



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE OCEANOGRAFIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

FREQUÊNCIA DE EMPUXO NA PLATAFORMA CONTINENTAL AMAZÔNICA RASA

Trabalho apresentado por:

ANDERSON MOVILHA BRAGA

Orientador: Msc. Yuri Onça Prestes (UFPA)

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Rollnic (UFPA)

**BELÉM- PARÁ
2019**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE OCEANOGRAFIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

FREQUÊNCIA DE EMPUXO NA PLATAFORMA CONTINENTAL AMAZÔNICA RASA

Trabalho apresentado por:

ANDERSON MOVILHA BRAGA

Orientador: Msc. Yuri Onça Prestes (UFPA)

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Rollnic (UFPA)

**BELÉM-PARÁ
2019**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

B813f Braga, Anderson Movilha
Frequência de empuxo na Plataforma Continental Amazônica
rasa / Anderson Movilha Braga. — 2019.
xiv, 42 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Me. Yuri Onça Prestes
Coorientador(a): Prof. Dr. Marcelo Rollnic
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Faculdade de
Oceanografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do
Pará, Belém, 2019.

1. Densidade. 2. Empuxo. 3. Rio Amazonas. 4. Rio Pará. 5.
Oceano Atlântico Tropical. I. Título.

CDD 551.46009811



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE OCEANOGRAFIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

FREQUÊNCIA DE EMPUXO NA PLATAFORMA CONTINENTAL AMAZÔNICA RASA

Apresentado por:

ANDERSON MOVILHA BRAGA

Como requisito parcial à obtenção do Grau de Bacharel em Oceanografia

Data de Aprovação: 09/ 07/ 2019

Banca Examinadora:

MSc. Yuri Onça Prestes - Orientador
Mestre em Oceanografia- UFPE

Prof. Dr. Marcelo Rollnic - Coorientador
Doutor em Oceanografia - UFPE

Prof. Dr. Renan Peixoto Rosário - Membro
Doutor em Geofísica Marinha - UFPA

Prof. Dr. Carlos Esteban Delgado Noriega - Membro
Doutor em Oceanografia Física - UFPE

Aos meus pais e minha família, que sempre me
incentivaram e acreditaram em mim.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me abençoar todos os dias e guiar meus passos. Por todas as conquistas e por colocar as melhores pessoas na minha vida.

Aos meus pais, **Valdilene** e **Valdo**, por todo amor, carinho, confiança e ensinamentos. Sei das lutas de vocês para me proporcionar o melhor, mesmo em situações difíceis. Obrigado por me apoiarem e incentivarem sempre em minhas escolhas. Sempre serão a minha base, se hoje estou aqui é por causa de vocês. Isto é para vocês.

À toda minha família, em especial a minha tia **Ana Shirley** e a minha avó **Ana**, por todo incentivo, apoio e suporte dado durante toda a graduação, algumas coisas não teriam sido possíveis sem vocês.

À **Thayane Reis**, por sempre confiar e me apoiar em todas as minhas escolhas durante essa fase da graduação. Por me aguentar nos momentos de desespero e estresse, fazendo eu perceber que sempre tem uma saída. Agradeço por todo amor, carinho e companheirismo. Sua parceria foi essencial.

À Oceanografia 2015 por todos os momentos de descontração, desespero antes das provas e apesar de tudo pela nossa união durante esses 4 longos anos. Especialmente ao **Felipe Alves**, **Yago Brito**, **Haresson Elias**, **Júlio Richard**, **Larissa Martins**, **Renan Mescouto**, **Thamires Salimos**, **Paulo Raphael** pela amizade e momentos únicos como as nossas viagens de campo e congressos, com vocês tudo foi mais divertido, até os momentos mais difíceis. Agradeço a **Luana Freire**, que sempre me ajudou e se fez presente ao longo do curso, valeu pela amizade, pelas brigas e confiança. É nós, Cabeça!!

Aos meus camaradas de Oceano, **Felipe Souza**, **Francisco** (Chico doido), **João Amaral** e o famoso **Hulber Villy**. E claro meu camarada de estádio, **Carlos Kennedy**, que sempre estivemos apoiando o glorioso Clube do Remo, mas sempre me ajudou na vida. estamos juntos!!

Ao meu orientador, **Yuri Prestes** pela amizade e por todos os ensinamentos na oceanografia e para vida. Apesar das correrias, sempre reservou um tempo para me auxiliar no desenvolvimento desse trabalho. Obrigado pelos puxões de orelha, por acreditar em mim e pela confiança dada durante a graduação contribuindo para a minha formação profissional.

Ao meu Coorientador, **Marcelo Rollnic**, por acreditar no meu potencial, e por todas as oportunidades que me foram disponibilizadas.

À toda a equipe do **LAPMAR/LOF** por todo apoio quando foi necessário, principalmente por terem sido cruciais para as coletas de dados. Por tornarem um ambiente de trabalho melhor e pela troca de conhecimento.

“Homem livre, tu sempre gostarás do mar.”

Charles Baudelaire

RESUMO

A Plataforma Continental Amazônica (PCA) rasa está sujeita a interação de forçantes físicas de diferentes fontes, que produzem condições dinâmicas altamente energéticas. Os processos dinâmicos tornam a plataforma amazônica um ambiente único, com elevado aporte continental oriundo de grandes sistemas estuarinos e que formam uma extensa pluma de água doce. Contudo, as informações em relação ao campo de massa da PCA ainda são escassas. O objetivo deste trabalho foi o estudo das variações do campo de densidade na plataforma rasa, na isóbata de 30 m, em um ponto localizado aproximadamente 100 km da foz do Rio Pará ($0^{\circ} 25,73' N/47^{\circ} 41,88' W$). Foram realizados perfis verticais de CTD (*conductivity, temperature and depth*) ao longo de doze meses entre fevereiro de 2018 e janeiro de 2019 (exceto maio e junho), totalizando dez medições. A conversão dos dados de condutividade em salinidade foi calculada por meio da nova equação de estado da água do mar (TEOS-10) para que fossem determinados os valores de Temperatura (T) e Salinidade (S). O campo de densidade foi analisado através da determinação dos valores da frequência de Brunt-Vaisala. Os resultados indicaram que as estratificações de TS ocorrem somente no período de elevada descarga fluvial, com gradientes de $0,7^{\circ}C$ e superiores a 25 unidades de sal. No período de baixa descarga não houve estratificações verticais. O aporte de água doce tem forte influência no campo de densidade na plataforma interna, aumentando as forças de empuxo, o que difere do período mínimo de descarga que não apresentam estratificações e as forças de empuxo são reduzidas. As análises da frequência de Brunt-Vaisala indicaram que os gradientes de temperatura foram mais relevantes (no período de máxima descarga) para o campo de densidade do que os gradientes de salinidade. A partir do diagrama TS foi possível propor valores de densidade para as plumas fluviais dos rios Amazonas e Pará, admitindo que essas plumas não se misturam de imediato, formando três camadas verticais de diferentes densidades (Rio Pará, Rio Amazonas e aporte marinho). Portanto, a natureza amostral instantânea do experimento indicou que a variabilidade do campo de densidade é influenciada somente pelas descargas fluviais dos rios Amazonas e Pará, destacando a importância das variações da temperatura para o fenômeno de anomalia de densidade vertical em um sistema que normalmente é forçado pelos gradientes de salinidade.

Palavras-chaves: Densidade. Empuxo. Rio Amazonas. Rio Pará. Oceano Atlântico Tropical.

ABSTRACT

The Amazon Continental Shelf (ACS) is subject to the interaction of physical forces from different sources, what produces highly energetic dynamic conditions in this environment. This dynamic processes make the ACS a unique environment with a high continental input coming from large estuarine systems that results in an extensive freshwater plume. However, the informations with focus in the mass field of this area is limited. This study aims verify the density field variations in this inner portion (30 m isobath), at approximately 100 km from Pará river mouth ($0^{\circ} 25,73' N/47^{\circ} 41,88' W$). Vertical profiles using a CTD (*conductivity, temperature and depth*) were performed over 12 months, between february 2018 and january 2019 (except may and june), totalizing 10 months of measurements. The conductivity data was converted using a new seawater state equation (TEOS-10), that determines the Temperatura (T) and Salinity (S) values. Brunt-Vaisala values frequency was used to analyze the density field. The results analysis indicated that TS stratification occurs only during the maximum discharge period, with gradients of $0.7^{\circ}C$ and higher than 25 salt units. In the minimum discharge conditions, there is no vertical stratification. The freshwater inputs has a strongly influence in the density field on this inner shelf wichs increasing the buoyancy forces, what differs of minimum discharge period that has no stratification and the buoyancy forces is reduced. Brunt-Vaisala frequency analysis indicated that temperature gradients were more relevant (in maximum discharge period) to the density field than the salinity gradients. From TS diagram it was possible to propose density values for the Amazon and Pará rivers plumes, admitting that these do not mix immediately, resulting in three layers with differents vertical density (Amazon and Pará rivers and ocean waters). Therefore, the instantaneous nature of the experiment indicated that density field variability is influenced only by Amazon and Pará rivers discharges, highlighting the temperature as important parameter in the variation of the density field in a system thats is commonly influenced by salinity gradient.

Keywords: Density. Buoyancy. Amazon River. Pará River. Tropical Atlantic Ocean.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1- Distribuição global das regiões tropicais. As áreas destacadas nos trópicos úmidos, são: o nordeste da América do Sul; Centro-Oeste da África; e arquipélago do Indo-Pacífico (com partes do sudeste da Ásia). Fonte: Adaptado por Yuri Prestes. Dados baseados no *The Times Atlas of The World 1990*. 1
- Figura 2- Variações sazonais de forçantes importantes que influenciam os processos oceânicos na plataforma amazônica. Fonte: Adaptada de Nittrouer *et al.* 1995. 2
- Figura 3- Área de manguezal brasileira em porcentagem da cobertura total de manguezais por estado. O eixo X representa as abreviaturas do estados barasileiros e o eixo Y a área de manguezais em porcentagem. Fonte: Adaptado de Diniz *et al.* 2019. 5
- Figura 4- a) Mapa da América do Sul; b) mapa ilustrativo das Bacias sedimentares Foz do Amazonas, Pará-Maranhão e Barreirinhas. São apresentados os potenciais setores de exploração e bloco de concessão em cada bacia. Também são apresentados unidades de conservação e pontos de pesca e os portos da região da PCA. Fonte: adaptado de Prestes 2016. 6
- Figura 5- Classificação das plataformas continentais de acordo com o clima de cada latitude. Fonte: Castello & Krug 2015. 8
- Figura 6- Mapa ilustrativo da margem continental brasileira. Fonte: Tessler & Mahiques 2000. 10
- Figura 7- Mapa da plataforma continental jurídica brasileira. Fonte: Cavalcanti 2011. 11
- Figura 8- Diagrama de estratificação-circulação de Hansen e Rattray (1966), com eixo alternativo (S_p/F_u) ao parâmetro de circulação, proposto por Prandle (1985). Fonte: Adaptado de Miranda *et al.* 2002. 13
- Figura 9- Mapa da área de estudo. a) mapa da América do Sul e; b) PCA e fisiografias adjacentes. 17
- Figura 10- Imagem ilustrativa do equipamento CTD utilizado para análise verticais do campo de massa (TS) da PCA. 18
- Figura 11- Mapa da área de estudo com a localização do ponto de amostragem na PCA (isóbata de 30 m). 23

- Figura 12- Resultados dos perfis verticais de TS na PCA para os dez meses de medição, sendo: a) fevereiro de 2018; b) março; c) abril; d) julho; e) agosto; f) setembro; g) outubro; h) novembro; i) dezembro de 2018 e; j) janeiro de 2019. 26
- Figura 13- Resultados médios para três camadas verticais: superfície (0 – 10 m), meio (11 – 20 m) e próximo ao fundo (21 – 30 m). a) salinidade; b) temperatura. A legenda diferencia as linhas e marcadores para cada camada vertical. 27
- Figura 14- Perfis verticais de N^2 para os dez meses de medições na PCA, sendo: a) fevereiro de 2018; b) março; c) abril; d) julho; e) agosto; f) setembro; g) outubro; h) novembro; i) dezembro de 2018 e; j) janeiro de 2019. Linha tracejada indica a influência das plumas fluviais. 30
- Figura 15- Diagrama TS temporal para três camadas verticais na área de estudo: superficial (valor médio de TS entre 0 – 10 m profundidade); intermediária (11 – 20 m de profundidade) e; próxima ao fundo (21 – 30 m de profundidade). Também são apresentadas as isopicnais em linhas tracejadas cinza. O retângulo laranja é referente à densidade da pluma do Rio Amazonas e o retângulo roxo à densidade da pluma do Rio Pará. O colorbar representa o primeiro mês de medição (fevereiro de 2018 – amarelo) até o último (janeiro de 2019 – verde escuro). 32

LISTA DE ABREVIACÕES

AMANDES –	<i>AMazon ADEans</i>
AmasSeds –	<i>A Multidisciplinary Amazon shelf Sediment Study</i>
Cenpes –	Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Petrobras
CNB –	Corrente Norte do Brasil
CTD –	<i>Conductivity, Temperature and Depth</i>
DOM –	Matéria Orgânica Dissolvida
MMA –	Ministério do Meio Ambiente
PIATAM –	Proteção Ambiental de Impactos do Transporte de petróleo e Derivados na Amazônia
PC –	Plataforma Continental
PCA –	Plataforma Continental Amazônica
REVIZEE –	Recursos Vivos na Zona Econmica Exclusiva
TS –	Temperatura e Salinidade
TEOS –	<i>International Thermodynamic Equation of Seawater</i>
ZC –	Zona Costeira
ZCA –	Zona Costeira Amazônica
ZCIT –	Zona de Convergência Intertropical
ZEE –	Zona Econmica Exclusiva

LISTA DE SÍMBOLOS

α –	Coeficiente de expansão térmica
β –	Coeficiente de contração salina
C_s –	Velocidade adiabática do som
C_p –	Constante de pressão específica do calor
ε –	Parâmetro de estratificação
g –	Gravidade
Kg.m^{-3} –	Quilograma por metro cúbico
m.s^{-1} –	Metros por segundo
$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ –	Metros cúbicos por segundo
m.s^{-2} –	Metros por segundo ao quadrado
mS.cm^{-1} –	Milisiemens por centímetro
N^2 –	Frequência de Brunt-Vaisala (ou de Empuxo)
p –	Pressão
ρ –	Densidade
S –	Salinidade
S_A –	Salinidade Absoluta
S_v –	Sverdrup ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$)
T –	Temperatura
Ton.ano^{-1} –	Toneladas por ano

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	IV
AGRADECIMENTOS	V
EPIÍGRAFE	VI
RESUMO	VII
ABSTRACT	VIII
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	IX
LISTA DE ABREVIACÕES	XI
LISTA DE SÍMBOLOS	XII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA.....	3
1.2 HIPÓTESE	6
2 OBJETIVOS	7
2.1 OBJETIVO GERAL	7
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
3 ESTADO ATUAL DO CONHECIMENTO	8
3.1 PLATAFORMAS CONTINENTAIS	8
3.2 PROJETO DE PESQUISA NA PCA.....	11
3.3 ANÁLISE DE BRUNT-VAISALA.....	12
4 METODOLOGIA	16
4.1 ÁREA DE ESTUDO.....	16
4.2 AQUISIÇÃO DE DADOS	17
4.3 PROCESSAMENTO DE DADOS	18
5 RESULTADOS	20
VERTICAL DENSITY ANOMALIES: A BRUNT-VAISALA FREQUENCY ANALYSIS ON THE SHALLOW AMAZON CONTINENTAL SHELF	20

5.1 INTRODUÇÃO	21
5.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
5.2.1 Área de estudo	22
5.2.2 Aquisição e processamento de dados	23
5.3 RESULTADOS.....	24
5.4 DISCUSSÃO	28
5.4.1 Variações temporais e verticais de TS	28
5.4.2 A frequência de Brunt-Vaisala	29
5.4.3 Diagrama TS	31
5.5 CONCLUSÕES	33
6 CONTRIBUIÇÕES COMPLEMENTARES	35
REFERÊNCIAS	36

1 INTRODUÇÃO

As regiões tropicais estão localizadas entre 15° N e 15° S (Figura 1). Estas regiões são caracterizadas por elevadas temperaturas (média anual maior que 20 °C) e altos índices de precipitação (médias mensais de 60 mm) e umidade (acima de 80%) (Nittrouer *et al.* 1995). Os ambientes costeiros localizados entre os trópicos apresentam elevada incidência de radiação solar, intenso aporte de água doce, presença de ventos alísios e baixa força de Coriolis devido à proximidade com a região equatorial (Nittrouer & Demaster 1996). As regiões tropicais continentais representam menos de um quarto da superfície terrestre, porém fornecem mais da metade da água, partículas e solutos liberados para o ambiente marinho (Dai & Trenberth 2002, Meybeck 1988, Nittrouer *et al.* 1995).

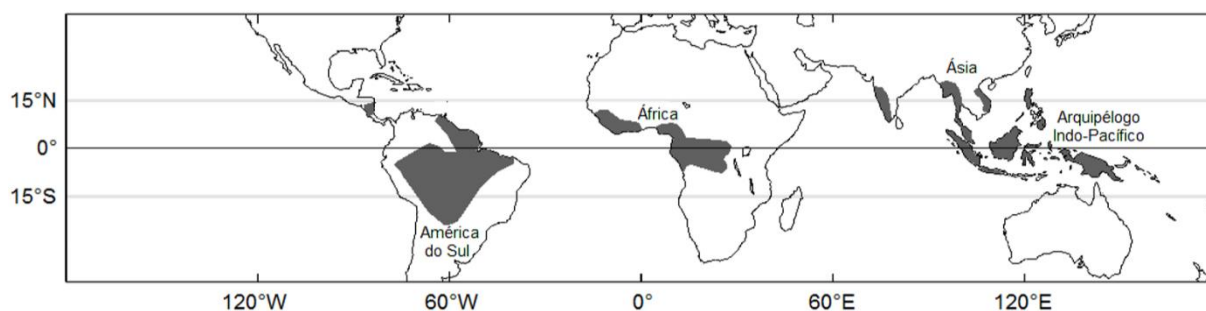


Figura 1- Distribuição global das regiões tropicais. As áreas destacadas nos trópicos úmidos, são: o nordeste da América do Sul; Centro-Oeste da África; e arquipélago do Indo-Pacífico (com partes do sudeste da Ásia). Fonte: Adaptado por Yuri Prestes. Dados baseados no *The Times Atlas of The World 1990*.

As Zonas Costeiras (ZC), baseadas em características físicas, têm sua morfodinâmica frequentemente modeladas por processos oceânicos e continentais. No geral, esses processos estão relacionados aos fatores climáticos, processos geológicos e dinâmicos de cada região, e.g., correntes de maré, descarga fluvial, regime de ventos e movimentos neotectônicos (Ranieri 2014). As ZC's apresentam uma diversidade de ecossistemas que são de grande importância ecológica (Brasil 1997), com destaque para os estuários, manguezais e os ambientes de plataformas continentais.

A Zona Costeira Amazônica (ZCA) é um ambiente com características únicas no âmbito meteorológico e oceanográfico. É uma região tipicamente tropical com elevados índices

pluviométricos e altas temperaturas. Além disso, apresenta uma ampla plataforma continental (~330 Km), regimes de macromaré a hipermaré (6 – 12 m) e elevadas descargas fluviais (Pereira *et al.* 2009). A costa norte do Brasil pode ser dividida em dois setores: O setor 1 abrange a região ocidental com influência da descarga líquida e sólida do Rio Amazonas, do Cabo Orange ao Cabo Maguari na Ilha do Marajó (Souza-Filho *et al.* 2008). O setor 2, abrange a região oriental com a presença da maior linha contínua de manguezais do mundo e o mais bem preservado, tornando a ZCA única entre outras regiões costeiras brasileiras (Diniz *et al.* 2019, Souza-Filho 2005).

A Plataforma Continental Amazônica (PCA), que compõe a ZCA, representa um ambiente de interação entre forçantes de diferentes fontes, produzindo condições dinâmicas altamente energéticas e complexas. Os processos físicos peculiares da PCA são gerados pela intensa descarga fluvial dos rios Amazonas e Pará (Lentz 1995b, Lentz & Limeburner 1995), fortes correntes de marés (Beardsley *et al.* 1995, Gabioux *et al.* 2005), a influência de uma corrente geostrófica de borda oeste, denominada Corrente Norte do Brasil (CNB), que flui para noroeste com velocidade de aproximadamente $1,0 \text{ m.s}^{-1}$ (Bourllès *et al.* 1999, Neto & Silva 2014), transportando em média 26 Sv (Johns *et al.* 1998) e os regimes de ventos na PCA com forte influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e dos ventos alísios (Nikiema *et al.* 2007, Molinas *et al.* 2014). A Figura 2 ilustra as magnitudes de alguns processos dinâmicos da PCA.

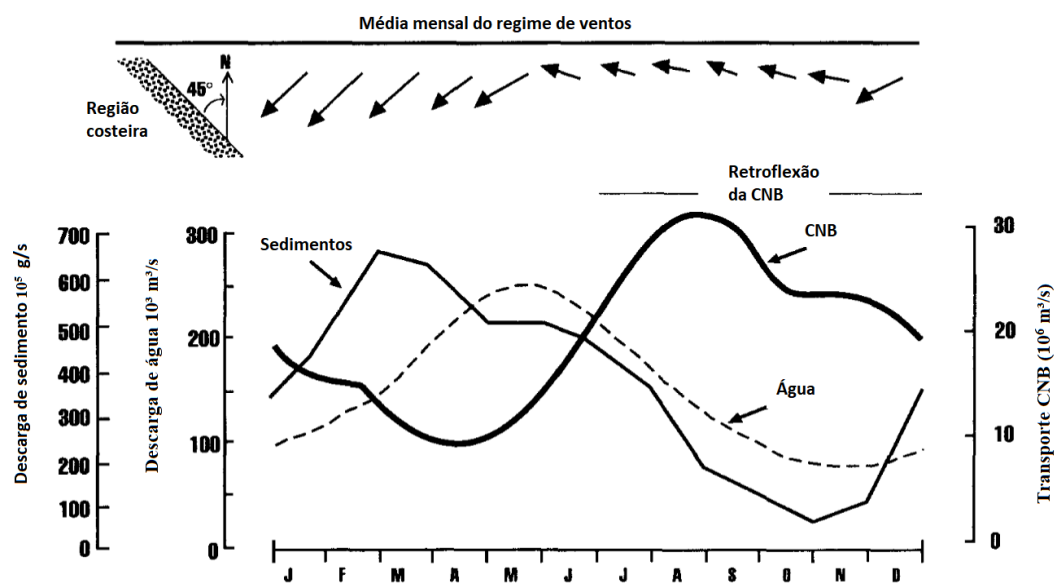


Figura 2- Variações sazonais de forçantes importantes que influenciam os processos oceânicos na plataforma amazônica. Fonte: Adaptada de Nittrouer *et al.* 1995.

O diferencial da plataforma amazônica são as magnitudes dos aportes continentais que tornam o ambiente altamente complexo. O Rio Amazonas o principal sistema fluvial da região apresenta uma descarga líquida de aproximadamente $2,0 \times 10^5 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (Callède *et al.* 2010), sendo que sua bacia hidrográfica é responsável por aproximadamente 20% da água doce mundial (Nittrouer & DeMaster 1986). O segundo principal corpo d'água da região é o Rio Pará, com uma descarga líquida de $2,1 \times 10^4 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (Prestes 2016). A interação dessas fontes de água doce, de diferente densidade, é responsável por gerar fortes correntes de empuxo na porção rasa da plataforma amazônica (Chant 2011).

A Salinidade (S) e a Temperatura (T) constituem o par de parâmetros conservativos que definem a densidade da água. Segundo Stommel (1961), a densidade superficial de águas oceânicas pode ser alterada por processos como: aquecimento e resfriamento que estão relacionados às variações de temperatura e pela precipitação e evaporação que alteram os valores de salinidade superficial. Em plataformas continentais, o campo densidade pode ser alterado pelos processos dinâmicos local que geram gradientes de TS, e.g., correntes de maré, regime de ventos, batimetria e a descarga fluvial.

A PCA é caracterizada por ser um ambiente tropical altamente energético. Dessa forma, este trabalho analisou as variações de gradientes verticais de TS na PCA, em um ponto em frente a foz do Rio Pará, ao longo de um ano. Essa análise permitiu verificar os gradientes de TS em camadas diferentes da coluna d'água. Portanto, o objetivo principal do trabalho foi a análise das oscilações verticais da frequência de empuxo e as alterações no campo de densidade na PCA rasa.

1.1 JUSTIFICATIVA

A costa norte do Brasil sofre com grandes impactos antrópicos, e.g., atividades pesqueiras, indústrias de mineração e especulação imobiliária (El-Robrini *et al.* 2006). Contudo, ainda existem grandes área de preservação e conservação ambiental da flora e fauna amazônica. Devido ao grande interesse econômico na região da ZCA, as políticas devem ser direcionadas para uma concepção baseadas em três aspectos: social (includente), ambiental (sustentável) e econômico (sustentado) (Sachs 2004). Portanto, há necessidade de

aprofundamento dos conhecimentos sobre a dinâmica da região com o intuito de aprimorar o embasamento científico local.

A ZCA é altamente dinâmica e é banhada por dois grandes sistemas fluviais: Rio Amazonas e Pará. A região se destaca por três principais usos socioeconômicos: as atividades portuárias, a exploração de petróleo e gás e as pescas artesanal/industrial (Rosário 2016). Essas atividades podem gerar impactos relevantes para a dinâmica da plataforma continental adjacente.

O litoral do norte do Brasil tem grande potencial para atividade pesqueira devido à presença desses grandes rios que transportam elevados volumes de matéria orgânica, tornando a região propícia para atividade (Isaac 2006). A atividade pesqueira na ZCA é bastante complexa e possui várias unidades denominadas de “sistema de produção pesqueira” que englobam desde pescador artesanal até o industrial e que apresentam estruturas particulares de tecnologia, economia, ecologia e social (Isaac *et al.* 2009). A pesca artesanal é relevante no âmbito econômico e social da ZCA, pois é responsável por 93% da produção marinha do Pará e emprega mais de 40.000 indivíduos (Isaac *et al.* 2009).

Atualmente, a atividade de exploração de óleo e gás natural têm se intensificado na área conhecida como Província Equatorial (região da costa Ceará até a Ilha do Marajó/PA) (Luczynski 2015). Na ZCA, as bacias sedimentares de interesse econômico são da Foz do Amazonas e Pará-Maranhão. A bacia da Foz do Amazonas começou a ser explorada na década de 1970 em águas rasas (até 100 m), enquanto a bacia Pará-Maranhão era conhecida desde a década de 80 (Prestes 2016). Esse novo cenário econômico gerou a necessidade de obter novos conhecimentos da região para posterior exploração e produção. Da mesma forma, houve a necessidade de estudo relacionada aos impactos ambientais, visto que essa atividade causou o aumento do tráfego marítimo e modificações no meio.

A ZCA é caracterizada pela presença de grandes portos, principalmente no estuário do Rio Pará, que intensificam o tráfego de embarcações, e.g., Porto Vila do Conde, no município de Barcarena; Porto de Belém; e o Terminal Petroquímico do Miramar, em Belém (Rosário 2016). A localização da PCA é um atrativo, tendo em vista que está próximo das rotas de navegação que ocorrem no canal do Panamá, contribuindo para o aumento do número de embarcações para carga/descarga e abastecimento (Prestes 2016). As atividades envolvendo óleo combustível representam um fator de risco ao ambiente natural, como apresentado no

estudo feito por Rodrigues (2008) para o principal porto da região do Rio Pará, o porto da Vila do Conde.

Os acidentes com derrames de óleo podem trazer consequências graves para região costeira amazônica. Segundo Souza-filho *et al.* (2009), a área apresenta grau de sensibilidade elevado em comparação com outras ZC's em escala global, muito em razão de suas características geomorfológicas (planícies lamosas e arenosas) e alta energia das marés, ondas e descarga fluvial. Além disso, a ZCA possui o mais bem preservado ecossistema de manguezais do mundo (Souza-Filho 2005), assim como a maior cobertura da área de manguezal do Brasil (Figura 3), com aproximadamente 7280 km² (Diniz *et al.* 2019).

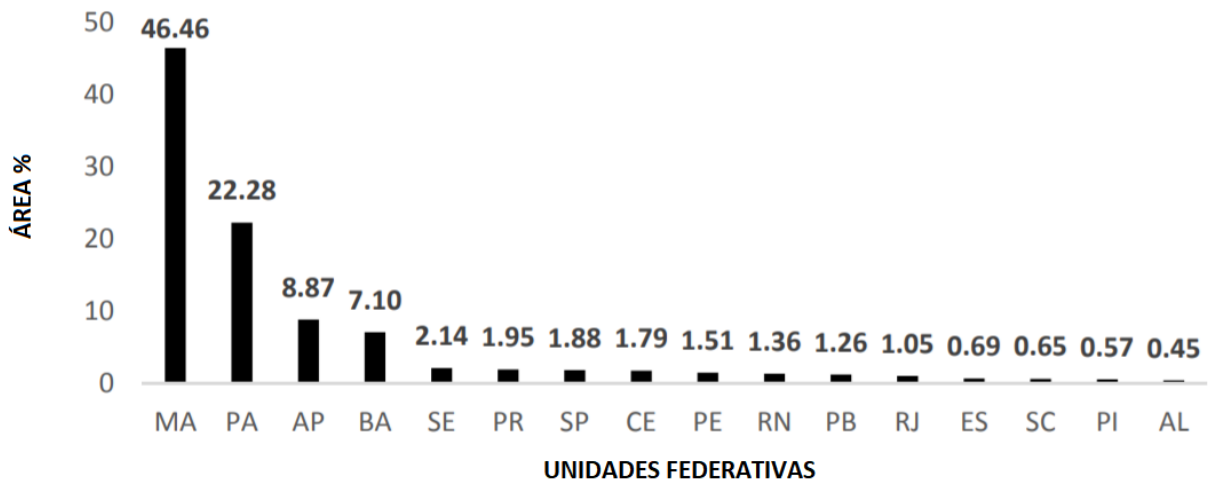


Figura 3- Área de manguezal brasileira em porcentagem da cobertura total de manguezais por estado. O eixo X representa as abreviaturas do estados barasileiros e o eixo Y a área de manguezais em porcentagem. Fonte: Adaptado de Diniz *et al.* 2019.

A Figura 4 exhibe os locais onde ocorrem as principais atividades socioeconômicas desenvolvidas na ZCA. Com o novo cenário econômico de exploração de petróleo e gás natural na plataforma amazônica, o subsídio científico é necessário para embasar medidas de preservação ambiental, avaliação de impactos em casos de acidentes e contribuir para o conhecimento dos processos dinâmicos, principalmente em uma região extremamente sensível em aspectos ambientais.

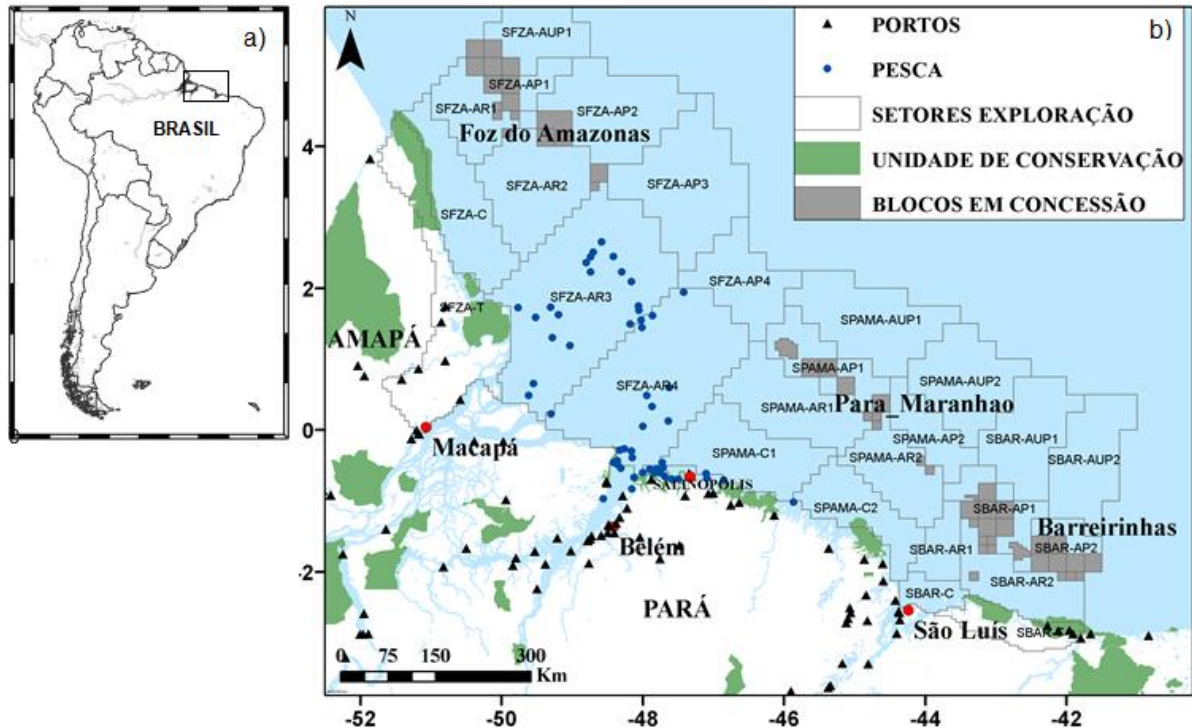


Figura 4- a) Mapa da América do Sul; b) mapa ilustrativo das Bacias sedimentares Foz do Amazonas, Pará-Maranhão e Barreirinhas. São apresentados os potenciais setores de exploração e bloco de concessão em cada bacia. Também são apresentados unidades de conservação e pontos de pesca e os portos da região da PCA. Fonte: adaptado de Prestes 2016.

1.2 HIPÓTESE

O elevado aporte de águas doces provenientes dos rios Amazonas e Pará, aliados aos processos dinâmicos que ocorrem na PCA, são conhecidos a partir de publicações geradas por meio de inúmeros projetos de pesquisa científica. Entretanto, as características do campo de massa desses dois sistemas continentais ainda são pouco conhecidas. São diversos fatores geomorfológicos e sedimentológicos que poderiam gerar diferentes traçadores para estas plumas e, conseqüentemente, diferente campo de massa.

Levando em consideração a necessidade de aprofundamento dos conhecimentos da dinâmica do campo de massa da PCA, foi formulada a seguinte hipótese: o aporte continental proveniente dos rios Amazonas e Pará causa alterações sazonais no campo de densidade da PCA. Os gradientes de temperatura alteram a estrutura vertical de densidade na PCA rasa. A pluma do Rio Amazonas, por apresentar maiores valores de temperatura, possui maior densidade que a pluma do Rio Pará. A diferença de densidade entre as plumas permite uma sobreposição de massas de água, sugerindo a formação de três camadas verticais na PCA rasa (Rio Pará, Rio Amazonas e aporte marinho).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é o estudo das variabilidades sazonais e verticais do campo de densidade em um ponto da PCA localizado a 100 km da foz do estuário do Rio Pará, na isóbata de 30 m. Para que o objetivo geral seja atingido, foi necessário esclarecer algumas questões. Portanto, foram estabelecidos objetivos específicos a seguir.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- A análise da estrutura vertical de TS e do diagrama TS temporal na PCA rasa ao longo de doze meses;
- Calcular a frequência de Brunt-Vaisala (Empuxo) a partir dos perfis verticais de TS na PCA rasa;
- Determinar a variabilidade sazonal e vertical do campo de densidade na PCA rasa;
- Propor valores de densidade a partir de traçadores de TS entre as plumas dos rios Amazonas e Pará na PCA rasa.

3 ESTADO ATUAL DO CONHECIMENTO

3.1 PLATAFORMAS CONTINENTAIS

A extensão rasa, submersa e declive suave que circunda os continentes é denominada de Plataforma Continental (PC) (Figura 5). A área da PC corresponde a 7,4% da área do oceano (Garrison 2010). É uma região que se estende da costa em direção à bacia oceânica com declividade média de 1:1000 (a cada 1000 m horizontais, a profundidade aumenta 1,0 m) (Schmiegelow 2004). A melhor forma de definir a PC é associando os critérios como a profundidade e declividade local. A largura e profundidade das PC's são bastante variáveis, em média a largura fica em torno de 75 km, contudo em algumas regiões podem ser superiores a 700 km, da mesma forma a profundidade que em média é de 130 m, mas podem alcançar mais de 400 m de profundidade (Castello & Krug 2015).

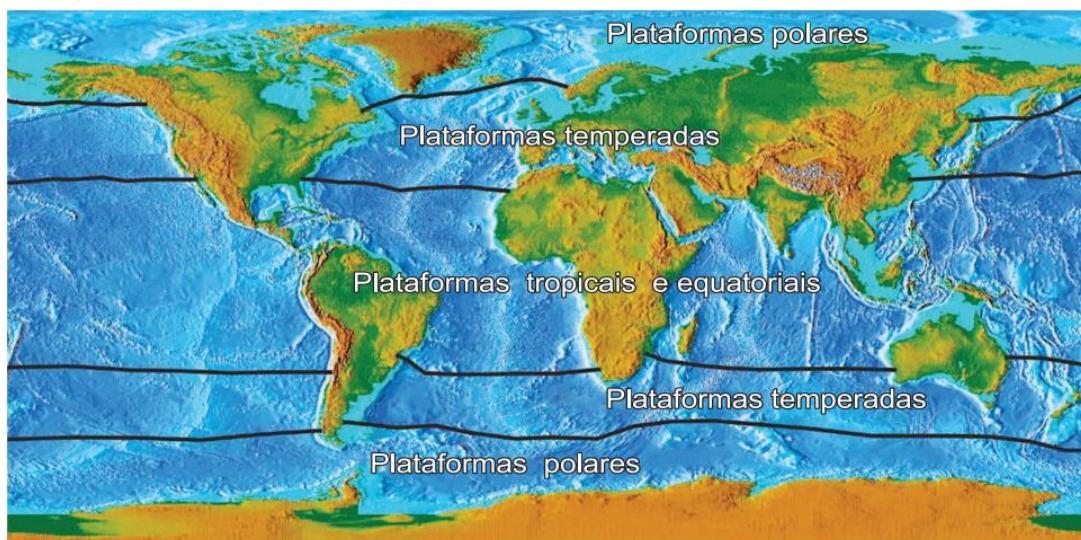


Figura 5- Classificação das plataformas continentais de acordo com o clima de cada latitude. Fonte: Castello & Krug 2015.

De forma geral, as PC's podem ser divididas em uma parte interna, que vai da linha de costa até a profundidade de 50 m, e a região externa, entre profundidade de 50 m até a zona de quebra (início do talude continental). A PC pode conter várias feições, como montanhas, depressões, rochas sedimentares e depósitos de petróleo e minerais. Essas características variam de acordo com as latitudes, conforme são apresentados na Figura 5.

As plataformas polares ou de clima frio estão localizadas em altas latitudes (Figura 5). Apresentam características marcantes, como largura irregular e influenciadas por processos morfoclimáticos, como geleiras litorâneas, bancos de gelo (Castello & Krug 2015). Esta região é foco de vários estudos no campo da oceanografia física, e.g., o trabalho realizado por Danielson *et al.* (2011), sobre a variabilidade do parâmetro TS no Mar de Bering. Em plataformas glaciais, como na plataforma Antártica, um exemplo recente é o estudo de McConnochie & Kerr (2016).

As plataformas de clima temperado abrangem as latitudes entre 30 – 60° em ambos os hemisférios (Figura 5). São plataformas que apresentam largura moderada com topografias submarinas menos acidentadas com variadas formas e podem ser subdivididas em: plataformas de franjas e subpolares; plataformas de zonas intermediárias; e plataformas de zonas temperadas quentes (Castello & Krug 2015). Alguns estudos foram realizados levando em consideração os processos físicos, como o estudo feito por Acha *et al.* (2004).

As plataformas de climas tropicais e equatoriais estão localizadas entre 30° norte e sul (Figura 5). A hidrodinâmica é influenciada pela ação de ventos, ciclones, ondas de grande amplitude e elevadas descargas fluviais. Além disso, as condições climáticas determinam características únicas desses sistemas, que pode ser genericamente subdividido em: plataformas áridas desprovidas de aportes continentais e plataformas sob ação de intenso aporte fluvial (Castello & Krug 2015). Para exemplificar essas plataformas, destaca-se a margem continental brasileira (Figura 6). No Brasil, a sua maior largura está localizada na foz do Rio Amazonas, atingindo cerca de 330 km, enquanto a menor largura encontra-se próximo de Salvador com cerca de 8 km de extensão (Gurgel 2015).

O foco desse trabalho está relacionado à PC tropical amazônica, que está localizada no extremo norte do Brasil. Esta plataforma é condicionada tanto pelos processos oceânicos quanto pelo continente (Goes & Ferreira 2017). É um sistema sedimentar complexo que apresenta diversas reentrâncias ao longo dos estuários, com inúmeras enseadas e baías por centenas de quilômetros em suas bacias hidrográficas (Gabioux 2002).

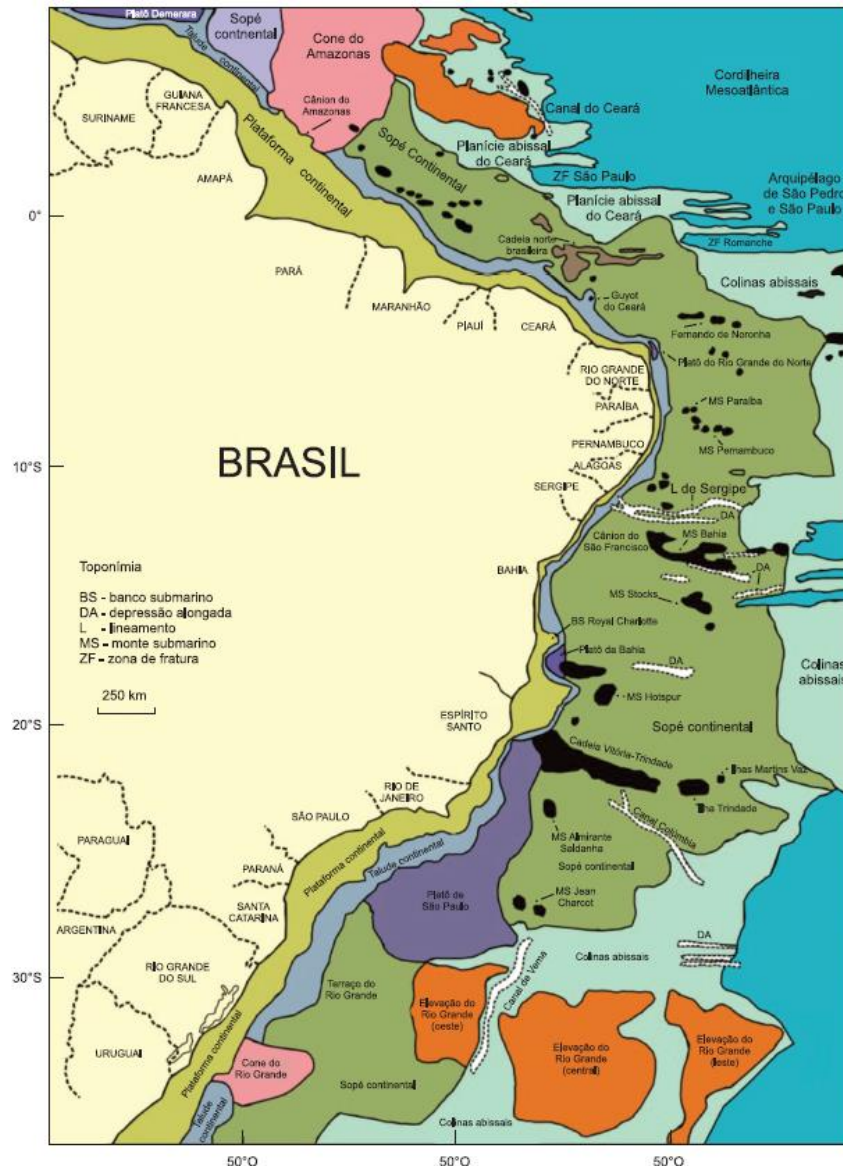


Figura 6- Mapa ilustrativo da margem continental brasileira. Fonte: Tessler & Mahiques 2000.

A PC faz parte da Zona Econômica Exclusiva brasileira (ZEE), presente na Constituição Brasileira de 1988 e abrange uma região de 12 a 200 milhas náuticas a partir das linhas de base, que servem para medir a largura do mar territorial (Cavalcanti 2011). As plataformas continentais são regiões de grandes riquezas marinhas e sedimentares, no qual o estado possui o direito de explorar e aproveitar os recursos nelas presentes, de modo que esses recursos compreendem os minerais, os recursos não vivos no leito do mar e subsolo bem como os organismos vivos (Cavalcanti 2011, MMA 2006). A Figura 7 representa a plataforma continental jurídica em que o estado brasileiro tem direito.

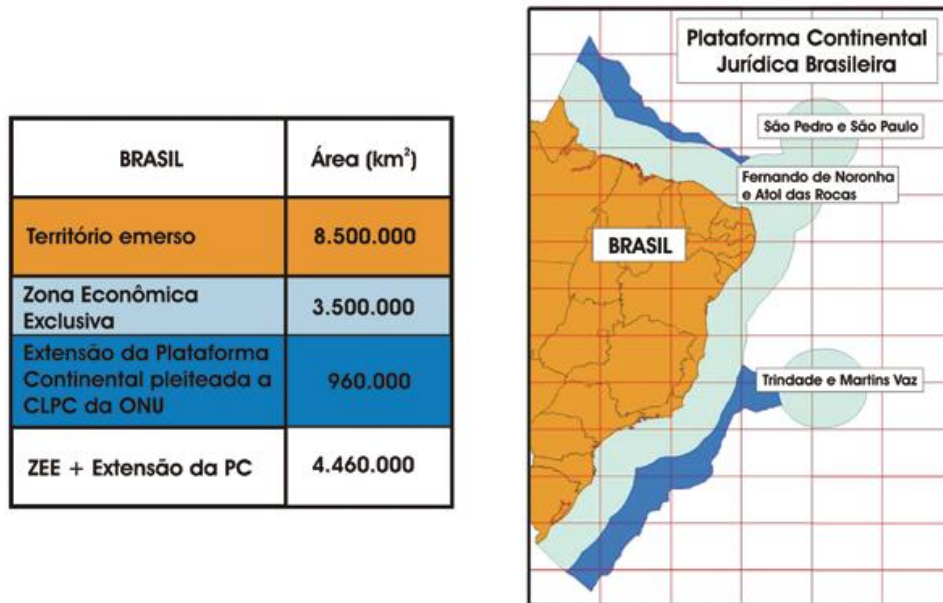


Figura 7- Mapa da plataforma continental jurídica brasileira. Fonte: Cavalcanti 2011.

3.2 PROJETO DE PESQUISA NA PCA

Desde a década de 80, a PCA tem sido o centro de vários projetos de pesquisa científica. As singularidades dessa região e a dinâmica dos processos físicos vêm chamando a atenção de pesquisadores e institutos de pesquisas nacionais e internacionais. O desenvolvimento de atividades socioeconômicas contribuiu para a necessidade de adquirir conhecimento e subsídios científicos sobre a região. A seguir serão apresentados os principais projetos de pesquisas desenvolvidas na PCA.

O primeiro grande projeto de pesquisa desenvolvida na PCA foi o projeto elaborado pelos Estados Unidos (EUA), o *A Multidisciplinary Amazon Shelf Sediment Study* (AmasSeds). O projeto teve duração de 1980- 1991 com o objetivo principal de investigar o conjunto de processos oceânicos e estuarinos que afetam e/ou são afetados pela descarga de água doce e partículas de sedimentos do rio Amazonas (AmasSeds Group 1991). Esse projeto foi responsável por gerar uma das maiores coletâneas de artigos científicos sobre a PCA, que serviram de subsídios para outros projetos científicos. O trabalho de Nittrouer & DeMaster (1996) apresentou as principais características da PCA, indicando processos físicos, geológicos e químicos. Outros trabalhos foram específicos na área da oceanográfica física, como Beardsley *et al.* (1995), Geyer *et al.* (1996), Lentz (1995a).

Outro grande projeto internacional na PCA, realizado pelos franceses, foi o *AMazon ADEanS* (AMANDES). As campanhas ocorreram entre 2007 – 2009 no estuário do Rio Amazonas e na plataforma adjacente. O objetivo geral foi entender os fluxos físicos e químicos do continente ao oceano. O projeto AMANDES teve como foco principal as trocas físico-químicas no estuário do Rio Amazonas e na plataforma continental, quantificando os impactos nas massas de água do Atlântico (Le Bars *et al.* 2010). Vários estudos foram gerados a partir desse projeto, e.g., Le Bars *et al.* (2010), Prestes *et al.* (2018) e Rosseau *et al.* (2015).

No âmbito nacional, o primeiro grande projeto foi o Programa de Avaliação do Potencial Sustentável de Recursos Vivos na Zona econômica Exclusiva (REVIZEE). O programa teve início em 1995, com objetivo geral de realizar um levantamento dos potenciais sustentáveis de captura dos recursos vivos e fatores abióticos na ZEE (MMA 2006). Esse programa foi importante para o Brasil, pois garantiu os direitos e responsabilidade de exploração, conservação e gestão dos recursos vivos ou não vivos de suas ZEE's. Os resultados desse programa originaram vários artigos científicos, como de Araujo *et al.* (2018), Neto & Silva (2014) e Silva *et al.* (2005, 2007, 2010).

Outro projeto nacional foi o de Proteção Ambiental Impactos do Transporte de Petróleo e derivados na Costa Amazônica (PIATAM), que foi um projeto de pesquisa tecnológica financiada pelo Centro de pesquisa e Desenvolvimento da Petrobras (Cenpes). Esse projeto teve foco principal no desenvolvimento de mapas de sensibilidade ambiental de derramamento de óleo na região costeira amazônica. Em 2003 teve início às atividades de mapeamento nas bacias do Ceará e Potiguar, Espírito Santo e sul da Bahia (MMA 2007). Para o litoral norte do Brasil, o processo de criação ocorreu somente no ano de 2012.

Atualmente, um novo projeto está em desenvolvimento, denominado “Desenvolvimento de metodologia para o entendimento dos processos costeiros e definição da vulnerabilidade de manguezais das bacias do Pará-Maranhão e Foz do Amazonas – Costa Norte”. O presente estudo foi viabilizado financeiramente e tecnicamente no âmbito do Projeto Costa Norte na PCA, ao longo do ano de 2018 até o primeiro semestre de 2019.

3.3 ANÁLISE DE BRUNT-VAISALA

Para determinação da estabilidade da água frente às oscilações de densidade, analisa-se o gradiente vertical da densidade, com isso é possível determinar se o fluido resiste ao

movimento vertical (estável), ou se o fluido tende a mover verticalmente (instável). As estratificações são definidas pelos gradientes de densidade que são consequências das variações de temperaturas e salinidade (Li *et al.* 2015). A seguir serão apresentadas as principais formas de análises de estratificações verticais densidade e do campo de massa.

Uma das primeiras formas de análise de estratificações e mistura foi à utilização do digrama de estratificação-circulação de Hansen & Rattray (1996) (Figura 8). Em ambientes estuarinos os processos de estratificação vertical são gerados por gradientes de densidade entre a água do mar e a água doce, gerando fluxos convectivos que são chamados de “circulação gravitacional”. A partir desse diagrama foi possível classificar os estuários litorâneos segundo uma sequência de tipos de mistura (Hansen & Rattray 1966). Alguns estudos utilizaram esse método de análise de estratificações, como Andutta *et al.* (2013) e Miranda *et al.* (2012).

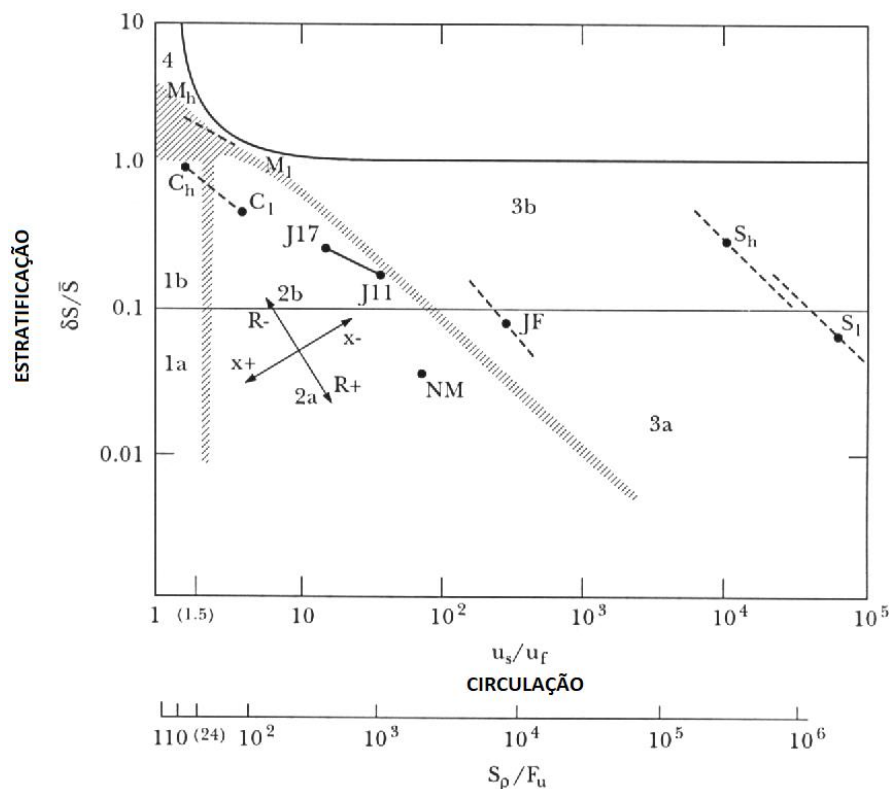


Figura 8- Diagrama de estratificação-circulação de Hansen e Rattray (1966), com eixo alternativo (S_ρ/F_u) ao parâmetro de circulação, proposto por Prandle (1985). Fonte: Adaptado de Miranda *et al.* 2002.

Atualmente, outras formas metodológicas mais sofisticadas são utilizadas para análises verticais do campo de densidade. Em plataformas continentais de diferentes latitudes é possível

que o campo de densidade seja alterado por diversos processos dinâmicos, como ressurgências costeiras (Ramírez *et al.* 2019), sazonalidade de monções (Roseli *et al.* 2015) e por ondas internas (Hall *et al.* 2013). Dessa forma, para identificar as variabilidades da estrutura vertical de regiões costeiras e oceânicas é necessária a utilização do cálculo da frequência de Brunt-Vaisala.

A frequência de Brunt-Vaisala é um dos importantes descritores da estrutura vertical de regiões oceânica e costeira, ao longo dos anos vários métodos surgiram para estimar a frequência da força de empuxo. De forma geral, essa frequência é apresentada como N^2 sendo um indicador de condições de estabilidade estática na coluna d'água. Segundo Mann & Lazier (1991) a frequência de Brunt-Vaisala ocorre após a pycnoclina ser deslocada da sua posição de equilíbrio e iniciar uma oscilação livremente sob ação de uma força restauradora, resultante principalmente do empuxo e do peso.

Alguns trabalhos comparam os diferentes métodos utilizados para o cálculo de Brunt-Vaisala. O Trabalho de Millard *et al.* (1990) destaca a diferença entre três métodos que são amplamente utilizados pela comunidade científica em estudos oceanográficos, destacando o método de nivelamento de anomalia estática adiabática, o método de Hesselberg-Sverdrup e o método de correlação adiabática (ou velocidade do som).

Outros trabalhos destacam também as diferentes formas de calcular a frequência de Brunt-Vaisala. O estudo feito por King *et al.* (2012), sobre a reflexão de ondas de gravidade interna em topografias, destaca duas formas de cálculo da frequência de empuxo que foram eficazes e que estão ganhando espaço no meio científico. Esses autores admitiram que os movimentos são adiabáticos. Assim, a primeira forma leva em consideração os termos de gradiente vertical de densidade *in situ* ρ :

$$N^2 = g^2 \left(\frac{d\rho}{dp} - \frac{1}{c_s^2} \right) \quad (1)$$

onde g é a aceleração da gravidade, p é a pressão e C_s é a velocidade adiabática do som.

Outra expressão destacada é em termos de gradiente verticais de temperatura e salinidade absoluta (SA):

$$N^2 = \rho g^2 \left(\alpha \left[\frac{\alpha T}{\rho c_p} - \frac{dT}{dp} \right] + \beta \frac{dS_A}{dp} \right) \quad (2)$$

onde α é o coeficiente de expansão térmica, β é o coeficiente de contração salina, p é a pressão, ρ é a densidade, T é a temperatura ($^{\circ}K$), S_A é salinidade absoluta e C_p é uma constante de pressão específica do calor.

O método da frequência de Brunt-Vaisala já foi utilizado na região da PCA, porém em análises de ondas internas (Gurgel 2015, Watanabe 2014), em relação a influência da pluma do Amazonas-Orinoco e intensificação de ciclones tropicais (Hernandez *et al.* 2016) e na dinâmica de frente salina (Molinas 2014) entre outros. No entanto, não há estudo específicos sobre o campo de densidade da plataforma tropical amazônica, considerando os dois principais sistemas fluviais amazônicos. Portanto, esse é um trabalho pioneiro que abre um leque de possibilidades pra estudos futuros, de modo a contribuir para o embasamento científico da região.

4 METODOLOGIA

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende a PCA, mais precisamente no ponto ($0^{\circ} 25,73' N/47^{\circ} 41,88' W$) situado próximo a isóbata de 30 m (Figura 9). A PCA fica adjacente à zona costeira do norte do Brasil, com uma extensão de aproximadamente 1.300 km (Coutinho 1996), com a largura variando ao longo da sua extensão alcançando o seu máximo de 330 km em frente à foz do Rio Amazonas (Flood & Damuth 1987). A PCA é caracterizada por ser uma plataforma ampla e rasa, com isóbata de 20 m afastada mais de 200 km em algumas regiões da PCA (Gabioux 2002). A PCA se estende até a isóbata de 100 m, onde inicia o talude continental (Nittrouer & DeMaster 1986).

O clima da região se configura como quente e úmido, com estações bem definidas, seca (julho a dezembro) e chuvosa (janeiro a maio), com uma precipitação média anual variando de 2500 a 3000 mm anuais e a temperatura em torno de $26^{\circ} C$ (Moraes *et al.* 2005). O clima da região é controlado pelas mudanças sazonais das linhas de instabilidade e principalmente pela ZCIT, que durante agosto-setembro permanecem em torno de $14^{\circ} N$ e em março e abril permanece em torno de $2^{\circ} S$ (Souza-Filho *et al.* 2009).

O regime de ventos local está associado a forte ação da ZCIT e das variações sazonais dos ventos alísios de sudeste e nordeste. Os ventos alísios de nordeste predominam durante dezembro a maio, com intensidades médias mensais que chegam a $18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ em fevereiro, enquanto os ventos de sudeste ocorrem durante junho a novembro com intensidade de $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Nikiema *et al.* 2007, Nittrouer & DeMaster 1996).

A PCA está localizada em uma região tropical, próximo ao equador, o que reduz o efeito da força de Coriolis. É uma região com elevado aporte de água doce, o Rio Amazonas apresenta elevada descarga fluvial média da ordem de $10^5 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, enquanto o Rio Pará tem magnitude de aporte continental com apenas uma ordem de grandeza menor, $10^4 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (Borba & Rollnic 2016, Prestes *et al.* 2014, Prestes 2016). A estimativa de transporte de material em suspensão é de aproximadamente $1,2 \times 10^9 \text{ ton}\cdot\text{ano}^{-1}$ e de $2,3 \times 10^8 \text{ ton}\cdot\text{ano}^{-1}$ de material dissolvido, entre o Rio Amazonas e a PCA (Meade *et al.* 1985, Milliman & Meade 1983). A maré é uma forçante importante na PCA, as marés são semidiurnas e se amplificam próximo a região costeira, sendo a principal componente harmônica é a lunar M_2 (Beardsley *et al.* 1995).

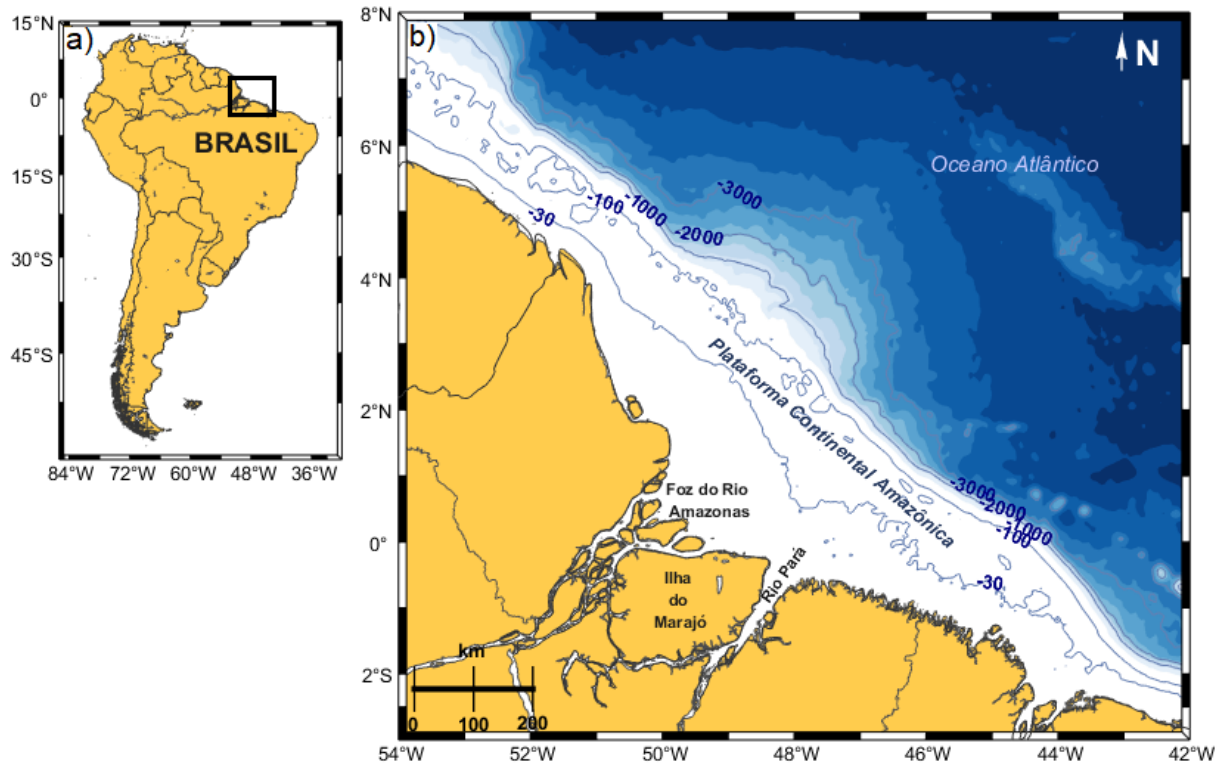


Figura 9- Mapa da área de estudo. a) mapa da América do Sul e; b) PCA e fisiografias adjacentes.

4.2 AQUISIÇÃO DE DADOS

A aquisição de dados hidrográficos ocorreu no âmbito do Projeto Costa Norte, na porção leste da PCA em frente à foz do Rio Pará. Os cruzeiros oceanográficos ocorreram mensalmente, durante as condições de maré de sizígia na PCA, que tiveram início em fevereiro de 2018 e foram finalizados em janeiro de 2019 (período de doze meses). Com exceção dos meses de maio (que não foi realizado) e junho, todos os meses tiveram aquisição de dados completos, com um total de dez medições.

A aquisição dos dados de TS para análise do campo de massa da PCA foi obtido por meio de perfis verticais de CTD (*conductivity, temperature and depth*) modelo *SeaBird SBE-37SM* com uma frequência amostral de 0,2 Hz, i.e., o equipamento armazena um dado a cada cinco segundos (Figura 10). Esse equipamento tem uma acurácia de $0,0003 \text{ mScm}^{-1}$ para a condutividade, de $0,002 \text{ }^{\circ}\text{C}$ para a temperatura e de 0,1% para o sensor de pressão.



Figura 10- Imagem ilustrativa do equipamento CTD utilizado para análise verticais do campo de massa (TS) da PCA.

4.3 PROCESSAMENTO DE DADOS

O processamento de dados esteve de acordo com o trabalho sobre análises de dados oceanográficos físicos de Emery & Thomson (1997). Como a região de estudo está localizada em uma plataforma rasa com a profundidade de aproximadamente 30 m, não foi necessário o ajuste para temperatura potencial.

Para a conversão dos dados de condutividade em salinidade, foi utilizada a nova equação do estado da água do mar. Foi utilizado um pacote computacional “*gsw_seawater*” que está de acordo com o TEOS-10 (*International Thermodynamic Equation of Seawater 2010*). Dessa forma, foi possível gerar os gráficos de perfis verticais de salinidade e temperatura (°C). Com base nessa equação, a densidade da água do mar pode ser representada a partir das funções de salinidade, temperatura e pressão: $\rho(S, t, p)$. Nos pacotes computacionais, a densidade da água do mar ρ tem como unidade: kg.m^{-3} .

Para a análise do campo de densidade, foi calculada a frequência de Brunt-Vaisala (N^2) que também é conhecido como frequência de empuxo. A frequência de empuxo representa estabilidades verticais relacionadas às estratificações na coluna d’água causadas pelos gradientes de salinidade e temperatura. A frequência de empuxo foi calculada para todos os meses de coleta a partir dos dados de perfis verticais de CTD. Para o cálculo dessa grandeza foi utilizado a seguinte equação:

$$N^2 = -\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (3)$$

em que ρ é a densidade (kg.m^{-3}), g representa a aceleração da gravidade (m.s^{-2}) e $\partial\rho/\partial z$ representa os gradientes de densidade em função da profundidade. Este tipo de análise é relevante para os estudos da variabilidade vertical das picnoclinas na PCA, em que a frequência

de Brunt-Vaisala (N^2) apresenta valores máximos geradas pelos gradientes no campo de massa de acordo com os resultados de TS.

O parâmetro adimensional de estratificação foi utilizado por Hansen & Rattray (1966) em seu diagrama de estratificação-circulação para classificação dos estuários. Geralmente, o parâmetro de estratificação, é calculado com base nos gradientes de salinidade. No presente estudo o cálculo foi baseado nos gradientes de TS para cada mês de coleta, de modo a identificar qual parâmetro é responsável pela estrutura vertical. Dessa forma, o parâmetro de estratificação é calculado pela seguinte fórmula:

$$\varepsilon = \frac{(T)B - (T)s}{(T)} \quad \varepsilon = \frac{(S)B - (S)s}{(S)} \quad (4)$$

onde $(T)B$ e $(S)B$ são os valores de TS de fundo; $(T)s$ e $(S)s$ são os valores de TS em superfície; e (T) e (S) é o resultado médio de TS ao longo da profundidade. Para condições homogêneas $\varepsilon = 0$, enquanto para condições de estratificação de densidade vertical máxima, os valores de variação vertical devem ser $\varepsilon > 0,5$.

5 RESULTADOS

A seguir será apresentado o artigo elaborado com base nos resultados de TS e análise da frequência de empuxo na PCA. O manuscrito apresenta os resultados gerais com base nos perfis verticais de CTD. O artigo tem como objetivo principal analisar as variações do campo de densidade e a interação entre as plumas dos rios Amazonas e Pará. Por uma questão de conveniência no processamento dos dados, as figuras e a tabela a seguir referentes ao artigo científico estão na língua inglesa. Os autores desse artigo são:

BRAGA, ANDERSON. M.^A; O. PRESTES, YURI.^A; SANTANA, LEANDRO, S.^A; SILVA, IRANILSON O.^A; ROLLNIC, MARCELO.^A;

^a *Laboratório de Pesquisa em Monitoramento Ambiental Marinho, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará – LAPMAR/IG/UFPA, Belém, Pará, Brazil*

VERTICAL DENSITY ANOMALIES: A BRUNT-VAISALA FREQUENCY ANALYSIS ON THE SHALLOW AMAZON CONTINENTAL SHELF

RESUMO

As condições altamente energética e complexa na Plataforma Continental Amazônica (PCA) é o resultado de interações entre forças derivadas de diferentes fontes, como as marés, ventos, Corrente Norte do Brasil e elevada descarga fluvial dos rios Amazonas e Pará. O volume de água doce que entra no oceano atlântico tropical, produz extensas plumas fluviais que alteram os valores de Salinidade (S) e Temperatura (T). O objetivo principal foi analisar as variações do campo de densidade da PCA e a interação das plumas fluviais dos rios Amazonas e Pará. Os dados de TS foram obtidos por perfis verticais de CTD (*conductivity, temperature and depth*) para análise do campo de densidade. Os cruzeiros ocorreram entre fevereiro de 2018 e janeiro de 2019 com medições mensais, na isóbata de 30 m da PCA, no âmbito do Projeto Costa Norte. Os resultados mostram que, as estratificações na PCA ocorrem somente no período de elevada descarga fluvial. A presença de água doce aumenta as forças de empuxo, gerando estruturas verticais estáveis de densidade. A análise da frequência de empuxo indica que $N^2 > \log_{10}(-4)$ representa a influência das plumas fluviais. As diferenças de N^2 junto com os resultados de TS indicaram que o aumento das forças de empuxo foi em virtude da diferença de temperatura entre as plumas do Rio Amazonas e Rio Pará. Os diagramas TS apontaram que a pluma do Rio Amazonas apresentou maior temperatura que a do Rio Pará, devido maior volume de material

em suspensão e dissolvido. As anomalias de densidade vertical da PCA, pode ser alterado por gradientes de temperatura, mesmo que o sistema seja forçado por variações na salinidade.

Palavras-chaves: Densidade. Empuxo. Rio Amazonas. Rio Pará. Oceano Atlântico Tropical.

5.1 INTRODUÇÃO

A Plataforma Continental Amazônica (PCA) representa um ambiente de interação entre forçantes de diferentes fontes, produzindo condições dinâmicas altamente energéticas e complexas. As correntes de maré estão dentre as forçantes mais importantes para a dinâmica da região, onde a constituinte de maré semidiurno (M_2) representa 70% da elevação total de maré na PCA (Beardsley *et al.* 1995, Gabioux *et al.* 2005). Ao longo da quebra da PCA atua uma forte corrente de borda ocidental, a Corrente Norte do Brasil (CNB), que flui para noroeste com velocidade de aproximadamente $1,0 \text{ m.s}^{-1}$ (Bourllès *et al.* 1999; Neto & Silva 2014). A circulação na plataforma é principalmente forçada pela ação de cisalhamento dos ventos alísios de nordeste (dezembro-maio) e do Sudeste (junho-novembro) que influenciam a camada de mistura e o fluxo da pluma sobre a plataforma (Nikiema *et al.* 2007). As plumas fluviais que interagem sobre a PCA são provenientes dos principais sistemas hídricos amazônicos: O rio Amazonas e Pará (Lentz 1995b, Lentz & Limeburner 1995).

A bacia do Rio Amazonas é a maior do mundo ($7,0 \times 10^6 \text{ km}^2$), sendo responsável por aproximadamente 20% da água doce mundial (Nittrouer & DeMaster 1986). O rio Amazonas, principal sistema fluvial da região, apresenta uma descarga média anual de $0,8 \times 10^5 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (Dai & Trenberth 2002, Oltman 1968), em estudos mais recentes indicam um fluxo médio na foz do sistema de aproximadamente $2,0 \times 10^5 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (Callède *et al.* 2010). O fluxo de água do Rio Amazonas é responsável por transportar toneladas de material em suspensão para a plataforma continental (Meades *et al.* 1985, Milliman e Meade 1983). O Rio Pará pertence à bacia Tocantins-Araguaia, é considerado o segundo principal corpo d'água da região amazônica com uma descarga líquida da ordem de $10^4 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (Prestes *et al.* 2014). A interação das descargas líquidas desses dois sistemas estuarinos de grande porte é responsável por gerar estratificações verticais, provocando alterações do campo de densidade local.

A Salinidade (S) e a Temperatura (T) constituem o par de parâmetros conservativos que definem a densidade da água. Em superfície de regiões oceânicas a densidade pode ser modificada por processos distintos: de aquecimento e resfriamento (temperatura) e precipitação

e evaporação (salinidade) (Stommel 1961). Em plataformas continentais as mudanças no campo de massa são geradas por dois processos: a advecção de águas com diferentes temperaturas e/ou salinidade e por forçantes atmosféricas (Li *et al.* 2015). Em regiões costeiras, as distribuições de TS também estão relacionadas às condições hidrodinâmicas locais, como o regime de marés, regime de ventos, batimetria e a interação entre a descarga fluvial (e.g., Castelao *et al.* 2010, Seo *et al.* 2018).

Embora a PCA seja influenciada por diversas forçantes físicas, neste artigo iremos explorar as variabilidades no campo de densidade ao longo de um ano, na plataforma continental interna amazônica. Nesse contexto, daremos particular atenção às influências das descargas líquidas dos rios Amazonas e Pará ao longo de aproximadamente 100 km da costa. O estudo foi baseado a partir da análise de perfis verticais de TS no âmbito do Projeto Costa Norte. Ao explorar a frequência de empuxo dessa região acredita-se que as plumas dos rios Amazonas e Pará não se misturam e a temperatura seria um parâmetro importante nesse monitoramento.

5.2 MATERIAIS E MÉTODOS

5.2.1 Área de estudo

A área de estudo é a PCA, mais precisamente no ponto ($0^{\circ} 25,73' N/47^{\circ} 41,88' W$) situado próximo a isóbata de 30 m (Figura 11). A PCA fica adjacente à zona costeira do norte do Brasil, com a largura variando ao longo da sua extensão alcançando o seu máximo de 330 km em frente à foz do rio Amazonas (Flood & Damuth 1987). A PCA se estende até a isóbata de 100 m no início do talude continental (Nittrouer & Demaster 1986). É uma região tropical, próximo ao equador, o que reduz os efeitos da força de Coriolis, com forte influência do regime de ventos gerados pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e intenso aporte de água doce dos rios Amazonas e Pará (Nittrouer 1995).

A PCA é um ambiente altamente energético, apresentando um grande aporte de água doce. O rio Amazonas apresenta elevada descarga fluvial média da ordem de $10^5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, enquanto o Rio Pará tem magnitude de aporte continental com apenas uma ordem de grandeza menor, $10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Borba e Rollnic 2016, Prestes 2016, Prestes *et al.* 2014). As marés na PCA

são semidiurnas e se amplificam próximo à região costeira, a principal componente harmônica de maré na PCA é a lunar M2 (Beardsley *et al.* 1995).

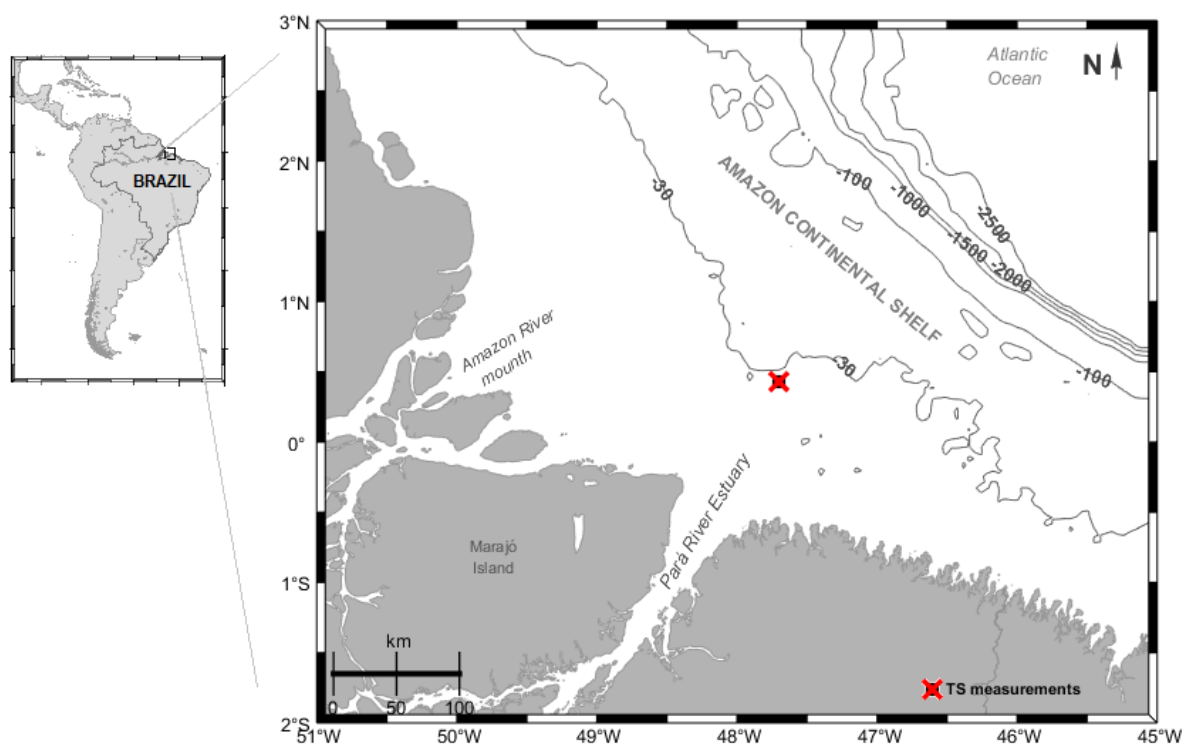


Figura 11- Mapa da área de estudo com a localização do ponto de amostragem na PCA (isóbata de 30 m).

5.2.2 Aquisição e processamento de dados

As campanhas oceanográficas ocorreram no âmbito do Projeto Costa Norte, por meio de coletas mensais, por um período de doze meses na PCA. Os cruzeiros tiveram início em fevereiro de 2018 e finalizados em janeiro de 2019. Portanto, com exceção dos meses de maio (que não foi realizado) e junho, todos os meses tiveram aquisições de dados completos. A distância entre o ponto de coleta (Isóbata de 30 m) e a foz do rio Pará é de aproximadamente 100 km (Figura 11).

Os dados coletados de TS foram utilizados para análise do campo de massa na PCA. Foram obtidos perfis verticais de CTD (*conductivity, temperature and depth*) SeaBird modelo SBE-37SM, com frequência amostral de 0,2 Hz. Este equipamento possui uma acurácia de $0,0003 \text{ mScm}^{-1}$ para condutividade, $0,002^\circ\text{C}$ para temperatura e 0,1% para o sensor de pressão.

No processamento dos dados brutos de CTD foram utilizados os dados de descida do equipamento. Para conversão dos dados de condutividade em salinidade, foi utilizado a equação

termodinâmica da água do mar, que está de acordo com o TEOS-10 (*Internacional Thermodynamic Equation of Seawater*). Essa equação representa que a densidade da água do mar é a relação $\rho(T, S, p)$, i.e., uma função da temperatura, salinidade e pressão.

A análise de frequência de Brunt-Vaisala (N^2) também chamado de frequência de empuxo, representa a estabilidade vertical relacionadas as estratificações na coluna d'água. Para o cálculo dessa grandeza foi utilizado a equação:

$$N^2 = -\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (1)$$

onde ρ é a densidade, g representa a aceleração da gravidade e $\partial\rho/\partial z$ representa os gradientes de densidade em função da profundidade. Este tipo de análise é relevante para os estudos da variabilidade vertical das pycnoclinas na PCA, em que a frequência de Brunt-Vaisala (N^2) apresenta valores máximos geradas pelos gradientes no campo de massa de acordo com os resultados de TS.

No geral, o parâmetro adimensional de estratificação é calculado com base nos gradientes de salinidade e.g., o diagrama de estratificação-circulação de Hansen e Rattray (1966). No presente estudo, o cálculo se baseou pelos gradientes de TS para cada mês de coleta. Portanto, foi utilizado a seguinte fórmula: $\epsilon = ((T,S)_B - (T,S)_s) / (T,S)$, onde $(T,S)_B$ são os valores de TS de fundo; $(T,S)_s$ são os valores de TS em superfície; e (T,S) o resultado médio de TS ao longo da profundidade.

5.3 RESULTADOS

Os resultados de temperatura não apresentaram valores menores que 27°C ao longo de todo o período de medição (Figura 12). Estratificações verticais de temperatura foram observadas nos meses de elevada descarga fluvial, com gradientes de aproximadamente 0,7 °C entre superfície e fundo (Figura 12A, 12B e 12C) e com valores de parâmetro de estratificação (ϵ) superiores a 0,50 (Tabela 1). No mês de março, o resultado do perfil de temperatura apresentou aumento entre 10 – 22 m, com temperatura máxima de 28,2 °C (Tabela 1) verificado em 15 m de profundidade (Figura 12B).

A partir do mês de julho, os resultados de temperatura apresentaram valores maiores que 28 °C e sem a presença de estratificações verticais ($\epsilon < 0,2$ - Tabela 1), com exceção de

alguns resultados em superfície, com pequenas variações de até 0,2 °C. (Figuras 12D e 12G). Durante o período transicional (dezembro de 2018 e janeiro de 2019), foi observado o início da estratificação vertical da temperatura (Figuras 12I e 12J), com gradientes de aproximadamente 0,3 °C entre superfície e fundo e com aumento do parâmetro de estratificação (Tabela 1).

Tabela 1- Resultados gerais de TS. Valores máximos, mínimos e médios (com desvio padrão) verticais de TS e os resultados do parâmetro de estratificação (E) para baseados nos valores de TS.

<i>Month</i>	Vertical Salinity			Vertical Temperature (°C)			Stratification Parameter (ϵ)	
	<i>Max</i>	<i>Min</i>	<i>Average \pm std</i>	<i>Max</i>	<i>Min</i>	<i>Average \pm std</i>	<i>Salinity</i>	<i>Temperature</i>
February/18	20.5	10.5	16.4 \pm 7.6	27.9	27.3	27.7 \pm 0.2	0.55	0.57
March	33	13.9	24.3 \pm 8.9	28.2	27.7	28 \pm 0.1	0.78	0.68
April	34.4	4.45	27.6 \pm 11.5	28.2	27.8	28.1 \pm 0.1	1.08	1.06
July	35.6	27.9	35.4 \pm 1.0	28.4	28.2	28.3 \pm 0.02	0.21	0.27
August	36.3	36.3	36.3 \pm 0.005	28.2	28.1	28.1 \pm 0.01	0.0003	0.0004
September	36.6	36.6	36.6 \pm 0.007	28.4	28.3	28.4 \pm 0.01	0.0005	0.0007
October	36.4	33.5	36.1 \pm 0.6	28.4	27.9	28.3 \pm 0.1	0.07	0.09
November	36.5	36.2	36.3 \pm 0.06	28.7	28.5	28.7 \pm 0.06	-0.006	-0.008
December	34.8	29.4	32.9 \pm 2.3	28.8	28.6	28.7 \pm 0.09	0.16	0.18
January/19	35.5	9.23	32 \pm 8.0	27.8	27.5	27.7 \pm 0.1	0.82	0.94

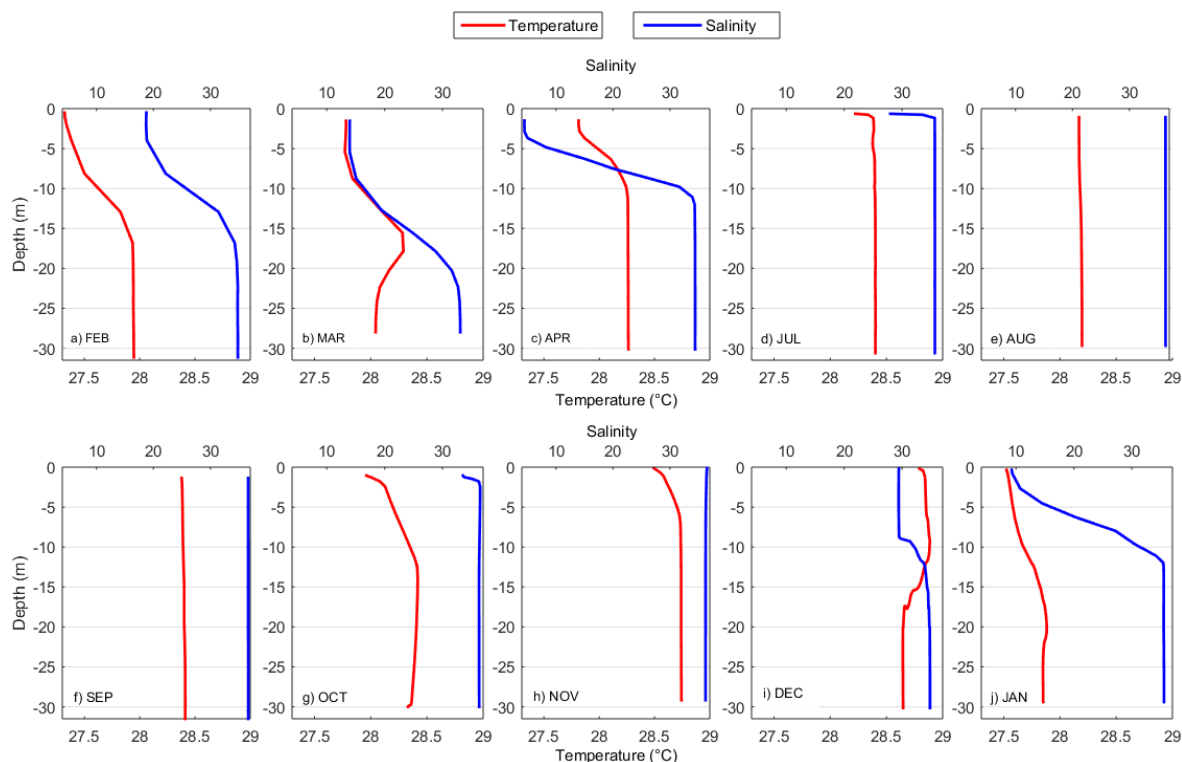


Figura 12- Resultados dos perfis verticais de TS na PCA para os dez meses de medição, sendo: a) fevereiro de 2018; b) março; c) abril; d) julho; e) agosto; f) setembro; g) outubro; h) novembro; i) dezembro de 2018 e; j) janeiro de 2019.

As estratificações verticais de salinidade foram observadas nos meses de elevada descarga fluvial (fevereiro a abril de 2018 e janeiro de 2019), com valores de salinidade menores que 15 em superfície e aumentando gradativamente até maiores profundidades (Figura 12A, 12B, 12C e 12J). Fortes estratificações foram observadas nos meses de março a abril de 2018 e janeiro de 2019 (com $\epsilon > 0,75$ - tabela 1), formando haloclinas espessas (superior a 6 m de extensão) (Figuras 12B, 12C e 12J). Os gradientes verticais mais evidentes foram verificados nos meses de abril de 2018 com salinidade > 30 e janeiro de 2019 com variação de salinidade > 26 (Tabela 1) apresentando o maior valor de parâmetro de estratificação de todos os meses (Tabela 1).

A partir do mês de julho de 2018, as médias de salinidade foram superiores a 33 (Tabela 1), sem a presença de estratificações verticais. As condições de mistura observada durante o período de baixa descarga fluvial contribuíram para os baixos valores do parâmetro de estratificação (Tabela 1). No entanto, no mês de julho, o valor da salinidade em superfície foi menor em relação à coluna d'água (~ 27) (Figura 12D). No mês de dezembro (Figura 12I), ocorreu um aumento de salinidade após 8 m de profundidade.

Para observar detalhes dos gradientes verticais, foram calculados valores médios de TS em três camadas: superfície (0 – 10 m), meio (11 – 20 m) e próximo ao fundo (21 – 30 m) (Figura 13). Os resultados médios de salinidade em superfície apresentaram valores entre 10 – 15 nas três primeiras medições (fevereiro – abril). A salinidade média próximo ao fundo aumentou de 20 para 35 ao longo desses meses de maior descarga. Os valores de salinidade para as três camadas não apresentaram diferenças entre os meses de julho a novembro, com máximo de salinidade média igual a 37 (Figura 13A).

Gradientes verticais de temperatura de até 0,5 °C também ocorreram somente nas três primeiras campanhas (Figura 13B). No mês de março foi observado que a temperatura média do fundo (28 °C) foi menor que a temperatura da camada do meio (28,2 °C). Na superfície, em todas as medições o resultado médio de temperatura foi menor em relação às camadas do meio e próxima ao fundo. A exceção foi o mês de dezembro, em que foi observado o máximo valor de temperatura média igual a 28,8 °C. Assim como foi verificado nos resultados dos perfis verticais de TS, duas medições apresentaram resultados que necessitam de maior atenção em sua análise, estas ocorreram nos meses de março e dezembro.

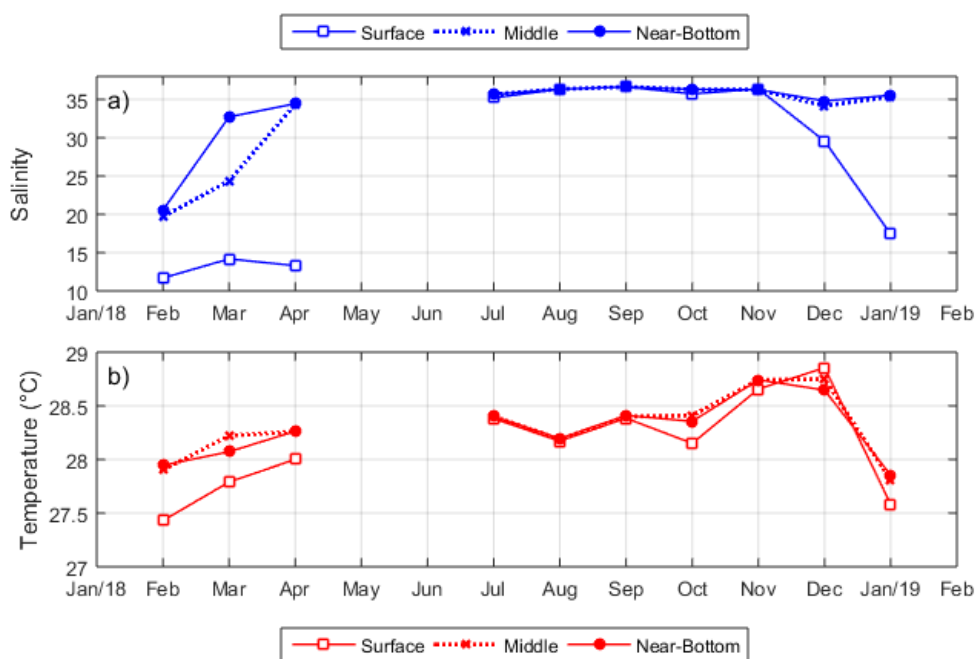


Figura 13- Resultados médios para três camadas verticais: superfície (0 – 10 m), meio (11 – 20 m) e próximo ao fundo (21 – 30 m). a) salinidade; b) temperatura. A legenda diferencia as linhas e marcadores para cada camada vertical.

5.4 DISCUSSÃO

5.4.1 Variações temporais e verticais de TS

Os resultados de temperatura e salinidade na área de estudo foram influenciados pela variabilidade sazonal das descargas fluviais dos rios Amazonas e Pará. A formação de estrutura vertical estratificada ocorre nos meses com maior aporte de água doce na PCA durante o período elevada descarga fluvial (Figura 12A, 12B e 12C). Ao longo do período de baixa descarga, temperatura e salinidade apresentaram perfis verticais bem misturados e com valores constantes de 28 °C e 36, respectivamente (Figura 12E, 12F e 12G).

As águas continentais influenciam fortemente o campo de densidade na região interna da PCA, na isóbata de 30 m. O trabalho de Lentz (1995a) identificou a presença das plumas dos rios Amazonas e Pará em regiões além do talude continental e constatou que a dispersão espacial está fortemente associada a variabilidade do regime de ventos, com alcance de centenas de quilômetros. O aporte de água doce no sistema aumenta a força de empuxo e gera gradientes de densidade longitudinal e vertical na PCA (Geyer *et al.* 1996, Mascarenhas *et al.* 2016, Silva *et al.* 2005). O campo de densidade da PCA na isóbata de 30 m apresentou estratificação vertical somente nos meses de intensa descarga fluvial.

Ao longo do período de baixa descarga, na ausência de gradientes verticais de salinidade e temperatura, o campo de densidade na região interna da PCA é homogêneo e bem misturado. Essas condições de mistura vertical são geradas pela ausência do aporte de água doce da descarga fluvial, o que reduz o alcance da dispersão espacial das plumas estuarinas na plataforma interna (Lentz & Limeburner 1995, Mendes *et al.* 2017). Com a redução das forças de empuxo, a força da maré semidiurna promove intensa mistura vertical devido ao aumento da energia cinética turbulenta no sistema (Beardsley *et al.* 1995, Gabioux *et al.* 2005, Prestes *et al.* 2018).

Por ser uma região rasa da plataforma, o cisalhamento vertical causado pelo vento e corrente de maré gera mistura somente no período de baixa descarga. No presente trabalho, as amostragens instantâneas realizadas através dos perfis verticais de CTD não apresentaram influência de oscilações de alta frequência. Portanto, a estrutura vertical do campo de densidade no ponto de coleta é representativa temporalmente em relação à sazonalidade da descarga fluvial na PCA, sem considerar oscilações de curto período relacionados às marés semidiurnas ou as variabilidades locais do regime de vento.

5.4.2 A frequência de Brunt-Vaisala

Em águas costeiras, os gradientes de salinidade são mais importantes para as estratificações verticais de densidade devido à influência do aporte de água doce nessas regiões (Frota *et al.* 2013, Pailler *et al.* 1999). Entretanto, variações na estrutura vertical de temperatura também podem gerar aumento na força de empuxo no sistema. O cálculo de N^2 permite identificar mais detalhadamente tais variações no campo de massa local. A análise da frequência de empuxo é amplamente utilizada em diversos estudos em sistemas costeiros e plataformas continentais (Dzwonkowski *et al.* 2015, Holloway *et al.* 1997, Lund-Hansen *et al.* 1996, Magalhães *et al.* 2016, Millard *et al.* 1990).

A comparação da análise vertical da frequência de empuxo com os resultados de temperatura e salinidade indicaram que $N^2 > \log_{10}(-4)$ representam influência das plumas (Figura 14). Em outras plataformas continentais de diferentes latitudes, é possível que o campo de densidade seja alterado por outros processos, e.g., sazonalidade de monções (Roseli *et al.* 2015) ressurgência costeira (Ramirez *et al.* 2019) e ondas internas (Hall *et al.* 2013, O'Driscoll & Levine 2017, Kurkina *et al.* 2017). Contudo, a área de estudo está inserida na plataforma rasa (isóbata de 30 m) e a natureza amostral instantânea dos experimentos do presente estudo indicou que as variabilidades verticais e temporais de N^2 dependem somente do aporte de água doce no sistema.

Resultados máximos para $N^2 > \log_{10}(-2)$ foram observados em medições em abril de 2018 e janeiro de 2019. Os resultados apresentados para a estrutura vertical de TS (Figura 12) indicaram que estão relacionados com a presença das plumas dos estuários dos rios Amazonas e Pará. Camadas verticais de até 8 m foram verificadas para estes cenários. Apesar da intensa descarga do Rio Amazonas, o aporte continental do Rio Pará também é elevado (Borba *et al.* 2016, Prestes *et al.* 2018). Além disso, as plumas desses aportes de água doce na PCA possuem diferentes características físico-químicas e traçadores (Ward *et al.* 2015). Portanto, os resultados de TS obtidos para a área de estudo, associado com a análise de N^2 , indicaram que as plumas dos rios Amazonas e Pará não se misturam (pelo menos não no ponto de medição) e formam três camadas verticais diferentes.

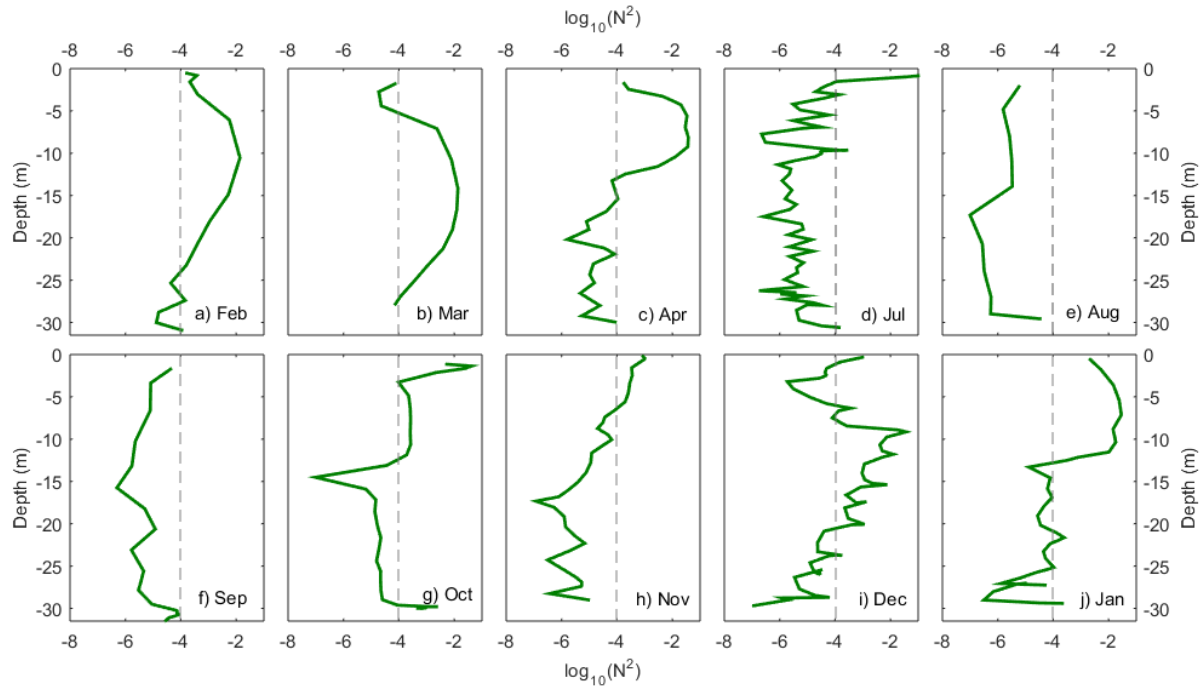


Figura 14- Perfis verticais de N^2 para os dez meses de medições na PCA, sendo: a) fevereiro de 2018; b) março; c) abril; d) julho; e) agosto; f) setembro; g) outubro; h) novembro; i) dezembro de 2018 e; j) janeiro de 2019. Linha tracejada indica a influência das plumas fluviais.

Geralmente, a salinidade define os gradientes verticais e horizontais de densidade em plataformas continentais rasas (Dzwonkowski *et al.* 2015). Porém, devido à proximidade entre a foz dos sistemas estuarinos (~ 80 km), as diferenças de N^2 , associado aos resultados de TS, sugerem que existe aumento das forças de empuxo devido às plumas dos rios Amazonas e Pará possuírem temperaturas diferentes. Como a força de empuxo é elevada em cenários de alta descarga fluvial, a estratificação vertical do campo de densidade permite que estas plumas e o aporte marinho não se misturem de imediato nessa região da PCA.

A estrutura vertical de N^2 (Figura 14B) e TS (Figura 12B) em março de 2018 indicaram que até 10 m de profundidade, as forças de empuxo são reduzidas e sem estratificação, com TS igual à $27,7$ °C e 14, respectivamente (presença da pluma do Rio Pará); entre 10 – 17 m, as forças de empuxo aumentaram devido às estratificações de TS ($\epsilon > 1,0$) – Tabela 1) – pluma do Rio Amazonas (com temperatura igual à $28,3$ °C). Após 23 m de profundidade as estratificações terminam, a temperatura reduz para $28,3$ e a salinidade em 32 (aporte marinho com pequena mistura). Outro exemplo específico é dezembro de 2018 (Figura 14I – N^2 ; Figura 12I – TS), em que até 8 m de profundidade, existe aumento de N^2 e a formação dos gradientes de TS em diferentes profundidades até aproximadamente 20 m de profundidade.

5.4.3 Diagrama TS

Com intuito de aprofundar a questão sobre as diferenças de TS, em que as plumas dos rios Amazonas e Pará não se misturam nessa região rasa da plataforma continental, foram apresentados os diagramas TS temporal para três camadas verticais: superficial, intermediária e próxima ao fundo (Figura 15). Também foram determinados quadrantes representativos para os resultados de TS os quais são propostos no presente trabalho para diferenciar o aporte das plumas. Resultados de densidade menores que 1020 kg.m^{-3} indicam diluição da água marinha e presença das plumas.

De acordo com esta análise, a pluma do Rio Amazonas é mais aquecida em relação à pluma do Rio Pará em aproximadamente $0,8 \text{ }^\circ\text{C}$ (valor médio). Não foi possível identificar diferenças de salinidade que representem esta sobreposição de plumas. Entretanto, a análise de N^2 (Figura 14) indica que o campo de densidade tem *feedback* positivo com as variações verticais de temperatura. É possível observar na Figura 15 que a densidade diminui para valores menores que 1020 kg.m^{-3} nos meses que ocorrem medições em condições de alta descarga, com exceção da camada próxima ao fundo. A densidade da pluma do Rio Pará é menor que a do Rio Amazonas ($1008 - 1014 \text{ kg.m}^{-3}$) e varia entre aproximadamente $1004 - 1008 \text{ kg.m}^{-3}$.

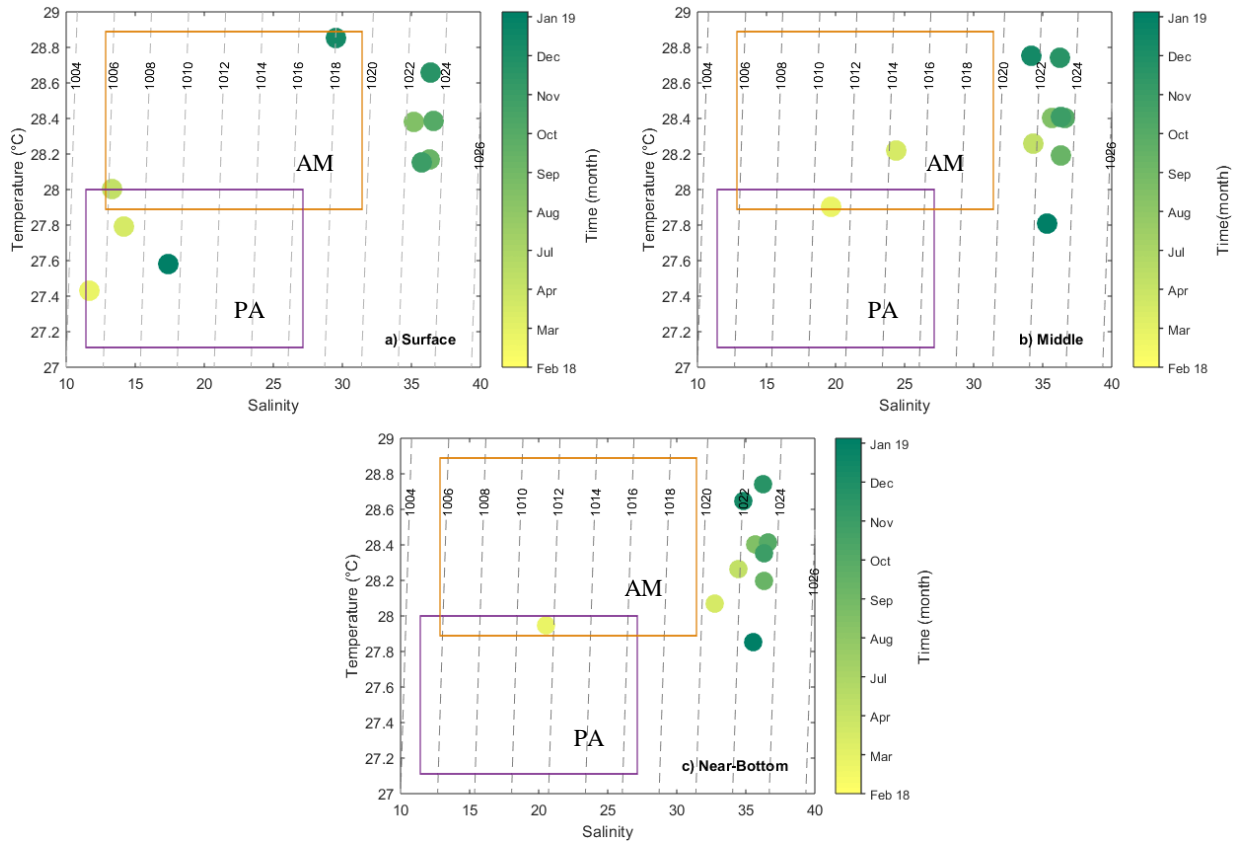


Figura 15- Diagrama TS temporal para três camadas verticais na área de estudo: superficial (valor médio de TS entre 0 – 10 m profundidade); intermediária (11 – 20 m de profundidade) e; próxima ao fundo (21 – 30 m de profundidade). Também são apresentadas as isopicnais em linhas tracejadas cinza. O retângulo laranja é referente à densidade da pluma do Rio Amazonas (AM) e o retângulo roxo à densidade da pluma do Rio Pará (PA). O colorbar representa o primeiro mês de medição (fevereiro de 2018 – amarelo) até o último (janeiro de 2019 – verde escuro).

Entre as camadas superficial e intermediária ocorreram a diferença de densidade entre os quadrantes sugeridos para as plumas dos rios Amazonas e Pará. Na camada superficial, a densidade é determinada pela presença da pluma do Rio Pará. Porém, na camada intermediária, o aumento de densidade ocorre devido ao aumento de temperatura, o que representa a presença da pluma do Rio Amazonas, mais aquecida em relação à pluma do Rio Pará.

Áreas em comum dos quadrantes representam incertezas sobre a precisão dos valores de TS para diferenciar as plumas na PCA. Contudo, o presente trabalho sugere que diferenças verticais de temperatura podem estar associadas às anomalias verticais no campo de densidade devido à sobreposição de plumas que não se misturam, a priori, na área de estudo, na isóbata de 30 m de profundidade. Estas anomalias por variações de temperatura alteram a estrutura da estratificação vertical forçada pelas diferenças verticais de salinidade, comum em foz dos sistemas continentais.

Trabalhos como Silva *et al.* (2007), Pailler *et al.* (1999) explicam que a maior concentração de sedimento e a composição de elementos químicos traçadores como matéria orgânica dissolvida (DOM) e silicatos, são responsáveis por aumentar a temperatura de plumas estuarinas. Estudos futuros com foco em identificar traçadores químicos, associados com maior resolução espacial e temporal dos dados de TS na plataforma rasa, podem otimizar esta análise. Modelos numéricos tridimensionais, forçados por modos baroclínicos, permitem aprofundar esta investigação sobre a estrutura vertical do campo de densidade e expandir o conhecimento sobre esta dinâmica.

5.5 CONCLUSÕES

O campo de densidade da PCA na isóbata de 30 m apresenta estratificações verticais somente nos meses de elevada descarga fluvial. A presença de água doce no sistema proveniente da drenagem continental ocasiona um aumento nas forças de empuxo da PCA, devido aos gradientes longitudinais e verticais de densidade. Durante a baixa descarga fluvial, essas forças de empuxo diminuem em virtude da mistura vertical gerada pela ausência do aporte continental.

Em águas costeiras, os gradientes de salinidades são mais importantes para as estratificações verticais de densidade, devido a influência do aporte de água doce nessas regiões. Entretanto, os gradientes de temperatura também geram aumento nas forças de empuxo da PCA. Em alguns meses de elevada descarga fluvial, as estabilidades verticais do campo de massa foram geradas por variações no gradiente térmico em subsuperfície, sendo mais relevantes que as variações de salinidade.

Na PCA as plumas dos rios Amazonas e Pará no primeiro momento não se misturam, formando camadas verticais diferentes. Essa característica é ocasionada pelas diferenças de densidade entre essas massas de água. A diferença de densidade é devida as diferenças de temperatura das plumas dos rios Amazonas, Pará e o aporte marinho.

A pluma do Rio Amazonas é mais aquecida em aproximadamente 0,8°C em relação à pluma do Rio Pará, enquanto a salinidade não foi determinante para representar a sobreposição de plumas. Com isso, a densidade do Rio Pará é menor que a do Rio Amazonas. Na posição superficial da PCA a densidade é determinada pela presença da pluma do Rio Pará, e na porção

intermediária a densidade é determinada pelos gradientes de temperatura em virtude da presença da pluma do Rio Amazonas.

Portanto, a natureza amostral instantânea do experimento do presente estudo indicou que, as variabilidades verticais e temporais de N^2 dependem somente do aporte de água doce no sistema. Destacando também a importância das variações de temperatura para anomalia de densidade vertical em um sistema que comumente é forçado pelos gradientes de salinidade. Contudo, é necessário que estudos futuros possam aprimorar essa análise, de modo a expandir o conhecimento da dinâmica da região da PCA.

6 CONTRIBUIÇÕES COMPLEMENTARES

O presente estudo buscou aprimorar o embasamento técnico-científico da dinâmica do campo de densidade da plataforma amazônica rasa. A estrutura vertical de densidade da PCA foi estudada a partir de análises de outros processos físicos, e.g., ondas internas e intensificação de ciclones tropicais. No entanto, não houveram trabalhos específicos das variabilidades do campo de massa na plataforma continental amazônica. Portanto, essas análises contribuíram para o entendimento do fenômeno de anomalia de densidade dessa plataforma, permitindo que outros estudos possam aprimorar essas análises.

O entendimento da estrutura vertical de densidade são importantes para compreensão de outros processos oceânicos. Os gradientes verticais de TS formam barreiras de diferentes densidades, podendo impedir a distribuição de gases, e.g., o oxigênio ao longo da coluna d'água (Capet *et al.* 2016), assim como impedir a distribuição de nutrientes. Os fatores biológicos também são afetados em relação a distribuição de microorganismos, como a retenção do fitoplâncton nas camadas superiores do oceano (Chakraborty & Lohrenz 2015). Dessa forma, esse estudo permite realizar implicações de processos em outros campos da oceanografia.

A zona costeira amazônica possui grande importância ambiental. Essa região apresenta três atividades econômicas que se destacam: exploração de óleo e gás natural, atividade pesqueira e a presença de portos. A exploração de óleo e o tráfego de embarcações trazem riscos em relação ao vazamento de óleo na plataforma amazônica. O presente estudo permitiu embasar medida de preservação ambiental e avaliação de impactos em casos de acidentes.

Esse estudo gerou resultados importantes para a dinâmica da plataforma interna amazônica, mostrando o papel dos sistemas fluviais da região para o campo de densidade. Contudo, estudos futuros com foco na identificação de traçadores químicos de cada pluma estuarina podem aprimorar essa análise. Além disso, modelos numéricos tridimensionais forçados por modo baroclinico, podem ser aplicados na região, para aprofundar o conhecimento da estrutura vertical do campo de densidade.

REFERÊNCIAS

- Andutta F.P., Miranda L.B., Schettini C.A.F., Siegle E., Silva M.P., Izumi V.M., Chagas F.M. 2013. Temporal Variations of temperature, salinity and circulation in the Peruípe river estuary (Nova Viçosa, BA). *Continental Shelf Research*, **70**: 36-45.
- Araujo M., Noriega C., Medeiros C., Lefèvre N., Ibánhez J.S.P., Montes M.F., Silva A.C., Santos M.L. 2018. On the variability in the CO₂ system and water productivity in the western tropical Atlantic off North and Northeast Brazil. *Journal of Marine System*, **189**: 62- 77.
- Acha E.M., Mianzan H.W., Guerrero R.A., Favero M., Bava J. 2004. Marine fronts at the continental shelves of austral South America physical and ecological processes. *Journal Marine Systems*, **44**(1-2): 83-105.
- Amassed Group. 1990. A Multi-disciplinary Amazon Shelf SEDiment Study (AMASSEDS). Eos, Transactions, American Geophysical Union, **71**(45): 1771–1777.
- Beardsley R. C., Candela J., Limeburner R., Geyer W. R., Lentz S. J., Castro B. M., Cacchione D., Carneiro N. 1995. The M₂ tide on the Amazon shelf. *Journal of Geophysical Research*, **100**(C2): 2283–2319.
- Borba T. A. C., Rollnic M. 2016. Runoff quantification on Amazonian Estuary based on hydrodynamic model. *Journal of Coastal Research*, **75**: 43 -47.
- Bourllès B., Molinari R.L., Johns E., Wilson W.D., Leaman K.D. 1999. Upper layer currents in the western tropical North Atlantic (1989-1991). *Journal of Geophysical Research*, **104**(c1):1361-1375.
- Brasil. 1997. Resolução Nº 005 de 03 de dezembro de 1997. Aprova o plano Nacional de Gerenciamento Costeiro II (PNGC II).
- Callède J., Cochonneau G., Ronchail J., Alves F.V., Guyot J.L., Guimarães V.S., Oliveira E. 2010. Les apports em eau de l'Amazone à l'Océan atlantique. *Journal of Water Science*, **23** (3): 247-273.
- Capet A., Stanev E.V., Beckers J.M., Murray J.W., Grégoire M. 2016. Decline of the Black sea oxygen inventory. *Biogeosciences*, **13**: 1287 – 1297.
- Castelao R., Glenn S., Schofield O. 2010. Temperature, salinity and density variability in the central middle Atlantic Bight. *Journal of Geophysical Research*, **115**(C10): 1-14.
- Castello J.P., Krug L.C. 2015. *Introdução às ciências do Mar*. Pelotas: Ed textos, 602p.
- Cavalcanti V.M.M. 2011. Plataforma Continental: a última fronteira da mineração brasileira. Departamento Nacional de produção Mineral (DNPM), Brasília, 104p.
- Chakraborty S., Lohrenz S.E. 2015. Phytoplankton community structure in the river-influenced continental margin of the northern Gulf of Mexico. *Marine Ecology Progress Series*, **521**: 31-47.
- Chant R. J. 2011. Interactions between Estuaries and Coasts: River Plumes – Their Formation, Transport, and Dispersal. *Reference Module in: Earth Systems and Environmental Sciences: Treatise on Estuarine and Coastal Science*, **2**: 213-235.

- Coutinho P. N. 1996. Levantamento Do Estado Da Arte Da Pesquisa Dos Recursos Vivos Marinhos do Brasil. 75p.
- Dai A., Trenberth K.E. 2002. Estimates of Freshwater Discharge from Continents: Latitudinal and Seasonal Variations. *Journal of Hydrometeorology*, **3**(6): 660-687.
- Danielson S., Eisner L., Weingartner T., Aagaard K. 2011. Thermal and haline variability over the central Bering Sea shelf: seasonal and interannual perspectives. *Continental Shelf Research*, **31**(6): 539-554.
- Diniz C., Cortinhas L., Nerino G., Rodrigues J., Sadek L., Adami M., Souza Filho P.W.M. 2019. Brazilian mangrove status: three decades of satellite Data analysis. *Remote Sensing*, **11**(7): 808.
- Dzwonkowski B., Park K., Collini R. 2015. The coupled estuarine-shelf response of a river-dominated system during the transition from low to high discharge. *Journal of Geophysical Research*, **120**(9): 1-9.
- El-Robrini M., Silva M. A. M. A., Souza Filho P. W. M., El-Robrini M. H. S., Silva Jr. O. G. S., França C. F. 2006. Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro. Belém: Ministério do Meio Ambiente.
- Emery W.J., Thomson R.E. 2001. *Data analysis methods in physical oceanography*. Elsevier Science, 654p.
- Flood R., Damuth J. E. 1987. Quantitative characteristics of sinuous distributary channels on the Amazon Deep-Sea Fan. *Geological Society America Bulletin*, **98**(6): 728-738.
- Frota F. F., Paiva B. P., Schettini C. A. F. 2013. Intra-tidal variation of stratification a semi-arid estuary under the impact of flow regulation. *Brazilian Journal of Oceanography*, **61**(1): 23-33.
- Gabioux M. 2002. Influência da lama em suspensão na propagação da maré na plataforma Amazônica. MS Dissertation, COPPE, UFRJ, 99p.
- Gabioux M., Vinzon S., Paiva A. M. 2005. Tidal propagation over fluid mud layers on Amazon shelf. *Continental Shelf Research*, **25**(1): 113-125.
- Garrison T. 2010. *Fundamentos de oceanografia*. Cengage Learning, 426p.
- Geyer R. W., Beardsley R. C. R., Lentz S. J., Candela J., Limeburner R., Johns W. E., Castro B. M., Dias Soares I. 1996. Physical oceanography of the Amazon shelf. *Continental Shelf Research*, **16**(5): 575-616.
- Goes E.R., Ferreira Jr V. 2017. Caracterização morfossedimentar da plataforma continental brasileira. *Revista Brasileira de Geografia Física*, **10**(5): 1595-1613.
- Gurgel A.R.C. 2015. Ressonância da onda de maré na plataforma continental amazônica. MS Dissertation, Programa de Pós-Graduação em Física Aplicada, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Pernambuco, 81p.
- Hall R.A., Huthnance J.M., Williams R.G. 2013. Internal wave reflection on shelf slopes with Depth- varying stratification. *Journal of Physical Oceanography*, **43**(2): 248-258.

- Hansen D.V., Rattray M.J. 1966. New dimensions in estuary classification. *Limnology and Oceanography*, **11**(3): 319-326.
- Hernandez O., Jouanno J., Durand F. 2016. Do the Amazon and Orinoco freshwater plumes really matter for hurricane-induced ocean surface cooling?. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **121**(4): 2119- 2141.
- Holloway P. E., Pelinovsky E., Talipova T., Barnes B. 1997. A nonlinear model of internal tide transformation on the Australian North West Shelf. *Journal of Physical Oceanography*, **27**(6): 871–896.
- Isaac-Nahum V.J. 2006. Exploração e manejo dos recursos pesqueiros do litoral amazônico: um desafio para o futuro. *Ciência e Cultura*, **58**(3): 33-36.
- Isaac B.J., Santo R.V.E., Bentes B., Frédou F.L., Mourão K.R.M., Frédou T. 2009. An interdisciplinary evaluation of fishery production systems off the state of Pará in North Brazil. *Journal of Applied Ichthyology*, **25**(3): 244-255.
- 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.
- King B., Stone M., Zhang H.P., Gerkema T., Marder M., Scott R.B., Swinney H.L. Buoyancy frequency profiles and internal semidiurnal tide turning depths in the oceans. *Journal of Geophysical research*, **117**(C4): 1-15.
- Kurkina O.E., Talipova T.G., Soomere T., Kurkin A.A., Rybin A.V. 2017. The impact of seasonal changes in stratification on the dynamics of internal waves in the Sea of Okhotsk. *Estonia Journal of Earth sciences*, **66**(4): 238-255.
- Le Bars Y. L., Lyard F., Jeandel C., Dardengo L. 2010. The AMANDES tidal model for the Amazon estuary and shelf. *Ocean Modelling*, **31**(3):132-149.
- Lentz S. J. 1995a. Seasonal variations in the horizontal structure of the Amazon Plume inferred from historical hydrographic data. *Journal of Geophysical Research*, **100**(C2), 2391-2400.
- Lentz S. J. 1995b. The Amazon River Plume during AMASSEDS: Subtidal current variability and the importance of wind forcing. *Journal of Geophysical Research*, **100**(C2), 2355-2375.
- Lentz S. J., Limeburner R. 1995. The Amazon River Plume during AMASSEDS: Spatial characteristics and salinity variability. *Journal of Geophysical Research*, **100**(C2): 2377–2390.
- Li Y., Fratantoni P.S., Chen C., Hare J.A., Sun Y., Beardsley R.C., Ji R. 2015. Spatio-temporal patterns of stratification on the Northwest Atlantic shelf. *Progress in Oceanography*, **134**: 123-137.
- Lund-Hansen L.C., Skyum P., Christiansen C. 1996. Modes of stratification in a Semi-enclosed Bay at the North Sea-Baltic Sea transition. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, **42**(1): 45-54.
- Luczynski E. 2015. Painel situacional da indústria de petróleo e gás natural no Estado do Pará. *Revista do Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Pará*. Artigo Técnico, **16**: 8-9.

- Magalhães J. M., Da Silva J. C. B., Buijsman M. C., Garcia C. A. E. 2016. Effect of the North Equatorial Counter Current on the generation and propagation of internal solitary waves off the Amazon shelf (SAR observations). *Ocean Science Discussions*, **12**(5): 243- 255.
- Mann K.H., Lazier J.R.N. 1991. *Dynamics of marine ecosystems*. Biological-Physical interactions in the ocean. 2° Ed. Oxford, Blackwell Scientific Publications, 466p.
- Mascarenhas A. C. C., Gomes G. S., Lima A. P. Y., Silva H. K. N., Santana L. S., Rosário R. P., Rollnic M. 2016. Seasonal variations of the Amazon River Plume with Focus on the Eastern Sector. *Journal of Coastal Research*, **75**: 532–536.
- McConnochie C. D., Kerr R.C. 2016. The effect of a salinity gradient on the dissolution of a vertical ice face. *Journal of Fluid Mechanics*, **791**: 589-607.
- Meade R. H., Dunne T., Richey J. E., Santos U. M., Salati E. 1985. Storage and remobilization of suspended sediment in the lower Amazon River of Brazil. *Science*, **228**(4698): 488-490.
- Mendes R., Saldías G. S., Castro M., Gesteira M. G., Vaz N., Dias J. M. 2017. Seasonal and interannual variability of the Douro turbid river plume, northwestern Iberian Peninsula. *Remote Sensing of Environment*, **194**: 401- 411.
- Meybeck M. 1988. How to establish and use world budgets of riverine materials. In: Lerman, A and Meybeck, M (ed.). *Physical and Chemical Weathering in Geochemical Cycles*. The Hague: Kluwer Academic, Netherlands, **251**: 247-272.
- Millard R.C., Owens W.B., Fofonoff N.P. 1990. On the calculation of the Brunt-Vaisala frequency. *Deep-Sea Research*, **37**(1): 167-181.
- Milliman J., Meade R.H. 1983. World-wide delivery of river sediment to the oceans. *The Journal of Geology*, **91**(1): 1-21.
- Miranda L.M., Olle E. D., Bérigamo A.L., Silva L.S., Andutta F.P. 2012. Circulation and salt intrusion in the Piaçaguera channel, Santos (SP). *Brazilian Journal of Oceanography*, **60**(1): 11-23.
- Miranda L.B., Castro B.M., Bjorn K. 2002. *Princípios de oceanografia física de estuários*. Edusp- Editora da Universidade de São Paulo, 432p.
- Molinas E., Vinzon S.B., Vilela C.P.X., Gallo M.N. 2014. Structure and position of the bottom salinity front in the Amazon estuary. *Ocean Dynamics*, **64**(11): 1583- 1599.
- Moraes B.C., Costa J.M.N., Costa A.C.L., Costa M.H. 2005. Variação espacial e temporal da precipitação no estado do Pará. *Acta Amazônia*, **35**(2): 207-214.
- Ministério do Meio Ambiente. 2006. Avaliação do potencial sustentável de Recursos vivos na Zona Econômica Exclusiva. Relatório Executivo. Disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/revizee/arquivos/rel_executivo_revizee.pdf Acessado em: 04/07/2019.
- Ministério do Meio Ambiente. 2007. Especificações e normas técnicas para elaboração de cartas de sensibilidade ambiental para derramamento de óleo. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/projeto/arquivos/cartassao2007port.pdf> Acessado em: 04/07/2019.

- Neto A.V.N., Silva A.C. 2014. Seawater temperature changes associated with the North Brazil current dynamics. *Ocean Dynamics*, **64**(1): 13-27.
- Nikiema O., Devenon J.L., Baklouti M. 2007. Numerical modeling of the Amazon River plume. *Continental Shelf Research*, **27**(7): 873-899.
- Nittrouer C. A. E., Demaster D. J. 1986. Sedimentary processes on the Amazon continental shelf: past, present and future research. *Continental shelf Research*, **6**(1-2), 5-30.
- Nittrouer C.A., Brunskill G.j., Figueiredo A.G. 1995. Importance of tropical coastal environments. *Geo-Marine Letters*, **15**(3-4): 121-126.
- 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.
- Oltman R.E. 1968. Reconnaissance investigations of the discharge and water quality of the Amazon River. U. S. *Geological Survey Circular*, **552**: 1-16.
- O'Driscoll K., Levine M. 2017. Simulations and observation of nonlinear internal waves on the continental shelf: Korteweg-de Vries and extended Korteweg-de Vries solutions. *Ocean Science*, **13**(5):749-763.
- Pailler K., Bourlès B., Gouriou Y. 1999. The barrier layer in the western Tropical Atlantic Ocean. *Geophysical Research Letters*, **26**(14): 2069-2072.
- Pereira L.C.C., Dias j.A., Carmo J.A., Polette M. 2009. A Zona Costeira Amazônica Brasileira. *Journal Integrated Coastal Zone Management*, **9**(2): 3-7.
- Prestes Y. O.; Rollnic M.; Silva M. S.; Rosário R. P. 2014. Volume transport in the tidal limit of the Pará River, Brazil. Proceedings of the 17th Physics of Estuaries and Coastal Seas conference, Porto de Galinhas, Pernambuco, Brazil.
- Prestes Y.O. 2016. Interação física entre os estuários do rio Pará e a Plataforma Continental no norte do Brasil. MS Dissertation, Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 122 p.
- Prestes Y. O.; Silva A.C.; Jeandel C. 2018. Amazon water lenses and the influence of the North Brazil Current on the continental shelf. *Continental Shelf Research*, **160**: 36-48.
- Ramirez M.C., Santana A.R., Villota C.R., Paramo J. 2019. Water masses and mixing processes in the Southern Caribbean upwelling system off Colombia. *Ocean Science Discussions*, 1-26.
- Ranieri L.A. 2014. Morfodinâmica costeira e o uso da orla oceânica de Salinópolis (Nordeste do Pará). PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 195 p.
- Rodrigues J.E.C. 2008. Risco tecnológico: Uma análise do Porto de Vila do Conde como área potencial de ameaça ao vazamento de óleo para comunidades em situação de vulnerabilidade. MS Dissertation, programa de Pós-Graduação em Geografia, Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, Faculdade de Geografia e Cartografia, universidade Federal do Pará, Belém, 96 p.
- Rosário R.P. 2016. Análise de processos oceanográficos no estuário do rio Pará. PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 139 p.

- Roseli N.H., Akhir M.F., Husain M.L., Tangang F., Ali A. 2015. Water mass characteristics and stratification at the Shallow Sunda Shelf of Southern South China Sea. *Open Journal of Marine Science*, **5**(4): 455-467.
- Rousseau T. C. C., Sonke J. E., Chmeleff J., Van Beek P., Souhaut M., Boaventura G., Seyler P., Jeandel C. 2015. Rapid neodymium release to marine waters from lithogenic sediments in the Amazon estuary, *Nature Communications*, **6**: 7592.
- Sachs I. 2008. *Desenvolvimento: includente, sustentável e sustentado*. Ed. Garamond, Rio de Janeiro, 151 p.
- Schmiegelow J.M.M.M. 2004. *O planeta azul: uma introdução às ciências marinhas*. Interciência, Rio de Janeiro, 202 p.
- Seo J.Y., Ha H.K., Im J., Hwang J.H., Choi S.M., Won N., Kim Y. 2018. Impact of seasonal vertical stratification on the dispersion patterns of dredging plumes off the South coast of Korea. *Marine Geology*, **395**: 14-21.
- Silva A.C., Araújo M., Bourlès B. 2005. Variação sazonal da estrutura de massas de água na plataforma continental do Amazonas e área oceânica adjacente. *Revista Brasileira de geofísica*, **23**(2): 145-157.
- Silva A.; Araujo M.; Medeiros C.; Silva M.; Bourles B. 2005. Seasonal changes in the mixed and barrier layers in the western equatorial Atlantic. *Brazilian Journal of Oceanography*, **53** (3-4), 83-98.
- Silva A C., Araújo M., Pinheiro L.S. 2007. Caracterização hidrográfica da plataforma continental do Maranhão a partir de dados oceanográficos medidos, remoto e modelados. *Revista Brasileira de Geofísica*, **25**(3): 281-294.
- Silva A.C., Araújo M., Bourlès B. 2010. Seasonal Variability of the Amazon River plume during REVIZEE program. *Tropical Oceanography*, **38**(1): 76-87.
- Souza Filho P.W.M. 2005. Costa de Manguezais de macromaré da Amazônia: cenários morfológicos, mapeamento e quantificação de área usando dados de sensores remotos. *Revista Brasileira de Geofísica*, **23**(4): 427-435.
- Souza Filho P.W.M., Lessa G.C., Cohen M.C.L., Costa F.R., Lara R.J. 2008. The subsiding macrotidal barrier estuarine system of the eastern amazon coast, Northern Brazil. In. Dillenburg S.R., Hesp P.A. (Ed). *Geology and geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil*. **107**: 347-375.
- Souza-Filho P. W., Golçalves F. D., Rodrigues W. P., Costa F. R., Miranda F. P. 2009. Multisensor data fusion of geomorphological and environmental sensivity index mapping in the amazonian mangrove coast, Brazil. *Journal of Coastal Reserach*, **56**: 1592-1596.
- Stommel H. 1961. Thermohaline convection with two stable regimes of flow. *Journal Tellus*, **13**(2): 224- 230.
- Ward N.D., Krusche A.V., Sawakuchi H.O., Brito D.C., Cunha A.C., Moura J.M.S., Silva R., Yager P.L., Keil R.G., Richey J.E. 2015. The compositional evolution of dissolved and particulate organic matter along the lower Amazon River-Óbidos to the Ocean. *Marine chemistry*, **177**(2): 244-256.

Watanabe G.A.O. 2014. Marés internas semi-diurnas na plataforma continental amazônica. MS Dissertation, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, 157p.