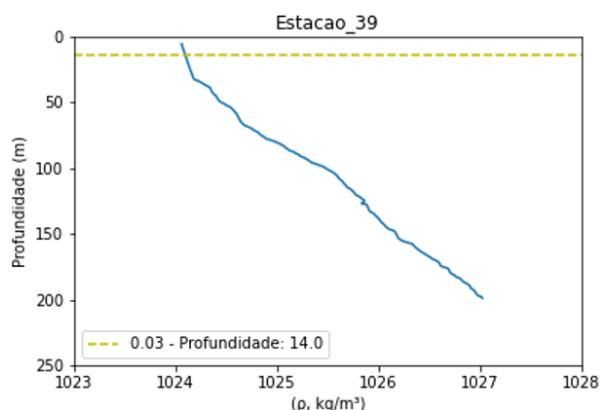


Figura. 3.22 – (continuação).

3.2.3 Campanha PIRATA XVIII/2018

Profundidade da camada de mistura calculada a partir dos perfis de temperatura

Aplicou-se o método *Threshold* à temperatura ($\Delta T(Z_0) = -0.3^\circ\text{C}$ ou -0.5°C) nas 29 estações distribuídas pelas secções I (Ests. 34 a 40), II (Ests. 9 a 22) e III (Ests. 23 a 33). A profundidade da camada de mistura (CM) está representada nas figuras 3.23 (sec. I) e 3.24 (sec. II) e 3.25 (sec. III), onde o critério de -0.3°C está identificado a verde e o critério de -0.5°C está identificado a vermelho. As profundidades da CM nas secs. I, II e III, mostram valores semelhantes a partir do cálculo do mesmo critério (-0.3°C ou -0.5°C). Contudo, os dois critérios parecem mostrar em todas as estações alguma diferença nas espessuras da camada de mistura, tal como representado na Fig. 3.26. Observa-se ainda na mesma figura que, em todas as secções, as maiores espessuras da camada de mistura são as das estações localizadas ao largo.

As profundidades da camada de mistura para a sec. I está representada na Fig. 3.23, que parece mostrar uma tendência crescente, quase linear, entre a profundidade calculada nas estações localizadas perto da costa e as profundidades identificadas nas estações localizadas ao largo. A Est. 28 localizada perto da costa, é um exemplo de uma menor espessura observada na sec. I (Figs. 3.23 e 3.26). Os dois critérios do método *Threshold* aplicado ao perfil da estação 28 resultam em espessuras de 28 m ($\Delta T(Z_0) = -0.3^\circ\text{C}$) e 38 m ($\Delta T(Z_0) = -0.5^\circ\text{C}$). Por outro lado, a maior espessura da CM, pertence à Est. 35 localizada mais ao largo, e resulta em profundidades semelhantes entre os dois critérios, cerca de 84.5 m (Fig. 3.23).

Na sec. I (Figs. 3.23 e 3.26) as profundidades da camada de mistura obtidas com os dois critérios da temperatura ($\Delta T(Z_0) = -0.3^\circ\text{C}$ ou -0.5°C), mostram uma diferença média de 10 m. A maior diferença observada entre os dois critérios é de 20 m na Est. 36.

A sec. I da campanha PIRATA XVIII/2018 (Fig. 3.23), quando comparada com a sec. I da campanha PIRATA XVII/2017 (Fig. 3.18), mostra profundidades menores da camada de mistura. Contudo observa-se em ambas uma maior espessura da CM, quanto mais ao largo a estação se localiza.

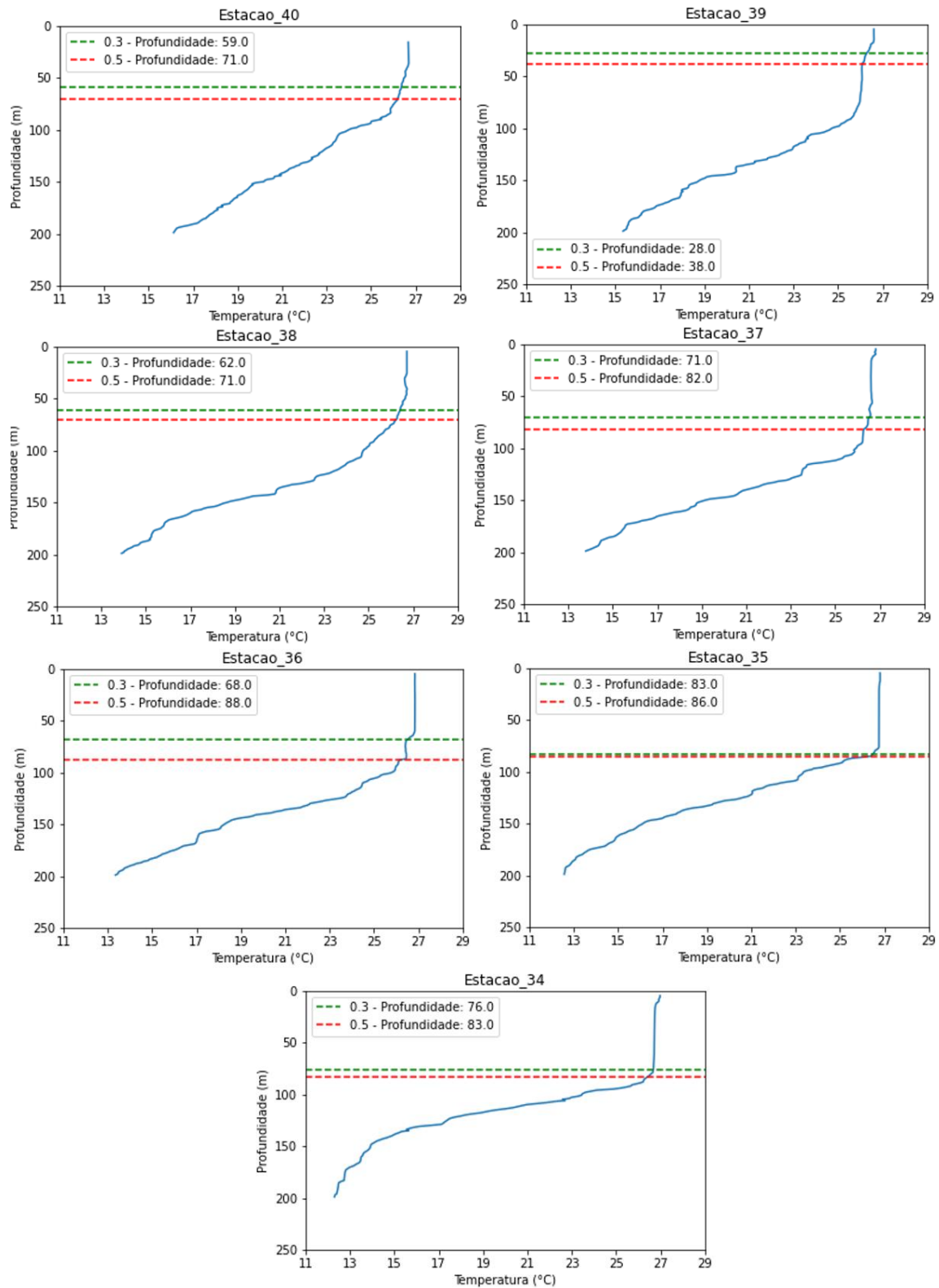


Figura 3.23 – Determinação da profundidade da camada de mistura utilizando os perfis de temperatura da sec. I (Ests. 40 a 34) da campanha PIRATA XVIII/2018. A verde $\Delta T = -0.3^\circ\text{C}$ e a vermelho $\Delta T = -0.5^\circ\text{C}$.

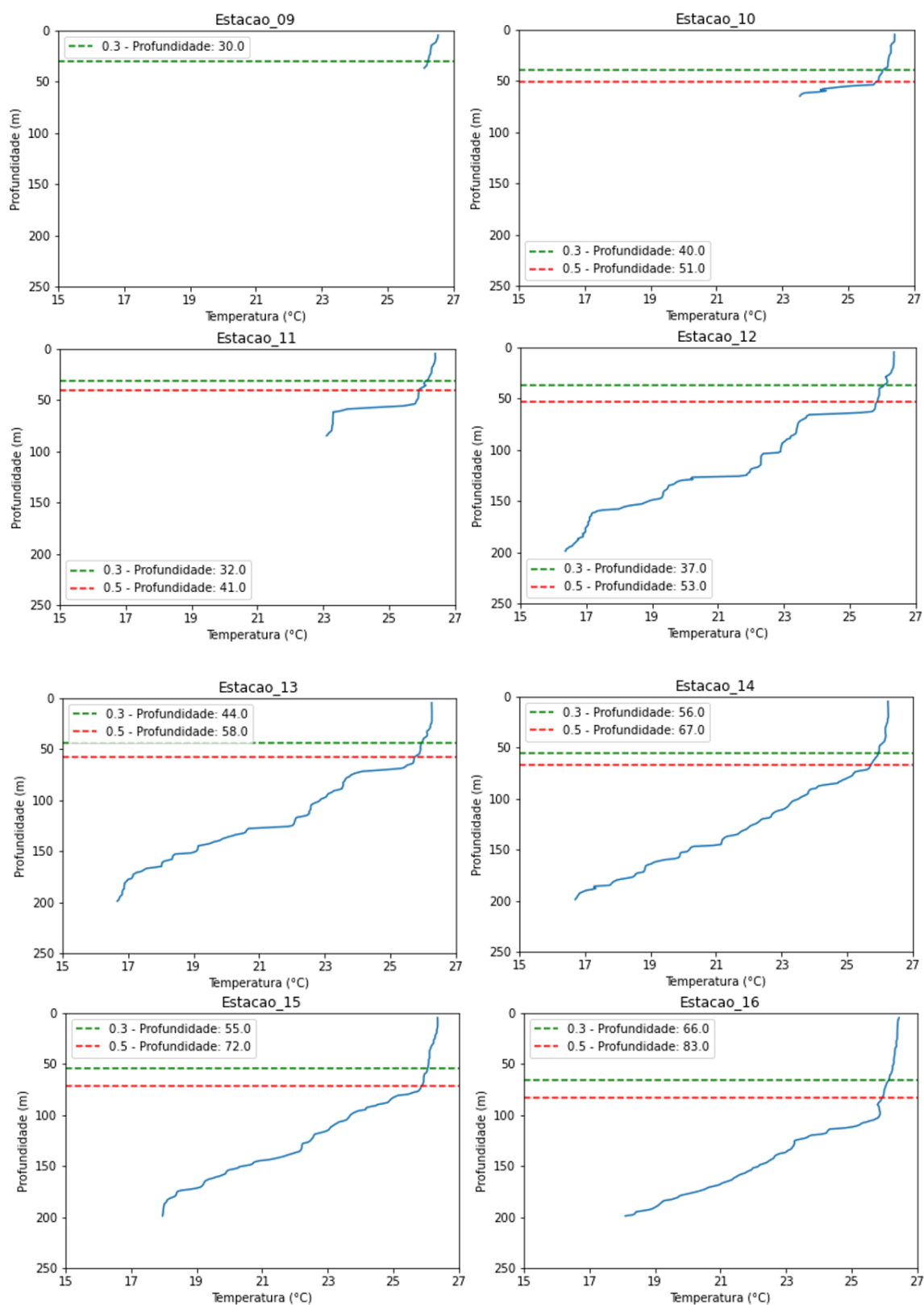


Figura 3.24 – Determinação da profundidade da camada de mistura utilizando os perfis de temperatura da sec. II (Ests. 9 a 22) da campanha PIRATA XVIII/2018. A verde $\Delta T = -0.3$ °C e a vermelho $\Delta T = -0.5$ °C.

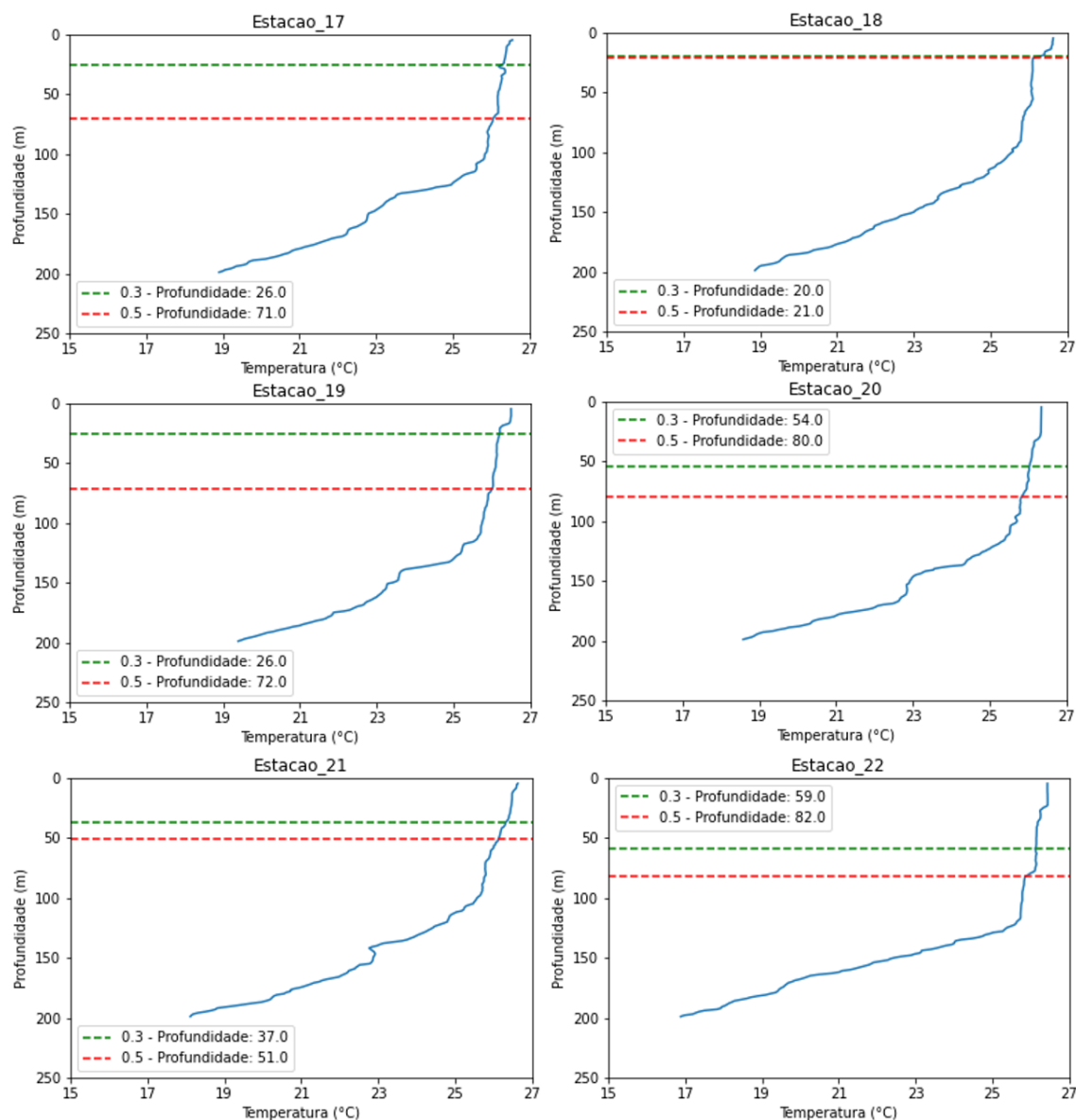


Figura 3.24 – (continuação).

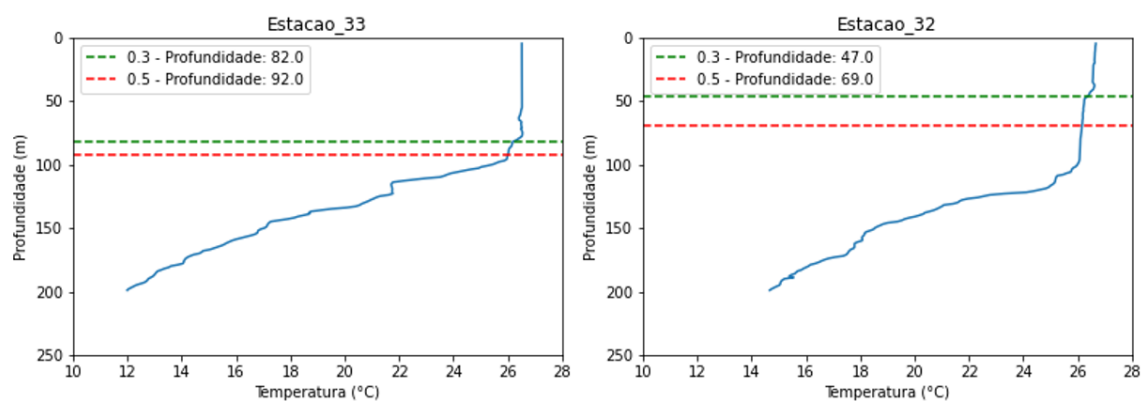


Figura 3.25– Determinação da profundidade da camada de mistura utilizando os perfis de temperatura da sec. III (Ests. 33 a 23) da campanha PIRATA XVIII/2018. A verde $\Delta T = -0.3^\circ\text{C}$ e a vermelho $\Delta T = -0.5^\circ\text{C}$.

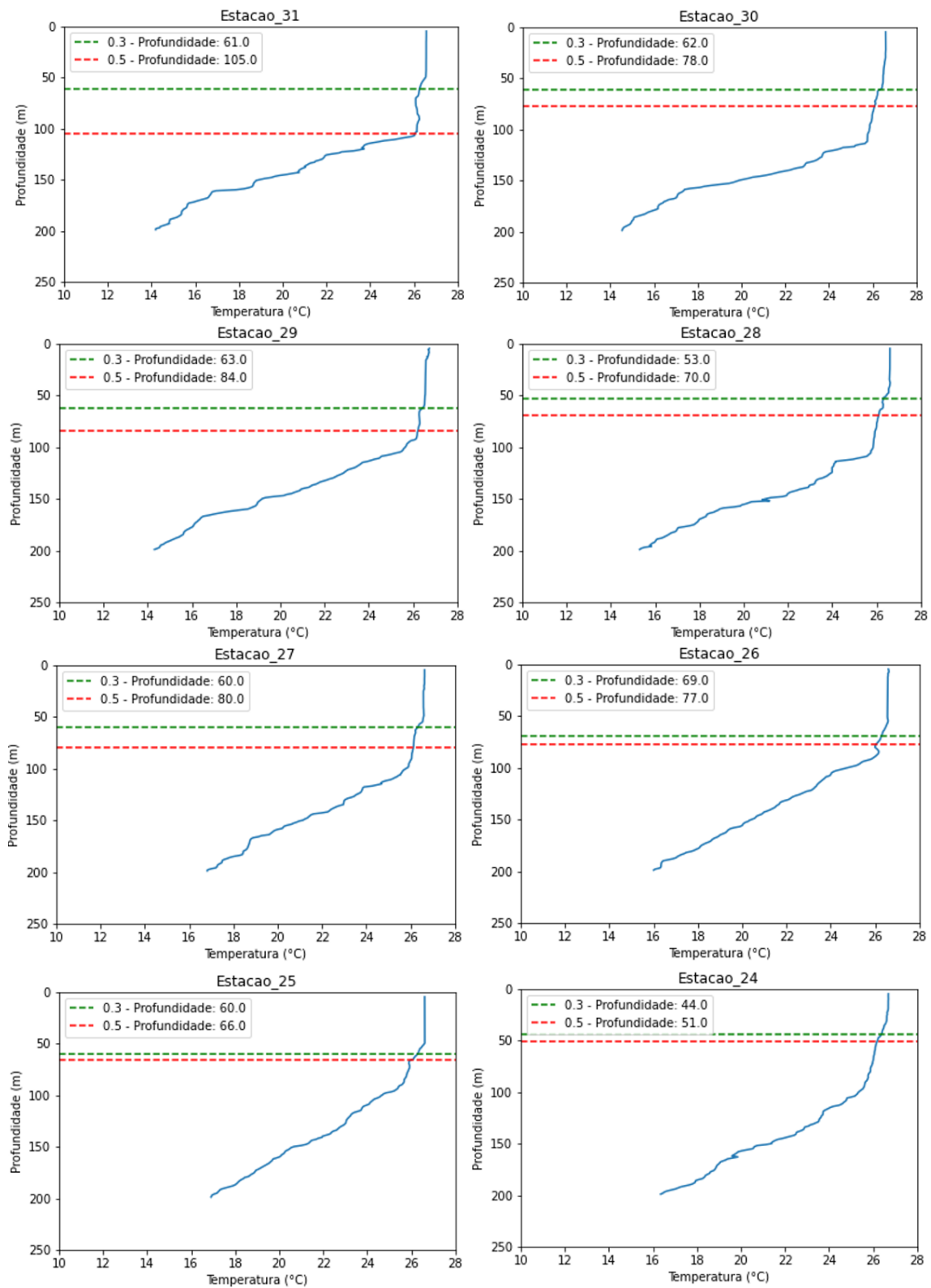


Figura 3.25 – (continuação).

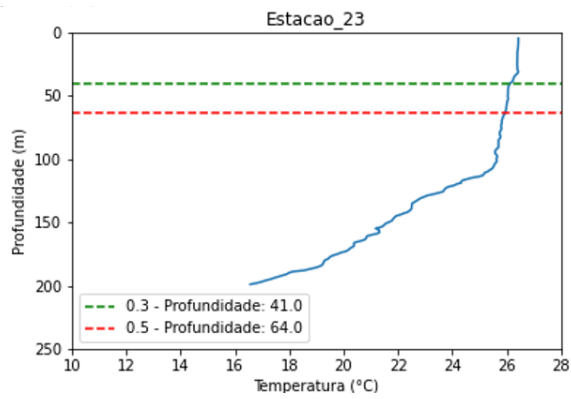


Figura 3.25 – (continuação).

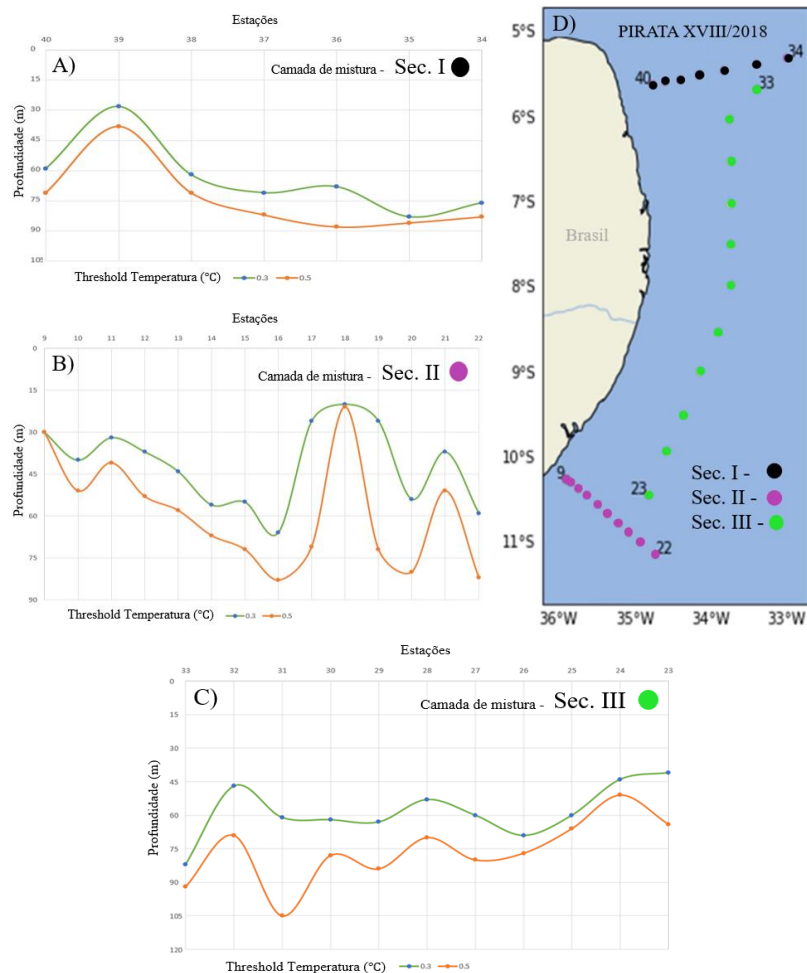


Figura. 3.26 - Variação da profundidade da camada de mistura ao longo das secções I (A), II (B) e III (C) na campanha PIRATA XVIII/2018. A localização das duas secções esta representada em D

Observa-se na sec. II (Fig. 3.24) que a profundidade calculada para a camada de mistura, a partir dos dois critérios do método *Threshold* ($-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$), difere cerca de 17 m na

maioria das estações. A profundidade obtida parece aumentar da Est. 9 (CM = 30 m) localizada perto da costa, até à Est. 16 (CM = 66 m ou 83 m, respectivamente $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$).

A profundidade da camada de mistura na sec. II da campanha PIRATA XVII/2017 mostra ser um pouco menor quando comparada com a espessura da CM na sec.II da campanha PIRATA XVIII/2018.

Na Fig. 3.25 estão as profundidades da camada de mistura obtidas para os perfis da sec.III. Observa-se que os dois critérios do método *Threshold* ($\Delta T(Z_0) = -0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) resultam em profundidades um pouco diferentes, diferindo cerca de 17 m na maioria das estações. A maior diferença observada entre os dois critérios é na Est. 31, resultando em 61 m com o critério de $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, e 105 m com o critério de $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

A menor profundidade observada com o critério de $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ é 41 m (Est. 23, Figs. 3.25 e 3.26) e a maior profundidade é 82 m (Est. 33, Figs. 3.25 e 3.26). Com a utilização do critério de $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, a maior profundidade é de 105 m (Est. 31, Figs. 3.25 e 3.26) e a menor profundidade é de 51 m (Est. 24, Figs. 3.25 e 3.26).

Profundidade da camada de mistura calculada a partir dos perfis de densidade

A profundidade da camada da mistura foram calculadas com o método *Threshold*, aplicado à densidade ($\Delta\rho = 0.03\text{ kg/m}^3$), para as estações das secs. I, II e III, da campanha PIRATA XVIII/2018, representadas respectivamente nas Figs. 3.27, 3.28 e 3.29. As espessuras calculadas para as três secções variam entre 6 m e 13 m, diferindo em muito da espessura calculada para a CM a partir dos critérios do método *Threshold* aplicado à temperatura ($\Delta T = -0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$). A Est. 35 da sec. I (Fig. 3.27), é um exemplo das grandes diferenças obtidas com o critério aplicado a ρ e os critérios aplicados a T, resultando em espessuras de 13 m e cerca de 84 m, respectivamente. Outro exemplo na sec. II (Fig. 3.28) é a Est. 16, que com os critérios de T a espessura da CM ronda os 70 m, e com o critério de ρ é 10 m. Também na sec. III, serve como exemplo de grandes diferenças entre os dois critérios, a Est. 31 (Fig. 3.29), que com os critérios de T resulta em profundidades de 61 m ($\Delta T = -0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$) e 105 m ($\Delta T = -0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$), e com o critério de ρ resulta em 12 m de profundidade.

A profundidade obtida a partir do método *Threshold* aplicado à densidade ($\Delta\rho = 0.03\text{ kg/m}^3$), mostra mais uma vez não ser o mais adequado.

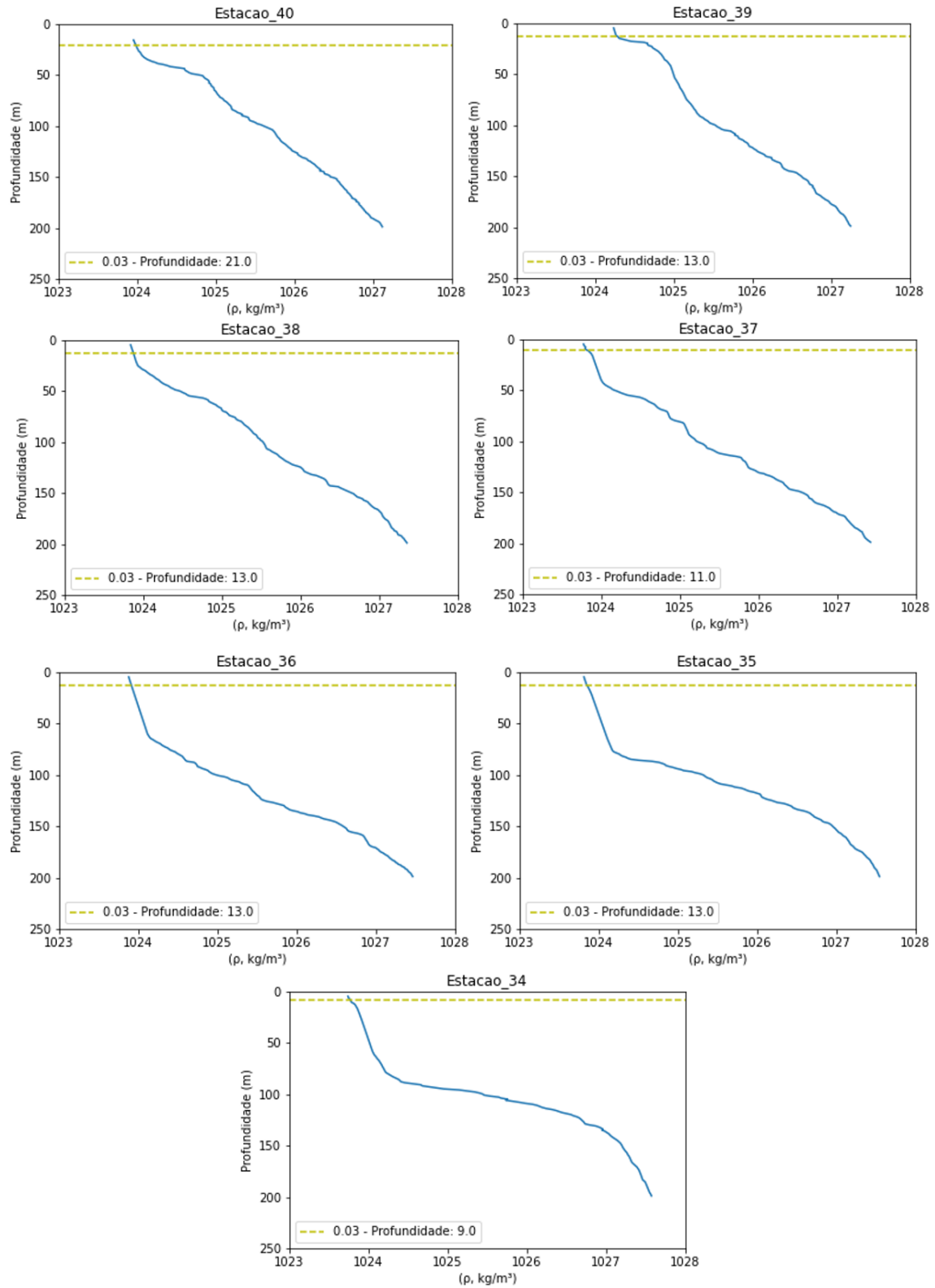


Figura. 3.27 - Determinação da profundidade da camada de mistura utilizando os perfis de densidade da sec. I (Ests. 40 a 34) da campanha PIRATA XVIII/2018. A amarelo $\Delta\rho = 0.03 \text{ kg/m}^3$.

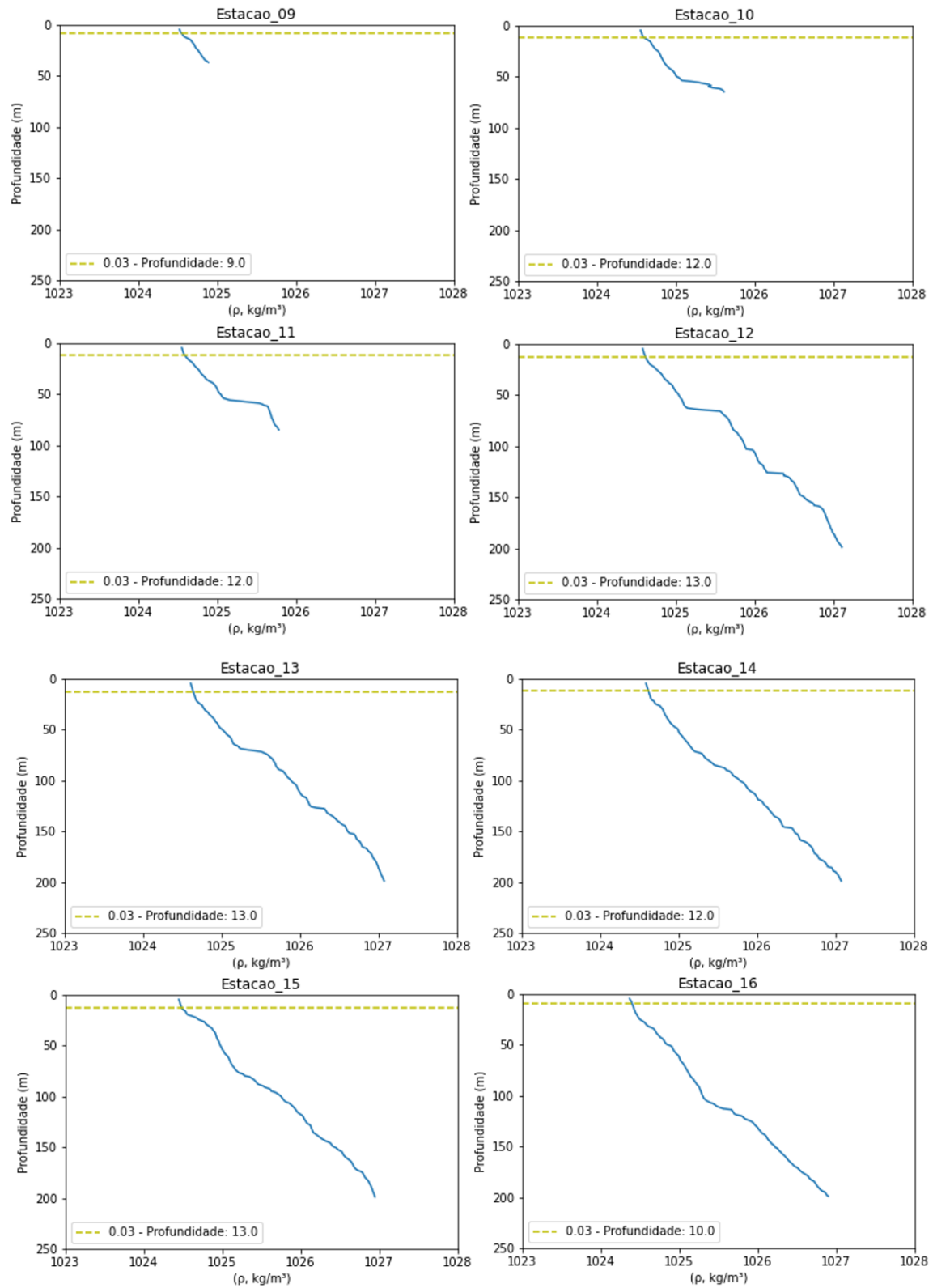


Figura. 3.28 - Determinação da profundidade da camada de mistura utilizando os perfis de densidade da sec. II (Ests. 9 a 22) da campanha PIRATA XVIII/2018. A amarelo $\Delta\rho = 0.03 \text{ kg/m}^3$.

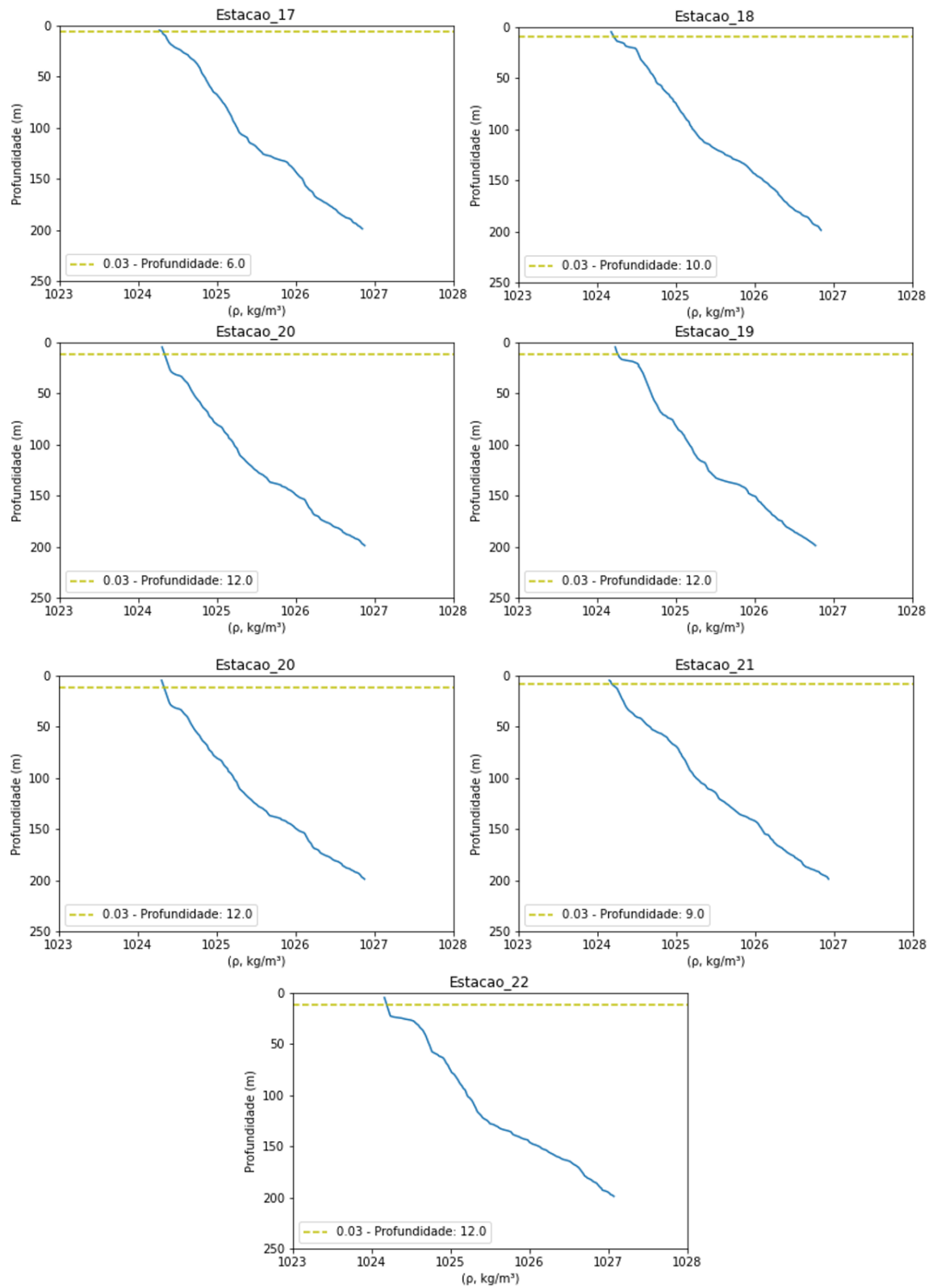


Figura. 3.28 – (continuação).

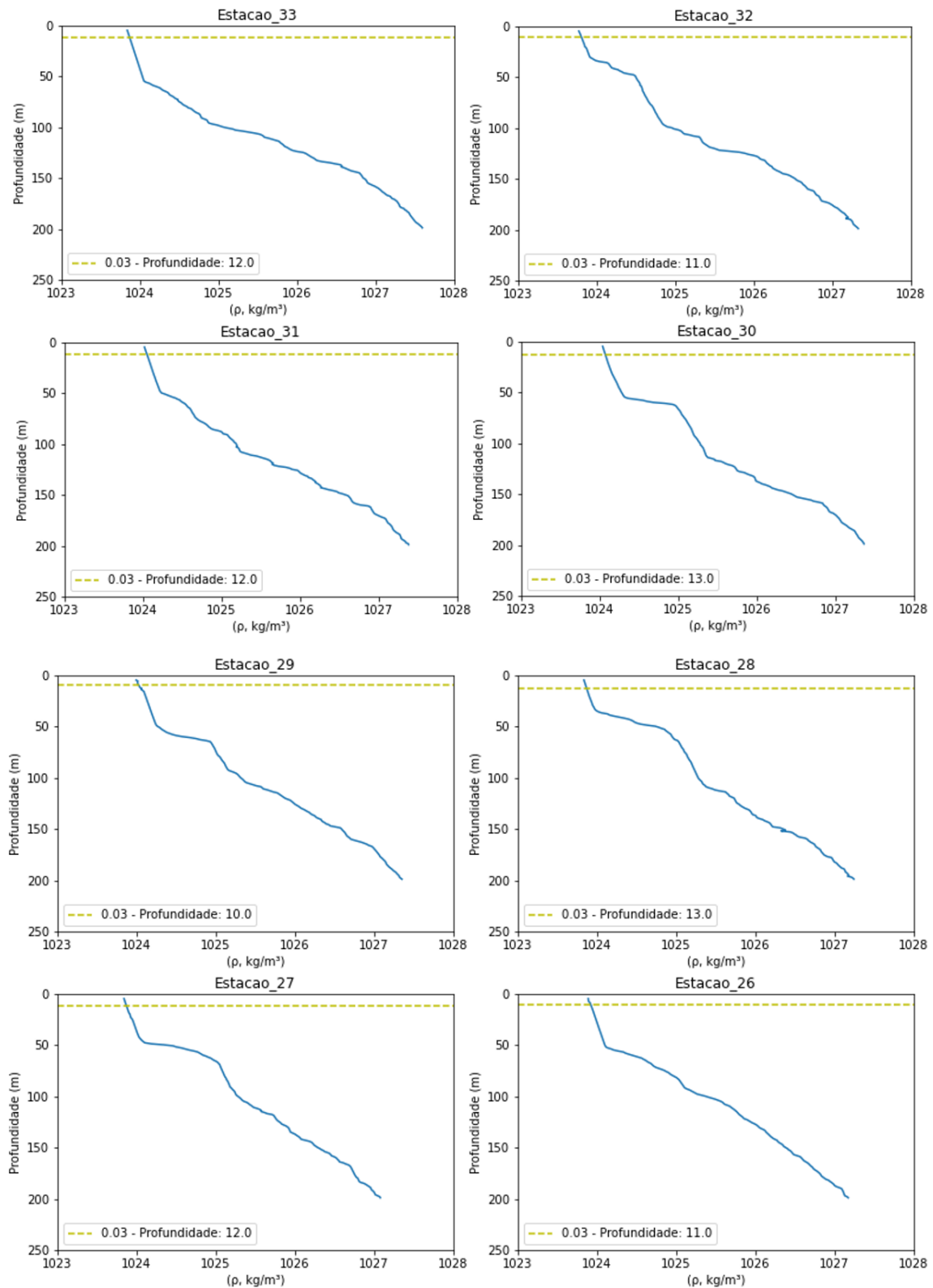


Figura. 3.29 - Determinação da profundidade da camada de mistura utilizando os perfis de densidade da sec. III (Ests. 33 a 23) da campanha PIRATA XVIII/2018. A amarelo $\Delta\rho = 0.03 \text{ kg/m}^3$.

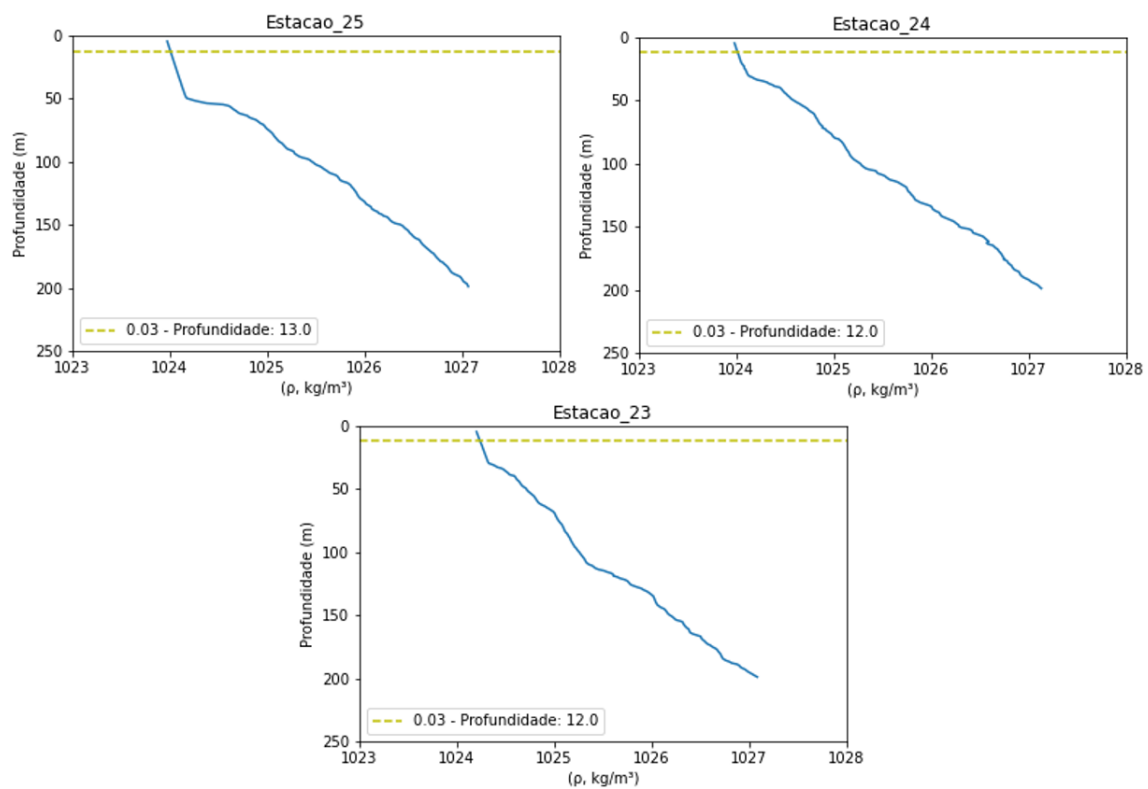


Figura. 3.29 – (continuação).

Capítulo 4

Conclusões

A partir da análise e processamento dos dados hidrológicos recolhidos durante as campanhas oceanográficas Camadas Finas III/2012 (11 Out. a 1 Nov. 2012), PIRATA XVII/2017 (30 Out. 2017 a 14 Jan. 2018) e PIRATA XVIII/2018 (28 Set. A 9 Out. 2018), observaram-se as características termohalinas (T, S), e calcularam-se as profundidades da camada de mistura a partir dos parâmetros T e ρ , numa região abrangida pelo percurso da Corrente Norte do Brasil (NBC).

A campanha Camadas Finas III/2012, teve lugar numa região próxima da foz dos rios Amazonas e Pará. Através dos perfis de temperatura, de salinidade e de densidade, observaram-se duas secções com comportamentos diferentes ao longo da coluna de água. A sec. I (Ests. 1 a 11), localizada mais para SE, mostra estações com comportamentos muito semelhantes. Numa camada superficial com T, S e ρ uniformes ou praticamente uniformes, e uma espessura de 50 a 150 m, onde $T > 25.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $S \approx 36.3$ e ρ com valores proximos de 1024 kg/m^3 . A camada subsuperficial ($\sim 100 - 170\text{ m}$), é marcada por um máximo de salidade na maioria das estações, $S > 36.4$. Estas conclusões estão de acorco com um estudo de Silva *et al.* (2009) que identificaram um máximo de salinidade subsuperficial ($S \sim 36.2$) numa região próxima. Outros autores como Silveira *et al.* (1994) e Neto & Da Silva. (2014), que também identificaram máximos de salinidade subsuperficial, numa região próxima, justificando-os com a presença da NBC, e do “núcleo” desta corrente a 100 - 150 m de profundidade. Em maiores profundidades os perfis de T, S e ρ , seguem o comportamento esperado.

A sec. II da campanha Camadas Finas III/2012, decorreu na embocadura da confluência dos rios Amazonas e Pará. A partir dos perfis de T, S e ρ , observaram-se comportamentos muito diferentes entre as estações desta secção. As estações localizadas imediatamente em frente à foz

dos rios Amazonas e Pará, mostram um comportamento praticamente uniforme ao longo da coluna de água. Contudo, e contrariamente ao esperado, a maioria destas estações mostram valores de salinidade típicos de água oceânica, com $S \geq 36.4$, assim como densidades de 1024 kg/m^3 . Por outro lado, as estações localizadas mais a NW mostram variações da temperatura ao longo da coluna de água, existindo claramente duas camadas diferenciadas, uma camada superficial, com características de água doce e, uma camada subsuperficial com características de água oceânica. Silva *et al.* (2009), observaram um comportamento semelhante numa região próxima, nas estações localizadas a NW da foz do rio Amazonas, tendo sido justificado pela presença de plumas de água doce provenientes do Amazonas.

O diagrama T/S de dispersão das 20 estações CTD da campanha Camadas Finas III/2012 facilitou a identificação de duas massas de água na região, definidas por Silveira *et al.* (1994): a Água Tropical (TW) observada na camada superficial, e a Água Central do Atlântico Sul (SACW) observada até ao último nível amostrado. Algumas estações da sec. II mostraram valores de salinidade que não se enquadraram em nenhuma das águas descritas anteriormente, nem mesmo no próprio diagrama. Estes valores, típicos de água doce, com salinidades inferiores a 34.0 (e densidades de cerca de 1007 kg/m^3), reforçam a presença de dois tipos de águas presentes na sec. II.

As campanhas oceanográficas PIRATA XVII/2017 e PIRATA XVIII/2018 foram realizadas na mesma área geográfica. Nos perfis de T, S e ρ , observa-se no geral, uma diferença entre as estações, dependendo da latitude e da distância à costa a que estas se encontram. A camada superficial, caracterizada por T, S e ρ praticamente uniforme, tende a ser mais espessa, quanto mais ao largo e a norte a estação se localizar, esta tendência também foi observada num estudo de Medeiros *et al.* (2009). Numa camada subsuperficial identificou-se um máximo de salinidade em praticamente todas as estações das campanhas PIRATA XVII/2017 e PIRATA XVIII/2018 (a ~ 50 - 150 m). Autores como Araújo *et al.* (2011) explicam que o máximo de salinidade numa região próxima da área de estudo está relacionado com a presença da Zona de Convergência Intertropical (ITCZ), que migra para o equador nesta altura do ano (inverno) e os níveis de precipitação excedem os níveis de evaporação. Maiores salinidades foram mais evidentes nas estações localizadas mais próximo da costa e mais a sul ($S > 37.0$). Os resultados parecem indicar um sinal mais forte da NBC junto da costa, uma vez que esta é uma corrente de fronteira oeste, caracterizada por máximos de salinidade subsuperficial (Johns *et al.*, 1998). Os valores relativamente mais elevados de salinidade nas estações localizadas mais a sul, parece estar relacionado com a presença mais evidente de Águas do Atlântico Sul (Araújo *et al.*, 2011; Vallès-Casanova *et al.*, 2022).

A partir dos digramas T/S das campanhas oceanográficas PIRATA XVII/2017 (21 estações processadas) e PIRATA XVIII/2018 (29 estações processadas) foi possível identificar a Água do Atlântico Sul (SAW), uma vez que as estações de ambas as campanhas seguem uma inclinação semelhante a esta massa de água definida por Araújo *et al.* (2011).

Para calcular a profundidade da camada de mistura (CM) foi utilizado o método *Threshold* aplicado à temperatura ($\Delta T(Z_0) = -0.3^\circ\text{C}$ ou -0.5°C) e à densidade ($\Delta \rho(Z_0) = 0.03 \text{ kg/m}^3$) nos perfis de T e ρ , das campanhas Camadas Finas III/2012, PIRATA XVII/2017 e PIRATA XVIII/2018.

Na sec. I da campanha Camadas Finas III (CFIII/2012) a profundidade da CM a partir dos dois critérios da temperatura, $\Delta T = -0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $\Delta T = -0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, resultou em profundidades próximas e espessuras entre 61 e 145 m. A espessura da CM nesta secção vai ao encontro de um estudo de Varona *et al.* (2019) para uma região próxima, onde os autores identificaram a profundidade da camada de mistura entre 100 m e 120 m.

Na sec. II da campanha CFIII/2012 não foi possível aplicar o critério da temperatura na maioria das estações. As estações onde os critérios foram aplicados são as estações localizadas mais a noroeste da foz do rio Amazonas, e os critérios da temperatura parecem novamente resultar em profundidades próximas, compreendidas entre 6 e 22 m.

A determinação da profundidade da camada de mistura nas campanhas PIRATA XVII/2017 e PIRATA XVIII/2018, utilizando o método *Threshold* aplicado à temperatura, $\Delta T = -0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $\Delta T = -0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, resulta em profundidades semelhantes em ambas as campanhas. Observou-se espessuras entre 15 e 122 metros, e uma diferença média de 17 m entre os critérios de $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

A partir da profundidade calculada para a CM nas campanhas PIRATA XVII/2017 e PIRATA XVIII/2018 foi possível observar que as estações mais próximas da costa mostram menores profundidades da camada de mistura, quando comparadas com as estações localizadas mais ao largo.

O método *Threshold* aplicado à densidade ($\Delta\rho(Z_0) = +0.03\text{ kg/m}^3$) para o cálculo da profundidade da camada de mistura nas campanhas Camadas Finas III/2012, PIRATA XVII/2017 e PIRATA XVIII/2018, não foi o mais apropriado na maioria das estações, resultando em profundidades entre 9 e 15 m. Em comparação com as profundidades calculadas a partir da temperatura, o critério *Threshold* aplicado à densidade resulta numa diferença significativa, atingindo uma ordem de grandeza em algumas estações.

Bibliografia

- Alberoni, A. A. L., Jeck, I. K., Silva, C. G., & Torres, L. C. (2020). The new Digital Terrain Model (DTM) of the Brazilian Continental Margin: detailed morphology and revised undersea feature names. *Geo-Marine Letters*, 40(6), 949-964.
- Araujo, M., Dimoune D, M., Noriega, C., Hounsou-Gbo G, A. H., Veleda, D., Araujo, J., Bruto, L., Feitosa, F., Flores-Montes, M., Lefèvre, N., Melo, P., Otsuka, A., Travassos, R. K., Schwamborn, R., & Neumann-Leitão, S. (2021). Camadas Finas III – BR cruise: S-ADCP data. SEANO. <https://doi.org/10.17882/80828>
- Araújo, M., Limongi, C., Servain, J., Silva, M., Leite, F. S., Veleda, D., & Lentini, C. A. D. (2011). Salinity-induced mixed and barrier layers in the southwestern tropical Atlantic Ocean off the northeast of Brazil. *Ocean science*, 7(1), 63-73.
- Bourlès, B., R, Lumpkin., J. M. McPhaden., F, Hernandez., P, Nobre., E, Campos., L, Yu., S, Planton., A, Busalacchi., D. A Moura., J, Servain., & J, Trotte. (2008). The PIRATA program: History, accomplishments, and future directions. *Bulletin Of The American Meteorological Society*, 89 (8), 1111-1125. https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/89/8/2008bams2462_1.xml
- Bourlès, B., Araujo, M., McPhaden, M. J., Brandt, P., Foltz, G. R., Lumpkin, H., Giordani, F., Gernandez, N., Lefèvre, P., Nobre, E., Cmapos, R., Saravanan, J., Trotte-duhá, M., Dengler, J., Hahn, R., Hummels, F. J., Lübbecke, M., Rouault, L., Cotrim, A., Sutton, M., Jochum., & Perez, R. C. (2019). PIRATA: A sustained observing system for tropical Atlantic climate research and forecasting. *Earth and Space Science*, 6(4), 577-616.
- Bourlès, B., Gouriou, Y., & Chuchla, R. (1999a). On the circulation in the upper layer of the western equatorial Atlantic. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C9), 21151-21170.
- Bourlès, B., Molinari, R. L., Johns, E., Wilson, W. D., & Leaman, K. D. (1999b). Upper layer currents in the western tropical North Atlantic (1989–1991). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C1), 1361-1375.
- Damasceno, Ú. M., Cintra, M. M., Gomes, M. P., & Vital, H. (2022). Interactions between the North Brazilian Undercurrent (NBUC) and the Southwest Atlantic Margin. Implications for Brazilian shelf-edge systems. *Regional Studies in Marine Science*, 54, 102486.
- Emery, W. J., & Meincke, J. (1986). Global water masses-summary and review. *Oceanologica acta*, 9(4), 383-391.
- Ffield, A. (2005). North Brazil current rings viewed by TRMM Microwave Imager SST and the influence of the Amazon Plume. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 52(1), 137-160.
- Foltz, G. R., Grodsky, S. A., Carton, J. A., & McPhaden, M. J. (2003). Seasonal mixed layer heat budget of the tropical Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C5).
- Fonseca, C. A., Goni, G. J., Johns, W. E., & Campos, E. J. (2004). Investigation of the north Brazil current retroflection and north equatorial countercurrent variability. *Geophysical Research Letters*, 31(21).

- Fratantoni, D. M., Johns, W. E., Townsend, T. L., & Hurlburt, H. E. (2000). Low-latitude circulation and mass transport pathways in a model of the tropical Atlantic Ocean. *Journal of Physical Oceanography*, 30(8), 1944-1966.
- Garzoli, S. L., Ffield, A., Johns, W. E., & Yao, Q. (2004). North Brazil Current retroflexion and transports. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C1).
- Gibbs, R. J. (1976). Amazon River sediment transport in the Atlantic Ocean. *Geology*, 4(1), 45-48.
- Goes, E. R., & Ferreira Jr. (2017). Caracterização morfossedimentar da plataforma continental Brasileira. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 10(5), 1595-1613.
- Gordon, A. L. (1986). Inter-ocean exchange of thermocline water. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 91(C4), 5037-5046.
- Hogg, N. G., & Johns, W. E. (1995). Western boundary currents. *Reviews of Geophysics*, 33(S2), 1311-1334.
- Johns, W. E., Lee, T. N., Schott, F. A., Zantopp, R. J., & Evans, R. H. (1990). The North Brazil Current retroflexion: Seasonal structure and eddy variability. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 95(C12), 22103-22120.
- Johns, W. E., Lee, T. N., Beardsley, R. C., Candela, J., Limeburner, R., & Castro, B. (1998). Annual cycle and variability of the North Brazil Current. *Journal of Physical Oceanography*, 28(1), 103-128.
- Johns, W. E., Zantopp, R. J., & Goni, G. J. (2003). Cross-gyre transport by North Brazil Current rings. In *Elsevier oceanography series* (Vol. 68, pp. 411-441). Elsevier
- Kantha, L., & Clayson, C. A. (2003). BOUNDARY LAYERS| Ocean Mixed Layer.
- Kelly, K. A., Drushka, K., Thompson, L., Le Bars, D., & McDonagh, E. L. (2016). Impact of slowdown of Atlantic overturning circulation on heat and freshwater transports. *Geophysical Research Letters*, 43(14), 7625-7631.
- Lentz, S. J. (1995). Seasonal variations in the horizontal structure of the Amazon Plume inferred from historical hydrographic data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 100(C2), 2391-2400.
- Liang, Y. C., Lo, M. H., Lan, C. W., Seo, H., Ummenhofer, C. C., Yeager, S., Wu, Renjie., & Steffen, J. D. (2020). Amplified seasonal cycle in hydroclimate over the Amazon river basin and its plume region. *Nature Communications*, 11(1), 4390.
- Lumpkin, R., & Garzoli, S. L. (2005). Near-surface circulation in the tropical Atlantic Ocean. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 52(3), 495-518.
- Masson, S., & Delecluse, P. (2001). Influence of the Amazon river runoff on the tropical Atlantic. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 26(2), 137-142.
- Mayer, D. A., & Weisberg, R. H. (1993). A description of COADS surface meteorological fields and the implied Sverdrup transports for the Atlantic Ocean from 30 S to 60 N. *Journal of Physical Oceanography*, 23(10), 2201-2221.
- McCarthy, G., Smeed, D., Cunningham, S., & Roberts, C. (2017). Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC). In *Marine Climate Change Impacts Partnership: Science Review: MCCIP Science Review 2017* (pp. 15-21).
- Medeiros, C., Araujo, M., Rollnic, M., and Freitas, I. (2009). Estrutura termohalina da região oeste do Atlântico tropical, in: Programa REVIZEE – SCORE NE, vol. I, edited by Hazin, F., 40-55.
- Neto, A. V. N., & Da Silva, A. C. (2014). Seawater temperature changes associated with the North Brazil current dynamics. *Ocean Dynamics*, 64(1), 13-27.

- Nittrouer, C. A., & DeMaster, D. J. (1996). The Amazon shelf setting: tropical, energetic, and influenced by a large river. *Continental shelf research*, 16(5-6), 553-573.
- Nobre Paulo (2018) PIRATA BR-18 cruise, RV Vital de Oliveira.
- Pailler, K., Bourlès, B., & Gouriou, Y. (1999). The barrier layer in the western tropical Atlantic Ocean. *Geophysical Research Letters*, 26(14), 2069-2072.
- Rodrigues, R. R., Rothstein, L. M., & Wimbush, M. (2007). Seasonal variability of the South Equatorial Current bifurcation in the Atlantic Ocean: A numerical study. *Journal of Physical Oceanography*, 37(1), 16-30.
- Saravanan, R., & Chang, P. (1999). Oceanic mixed layer feedback and tropical Atlantic variability. *Geophysical research letters*, 26(24), 3629-3632.
- Schmitz Jr, W. J., & Richardson, P. L. (1991). On the sources of the Florida Current. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 38, S379-S409.
- Schott, F. A., Fischer, J., & Stramma, L. (1998). Transports and pathways of the upper-layer circulation in the western tropical Atlantic. *Journal of Physical Oceanography*, 28(10), 1904-1928.
- Segar, D. A. (1998). *Introduction to ocean sciences*. USA: Wadsworth Publishing Company.
- Sharma, N., Anderson, S. P., Brickley, P., Nobre, C., & Cadwallader, M. L. (2009, October). Quantifying the seasonal and interannual variability of the formation and migration pattern of North Brazil Current Rings. In *OCEANS 2009* (pp. 1-7). IEEE.
- Silva, A. C., Bourlès, B., & Araujo, M. (2009). Circulation of the thermocline salinity maximum waters off the Northern Brazil as inferred from in situ measurements and numerical results. In *Annales Geophysicae* (Vol. 27, No. 5, pp. 1861-1873). Copernicus GmbH.
- Silveira, I. C. A. D., Schmidt, A. C. K., Campos, E. J. D., Godoi, S. S. D., & Ikeda, Y. (2000). A corrente do Brasil ao largo da costa leste brasileira. *Revista Brasileira de Oceanografia*, 48, 171-183.
- Silveira, I. C., de Miranda, L. B., & Brown, W. S. (1994). On the origins of the North Brazil Current. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 99(C11), 22501-22512.
- Stewart, R. H. (2008). *Introduction to physical oceanography*. Robert H. Stewart.
- Stramma, L., & England, M. (1999). On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C9), 20863-20883.
- Stramma, L., & Schott, F. (1999). The mean flow field of the tropical Atlantic Ocean. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 46(1-2), 279-303.
- Talley, L. D. (2011). *Descriptive physical oceanography: an introduction*. Academic press.
- Thomson, R. E., & Fine, I. V. (2003). Estimating mixed layer depth from oceanic profile data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20(2), 319-329.
- Vallès-Casanova, I., Fraile-Nuez, E., Martín-Rey, M., van Sebille, E., Cabré, A., Olivé-Abelló, A., & Pelegrí, J. L. (2022). Water mass transports and pathways in the North Brazil-Equatorial Undercurrent retroflexion. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127(5), e2021JC018150.
- Varona, H. L., Veleda, D., Silva, M., Cintra, M., & Araujo, M. (2019). Amazon River plume influence on Western Tropical Atlantic dynamic variability. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 85, 1-15.
- Vilela, I., Araujo, M., Tyaquicã, P., & Veleda, D. (2018). Empirical orthogonal function analysis of satellite-derived currents in the tropical Atlantic. *Tropical oceanography*, 46(2), 1-24.