

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO

Fundação Instituída nos termos da Lei nº 5.152, de 21/10/1966 – São Luís - Maranhão.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

KASSANDRA KELEN BORGES

**CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NO
ESTUÁRIO DO RIO PARNAÍBA, PI**

SÃO LUÍS, MA

2023

PPGOceano

KASSANDRA KELEN BORGES

**CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NO
ESTUÁRIO DO RIO PARNAÍBA, PI**

Dissertação apresentada ao mestrado do Programa de Pós-Graduação em Oceanografia – PPGOceano/UFMA como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Oceanografia.

Orientador (a): Prof. Dr. Francisco Jose da Silva Dias
Linha de pesquisa: Dinâmica de Sistemas Costeiros e Oceânicos

SÃO LUÍS, MA

2023

PPGOceano

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo (a) autor (a). Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

Borges, Kassandra Kelen. Circulação hidrodinâmica e transporte de sedimentos no estuário do rio Parnaíba, PI. / Kassandra Kelen Borges. - 2023.
71 p.

Orientador (a): Francisco Jose da Silva Dias.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Oceanografia, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2023.

1. Hidrodinâmica. 2. Estuário. 3. Mesomaré. 4. Granulometria. I. Dias, Francisco José da Silva. II. Título.

KASSANDRA KELEN BORGES

**CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NO
ESTUÁRIO DO RIO PARNAÍBA, PI**

Dissertação apresentada ao mestrado do Programa de Pós-Graduação em Oceanografia – PPGOceano/UFMA como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Oceanografia.

Aprovada em ____ de _____ de 2023.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Francisco José da Silva Dias
PPGOceano – Programa de Pós-Graduação em Oceanografia
Orientador

Prof. Dr. Audalio Rebelo Torres Junior
PPGOceano – Programa de Pós-Graduação em Oceanografia

Prof. Dr. Francisco José de Paula Filho
Universidade Federal do Cariri - UFCA

*Dedico este trabalho à mulher que é meu
porto seguro e que me inspira todos os dias,*

Conceição, minha mãe.

AGRADECIMENTOS

Sou imensamente grata...

Antes de tudo à Deus, pela força e pelas pessoas boas que Ele fez passar pelo meu caminho e que me ajudaram nesse trabalho.

À minha mãe, Conceição, pelo incentivo e por ser exemplo de coragem e determinação.

Às outras mulheres da minha vida (minha família): Silvia, Leticia, Raimunda, Bruna, vovó Izidoria e ao meu sobrinho Vitor. Apesar de deixarem minha vida mais barulhenta, ainda sim, deixam meus dias mais alegres.

Ao meu orientador Prof. Dr. Francisco Dias, pela oportunidade de participar do LHiCEAI, pela grande paciência nessa jornada do mestrado, pelo apoio científico e por toda estrutura que sempre forneceu aos alunos, e por todo conhecimento comigo. Agradeço ao Prof. Dr. Audalio Rebelo que mesmo indiretamente ajudou na realização deste trabalho.

Aos rapazes do laboratório: Jefferson Horley pelos conselhos, aprendizados e ajuda nos gráficos. Ao Vinicius Maciel, pela ajuda nos dados, nas análises, figuras e pelos aprendizados. Ao Hugo Lima, pela ajuda nos campos, nos dados e nas análises. Ao Rômulo Soares pela paciência, pelo auxílio nos campos, nas análises dos dados e pelo incentivo no trabalho. Aos quatro, agradeço pelas conversas, risadas e brincadeiras, vocês foram essenciais nesse trabalho.

À amiga Kerlem Lucia, que esteve comigo nessas lutas de pesquisa e até nas lutas pessoais. Agradeço pelas conversas de incentivo, pelas risadas e por não ter soltado minha mão nos momentos difíceis. Você foi muito importante nessa jornada.

À amiga Juliana Aguiar pelo apoio nesses anos desde a graduação, agradeço pelos incentivos, conversas e risadas.

Ao professor Francisco de Paula Filho pelo auxílio logístico no campo.

À Capes pelo financiamento enquanto a pesquisa estava sendo realizada.

À Universidade Federal do Maranhão pela infraestrutura.

Meu muito obrigada a todos que fizeram parte desse ciclo. E que venham os próximos...

Em frente...

Ou enfrente!

Caio Fernando Abreu

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

AE – Água Estuarina
ADCP – *Acoustic Doppler Current Profiler*
AR – Água de Rio
CTD – *Conductivity Temperature and Depth*
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
LHICEAI – Laboratório de Hidrodinâmica Costeira, Estuarina e de Águas Interiores
MPS – Material Particulado em Suspensão
OD – Oxigênio Dissolvido
PAD – Percentual de Água Doce
PCA – Plataforma Continental Adjacente
S – Salinidade
T – Temperatura
TEOS-10 - *Termodinamic Equations of Sea Water* - 2010
Tr – Tempo de Residência
Tv – Transporte de Volume
Vfw – Volume de Água Doce
VT – Volume Total
ZCIT – Zona de Convergência Intertropical
ZC – Zona Costeira
ZM – Zona de Mistura
ZR – Zona de Maré de Rio
 ρ – densidade da água do mar
 σ_t = densidade convencional

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização da área de estudo – estuário do rio Parnaíba.....	21
Figura 2. Série histórica de pluviosidade mensal dos anos de 1994 a 2017 e a precipitação do ano de 2018 (ano de coleta). Fonte: INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Estação Meteorológica: Luzilândia.	22
Figura 3. Localização das estações hidrográficas: P01 a P08 no estuário do rio Parnaíba.	24
Figura 4. Representação do comportamento da maré durante a aquisição dos dados no estuário do rio Parnaíba. A) Período de chuva; B) Período de transição e C) Período de seca. Fonte: DHN, 2018.	26
Figura 5. A) Equipamento CTD/EXO2, B) acoplado a grade de proteção.	27
Figura 6. A) ADCP; B) ADCP acoplado à prancha, rebocado na popa da embarcação.	29
Figura 7. A) Garrafa de Van Dorn; B) Aparelho de filtragem e C) Filtros para contagem do MPS.....	31
Figura 8. Draga de Gibbs utilizada na coleta de sedimento.....	33
Figura 9. A) Amostras secas; B) Conjunto de peneiras utilizado na separação dos grãos (> 0.062 mm) acoplado ao equipamento Rotup (Agitador de peneiras).	34
Figura 10. Diagrama triangular para a classificação de sedimentos estuarinos.....	35
Figura 11. Distribuição vertical da temperatura (°C): A) Vazante e B) Enchente; e salinidade (g.kg ⁻¹): C) Vazante e D) Enchente no estuário do rio Parnaíba, no período de chuva.	38
Figura 12. Distribuição vertical do oxigênio dissolvido (µmol.kg ⁻¹): A) Vazante e B) Enchente; e MPS (mg.L ⁻¹): C) Vazante e D) Enchente no estuário do rio Parnaíba, no período de chuva.	39
Figura 13. Diagrama T-S espalhado no período de chuva no ano de 2018, para os índices de temperatura e salinidade onde, (●) preta - Vazante e (●) Cinza – Enchente.	41
Figura 14. Variação do transporte de volume nas oito seções transversais, em maré vazante e enchente no período de chuva.	42
Figura 15. Tempo de Residência (Tr) e o Percentual de Água Doce (PAD) para as seções transversais no estuário do rio Parnaíba.....	44
Figura 16. Distribuição vertical da Temperatura (°C): A) Vazante e B) Enchente; e Salinidade (g.kg ⁻¹): C) Vazante e D) Enchente no estuário do rio Parnaíba, no período de transição.	47
Figura 17. Distribuição vertical do MPS (mg.L ⁻¹): A) Vazante e B) Enchente no estuário do rio Parnaíba, no período de transição.	48
Figura 18. Diagrama T-S Espalhado no período de transição no ano de 2018, para os índices de temperatura e salinidade onde, (■) preto – Vazante e (■) cinza – Enchente.	49
Figura 19. Variação do Transporte de Volume nas oito seções transversais, em maré vazante e enchente, no período de transição.	50
Figura 20. Tempo de Residência (Tr) e o Percentual de Água Doce (PAD) para as seções transversais no estuário do rio Parnaíba, no período de transição.....	51
Figura 21. Distribuição vertical da Temperatura (°C): A) Vazante e B) Enchente; e Salinidade (g.kg ⁻¹): C) Vazante e D) Enchente no estuário do rio Parnaíba, no período de seca.....	54

Figura 22. Distribuição vertical do Oxigênio Dissolvido ($\mu\text{mol.kg}^{-1}$): A) Vazante e B) Enchente; e MPS (mg.L^{-1}): C) Vazante e D) Enchente no estuário do rio Parnaíba, no período de seca.	55
Figura 23. Diagrama T-S Espalhado do período de seca no ano de 2018, para os índices de temperatura e salinidade onde, (\blacktriangle) preto – Vazante e (\blacktriangle) cinza – Enchente.....	57
Figura 24. Variação do Transporte de Volume nas oito seções transversais, em maré vazante e enchente, no período de seca.	57
Figura 25. Tempo de Residência (T_r) e o Percentual de Água Doce (PAD) para as seções transversais no estuário do rio Parnaíba, no período de seca.	59
Figura 26. Diagrama de Pejrup das amostras coletadas nos Pontos 01 ao 08 no estuário do rio Parnaíba, nos períodos de chuva, transição e seca.	61
Figura 27. Balanço líquidos das vazões em $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ nas interfaces ZR, ZM e ZC no estuário do rio Parnaíba, no período de chuva, transição e seca em maré vazante e enchente. Vaz – vazante e Ench – Enchente.	63

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1. Coordenadas das estações hidrográficas do estuário do rio Parnaíba.....	25
Tabela 2. Classificação da escala granulométrica proposto por Wentworth (1922).	33
Tabela 3. Resultados do volume de água total das 8 seções transversais, em condições de maré vazante e enchente, no período de chuva.	43
Tabela 4. Resultados do volume de água doce das 8 seções transversais em condições de maré vazante e enchente, no período de transição.....	51
Tabela 5. Resultados do volume de água total das 8 seções transversais, em condições de maré vazante e enchente, no período de seca.	58
Tabela 6. Resultado da classificação média das amostras granulométricas ao longo do estuário do rio Parnaíba, nos períodos de chuva, transição e seca. Classificação baseada nos parâmetros estatísticos de acordo com Folk e Ward (1957).....	60

RESUMO

Os estuários estão entre os ecossistemas costeiros mais produtivos e hidrológicamente dinâmicos ao longo da interface continente-oceano, isso, devido às descargas fluviais, efeito da precipitação, variação das marés e ação dos ventos. O padrão de circulação e mistura nos ambientes estuarinos são fundamentais para o controle da distribuição e transporte de materiais. Este trabalho teve como objetivo caracterizar a circulação hidrodinâmica e o transporte sedimentos de fundo e em suspensão do estuário do rio Parnaíba, PI, durante os períodos de chuva, transição e seca no ano de 2018. Para aquisição dos dados foram determinadas 8 (oito) seções transversais ao escoamento e 8 (oito) estações hidrográficas. Foram mensurados parâmetros de Temperatura, condutividade e profundidade com auxílio de um CTD e para aquisição dos dados da interação continente - oceano foi utilizado um ADCP. As concentrações do Material Particulado em Suspensão (MPS) foram obtidas por gravimetria e para a coleta de sedimentos foi utilizado uma draga de *Gibbs*. A análise granulométrica foi realizada pelo método de peneiramento e tratados no *Software R*. E posteriormente, as amostras foram analisadas no Diagrama de Pejrup. A variação da estrutura termohalina no período de chuva indicaram intenso aporte fluvial, enquanto que nos períodos de transição e seca houve maior influência da água marinha. As variações da concentração do MPS entre os períodos estudados indicaram maiores valores no período de chuva em decorrência do elevado aporte fluvial e menores valores nos períodos de transição e seca, devido a maior influência da água marinha no sistema estuarino. A disposição dos pares TS indicaram a presença de duas massas de água distintas, sendo uma de origem continental, caracterizada pela elevada temperatura ($T \geq 30^{\circ}\text{C}$) e baixa salinidade ($S \leq 5 \text{ g.kg}^{-1}$) e uma outra resultante da mistura desta com a água costeira. Nas análises da interações continente – oceano, o Transporte de volume (T_v), Percentual de Água Doce (PAD) e Tempo de Residência (Tr), indicaram um intenso escoamento em decorrência do aporte fluvial no período chuvoso, já nos períodos sazonais seguintes a intrusão salina foi predominante no sistema estuarino. Mas no geral os resultados indicaram que quanto maior o percentual de água doce maior é o tempo residual, conforme a influência da maré na região. Quanto às análises granulométricas dos sedimentos de fundo, a classe de Areia Média foi predominante no período de chuva e Areia Fina nos períodos de transição e seca. O Diagrama de Pejrup classificou o estuário do rio Parnaíba como um ambiente de hidrodinâmica alta e percentuais de Areia variando entre 90 – 100% e através do balanço líquido das vazões, o estuário do rio Parnaíba foi classificado como importador.

Palavras-chave: Hidrodinâmica; Estuário; Mesomaré; Granulometria.

ABSTRACT

Estuaries are among the most productive and hydrologically dynamic coastal ecosystems along the continent-ocean interface, due to river discharges, precipitation effect, tidal variation and wind action. The pattern of circulation and mixing in estuarine environments is fundamental for controlling the distribution and transport of materials. This work aimed to characterize the hydrodynamic circulation and the transport of bottom and suspended sediments in the estuary of the Parnaíba River, PI, during the rainy, transition and dry periods in the year 2018. For data acquisition, 8 (eight) were determined. transversal sections to the flow and 8 (eight) hydrographic stations. Temperature, conductivity and depth parameters were measured using a CTD/Exo2 and an ADCP was used to acquire continent-ocean interaction data. Suspension Particulate Matter (SPM) concentrations were obtained by gravimetry and a Gibbs dredge was used to collect sediments. The granulometric analysis was carried out by the sieving method and treated in the R Software. And later, the samples were analyzed in the Pejrup Diagram. The variation of the thermohaline structure in the rainy period indicated intense fluvial input, while in the transition and dry periods there was a greater influence of sea water. Variations in MPS concentration between the studied periods indicated higher values in the rainy season due to the high river input and lower values in the transition and dry periods, due to the greater influence of marine water in the estuarine system. The arrangement of the TS pairs indicated the presence of two distinct water masses, one of continental origin, characterized by high temperature ($T \geq 30^{\circ}\text{C}$) and low salinity ($S \leq 5 \text{ g.kg}^{-1}$) and another resulting from the mixing with coastal water. In the analyzes of the continent - ocean interactions, the Transport volume (T_v), Percentage of Fresh Water (PAD) and Time of Residence (T_r), indicated an intense flow due to the fluvial input in the rainy season, already in the seasonal periods following the saline intrusion was predominant in the estuarine system. But in general, the results indicated that the greater the percentage of fresh water, the greater the residual time, depending on the influence of the tide in the region. As for the granulometric analyzes of the bottom sediments, the Medium Sand class was predominant in the rainy season and Fine Sand in the transition and dry periods. The Pejrup Diagram classified the Parnaíba river estuary as an environment of high hydrodynamics and Sand percentages ranging from 90 - 100% and through the net balance of flows, the Parnaíba river estuary was classified as an importer.

Keywords: Hydrodynamics; Estuary; Mesotide; Grain size.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	JUSTIFICATIVA	19
3	OBJETIVOS	19
3.1	Geral	19
3.2	Específicos	19
4	ÁREA DE ESTUDO	20
5	MATERIAIS E MÉTODOS	24
5.1	Aquisição dos dados	24
5.2	Estrutura termohalina e oxigênio dissolvido	25
5.3	Diagrama T-S espalhado	28
5.4	Interação continente – oceano	29
5.4.1	Transporte de volume	29
5.4.2	Volume de água total	30
5.4.3	Volume de água doce	30
5.4.4	Tempo de residência (Tr)	30
5.5	Material Particulado em Suspensão (MPS)	31
5.6	Granulometria	32
5.7	Diagrama de Pejrup	34
5.8	Modelo em caixa (LOICZ)	35
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
6.1	Período de chuva	36
6.1.1	Estrutura Termohalina	36
6.1.2	Oxigênio Dissolvido e MPS	37
6.1.3	Diagrama T-S espalhado	40
6.1.4	Transporte de volume (Tr)	40
6.1.5	Interação continente – oceano	42
6.2	Transição	44
6.2.1	Estrutura termohalina	44
6.2.2	Material Particulado em Suspensão	45
6.2.3	Diagrama T- S espalhado	46
6.2.4	Transporte de volume (Tr)	49
6.2.5	Interação continente-oceano	50
6.3	Período de seca	52

6.3.1	Estrutura Termohalina	52
6.3.2	Oxigênio Dissolvido e MPS.....	53
6.3.3	Diagrama T-S espalhado	56
6.3.4	Transporte de volume (Tv).....	56
6.3.5	Interação continente-oceano	58
6.4	Granulometria e Diagrama de Pejrup	59
6.5	Balço líquido das vazões	61
7	CONCLUSÃO	64
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65

1 INTRODUÇÃO

A zona costeira faz parte de uma porção territorial de extrema importância por ser uma interface entre o continente e o oceano, que por sua vez, sofre constantes alterações pois servem como barreira para proteção da costa, e principalmente, porque nela vive grande parte da população mundial (CLARK, 1994).

Entre os ambientes da zona costeira, os estuários são considerados como os ecossistemas mais dinâmicos ao longo da interface continente-oceano, devido às principais forçantes: descargas fluviais, efeito da precipitação, variação das marés e influência dos ventos (DAY, 1989; CLOERN, 2001; ALLER, 2004; DYER, 1995). As diferentes intensidades com que cada uma pode atuar, proporcionam diversas condições distintas e peculiares, às quais estão submetidos os estuários do mundo todo (IZUMI, 2011).

Existem diversas maneiras para definir um estuário, dependendo do ponto de vista empregado no trabalho e dos autores. Considerando os processos físicos dos estuários, Pritchard (1955) descreve como “um corpo de água costeiro semifechado com ligação livre com oceano aberto, estendendo-se rio acima até o limite da influência da maré, sendo que em seu interior a água do mar é mensuravelmente diluída pela água doce oriunda da drenagem continental”.

Davies (1964) classificou os estuários de acordo com a altura máxima de maré: micromarés, com alturas menores que 2 metros; mesomarés, alturas que variam de 2 a 4 metros; macromarés, aqueles com alturas entre 4 e 6 metros e hipermarés com alturas maiores que 6 metros. Quanto a estratificação da salinidade, Pritchard (1955) classifica os estuários em cunha salina, parcialmente misturado, verticalmente bem misturado e lateralmente estratificado e bem misturado.

Quanto as zonas estuarinas, Kjerve (1987) classifica em três: Zona de Maré do Rio (ZR), que corresponde a parte fluvial com salinidade praticamente zero, sujeita à influência da maré; Zona de Mistura (ZM), região onde ocorre a mistura da água fluvial com água do mar; e Zona Costeira (ZC) que corresponde a região costeira adjacente se estendendo até a frente da pluma estuarina.

Quanto aos mecanismos responsáveis pelos padrões de mistura entre as massas de água em um corpo estuarino, pode-se classificar os estuários segundo Pritchard (1952), em três tipos: **1) Cunha salina:** são altamente estratificados, típicos de regiões de micromaré, onde ocorre o domínio da descarga fluvial. Esse padrão é caracterizado pela diferença de densidade da água fluvial e a água salgada gerando uma diferença acentuada no perfil vertical de salinidade e um aumento gradativo da mesma em direção ao oceano; **2) Parcialmente misturado:** estuários onde o volume de água no seu interior não é totalmente misturado. A força da maré e a descarga fluvial possuem forças equivalentes que irão gerar turbulência interna; **3) Bem misturado:** estuários típicos de ambientes rasos, onde a descarga fluvial é muito pequena, havendo apenas ou predominantemente influência da maré. Este ambiente não apresenta gradiente vertical de salinidade, ou em alguns casos é muito fraco.

A diferença de densidade das águas pode apresentar-se como gradientes horizontais e/ou verticais, sendo neste último caso, gerador da estratificação das águas. Essa diferença de densidade das águas, principalmente quando governada pelo movimento das marés dentro do estuário e a morfologia local, gera gradientes de pressão dos tipos barotrópico e baroclínico, que irão atuar no deslocamento e mistura das massas d'água costeira e fluvial (JOUON *et al.*, 2006).

Na hidrodinâmica estuarina, diferentes processos de circulação e mistura podem ocorrer tanto no sentido vertical, como longitudinal, decorrentes da ação das marés e descarga fluvial (DYER, 1997). Nessas regiões a oscilação natural do nível do mar e as correntes de enchente e vazante são as características mais notáveis dos movimentos da água nestas regiões (MIRANDA *et al.*, 2002). Em estuários com canais de maré profundos e grandes áreas intermareais, há um predomínio de correntes de vazante mais intensas, enquanto estuários com canais rasos e pouca área intermareal tendem a gerar correntes de enchente mais intensas (DRONKERS, 1986).

Essas correntes, assim como as correntes residuais (que representam a velocidade média das correntes ao longo de um tempo, ou seja, ao longo de vários ciclos de maré), exercem um papel relevante no tempo de residência de materiais (nutrientes, sedimentos, Material Particulado em Suspensão - MPS) dentro do

estuário, controlando a importação ou exportação dos mesmos no interior do corpo de água (LE HIR *et al.* 2000).

A identificação dos padrões de circulação e mistura nos ambientes estuarinos é importante para o controle da distribuição e transporte de materiais assim como, a localização das áreas com maior concentração de sedimentos (SCHOELLHAMER, 2001). Nessa região a velocidade resultante de movimentos convergentes é praticamente nula e a concentração de sedimentos de origem fluvial e marinha é alta, além de que, os processos gerados pelos transportes de sedimentos pela circulação estuarina podem promover o aprisionamento dos mesmos no interior do estuário, impedindo ou retardando a sua saída para a zona costeira (MIRANDA *et al.*, 2002).

Esses processos hidrodinâmicos são fundamentais no ciclo sedimentar, pois promovem as trocas e transporte de sedimentos entre os oceanos e continentes (MIRANDA *et al.*, 2002). Para Sousa (2011), o deslocamento e o transporte dos sedimentos dependem de algumas características como: a forma, o tamanho, peso da partícula e das forças exercidas pela ação do deslocamento. Quando essas forças diminuem a uma condição de não poderem mais atuar no deslocamento dessas partículas, ocorre o processo denominado deposição.

Para entender melhor esses processos sedimentares, o estudo da granulometria é necessário, que, de acordo com Suguio (1973) é definida como: a medida do tamanho dos grãos, sendo frequentemente uma das propriedades físicas fundamentais dos sedimentos. Sendo possível deduzir informações sobre a proveniência, transporte e ambientes deposicionais (DIAS, 2004). Além disso, o selecionamento granulométrico dos sedimentos finos a partir da foz está relacionado com a diferença de densidade entre as águas fluviais e marinhas que atuam no ambiente (FALCÃO *et al.*, 2010).

2 JUSTIFICATIVA

O litoral do Estado do Piauí está inserido em uma paisagem costeira geológica recente no nordeste setentrional do Brasil e é marcado por uma variedade de feições geomorfológicas distintas (PAULA, 2013). Dentre os ambientes costeiros, o estuário do Delta do rio Parnaíba além de integrar parte da Área de Proteção Ambiental (APA) do Delta do Parnaíba, têm importância social e econômica através dos recursos naturais disponíveis. Devido a sua importância, tornou-se alvo de diversos interesses que alteram as condições de uso e ocupação das zonas costeiras (MMA, 2006).

Os processos que regem o padrão hidrodinâmico em ambientes estuarinos têm influência direta na distribuição de elementos dissolvidos e particulados, sedimentos, poluentes e microorganismos, os quais podem ser considerados como traçadores ambientais nos estuários. Sendo assim, a caracterização do comportamento hidrodinâmico e a distribuição de sedimentos de fundo e em suspensão sob diferentes períodos sazonais do estuário do rio Parnaíba são uma importante ferramenta para o entendimento do transporte de materiais no gradiente continente - oceano de sistemas estuarinos dominados por regime de mesomaré.

3 OBJETIVOS

3.1 Geral

Caracterização da circulação hidrodinâmica e transporte sedimentos em diferentes períodos sazonais do estuário do rio Parnaíba, PI.

3.2 Específicos

- Caracterizar a variação da estrutura termohalina e massas de água em diferentes regimes sazonais;
- Determinar as zonas estuarinas: Zona de Rio (ZR), Zona de Maré do rio (ZM) e Zona Costeira (ZC) do estuário do rio Parnaíba;

- Caracterizar as interações continente-oceano: Transporte de Volume (Tv), Tempo de Residência (Tr) e Percentual de Água Doce (PAD) em diferentes regimes sazonais;
- Analisar a variação do transporte do Material Particulado em Suspensão em diferentes regimes sazonais;
- Caracterizar a distribuição dos sedimentos de fundo em diferentes períodos sazonais;
- Analisar o balanço líquido das vazões de acordo com as zonas estuarinas e em diferentes regimes sazonais.

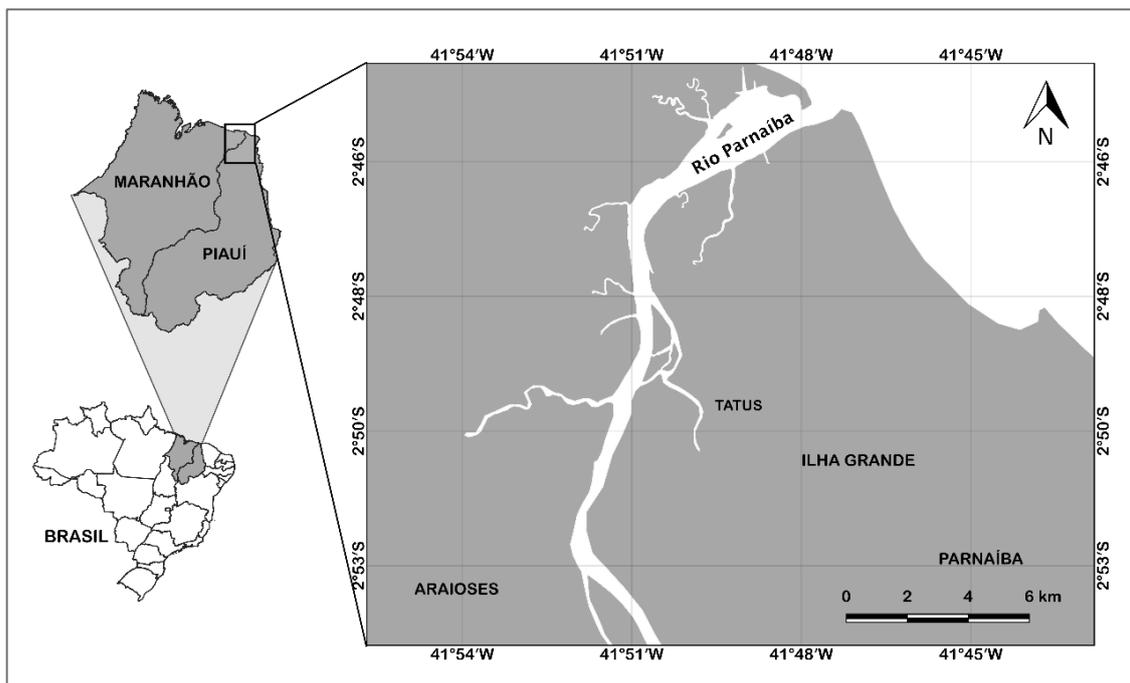
4 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende o estuário do rio Parnaíba localizado no Nordeste Brasileiro entre os estados do Piauí e Maranhão (Figura 1). O rio Parnaíba nasce na chapada das Mangabeiras, ao sul do Piauí, e sua foz ao norte no Oceano Atlântico, onde forma um grande delta em mar aberto. Constitui a quarta maior bacia hidrográfica brasileira e é o maior rio do Nordeste ocidental ou Meio Norte. Possui extensão total de aproximadamente de 1.450 Km e serve de divisa entre os estados do Piauí e Maranhão (LIMA, 2016).

O rio Parnaíba recebe sete afluentes no lado do Piauí (Uruçuí Vermelho, Uruçuí Preto, Gurguéia, Itaueira, Canindé, Poti e Longá) e um do lado do Maranhão (Balsas). É dividido, geograficamente, em Alto Parnaíba, das nascentes à afluência do rio Gurguéia, Médio Parnaíba, até a foz do rio Poti e Baixo Parnaíba até a formação do delta junto ao oceano Atlântico (LIMA, 2012).

O regime de maré é semidiurna, com intervalos proporcionais de aproximadamente 6 horas, amplitude máxima de 3,3 m e mínima 1,7 m na maré de quadratura (DHN, 2018), características de regiões de mesomaré. Os ventos alísios de nordeste são bastante constantes ao longo do ano, com as velocidades médias variando entre 2 m.s^{-1} a 6 m.s^{-1} . Nesta parte da costa do Nordeste brasileiro, o clima de ondas é dominante na direção SW, com uma altura de onda significativa de 1 m e período médio de 5 segundos. A combinação de vento e ondas produz uma corrente de longitude leste-oeste, característica de toda a costa brasileira do Nordeste (BITTENCOURT *et al.*, 2005).

Figura 1. Mapa de localização da área de estudo – estuário do rio Parnaíba.



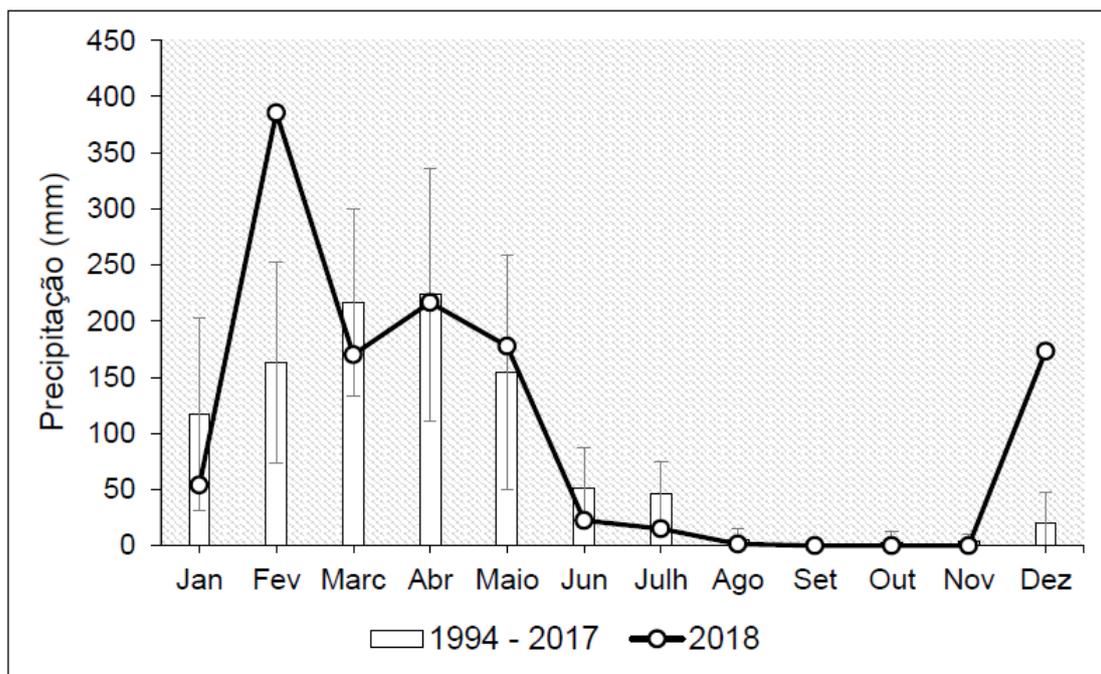
Tendo em vista que a bacia do rio Parnaíba se encontra inserida no Nordeste Setentrional, Meridional e no Meio Norte, ela apresenta características fisiográficas de zona de transição, com um regime pluviométrico heterogêneo e cinco tipos de clima bem definidos (PAULA FILHO, 2014).

O estado do Piauí é uma zona de transição climática entre as zonas Pré-Amazônica e Semiárida NE (ANDRADE, Jr. *et al.*, 2005). O clima da região possui dois períodos distintos: um período chuvoso, que se inicia em janeiro e que se prolonga até maio, e um período seco, que se estende de julho a dezembro. O índice de precipitação anual fica em torno de 1.152 mm. A duração de cada estação depende da posição da Zona de Convergência Intertropical e da ocorrência e intensidade do fenômeno *El Niño-Oscilação Sul* (ENOS) (MMA, 2006; HASTENRATH, 2006).

Os dados meteorológicos dos últimos 24 anos (Figura 2) evidenciam dois períodos sazonais distintos: período chuvoso, que se inicia em janeiro e que se prolonga até maio, com maiores precipitações em abril (223,6 mm) e o período seco, que se estende de junho a dezembro com menor precipitação em setembro (0,93 mm). Para o ano de 2018 houve maiores precipitações em fevereiro com

384,6 mm, sendo mais elevada que a média histórica registrada para esse mês (172,4 mm).

Figura 2. Série histórica de pluviosidade mensal dos anos de 1994 a 2017 e a precipitação do ano de 2018 (ano de coleta). Fonte: INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Estação Meteorológica: Luzilândia.



A bacia do rio Parnaíba encontra-se integralmente inserida na Região Nordeste do Brasil, estendendo-se pelos estados do Maranhão, Piauí e Ceará. Abrange 279 municípios, totalizando 333.056 km² de superfície, o equivalente a cerca de 4% do território nacional (ANA, 2015).

De acordo com o MMA (2006), a bacia do Parnaíba se divide em três unidades fisiográficas (sub-bacias): Alto Parnaíba que compreende os rios Balsas, Gurgueia e Itaueiras; Médio Parnaíba com os rios Canindé/Piauí e Poti/Parnaíba e o Baixo Parnaíba com os rios Longá/Parnaíba, sendo que o rio Longá alimenta inúmeras lagoas de pequeno porte, além de ser caracterizado por barragens em dois pontos do seu curso. O rio Parnaíba forma um delta com cinco canais de maré, uma no Piauí (Igaraçu), e as outras quatro estão situadas no Maranhão (Tutóia, Melancieira, Caju e Canárias) (ARIDAS, 1995).

O Delta do Parnaíba é o único em mar aberto das Américas, que possui extensas planícies fluvio-marinhas com reduzido perfil batimétrico e formação de grandes bancos de areia, resultantes de processos de acumulação de materiais terrígenos, desenvolvendo-se, assim, extensas áreas de mangues, além das restingas e das dunas na zona litorânea do Baixo Parnaíba (ARIDAS, 1995; MMA, 2005; 2006; SEMAR, 2010).

Conforme estudo realizado pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2015), a vazão média da região do Parnaíba é de $767 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ com disponibilidade hídrica de $379 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. O regime de vazão do rio é perene em função da alimentação dos tributários perenes em seu alto curso onde se localiza a faixa de regime de chuvas em torno de 1.200 e 1.400 mm anuais e seu médio e baixo curso localizam-se numa área onde há um dos maiores aquíferos regionais da bacia do Parnaíba (LIMA, 2013).

O rio Parnaíba flui sobre a bacia hidrográfica do Parnaíba durante a maior parte do seu trajeto, alcançando a bacia hidrográfica de Barreirinhas na região da sua foz. Independente de qual bacia sedimentar esteja passando, sedimentos inconsolidados são encontrados nas margens do rio e, portanto, uma alta entrada de sedimentos para o rio é esperada. Semelhanças no arcabouço tectônico foram observadas, com ambas as bacias apresentando uma tendência de lineamento predominantemente SW-NE e NW-SE (ALMEIDA FILHO *et al.*, 2009; OLIVEIRA *et al.*, 2003).

estão descritos os dias e horários das coletas, conforme os períodos amostrados, onde figura 4A corresponde ao período de chuva e realizado em maré de sizígia, figura 4B foi no período de transição e em maré de quadratura e figura 4C foi o período de seca e em maré de quadratura.

Tabela 1. Coordenadas das estações hidrográficas do estuário do rio Parnaíba.

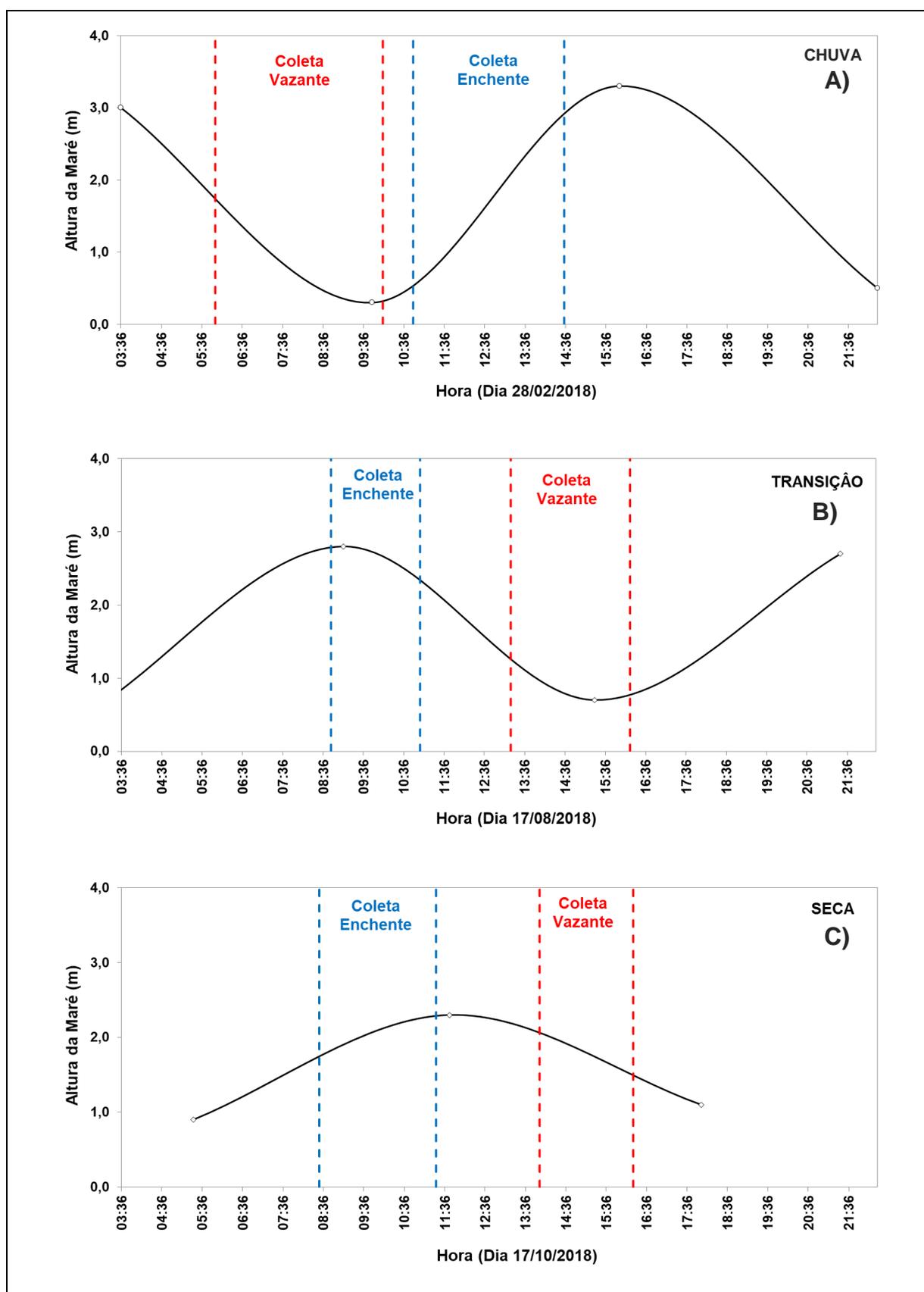
Ponto	Latitude	Longitude
P01	-2,746583°	-41,795870°
P02	-2,757191°	-41,819106°
P03	-2,769702°	-41,843372°
P04	-2,798445°	-41,847134°
P05	-2,826439°	-41,850617°
P06	-2,851800°	-41,859081°
P07	-2,877088°	-41,863790°
P08	-2,899028°	-41,845530°

5.2 Estrutura termohalina e oxigênio dissolvido

Para a aquisição de dados da estrutura termohalina e do OD foi utilizado um CTD (*Conductivity, Temperature and Depth*) modelo EXO2/YSI, (Figura 5-A e B), o qual foi imerso na coluna d'água a cada estação de coleta. O equipamento possui sensores de temperatura com amplitude de medição entre -5°C e 35°C; condutividade entre 0 e 200 mS.cm⁻¹, Oxigênio Dissolvido com amplitude de medição ± 0,1 mg.L⁻¹ e pressão até 200 dbar. O equipamento foi previamente lastreado no intuito de minimizar a atuação das correntes no deslocamento horizontal em relação a vertical.

Na etapa de tratamento dos dados de CTD foram detectados e eliminados os dados espúrios, através do uso de uma taxa de máxima variação de cada propriedade, eliminando assim quaisquer valores que excederam a este limite. Desse modo, para uma melhor análise dos dados, os perfis hidrográficos realizados com CTD foram divididos em blocos de 0,5 m de espessura, desde a superfície até o fundo. Em cada bloco, os dados que diferiam da média ±3 vezes o desvio padrão do bloco foram eliminados (EMERY; THOMSON, 1997).

Figura 4. Representação do comportamento da maré durante a aquisição dos dados no estuário do rio Parnaíba. A) Período de chuva; B) Período de transição e C) Período de seca. Fonte: DHN, 2018.

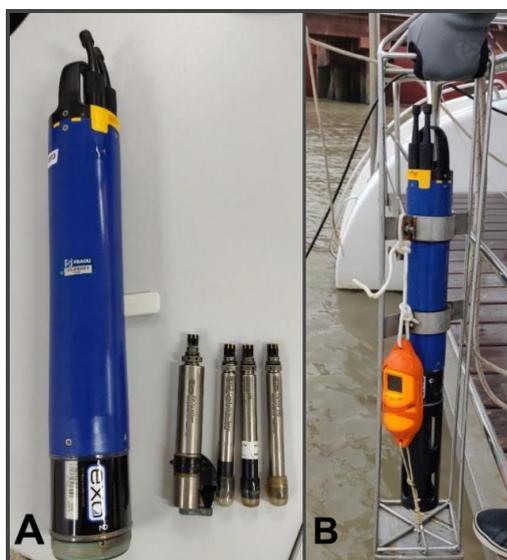


O CTD foi descido na coluna d'água a uma velocidade de $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e frequência de aquisição de dados de 1 Hz. No entanto, devido ao jogo da embarcação e a operação manual do cabo que desceu o CTD, não foi possível garantir um equi-espaçamento vertical entre as amostras no momento da amostragem. Sendo assim, foi calculada uma média vertical para cada 0,5 m de coluna d'água, o que resultou em perfis equi-espaçados verticalmente.

Com a retirada dos valores inconsistentes e do equi-espaçamento vertical, os valores dos dados de temperatura e salinidade foram recalculados utilizando um procedimento conhecido na literatura como "filtragem por janela móvel", para cada 0,5 m de água. Os valores retirados neste procedimento foram substituídos por uma média ponderada entre eles mesmos e os valores adjacentes. A quantidade de valores adjacentes incluídos nesta média corresponde ao tamanho da janela utilizada.

A salinidade ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) e a temperatura ($^{\circ}\text{C}$) foram calculadas segundo a TEOS-10 - *Thermodynamic Equation Of Seawater – 2010*, (Equação Termodinâmica da Água do Mar), proposta pela Comissão Oceanográfica Intergovernamental (IOC) sendo essa baseada em uma formulação a partir da qual todas as propriedades termodinâmicas da água do mar, como densidade e entalpia, são expressas como funções da salinidade absoluta ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), em vez de serem funções da condutividade da água do mar (IOC, 2010).

Figura 5. A) Equipamento CTD/EXO2, B) acoplado a grade de proteção.



No presente estudo, a densidade convencional (σ_t), foi calculada de acordo com a Equação 1, proposta por Miranda *et al.*, (2002):

$$\sigma_t = \rho(s, T, P_{atm}) - 1000 \quad \text{Equação 1}$$

Onde: $\rho(S, T, P_{atm})$ é a densidade da água do mar com salinidade (S), temperatura (T) a uma pressão atmosférica (P_{atm}).

5.3 Diagrama T-S espalhado

Foi construído o diagrama T-S espalhado que, no plano, TS representam observações de salinidade e temperatura (MIRANDA, 1982; MIRANDA, 1985), postos na ordenada e na abcissa do diagrama cartesiano, respectivamente (MIRANDA *et al.*, 2002). Para a estimativa da área horizontal e vertical de influência de um dado par TS (temperatura e salinidade), foi levada em consideração a isotropia na distribuição das estações hidrográficas. A distância vertical para cada par TS foi definida como:

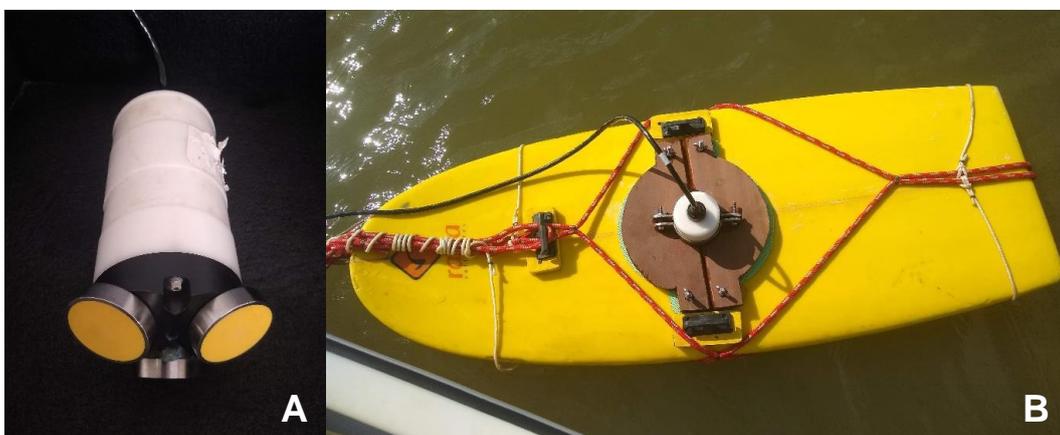
$$d_i \begin{cases} \frac{h_{i+1} - h_i}{2} & \text{se } i = 1 \\ \frac{h_{i+1} - h_{i-1}}{2} & \text{se } 1 < i < n \\ Z - h_i + \frac{h_i - h_{i-1}}{2} & \text{se } i = n \end{cases} \quad \text{Equação 2}$$

O índice i representa a i -ésima observação na coluna de água, numeradas consecutivamente a partir da superfície livre até o fundo ($i = 1$ é a observação mais próxima à superfície e $i = n$ é a observação mais próxima ao fundo); d_i representa a distância vertical de influência da i -ésima observação na coluna de água; $h_i \geq 0$ é a profundidade da i -ésima observação; Z é a profundidade da estação (MIRANDA; CASTRO, 1979).

5.4 Interação continente – oceano

Os dados das seções transversais foram obtidos com um ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) da marca SONTEK/YSI com frequência de 1,5 MHz, em seções transversais ao escoamento. O equipamento foi acoplado a uma prancha presa à embarcação (Figura 6-A e B). A aquisição dos dados foi feita a cada 5 segundos (*Burst interval*), associado a um sistema *Bottom Tracking* que utiliza o fundo como referencial. A extensão vertical de cada célula foi de 0,5 m, com distância de branco de 0,40 cm e alcance máximo de 30 m.

Figura 6. A) ADCP; B) ADCP acoplado à prancha, rebocado na popa da embarcação.



5.4.1 Transporte de volume

O transporte de volume (Tv) ou vazão estuarina nas seções transversais ao fluxo médio da área $A = A(x, z)$ ao longo do estuário do rio Parnaíba foram calculados através da integração numérica, segundo Miranda *et al.* (2002).

$$Tv = \iint A \vec{v} \cdot \vec{n} dA \quad \text{Equação 3}$$

onde: $\vec{v} = \vec{v}(x, Z, t)$ é o vetor velocidade; \vec{n} é o versor normal à seção A; t é o instante amostral; x é a distância horizontal da seção; z é a profundidade. Essa quantidade física foi calculada em unidades do Sistema Internacional (SI) ($m^3 s^{-1}$).

5.4.2 Volume de água total

O volume de água total (dv) foi calculado a partir do Tv , em m^3 , como na equação 4:

$$dv = \int_0^T |Tv| \quad \text{Equação 4}$$

onde: T é o tempo em segundos de meio ciclo de maré.

5.4.3 Volume de água doce

O volume de água doce (Vfw) que existe na massa de água total estuarina, em m^3 , foi obtido a partir da equação 5. Onde foi considerado o volume de água total e determinado o Percentual de Água Doce (PAD) para o período estudado.

$$Vfw = \frac{1}{v} \int \frac{S_o - S_e}{S_o} dv \quad \text{Equação 5}$$

onde: S_o é a salinidade observada para a água do mar ($36,2 \text{ g.kg}^{-1}$); S_e = média aritmética da salinidade medida *in situ* para a seção do canal estuarino.

5.4.4 Tempo de residência (Tr)

Em geral, o termo tempo de residência (Tr) no ambiente estuarino é um parâmetro conveniente que representa na escala de tempo os processos de transporte físicos, que ocorrem nestes ambientes e muitas vezes são usados como parâmetros de comparação na escala de tempo de processos biogeoquímicos (CUCCO; UMGIESSER, 2003).

O Tr é a razão entre volume de água doce (Vfw) contido no estuário e o Tv , isso para as substâncias orgânicas e/ou inorgânicas transportadas e retidas no sistema estuarino, como demonstrado na equação 6:

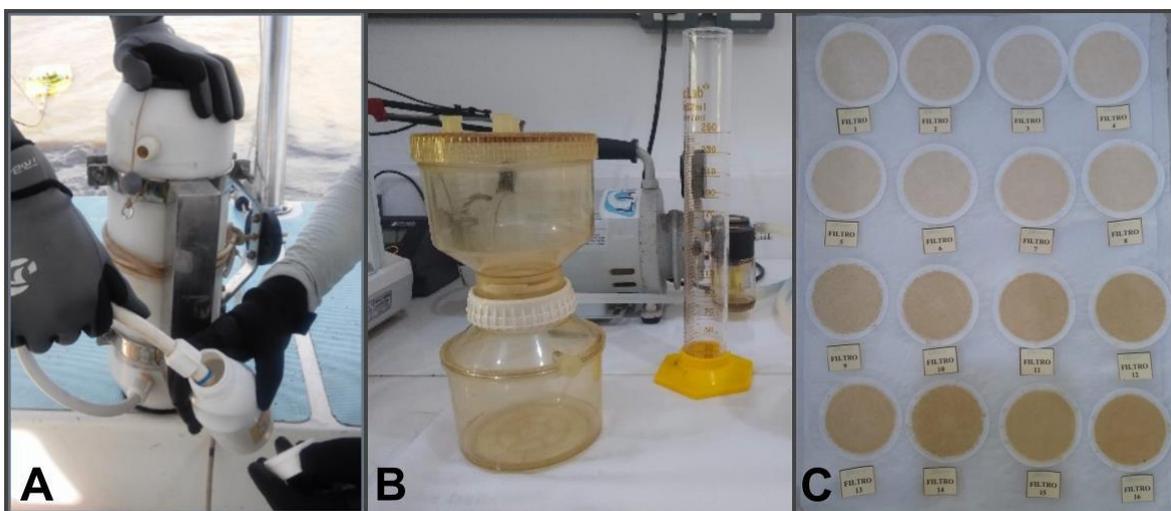
$$TR = \frac{V_{fw}}{Tv} \quad \text{Equação 6}$$

V_{fw} = Volume de Água doce; Tv = Transporte de Volume

5.5 Material Particulado em Suspensão (MPS)

A amostragem do MPS foi feita com auxílio de uma garrafa de Van Dorn com capacidade de 5 litros (Figura 6-A), a qual foi lançada na água em duas profundidades: superfície e fundo em maré enchente e vazante. Logo após a coleta, as amostras foram acondicionadas em garrafas de polietileno de 500 mL e devidamente refrigeradas para conservação até a execução dos procedimentos no Laboratório de Modelagem Equatorial (MEL), vinculado ao LHiCEAI/UFMA.

Figura 7. **A)** Garrafa de Van Dorn; **B)** Aparelho de filtração e **C)** Filtros para contagem do MPS.



As concentrações do MPS foram determinadas por gravimetria, segundo metodologia descrita por Strickland e Parsons (1972) e Apha (2001). As amostras de água foram filtradas através de filtros de fibra de vidro de 47 mm de diâmetro e porosidade nominal de 2 μm , com o auxílio de uma bomba a vácuo. Antes da amostragem, os filtros passaram por um processo de preparo: foram lavados três vezes consecutivas com 20 mL de água destilada. Depois, foram secos em estufa

a 100°C por 1 hora e em seguida, resfriados em dessecador até atingir temperatura ambiente, logo após pesados em balança analítica com precisão de $\pm 0,0001$ g.

O ciclo foi repetido até que os filtros atingissem peso constante. Em seguida, um volume suficiente e adequado da amostra foi homogeneizado e transferido com uma proveta para o aparato de filtração (Figura 7-B) ligado a bomba a vácuo (300 a 350 mmHg). Após a filtração (Figura 7-C), o volume inicial foi anotado e os filtros foram colocados em estufa a 100°C por cerca de 1 hora, sendo resfriados em dessecador e pesados em balança analítica (*Shimadzu*), modelo AY220), repetindo-se até atingir peso constante (= peso final dos filtros). Através da diferença de peso final e o inicial foi possível determinar o MPS em mg.L^{-1} , de acordo com a equação 7, a seguir:

$$MPS (\text{mg L}^{-1}) = \frac{(B - A) \times 1000}{\text{volume da amostra (mL)}} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

A = peso do filtro (mg);

B = peso do filtro + resíduo seco (mg).

5.6 Granulometria

As amostras de sedimentos de fundo foram coletadas com o auxílio de uma draga de Gibbs (Figura 9), e posteriormente acondicionadas em sacos plásticos e armazenadas em caixas de térmicas para o transporte ao Laboratório de Modelagem Equatorial (MEL), vinculado ao LHiCEAI (CCMar-UFMA), onde foi realizada as análises.

Para a análise granulométrica, foram utilizados os métodos de peneiramento seco para a fração grossa ($> 0,062$ mm), segundo metodologia proposta por Suguio (1973) e utilizando a escala granulométrica proposta por Udden (1914) e Wentworth (1922) (Tabela 2). O método consiste, primeiramente, na remoção dos sais através da adição de água destilada nas amostras. Após a

remoção, as amostras foram secas em estufa a 60 °C, posteriormente quarteadas para obter-se o peso de 50 gramas de sedimento. Cada amostra foi colocada no conjunto de peneiras e submetida à agitação pelo equipamento *Rotup*, (Figura 9-A e B).

Tabela 2. Classificação da escala granulométrica proposto por Wentworth (1922).

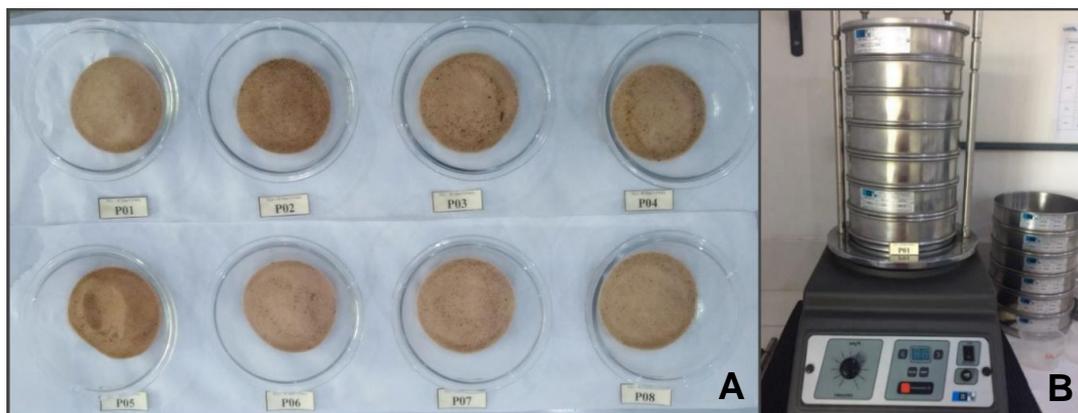
Phi ϕ	Textura	Malhas (mm)
-2		4
-1	Cascalho CSC	2
0	Areia Muito Grossa (AMG)	1
1	Areia Grossa (AG)	0,5
2	Areia Média (AM)	0,25
3	Areia Fina (AF)	0,125
4	Areia Muito Fina (AMF)	0,062
5	Silte Grosso (SG)	0,031
6	Silte Médio (SM)	0,015
7	Silte Fino (SF)	0,0078
8	Silte Muito Fino	0,0039
9	Argila Grossa	0,0020
10	Argila Média	0,00098
11	Argila Fina	0,00024
12	Argila Muito Fina	0,00012

O cálculo das porcentagens de cada fração granulométrica (Escala Wentworth) e as análises estatísticas foram feitas segundo Folk e Ward (1957) utilizando o software livre R (*R development Core Team, 2009*) através do pacote Rysgran (GILBERT; CAMARGO E SANDRINI-NETO, 2015).

Figura 8. Draga de Gibbs utilizada na coleta de sedimento.



Figura 9. A) Amostras secas; **B)** Conjunto de peneiras utilizado na separação dos grãos (> 0.062 mm) acoplado ao equipamento *Rotup* (Agitador de peneiras).

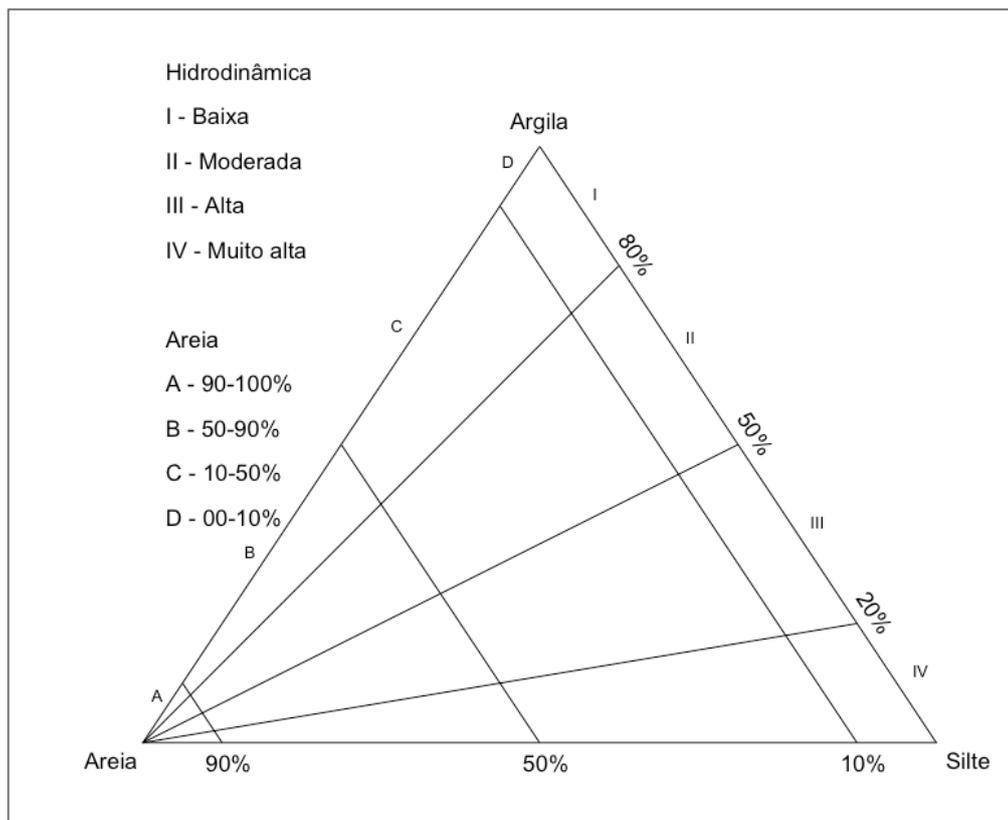


5.7 Diagrama de Pejrup

O diagrama de Pejrup (1988) é um diagrama triangular utilizado para classificar a hidrodinâmica estuarina com base nos sedimentos de fundo, a partir das porcentagens das classes granulométricas. Basicamente, consiste em utilizar o teor de argila presente nos sedimentos para delimitar as áreas do diagrama. Desta maneira, o diagrama proposto é dividido em 16 grupos, nomeados por letras (A, B, C e D) e números (I, II, III e IV) que indicam as condições de deposição estuarina.

A seção das letras indica o percentual de areia presente nos sedimentos e variam de acordo com a seguinte sequência: A (90 - 100%), B (50 - 90%), C (10 - 50%) e D (0 - 10%). A seção dos algarismos romanos refere-se às porcentagens de argila e silte para determinar as condições hidrodinâmicas da região, sendo classificada pela forma: I (baixa), II (moderada), III (alta) e IV (muito alta), de acordo com a Figura 10.

Figura 10. Diagrama triangular para a classificação de sedimentos estuarinos.



Fonte: Pejrup (1988).

5.8 Modelo em caixa (LOICZ)

Para os cálculos dos balanços líquidos das vazões na interface continente-oceano foi utilizado um modelo de caixa LOICZ (*Land Ocean Interactions in the Coastal Zone*) é uma estimativa descrita originalmente em Gordon (1996). Esse modelo foi proposto para ambientes costeiros e tem a o objetivo de mostrar a contribuição da bacia de drenagem para o sistema estuarino e do mesmo para a zona adjacente.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Período de chuva

6.1.1 Estrutura Termohalina

No estuário do rio Parnaíba a temperatura da água em maré vazante (Figura 11-A) apresentou amplitude térmica 1,5 °C, com valor mínimo de 30,2 °C e máximo de 31,7 °C, onde observou-se maiores temperaturas estuário acima e menores em direção a foz. Isso ocorre devido a diminuição da razão de aspecto (largura e profundidade), propiciando maior troca com a atmosfera. O mesmo comportamento foi observado em maré enchente (Figura 11-B), onde a amplitude térmica foi de 2,2 °C, com valores maiores que 31°C próximos ao continente e menores que 30,6 °C na região da foz.

A distribuição vertical da salinidade na maré vazante (Figura 11-C) não apresentou variação significativa, cujos valores foram de 0,03 a 0,20 g.kg⁻¹, indicando um comportamento homogêneo tanto horizontal quanto verticalmente. Além da condição de maré vazante, a presença de água doce em todos os pontos evidencia o intenso aporte fluvial em decorrência do período chuvoso.

Na maré enchente (Figura 11-D), os valores de salinidade variaram entre 0,03 a 30,0 g.kg⁻¹, no sentido continente – oceano, respectivamente. É possível observar a influência do caudal fluvial até o quilômetro 15, onde a salinidade observada foi em torno de 3,0 g.kg⁻¹, aumentando nos quilômetros seguintes (estuário abaixo). Na área de influência da intrusão salina (entre 15 a 20 km), observou-se menores salinidades em superfície e maiores no fundo, com gradiente vertical de 0,3 g.kg⁻¹.m⁻¹.

Da Silva (2015) relata em estudo realizado na foz do rio Parnaíba, durante a transição entre a maré baixa e a alta, estuário abaixo, salinidades menores em superfície e maiores no fundo. E em estuário acima, foram identificadas salinidades próximas a 0,0. Quanto à temperatura, foram observadas pequenas diferenças entre as águas marinhas e fluviais que variaram de 28,3 °C a 30,1 °C em superfície. A água do mar foi observada no estuário durante a cheia e a maré alta por um total

de 8,5 / 25 horas. Portanto, na maior parte do tempo, essa região é submetida a condições de águas fluviais.

Em suma, a variabilidade observada da estrutura termohalina durante o período chuvoso, mostra um intenso aporte fluvial, uma vez que as características das águas oriundas da drenagem continental são mais quentes e menos salinas que às do oceano adjacente.

6.1.2 Oxigênio Dissolvido e MPS

A distribuição vertical do oxigênio dissolvido na maré vazante (Figura 12-A), apresentou concentrações entre 157,2 e 172,2 $\mu\text{mol.kg}^{-1}$, onde os menores valores situam-se ao fundo e os maiores em superfície da água. Possivelmente, tais valores indicam maior atuação dos ventos pelos processos de trocas difusivas entre a atmosfera e a água e/ou processos fotossintéticos.

Em maré enchente (Figura 12-B), as concentrações de oxigênio dissolvidos foram maiores, variando entre 170,1 a 186,6 $\mu\text{mol.kg}^{-1}$, provavelmente esse aumento está relacionado aos processos turbulentos ocasionados pelo encontro da água marinha com a descarga fluvial. Em estudo realizado por Dias (2007) no estuário do Rio Jaguaribe no período chuvoso de valores entre 97 a 204 $\mu\text{mol.kg}^{-1}$ foram observados, corroborando com os valores encontrados no estuário do rio Parnaíba.

A distribuição da concentração de MPS em maré vazante (Figura 12-C) variou entre 68,0 a 108,0 mg.L^{-1} , tais valores estão associados a maior contribuição da descarga fluvial e/ou a ressuspensão do material particulado pelas correntes de maré. No entanto, em maré enchente (Figura 12-D), observou-se menores concentrações, variando entre 19,2 e 79,2 mg.L^{-1} , no sentido oceano-continente, respectivamente. Possivelmente, esse comportamento é decorrente da maior contribuição de água salina no estuário refletindo em menores concentrações de material particulado na água. Segundo estudos realizados no rio Parnaíba em fevereiro de 2009 (DA SILVA, 2015), no período chuvoso as concentrações de MPS variaram entre 172,2 a 84,8 mg.L^{-1} .

Figura 11. Distribuição vertical da temperatura ($^{\circ}\text{C}$): **A)** Vazante e **B)** Enchente; e salinidade (g.kg^{-1}): **C)** Vazante e **D)** Enchente no estuário do rio Parnaíba, no período de chuva.

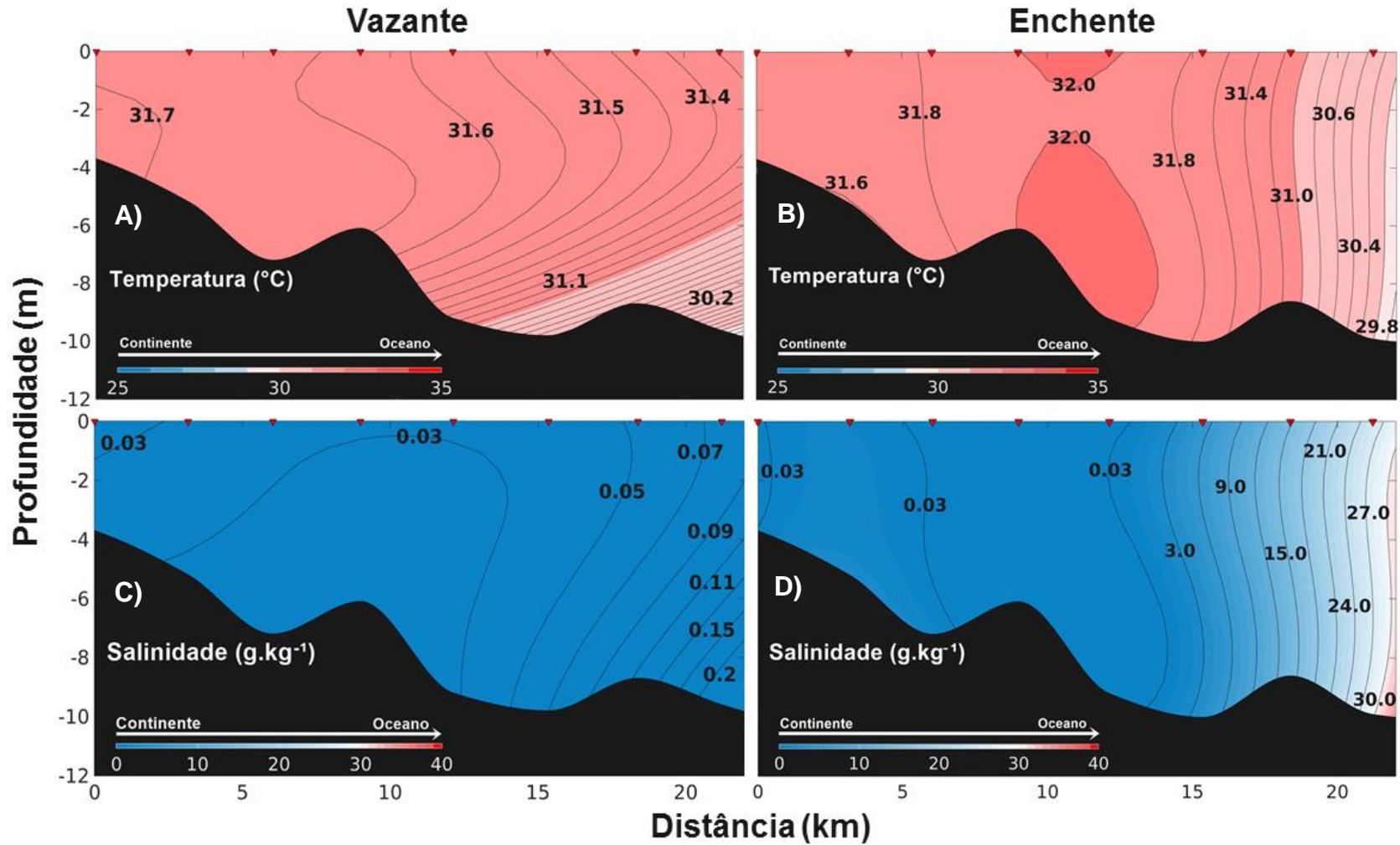
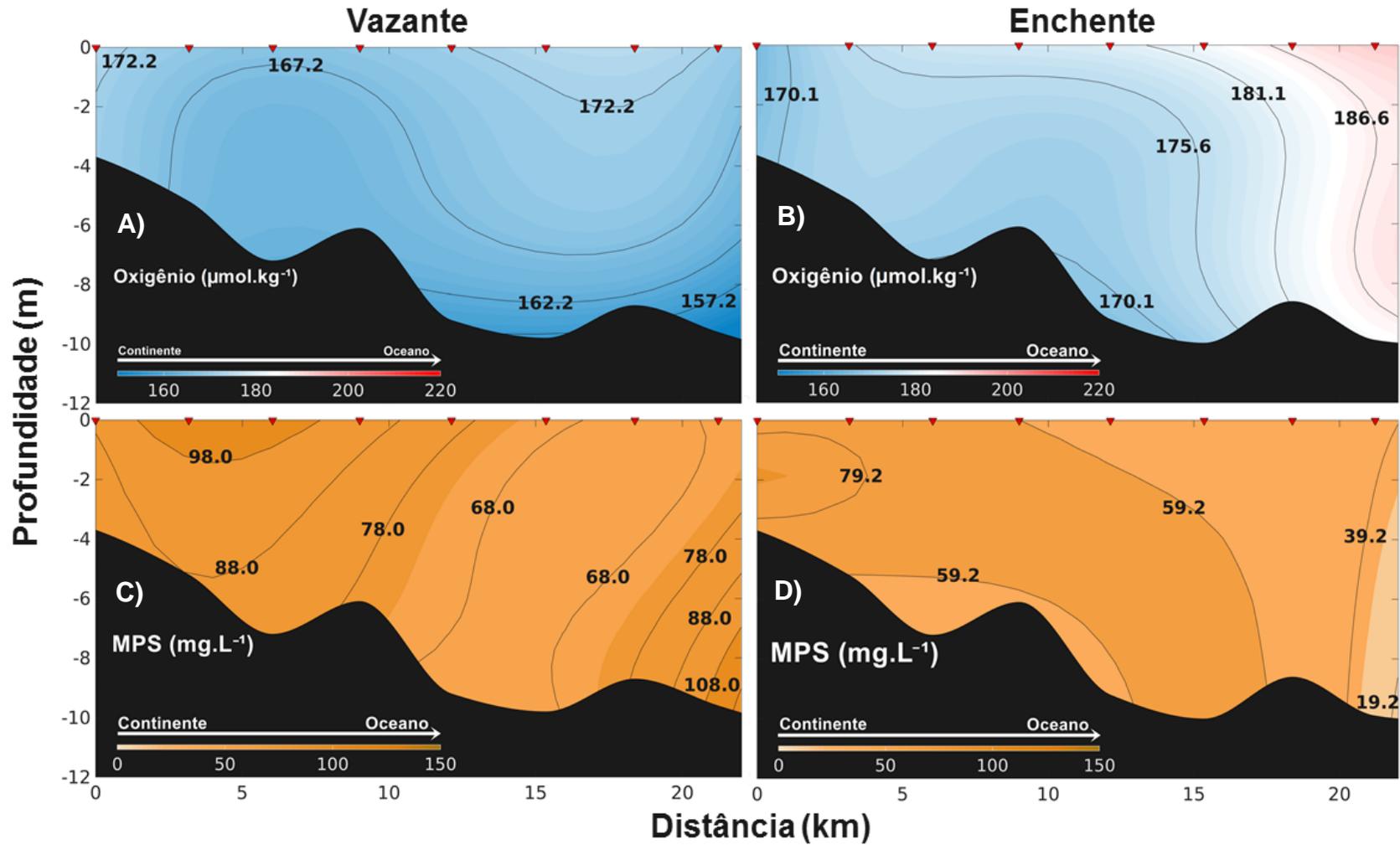


Figura 12. Distribuição vertical do oxigênio dissolvido ($\mu\text{mol.kg}^{-1}$): **A)** Vazante e **B)** Enchente; e MPS (mg.L^{-1}): **C)** Vazante e **D)** Enchente no estuário do rio Parnaíba, no período de chuva.



6.1.3 Diagrama T-S espalhado

Os índices termohalinos foram definidos a partir das correlações entre os dados de temperatura (T) e salinidade (S) gerando o diagrama T-S espalhado nas estações hidrográficas. Baseado em estudo localizado na região nordeste da margem equatorial brasileira, realizado por Dias *et al.* (2013) foi possível destacar, no estuário do rio Parnaíba, a presença de duas massas de água diferentes: Água de Rio (AR) e Água Estuarina (AE).

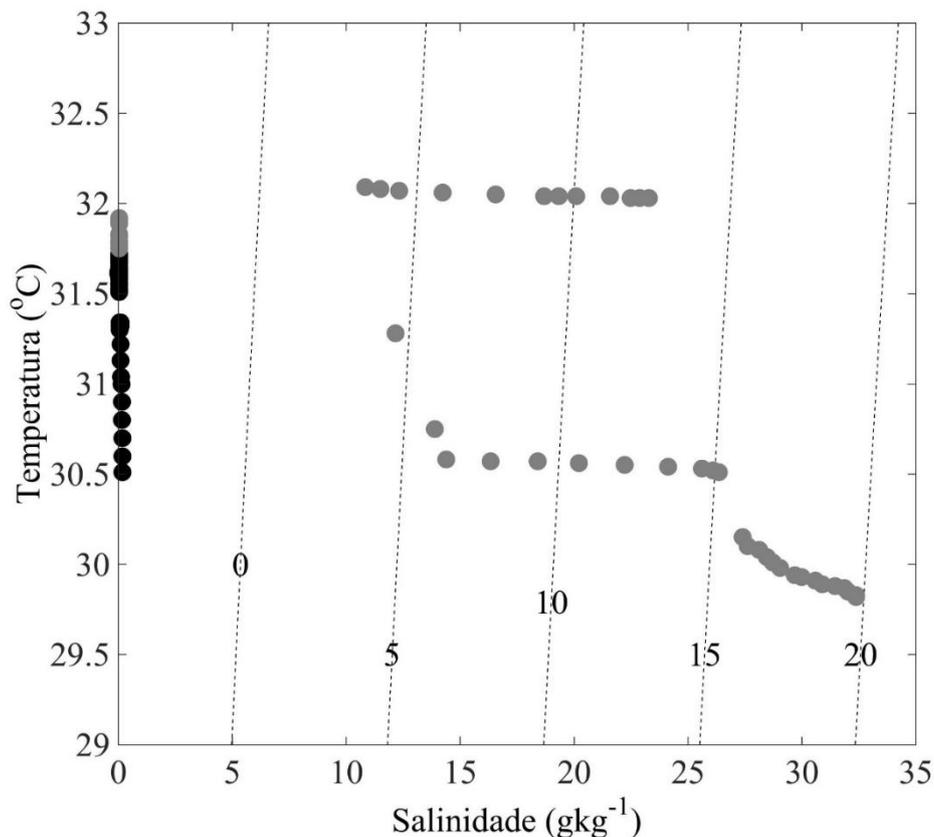
Os índices T-S para cada massa de água foi calculado a partir dos dados de enchente e vazante. A AR foi caracterizada pela elevada temperatura ($T \geq 30^{\circ}\text{C}$) e menor salinidade ($S \leq 5 \text{ g.kg}^{-1}$) e uma outra massa de água que é resultado da mistura desta com a água salina caracterizada como AE ($5 < S < 30 \text{ g.kg}^{-1}$). A massa de água de origem continental ficou restrita a isopicnal menor que 4 kg.m^{-3} ($\sigma_t < 5 \text{ kg.m}^{-3}$), enquanto a massa de água estuarina ficou restrita as isopictais de $4 < \sigma_t < 20 \text{ kg.m}^{-3}$.

Os índices T-S durante a maré enchente (círculo azul) evidenciam um comportamento de rio e durante a maré vazante (círculo vermelho) um comportamento típico de sistemas estuarinos, onde a água continental presente na bacia de drenagem é mensuravelmente diluída pela água costeira que entra no estuário. Comparando a outro estuário de mesomaré (DIAS, 2011) foram observadas massas de água com características de AR com isopicnal abaixo de 5 ($\sigma_t < 5$), evidenciando fortes influencias continentais assim como no estuário do rio Parnaíba.

6.1.4 Transporte de volume (T_v)

O transporte de volume ou vazão estuarina nas seções transversais (Figura 14) apresentaram em maré vazante variação mínima de $591 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (seção 8) e máxima de $1853 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (seção 1). Conforme a influência da maré, as maiores vazões estão em torno das seções 1 e 2 e diminuem nas seções de 3 até a 8, exceto pela seção 7 que apresentou valor em torno de $1097,52 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

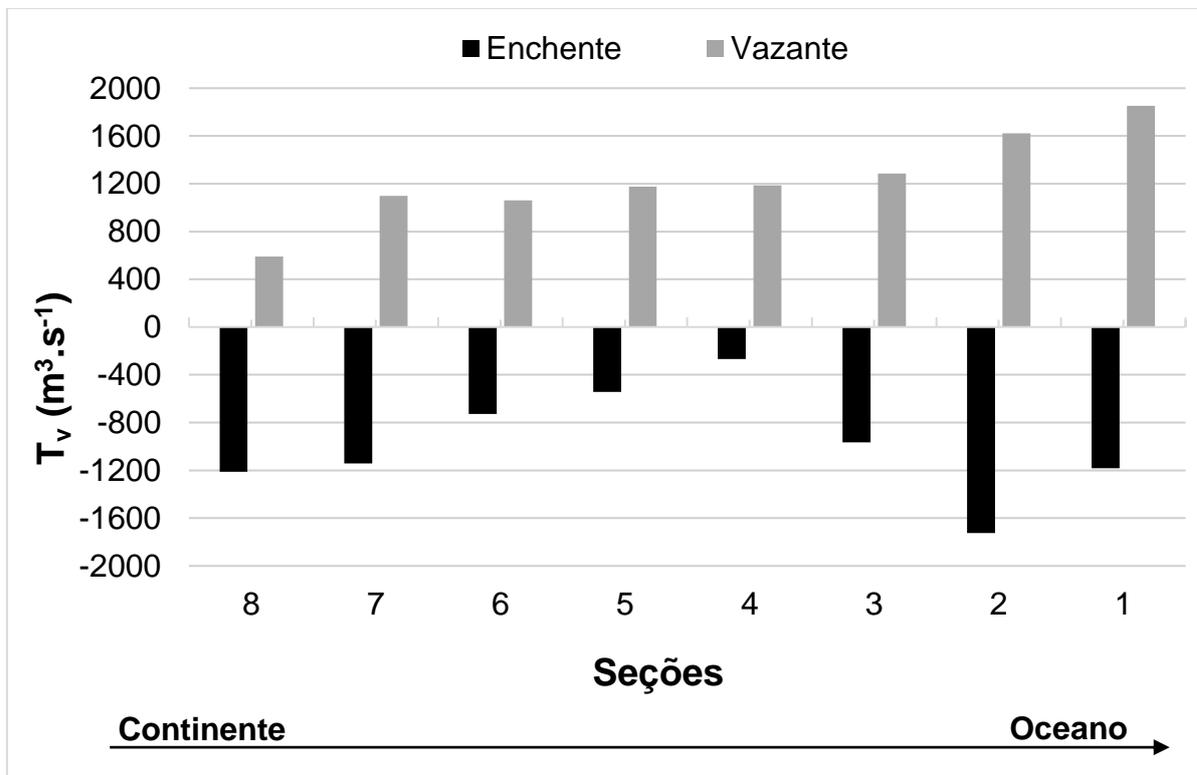
Figura 13. Diagrama T-S espalhado no período de chuva no ano de 2018, para os índices de temperatura e salinidade onde, (●) preta - Vazante e (●) Cinza – Enchente.



Em condição de maré enchente foram observadas variações significativas com valor mínimo de $267 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (seção 4) e máximo de $1720 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (seção 2). Essas variações resultaram em uma redução entre as seções 6 e 4 e aumento nas demais seções.

No geral, as maiores vazões ocorreram nas seções 1 e 2, região da foz do rio, devido ao tamanho da área e por ser a zona de encontro entre a água da descarga fluvial e água marinha. Estudo realizado por Da Silva (2015) no rio Parnaíba conclui que a vazão média do rio aumenta à jusante, indicando que a evaporação é compensada pelo aumento das chuvas em direção à zona costeira. Já nas seções 8 e 7, as maiores vazões, em condição de vazante, estão associadas a influência do aporte fluvial devido ao período chuvoso. Tais variações na vazão do rio também são observadas no rio Amarelo, no rio Amazonas, no rio Nilo e no rio Ganges/Brahmaputra (SAITO, YANG; HORI, 2001; SYVITSKI *et al.*, 2005).

Figura 14. Variação do transporte de volume nas oito seções transversais, em maré vazante e enchente no período de chuva.



6.1.5 Interação continente – oceano

No período de chuva, os resultados referentes ao volume de água total encontram-se na Tabela 3. Em condição de maré vazante, a variação foi na ordem de grandeza entre $1,45 \times 10^5 \text{ m}^3$ e $1,66 \times 10^6 \text{ m}^3$, no sentido continente – oceano (Seção 8 a 1), respectivamente. Em maré enchente, a variação foi de $8,02 \times 10^4 \text{ m}^3$ (seção 4) e $4,49 \times 10^5 \text{ m}^3$ (seção 1).

Segundo estudo realizado por Dias *et al.*, (2005a), em um estuário de mesomare (Rio Jaguaribe – CE), o volume de água total variou entre $4,4 \times 10^6 \text{ m}^3$ a $1,1 \times 10^6 \text{ m}^3$, cujo volume de água doce correspondeu a 85% do volume de água total, devido aos meses de maior precipitação.

Tabela 3. Resultados do volume de água total das 8 seções transversais, em condições de maré vazante e enchente, no período de chuva.

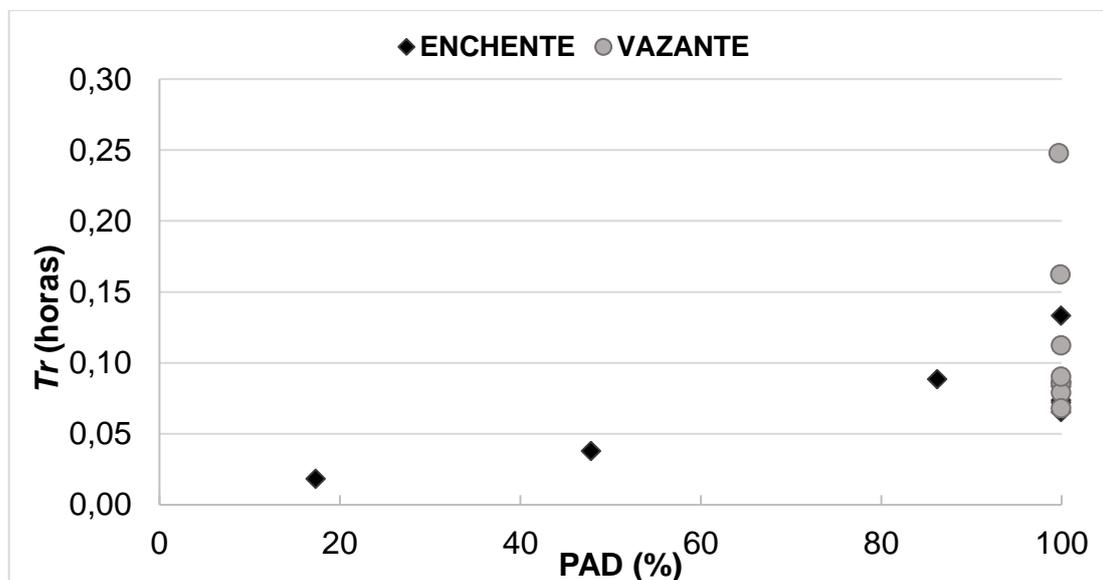
Volume de Água Total (m ³)		
Seção	Vazante	Enchente
1	1,66 x 10 ⁶	4,49 x 10 ⁵
2	9,50 x 10 ⁵	4,91 x 10 ⁵
3	5,20 x 10 ⁵	3,57 x 10 ⁵
4	3,68 x 10 ⁵	8,02 x 10 ⁴
5	3,65 x 10 ⁵	2,60 x 10 ⁵
6	3,02 x 10 ⁵	1,71 x 10 ⁵
7	3,57 x 10 ⁵	3,03 x 10 ⁵
8	1,45 x 10 ⁵	3,15 x 10 ⁵

Na relação do Tempo de Residência (Tr) e Percentual de Água Doce (PAD) no período de chuva (Figura 15), observou-se que os percentuais maiores de 60% apresentaram Tr acima de 0,05 horas e menores que 60% indicaram Tr abaixo de 0,05 horas, indicando que os maiores percentuais de água doce retornam maiores Tr , dada a influência da maré na região e ao período de maior aporte fluvial.

Dias *et al.*, (2005b), observaram que o tempo residual das águas estuarinas do rio Jaguaribe (CE), em períodos de grandes deflúvios, variaram de 12 horas a 13 dias, mostrando forte dependência dos padrões de circulação e da vazão hídrica total para a região. E que um dos fatores determinantes do tempo de residência, são as vazões, que podem ou não apresentar competência para o rompimento da barreira física imposta pelo regime de marés.

O tempo de residência de uma dada região varia de acordo com as condições de circulação encontradas em cada ambiente. Nos estuários das regiões de clima temperado o Tr pode variar de 1 a 8 dias, podendo chegar a 12 dias de acordo com o padrão de circulação atuante em cada região (GÓMEZ-GESTEIRA *et al.*, 2003; WANG *et al.*, 2004; JOUON *et al.*, 2006). Em Baías, como a do Espírito Santo, o Tr pode variar entre 10 e 21 dias, devido a efeitos deflectivos das correntes, segundo Gaze (2005).

Figura 15. Tempo de Residência (Tr) e o Percentual de Água Doce (PAD) para as seções transversais no estuário do rio Parnaíba.



6.2 Transição

6.2.1 Estrutura termohalina

Na distribuição vertical da temperatura da água em maré vazante (Figura 16-A) apresentou amplitude térmica 1,8 °C, com valor mínimo de 28,7 °C e máximo de 30,5 °C, onde é possível observar maiores temperaturas estuário acima, até a distância de 12km e menores temperaturas em direção a foz. Na maré enchente (Figura 16-B), apresentou maior temperatura estuário acima, em torno de 29,1°C e menor temperatura em direção a foz, com mínima de 27,3°C e amplitude térmica de 1,8°C. É possível observar as isotermas na região da foz a intrusão de águas com características de menor temperatura.

A distribuição vertical da salinidade na maré vazante (Figura 16-C) apresentou variação significativa, com salinidade mínima de 0,03 g.kg⁻¹ e máxima de 24,0 g.kg⁻¹. É possível observar o comportamento heterogêneo horizontalmente, pois a salinidade aumenta em direção a foz e um comportamento heterogêneo verticalmente na região do estuário abaixo, sendo em superfície 8,0 g.kg⁻¹ e no fundo 24,0 g.kg⁻¹, evidenciando a atuação da água do mar. Além disso, foi

observado a influência do caudal fluvial até o quilometro 15, diferente do período de chuva em que a água do rio alcança até a foz.

Em maré enchente, a distribuição vertical da salinidade (Figura 16-D) também se mantém heterogênea, tendo como valor mínimo de $0,12 \text{ g.kg}^{-1}$ e máximo de $32,4 \text{ g.kg}^{-1}$, sentido continente – oceano, respectivamente. Nessa condição de maré foi possível observar, através das isohalinas, a intrusão da cunha salina no estuário entre 15 a 20 km. Assim como a salinidade observada nesse trecho está em torno de $26,7 \text{ g.kg}^{-1}$ na superfície e $32,4 \text{ g.kg}^{-1}$ no fundo.

Um estudo realizado em 2012 realizado na foz do rio Parnaíba, por Silva 2015, evidencia valores de temperaturas entre 28 a 30° C em superfície. E quanto à salinidade foram observados menores em superfície e maiores no fundo, próximos a foz do rio. Já em estuário acima, as salinidades foram em torno de zero. Dessa forma o autor conclui que apesar das diminuições das chuvas, o rio Parnaíba ainda apresenta características de águas fluviais, em estuário acima, assim como mostra o presente estudo.

A variabilidade observada da estrutura termohalina entre maré enchente e vazante evidencia características do aporte fluvial, estuário acima, e a partir desse período de transição já é observado a influência da água marinha em maré vazante, evidenciando um menor aporte fluvial, diferente do período de chuva.

6.2.2 Material Particulado em Suspensão

A distribuição da concentração de MPS em maré vazante (Figura 17-C) variou entre 20,9 a $34,1 \text{ mg.L}^{-1}$, tais valores estão associados a menor contribuição da descarga fluvial e diminui a movimentação por ressuspensão do material particulado pelas correntes de maré. É possível notar que as concentrações acima de 30 mg.L^{-1} estão situadas na região do estuário acima, evidenciando alguma contribuição pontual de efluente.

Em maré enchente (Figura 17-D), as concentrações de MPS variaram 22,2 e $70,2 \text{ mg.L}^{-1}$. As concentrações acima de 30 mg.L^{-1} foram observadas a partir do quilometro 12 e aumentando em direção ao oceano. Nessa condição de maré, a influência da intrusão da água do mar é mais intensa e dessa forma contribui para

os processos de movimentação por ressuspensão dos materiais particulados que estavam no fundo. E assim como em maré vazante, entre 0 a 5 km, observa-se uma contribuição pontual que favorece o acúmulo da concentração do material em suspensão. Em estudo por Silva (2015), concluiu que, embora 70% do material desse ambiente ocorre no período chuvoso, o período seco dure mais tempo e dessa forma fornece maior movimentação desse material.

6.2.3 Diagrama T- S espalhado

Segundo as correlações entre os dados de temperatura (T) e salinidade (S) e os resultados obtidos pelo diagrama TS espalhado foram observados dois tipos de massas de água no período de transição para o estuário do rio Parnaíba: Água de Rio (AR) e Água Estuarina (AE).

Os índices T-S para cada massa de água foi calculado a partir dos dados de enchente e vazante. No diagrama T-S (Figura 18), a AR foi caracterizada pela elevada temperatura ($T \geq 30^{\circ}\text{C}$) e menor salinidade ($S \leq 5 \text{ g.kg}^{-1}$) e a AE, resultado da mistura desta com a água salina, caracterizada pela maior salinidade ($5 < S < 30 \text{ g.kg}^{-1}$). Observou-se que a massa de água de origem continental ficou restrita a isopicnal menor que 5 kg.m^{-3} ($\sigma_t < 5 \text{ kg.m}^{-3}$), enquanto a massa de água estuarina ficou restrita as isopicnais entre $5 < \sigma_t < 20 \text{ kg.m}^{-3}$.

Um estudo realizado por Dias (2011), em um estuário de mesomaré também foram observadas características de AR com isopicnais abaixo de 5, corroborando com o presente estudo. Em outro estudo realizado por Fagherazzi (2014), mostrou salinidades entre 3 a 28 g.kg^{-1} e isopicnais entre $4 < \sigma_t < 18 \text{ kg.m}^{-3}$.

Figura 16. Distribuição vertical da temperatura ($^{\circ}\text{C}$): **A)** vazante e **B)** enchente; e salinidade (g.kg^{-1}): **C)** vazante e **D)** enchente no estuário do rio Parnaíba, no período de transição.

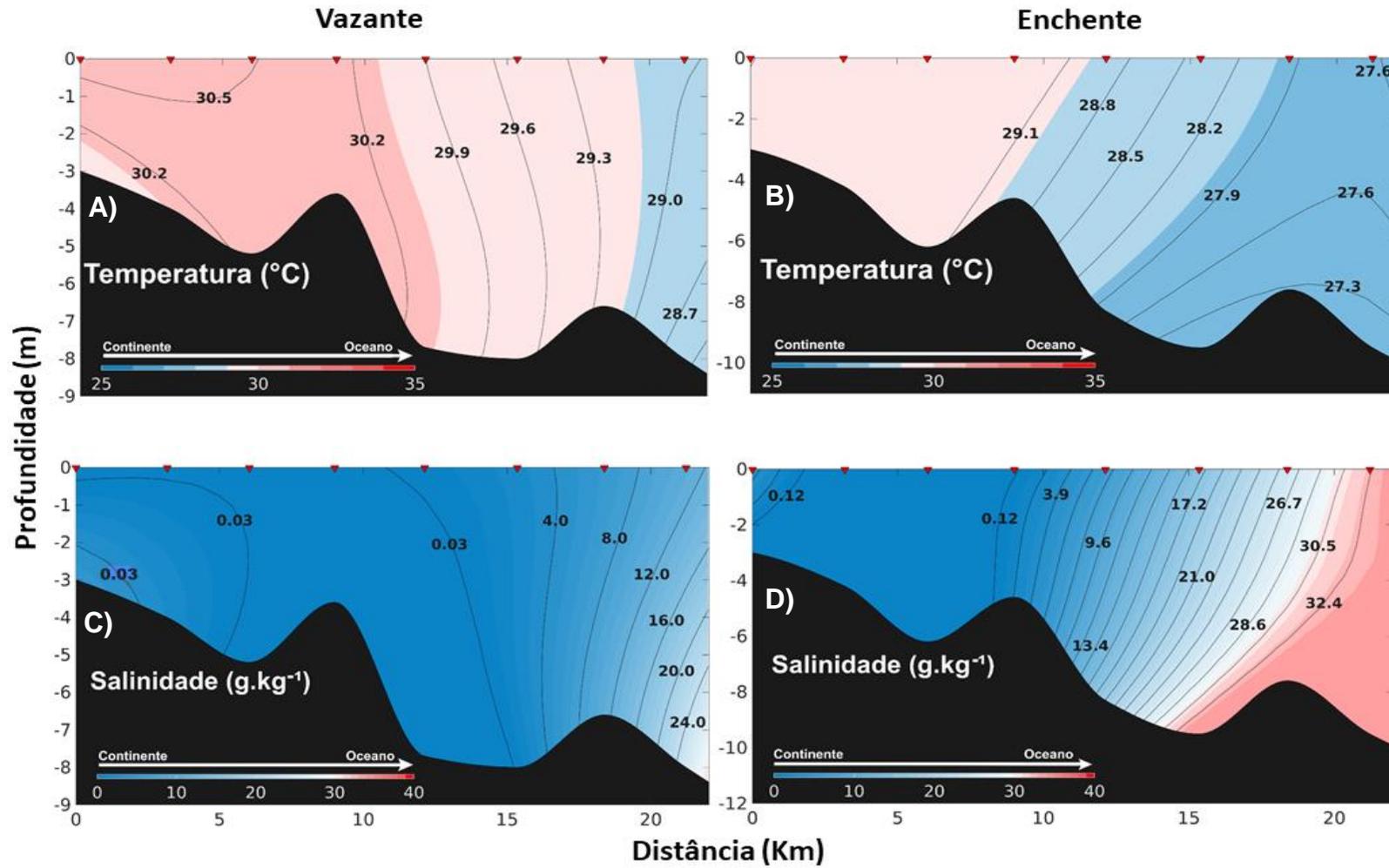


Figura 17. Distribuição vertical do MPS (mg.L^{-1}): **A)** Vazante e **B)** Enchente no estuário do rio Parnaíba, no período de transição.

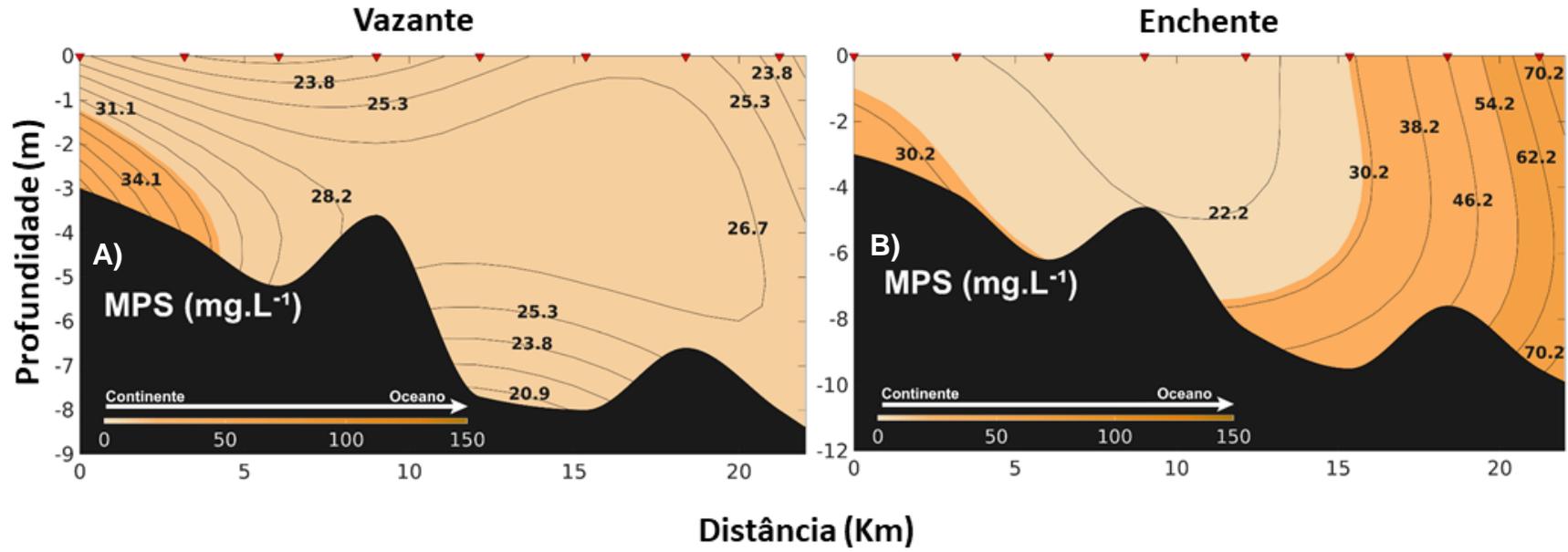
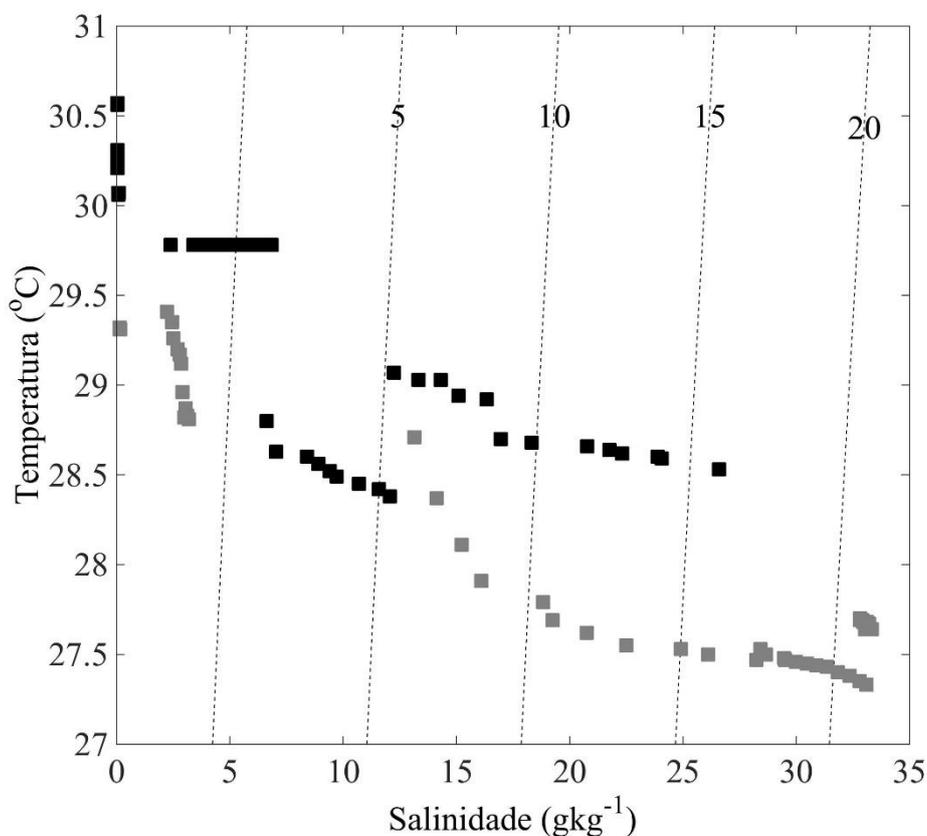


Figura 18. Diagrama T-S Espalhado no período de transição no ano de 2018, para os índices de temperatura e salinidade onde, (■) preto – Vazante e (■) cinza – Enchente.



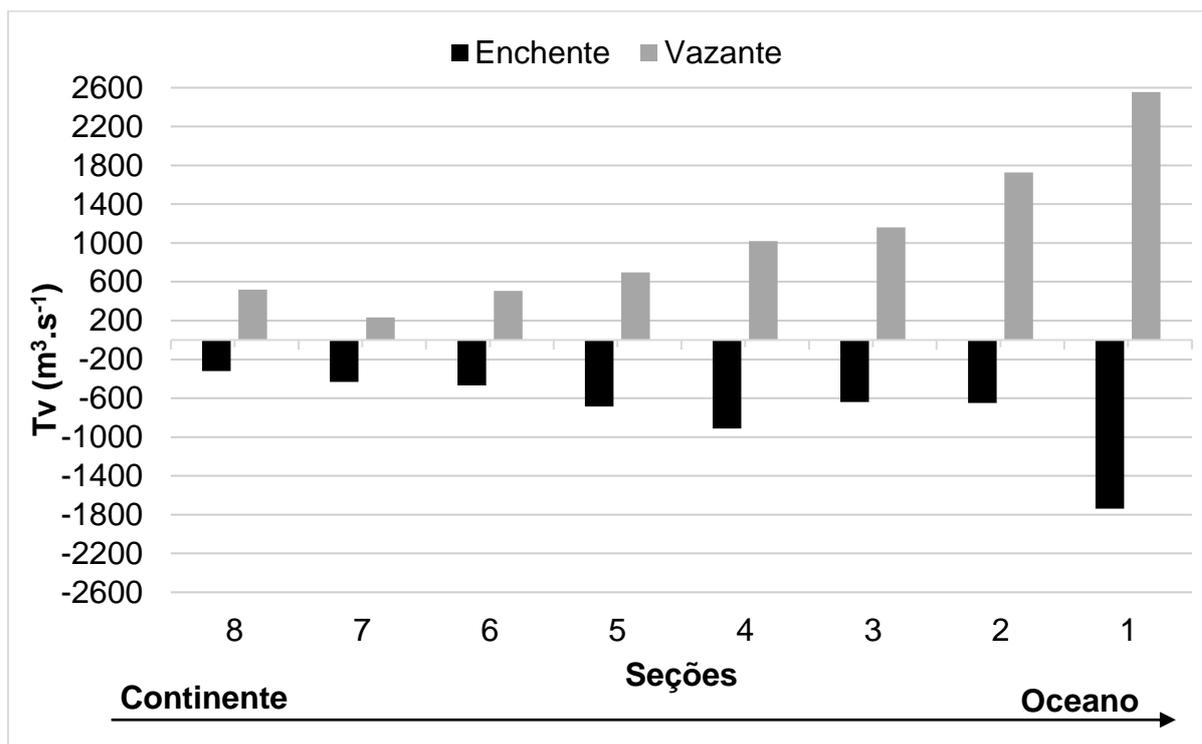
6.2.4 Transporte de volume (T_v)

O transporte de volume no período de transição (Figura 19) em maré vazante, apresentaram variação entre $233,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (seção 7) e $2555,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (seção 1). Os maiores valores estão nas seções 1 e 2, diminuindo nas demais seções (3 até a 7), exceto pela seção 8. Em enchente foi observado uma variação entre $321,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (seção 8) e $1737,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (seção 1). Em ambas condições de maré, os maiores transportes de volume resultam da entrada de água marinha no estuário influenciando apenas as seções estuário abaixo. Isso ocorre, também, devido ao tamanho da área e por ser a zona de encontro entre a água da descarga fluvial e água marinha.

Assim como no período de chuva, as maiores vazões ocorreram nas seções 1 e 2, região da foz do rio, devido ao tamanho da área e por ser a zona de encontro entre a água da descarga fluvial e água marinha. Dentre todos os períodos

sazonais, no de transição foram observados os maiores valores, possivelmente pela maior influência da marinha, como dito anteriormente ou devido ao horário de coleta que pode ter ocorrido no ápice da maré enchente.

Figura 19. Variação do Transporte de Volume nas oito seções transversais, em maré vazante e enchente, no período de transição.



6.2.5 Interação continente-oceano

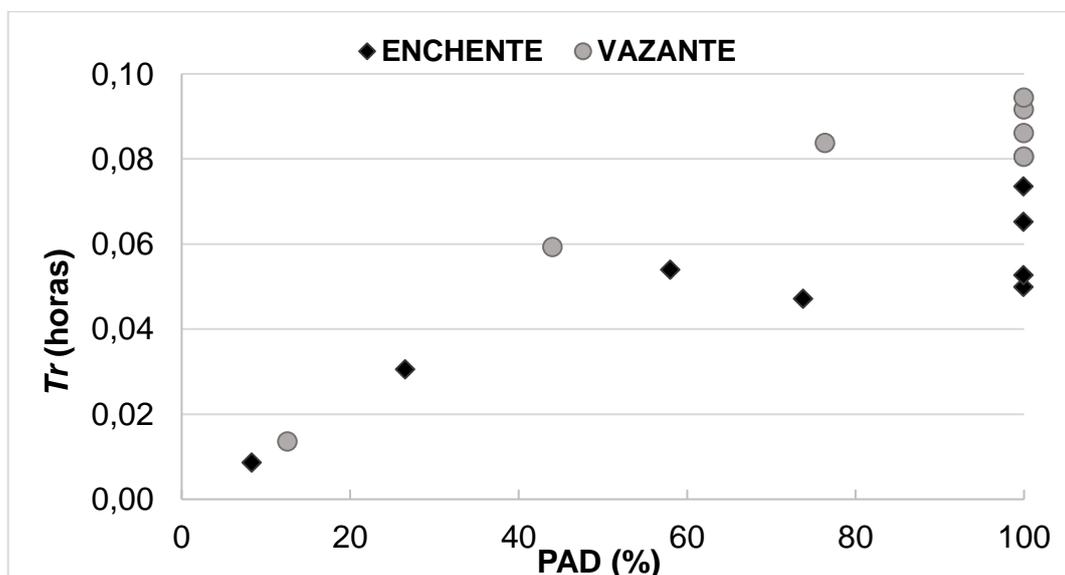
No período de transição, o volume de água total na condição de maré vazante (Tabela 4) variou na ordem de grandeza entre $6,07 \times 10^4 \text{ m}^3$ (seção 7) e $1,07 \times 10^6 \text{ m}^3$ (seção 1). Em maré enchente, a variação foi entre $6,27 \times 10^4 \text{ m}^3$ (seção 8) e $6,95 \times 10^5 \text{ m}^3$ (seção 1). Em ambas condições de maré os maiores volumes de água encontram-se nas primeiras seções, devido ao tamanho da área e também a maior contribuição de água marinha nessas seções. Segundo estudo realizado por Dias *et al.*, (2016), em um estuário de mesomaré, o volume de água total variou entre $3,2 \times 10^4 \text{ m}^3$ a $1,1 \times 10^4 \text{ m}^3$, com maiores estuário abaixo, corroborando com valores aproximados do presente estudo.

Tabela 4. Resultados do volume de água doce das 8 seções transversais em condições de maré vazante e enchente, no período de transição.

Volume de Água Total (m ³)		
Seção	Vazante	Enchente
1	1,07 x 10 ⁶	6,95 x 10 ⁵
2	8,55 x 10 ⁵	2,67 x 10 ⁵
3	3,07 x 10 ⁵	3,30 x 10 ⁵
4	3,62 x 10 ⁵	3,28 x 10 ⁵
5	1,95 x 10 ⁵	1,85 x 10 ⁵
6	8,84 x 10 ⁴	1,15 x 10 ⁵
7	6,07 x 10 ⁴	1,05 x 10 ⁵
8	1,38 x 10 ⁵	6,27 x 10 ⁴

Na relação do Tempo de Residência (Tr) e Percentual de Água Doce (PAD) no período de transição (Figura 20), observou-se que os percentuais maiores que 40% apresentaram Tr acima de 0,04 horas e menores que 40% indicaram Tr abaixo de 0,04 horas, indicando que os maiores percentuais de água doce retornam maiores Tr . Um dos fatores determinantes do tempo de residência são os regimes de maré, pois as regiões com menores Tr são as mais influenciadas. Em estudos realizados na região nordeste, Dias *et al.*, (2005b), observaram maiores tempos residuais, em torno de dias e concluir que as vazões são determinantes para o Tr e principalmente no rompimento da barreira física da maré.

Figura 20. Tempo de Residência (Tr) e o Percentual de Água Doce (PAD) para as seções transversais no estuário do rio Parnaíba, no período de transição.



6.3 Período de seca

6.3.1 Estrutura Termohalina

A distribuição vertical da temperatura da água em maré vazante (Figura 21-A) apresentou variação mínima de 28,3°C, máxima de 31,3°C e amplitude térmica de 3,0 °C, resultando na diminuição da temperatura no sentido continente – oceano. Essa diminuição ocorreu devido a redução da razão de aspecto (largura e profundidade) propiciando maior troca com a atmosfera. O mesmo comportamento foi observado em maré enchente (Figura 21-B), onde a amplitude térmica foi de 2,3 °C, e com as maiores temperaturas na porção estuário acima e a diminuição da temperatura em direção a foz, com menores valores na região da intrusão salina.

Quanto à salinidade, a distribuição vertical na condição de maré vazante (Figura 21-C) apresentou variação significativa, entre 0,01 a 34,2 g.kg⁻¹ no sentido continente – oceano. Nessa mesma condição de maré, foi observado a influência do aporte fluvial até 15 km de distância, cuja temperatura em superfície foi de 1,9 g.kg⁻¹ e no fundo 3,8 g.kg⁻¹. A partir do quilometro 15 o aumento da temperatura se torna significativo e evidencia a intensa atuação da intrusão salina no sistema.

Na maré enchente (Figura 21-D), os valores de salinidade variaram horizontalmente entre 0,03 a 34,2 g.kg⁻¹, no sentido continente – oceano, respectivamente. Assim como em maré vazante, foi possível observar a influência do caudal fluvial até o quilometro 10, onde a salinidade observada está em torno de 3,8 g.kg⁻¹, aumentando significativamente nos quilômetros seguintes (estuário abaixo). Na área de influência da intrusão salina (entre 10 a 20 km), foi observado menores salinidades em superfície (em torno de 24,7 g.kg⁻¹) e maiores no fundo (34,2 g.kg⁻¹), evidenciando a influência da cunha salina.

Segundo Dias et al (2016) em um estudo realizado em um estuário no semiárido observou no período de seca que a temperatura durante maré vazante variou entre 28,9 e 29,5°C, características de água continental e em maré enchente observou uma mistura das águas continentais e costeiras com valores de 28,1°C. Quanto à salinidade, o mesmo autor relatou observar um padrão típico de águas estuarinas com variação entre 2 a 5 g.kg⁻¹ durante a maré vazante e entre 8 a 17 g.kg⁻¹ em maré enchente, indicando uma diluição continental pelas águas costeiras.

O autor também evidencia a presença de cunha salina de forma menos significativa comparado a este trabalho, onde observamos a presença de cunha salina através das curvas das isohalinas.

6.3.2 Oxigênio Dissolvido e MPS

A distribuição vertical do Oxigênio Dissolvido na maré vazante (Figura 22-A), apresentou concentrações entre 179,6 e 212,6 $\mu\text{mol.kg}^{-1}$, de forma que os maiores valores se encontram na região do estuário acima e diminui em direção à foz. Isso afirma a proporção inversa de que quanto maior a salinidade menor será a concentração de OD. Além disso, verticalmente, foi observado que os maiores valores estão em superfície e menores ao fundo, indicando maior atuação dos ventos pelos processos de trocas difusivas entre a atmosfera e a água.

Em maré enchente (Figura 22-B), as concentrações de Oxigênio Dissolvido variaram entre 177,8 a 205,3 $\mu\text{mol.kg}^{-1}$, no sentido oceano – continente, respectivamente. Assim, como em maré vazante, os menores valores estão na região da foz onde ocorre a influência intensa da intrusão salina e propiciando a menor solubilidade do OD. Em estudo realizado por Paula (2020), no estuário do rio Parnaíba, observou também maiores valores de OD estuário acima e menores em direção à foz, corroborando com os valores encontrados no presente estudo.

A distribuição da concentração de MPS em maré vazante (Figura 22-C) variou entre 21,3 a 31,3 mg.L^{-1} , esse comportamento evidencia baixas movimentações por ressuspensão pelas correntes de maré, contribuindo com menores concentrações de material em suspensão.

Na condição de maré enchente (Figura 22-D), foi observado menores concentrações, variando entre 23,1 e 43,1 mg.L^{-1} , no sentido oceano-continente, respectivamente. Os valores acima de 30,0 mg.L^{-1} , situados na foz estão associados a maior contribuição de água salina que favorece os processos de ressuspensão da coluna da água. Assim como no período de transição, a concentração de MPS é reduzida, sendo a atuação predominante da água marinha no sistema estuarino.

Figura 21. Distribuição vertical da temperatura ($^{\circ}\text{C}$): **A)** vazante e **B)** enchente; e salinidade ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$): **C)** vazante e **D)** enchente no estuário do rio Parnaíba, no período de seca.

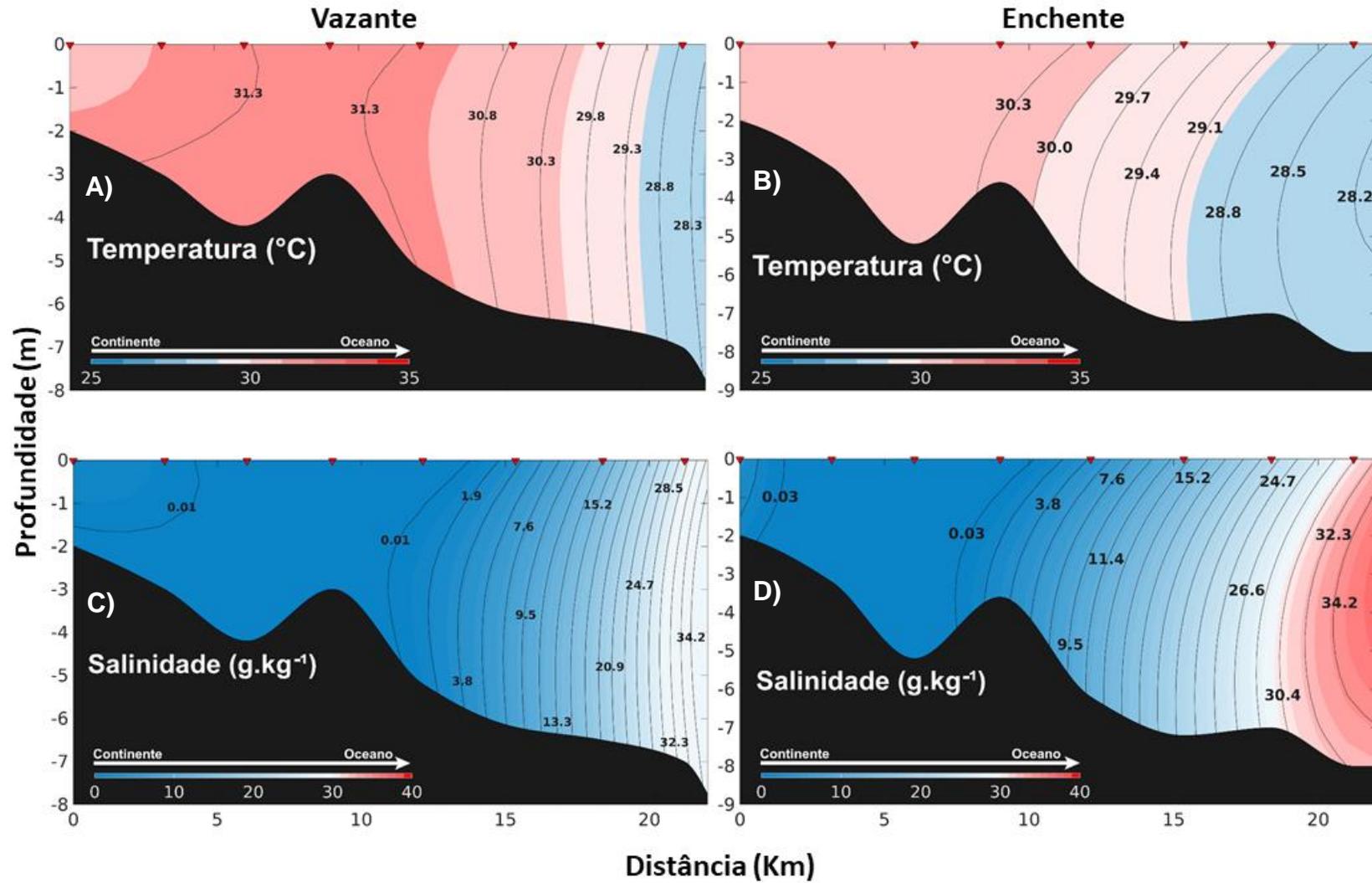
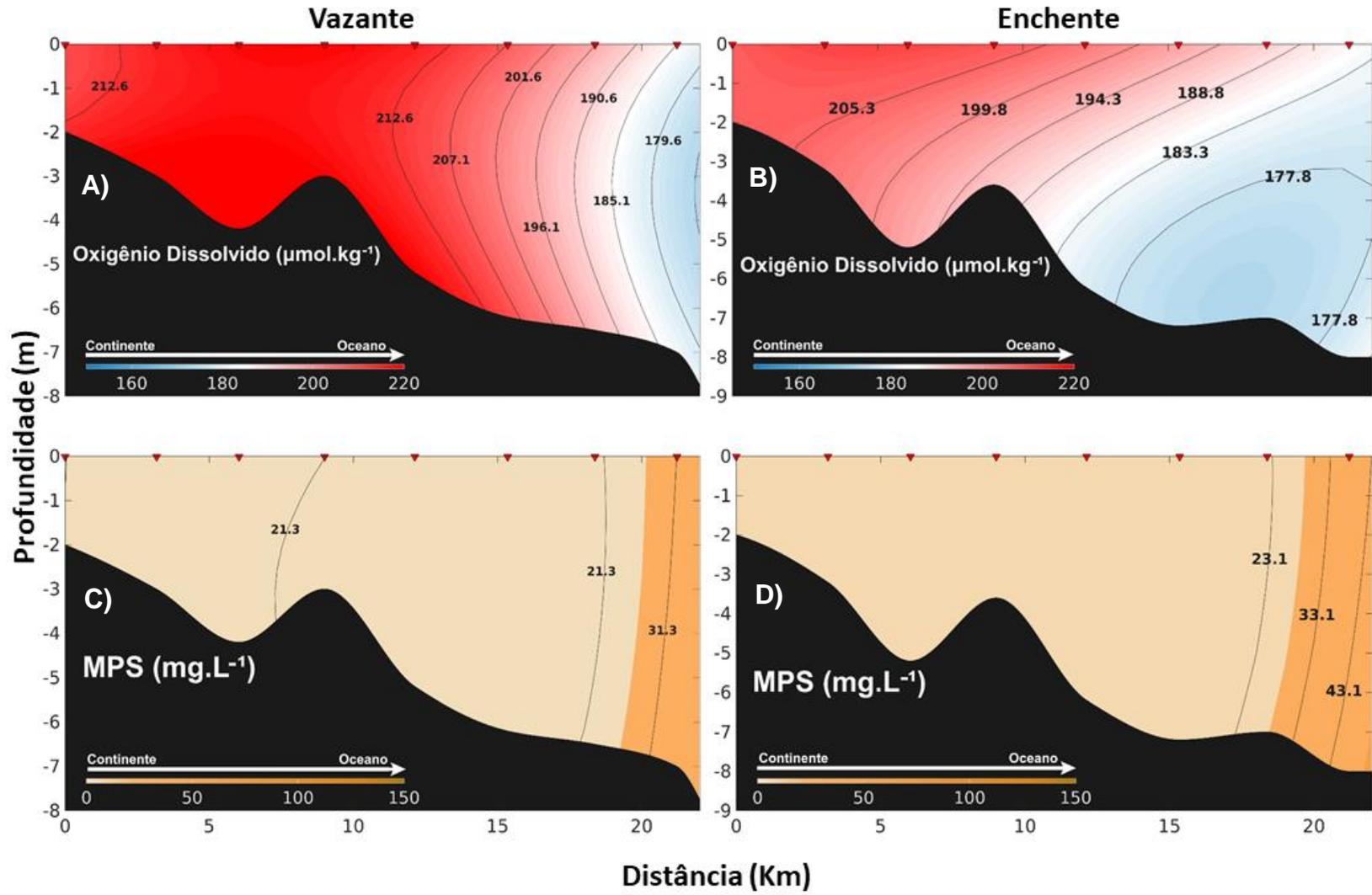


Figura 22. Distribuição vertical do Oxigênio Dissolvido ($\mu\text{mol.kg}^{-1}$): **A)** Vazante e **B)** Enchente; e MPS (mg.L^{-1}): **C)** Vazante e **D)** Enchente no estuário do rio Parnaíba, no período de seca.



6.3.3 Diagrama T-S espalhado

Segundo as correlações entre os dados de temperatura (T) e salinidade (S) e os resultados obtidos pelo diagrama TS espalhado foram observados dois tipos de massas de água no período de transição para o estuário do rio Parnaíba: Água de Rio (AR) e Água Estuarina (AE).

No diagrama TS (Figura 23) a AR foi caracterizada pela temperatura acima de 30°C ($T \geq 30^\circ\text{C}$) e menor salinidade, entre 0 a 5 g.kg⁻¹ ($S \leq 5 \text{ g.kg}^{-1}$) e a AE, caracteriza-se pela maior salinidade, entre 5 a 30 ($5 < S < 30 \text{ g.kg}^{-1}$). Assim como nos períodos anteriores, observou-se que a massa de água de origem continental ficou restrita a isopical menor que 5 kg.m⁻³ ($\sigma_t < 5 \text{ kg.m}^{-3}$), enquanto a massa de água estuarina ficou restrita às isopicais entre 5 a 20 kg.m⁻³.

Assim como nos períodos sazonais anteriores, os índices T-S durante a maré enchente apresentam características típicas de AR e durante a maré vazante são típicos de sistemas estuarinos. Esse comportamento também corrobora com um estudo realizado por Dias (2011), em um estuário de mesomaré, apresentando influências do aporte continental no sistema estuarino. Segundo Flor-Blanco (2015) em estudo realizado em um estuário de mesomaré na Espanha mostrou que as águas com características típicas de água estuarina estão entre as salinidades de 10 a 20 kg.m⁻³.

6.3.4 Transporte de volume (T_v)

O transporte de volume ou vazão estuarina no período de seca do estuário do rio Parnaíba (Figura 24) apresentaram, em maré vazante, valor mínimo de 450,2 m³s⁻¹ (seção 8) e máximo de 1410,2 m³s⁻¹ (seção 3). Na maré enchente foi observado variação entre 211,0 m³s⁻¹ (seção 6) e 1000,3 m³s⁻¹ (seção 3). Em ambas condições de maré, as vazões são menores das seções 4 a 8 (estuário acima), indicando menor aporte fluvial, e são mais elevadas das seções 3 a 1 (estuário abaixo), evidenciando maior influência da água marinha.

Estudo realizado por Dias (2016) no Rio Jaguaribe observou no período de seca taxas entre 72,4 e 174,6 m³s⁻¹ na maré vazante e entre 181,9 e 287,4 m³s⁻¹ em maré enchente e concluiu um aumento do transporte de volume estuário abaixo.

Tais variações na vazão do rio também são observadas no rio Amarelo e no rio Amazonas (SAITO, et al, 2001).

Figura 23. Diagrama T-S Espalhado do período de seca no ano de 2018, para os índices de temperatura e salinidade onde, (▲) preto – Vazante e (▲) cinza – Enchente.

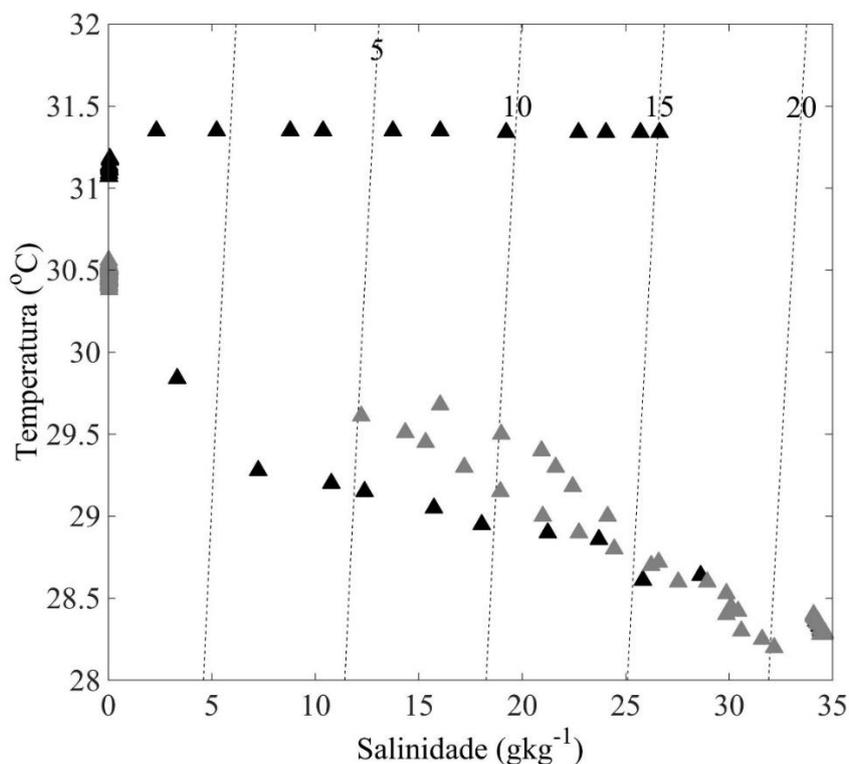
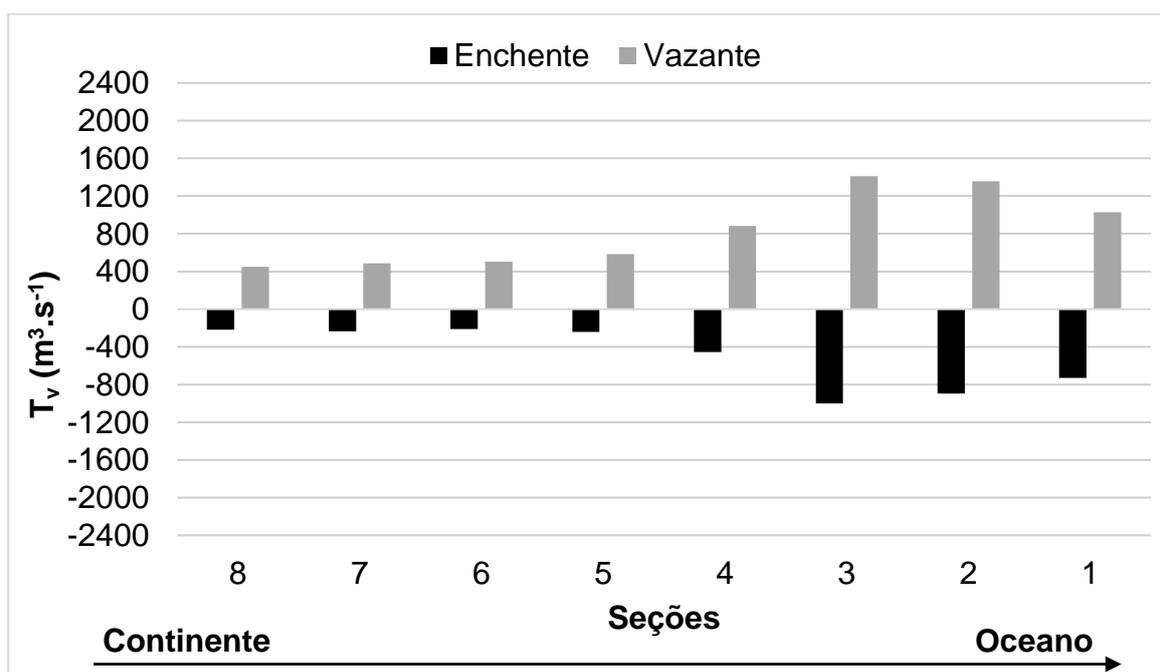


Figura 24. Variação do Transporte de Volume nas oito seções transversais, em maré vazante e enchente, no período de seca.



6.3.5 Interação continente-oceano

No período de seca, o resultado do volume de água total (Tabela 5) em maré vazante variou na ordem de grandeza entre $1,31 \times 10^5 \text{ m}^3$ (seção 8) e $6,58 \times 10^5 \text{ m}^3$ (seção 2), no sentido continente - oceano, respectivamente. Em maré enchente, a variação foi entre $3,80 \times 10^4 \text{ m}^3$ (seção 6) e $3,72 \times 10^5 \text{ m}^3$ (seção 2). Em ambas condições de maré, os maiores valores estão situados nas seções de 1 a 3 (estuário abaixo) e menores nas seções de 4 a 8 (estuário acima), esses são resultados da maior influência de água marinha e também da razão largura e profundidade das primeiras seções.

Comparando com os períodos sazonais anteriores, no período de seca o volume de água total é reduzido, principalmente devido ao menor aporte da descarga continental. Esses valores corroboram com estudo realizado por Dias (2016) que também observou essa redução entre os períodos sazonais.

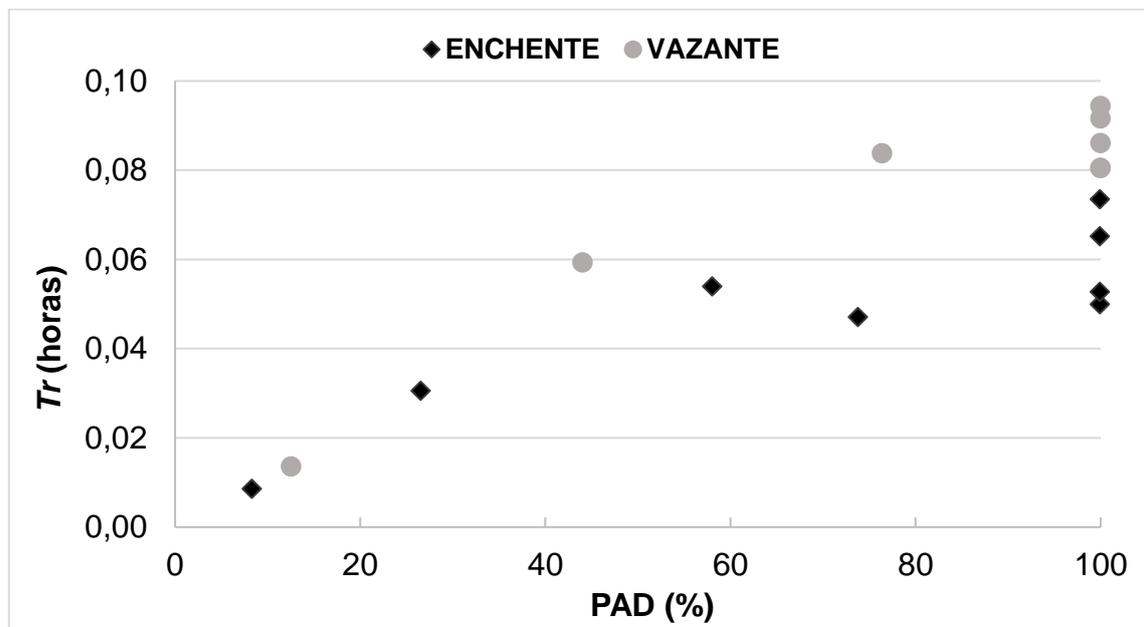
Tabela 5. Resultados do volume de água total das 8 seções transversais, em condições de maré vazante e enchente, no período de seca.

Volume de Água Total (m^3)		
Seção	Vazante	Enchente
1	$4,01 \times 10^5$	$2,74 \times 10^5$
2	$6,58 \times 10^5$	$3,72 \times 10^5$
3	$5,57 \times 10^5$	$3,35 \times 10^5$
4	$2,56 \times 10^5$	$1,05 \times 10^5$
5	$1,92 \times 10^5$	$5,70 \times 10^4$
6	$1,56 \times 10^5$	$3,80 \times 10^4$
7	$1,66 \times 10^5$	$6,26 \times 10^4$
8	$1,31 \times 10^5$	$4,15 \times 10^4$

Na relação do Tempo de Residência (Tr) e Percentual de Água Doce (PAD) do período de seca (Figura 25), foi observado um padrão semelhante ao período anterior, onde os percentuais maiores de 40% apresentaram Tr acima de 0,4 horas e menores que 40% indicaram Tr abaixo que 0,04 horas, indicando que os maiores percentuais de água doce retornam maiores Tr , mesmo com o menor aporte fluvial

nesse período. Dessa, independente do período sazonal a relação TR e PAD manteve o mesmo resultado.

Figura 25. Tempo de Residência (Tr) e o Percentual de Água Doce (PAD) para as seções transversais no estuário do rio Parnaíba, no período de seca.



6.4 Granulometria e Diagrama de Pejrup

Os resultados da análise granulométrica para as amostras de sedimentos de fundo encontram-se na Tabela 6. A classificação média das amostras sedimentares mostrou predominância da classe Areia Média no período de chuva. Já no período de transição, a classificação ficou entre Areia Média que representou 38% das amostras e Areia Fina com 62% do total. No período de seca, a predominância foi de 50% Areia Fina, 37,5% Areia Média, e apenas um ponto com Silte Grosso (P04), representando 12,5%.

Em todos os períodos, as amostras obtiveram um percentual maior que 95% de Areia, indicando que os processos de hidrodinâmica não variam significativamente a composição granulométrica das amostras. Outro fator que pode contribuir para a predominância de Areia Média, é a localização do Delta do Parnaíba

(composto por uma longa faixa de praia) que contribui com a disponibilização desses tipos de sedimentos.

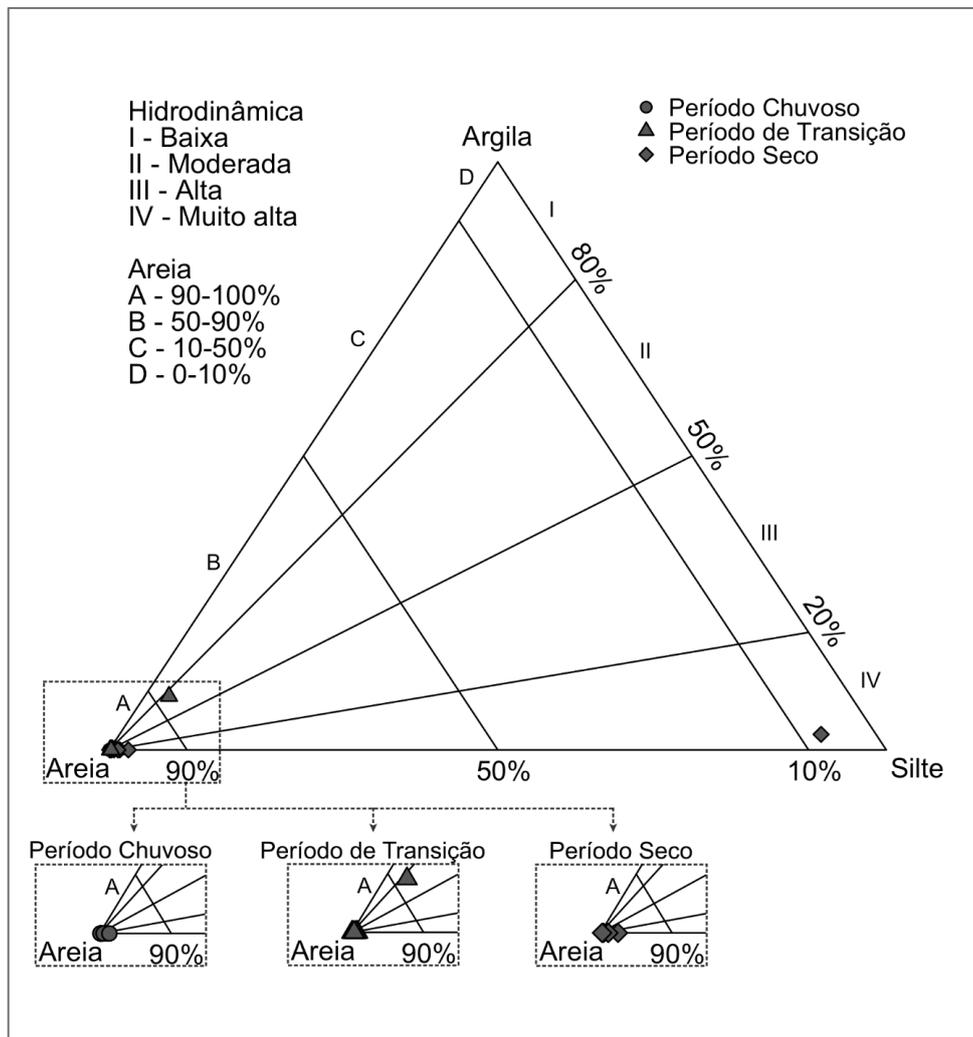
Os resultados obtidos a partir das análises granulométricas dos sedimentos foram plotados no diagrama de Pejrup (Figura 26), onde foi delimitada as áreas representativas da hidrodinâmica ocorrente no estuário. As amostras de todos os períodos foram classificadas como pertencentes ao grupo A-IV, onde A corresponde a 90 - 100% de Areia e IV, significa Hidrodinâmica Muito Alta. Exceto pela amostra do período de transição que se destacou pertencente ao grupo D-IV, onde D corresponde de 0 a 10% de Areia e IV, Hidrodinâmica Muito Alta.

Os resultados corroboram com os dados da granulometria refletindo em um ambiente que os sedimentos são depositados em condições de alta hidrodinâmica. Portanto, considerando os dados obtidos das velocidades de correntes e as análises do Diagrama de Pejrup, através dos sedimentos, pode-se inferir que ambos indicaram hidrodinâmica alta no Estuário do rio Parnaíba. Outros estudos obtiveram resultados similares GREGÓRIO (2008), CORREA (2005), OLIVEIRA (2015).

Tabela 6. Resultado da classificação média das amostras granulométricas ao longo do estuário do rio Parnaíba, nos períodos de chuva, transição e seca. Classificação baseada nos parâmetros estatísticos de acordo com Folk e Ward (1957).

Períodos	Chuva	Transição	Seca
Pontos	Classificação Média		
P01	Areia média	Areia fina	Areia fina
P02	Areia média	Areia fina	Areia fina
P03	Areia média	Areia média	Areia fina
P04	Areia média	Areia fina	Silte grosso
P05	Areia média	Areia fina	Areia média
P06	Areia média	Areia média	Areia média
P07	Areia média	Areia média	Areia média
P08	Areia média	Areia fina	Areia fina

Figura 26. Diagrama de Pejrup das amostras coletadas nos Pontos 01 ao 08 no estuário do rio Parnaíba, nos períodos de chuva, transição e seca.



6.5 Balanço líquido das vazões

O balanço líquido das vazões está representado na figura 27, onde no período de chuva, em maré vazante, considerando $981,48 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ na ZR, $1.236,36 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ na ZM, e somando esses valores temos $2.217 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, no entanto na ZC só atingiu $1.738,37 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, **retendo $479,47 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$** em vazante. Em maré enchente, na ZC a vazão foi de $1.453,33 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, havendo uma redução de $114 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ comparado com a vazante. Desses $1453,33 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, na ZM só atingiu $616,22 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, sendo **retido $873,11 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$** . Na ZR a vazão foi de $905,62 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, no entanto houve um **incremento de $289,40 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$** .

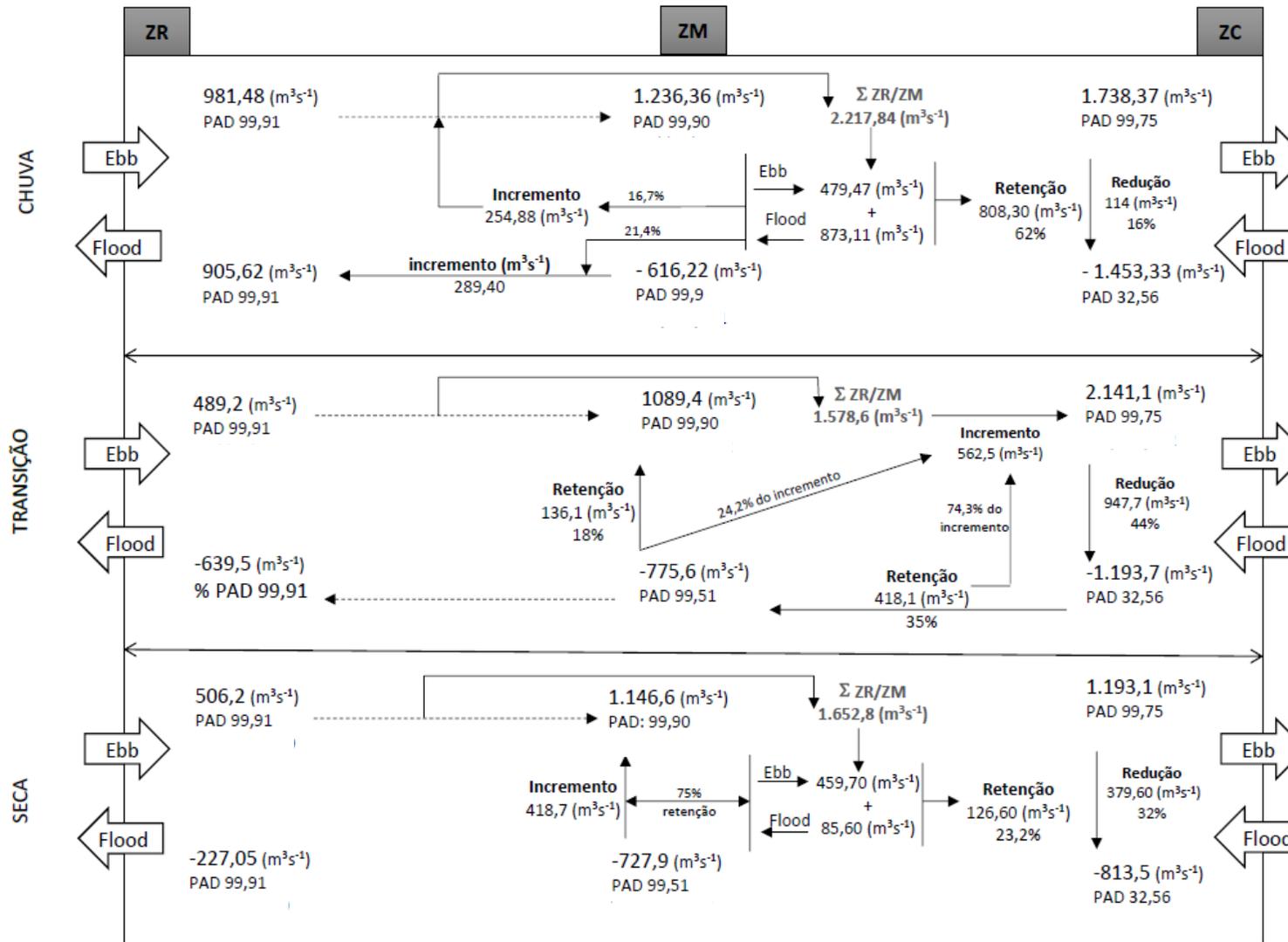
Considerando as retenções em Vazante $479,47 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e Enchente $873,11 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e os incrementos de $289,40 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ em enchente (da ZM para ZR) e $254,88 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ em vazante (ZR para ZM), o que ocasionou uma retenção de 62% no período de chuva.

No período de transição, em maré vazante, a soma das vazões da ZR e ZM foi de $1578,6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, no entanto na ZC a vazão alcançada foi $2141,1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, havendo um **incremento de $562,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$** (entre ZM e ZC). Em maré enchente, na ZC a vazão foi de $1193,7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ havendo uma redução de $947,7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ comparado com a vazante. Desses $1193,7$ só permaneceu $775,6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ na ZM, **retendo $418,1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$** (da ZC para ZM). Na ZR a vazão foi de $639,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ havendo **retenção de $136,1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$** (da ZM para ZR). Dessa forma o balanço se manteve equilibrado nesse período de transição.

No período de seca, em maré vazante, a soma das vazões na ZR e ZM foi de $1652,8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, no entanto na ZC a vazão foi de $1193,1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, havendo uma **retenção de $459,70 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$** (da ZM para ZC). Em maré enchente, na ZC a vazão foi de $813,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, havendo uma redução de $379,60 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ comparado com a vazante. Desses $813,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ só permaneceu $727,9 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ na ZM, havendo uma **retenção de $85,6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$** (entre ZC e ZM). Na ZR a vazão foi de $227,05 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, havendo uma retenção de **$418,7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$** (entre ZM e ZR), porém esse valor foi incremento durante a vazante na ZM. Dessa forma, o resultado foi uma retenção de aproximadamente 23,2%.

Considerando o resultado dos três períodos sazonais, o estuário do rio Parnaíba foi caracterizado como estuário importador de volume de água, pois na chuva e na seca o estuário conservou parte da água transportada nas zonas estuarinas. Segundo o estudo realizado por Dias (2011; 2016), em um estuário de mesomaré, observou que na estação chuvosa o estuário do rio Jaguaribe se comportou como exportador de água e no período de seca como importador. Além disso, o autor evidenciou uma redução no volume transportado sazonalmente no período seco, corroborando com o presente estudo. A redução em volume de rio resulta claramente em uma diminuição no volume de água transportado para o estuário entre as estações de chuva e seca.

Figura 27. Balanço líquido das vazões em $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ nas interfaces ZR, ZM e ZC no estuário do rio Parnaíba, no período de chuva, transição e seca em maré vazante e enchente. Ebb – vazante e Flood – Enchente.



7 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos a partir da estrutura termohalina do estuário do rio Parnaíba indicam grande contribuição da descarga fluvial em decorrência do período de chuva, restringindo a influência da água marinha a poucos quilômetros da foz. No entanto nos períodos de transição e seca apontam maior influência da água marinha e a intrusão da cunha salina no sistema estuarino. Elevadas concentrações de MPS foram observadas no período de chuva em decorrência da descarga fluvial, e baixas concentrações nos períodos de transição e seca. E quanto aos índices termohalinos destacaram a presença de duas massas de água distintas: AR e AE.

As maiores vazões foram observadas estuário abaixo, em condições de maré vazante, devido ao aumento da razão de aspecto e à zona de maior influência marinha. Quanto à relação PAD e Tr , foi evidente que quanto maior o percentual de água doce maior é o tempo residual, conforme a influência da maré na região e ao período sazonal.

Nas análises granulométricas dos sedimentos, houve a predominância de Areia Média em todos os pontos amostrais. Os parâmetros estatísticos indicaram sedimentos bem selecionados e assimetria negativa, os quais indicam condições não deposicionais.

O Diagrama de Pejrup classificou o estuário do rio Parnaíba como um ambiente de hidrodinâmica alta, corroborando com os dados de correntes mensurados, cujo diagrama indicou percentuais de Areia variando entre 90 – 100%, mostrando-se como uma importante ferramenta e diagnóstico na interpretação da hidrodinâmica de um estuário de mesomaré (rio Parnaíba). Dessa forma, a granulometria é essencial para fornecer informações no estudo da hidrodinâmica estuarina. E segundo o balanço líquidos das vazões, o estuário do rio Parnaíba se caracteriza como importador de água mesmo em períodos sazonais distintos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLER, R. C. Conceptual models of early diagenetic processes: The muddy seafloor as an unsteady, batch reactor. **Journal of Marine Research**, v. 62, n. 6, p. 815–835, 2004.
- ALMEIDA FILHO, R.; ROSSETTI, D. F.; MIRANDA, F. P.; FERREIRA, F. J.; SILVA, C.; BEISL, C. Quaternary reactivation of a basement structure in the Barreirinhas Basin, Brazilian Equatorial Margin. **Quaternary Research**, 72(1), p. 103-110, 2009.
- ANA – Agência Nacional de Águas. **Panorama da qualidade das águas superficiais do Brasil**. Brasília-DF, Brasil. 2015, p.253.
- ANDRADE Jr, A. S. de; BASTOS, E. A.; BARROS, A. H. C.; SILVA, C. O. da; GOMES, A. A. N. Classificação climática e regionalização do semiárido do estado do Piauí sob cenários pluviométricos distintos. **Revista Ciência Agronômica**, v.36, n.2, p.143-151, 2005.
- ANGUSAMY, N.; RAJAMANICKAM, G. V. Coastal processes of Central Tamil Nadu, India: clues from grain size studies. **Oceanologia**, v. 49, n. 1, 2007.
- APHA. American Public Health Association. **Stand Methods for Examination of Water and Wastewater** (20^a ed). Washington: Port City Press, 2001.
- ARIDAS, P.I. **Tema 3: Proposta de conservação de recursos hídricos e de meio ambiente do Estado do Piauí**. PIAUÍ: 70p., 1995.
- BARBOSA, M. J. de O. **Estudos Sedimentológicos do Estuário do Rio Timbó-PE**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Geociências, 93f, 2006.
- BERGAMO, A. L.; MIRANDA, L. B.; CORREA, M. A. Estuário: Programas para processamento e análise de dados hidrográficos e correntográficos. **Relatório Técnico do Instituto Oceanográfico**, v. 49, p. 1–16, 2002.
- BITTENCOURT, A. C. S. P.; DOMINGUEZ, J.M.L.; MARTIN, L., AND SILVA, I.R. Longshore transport on the northeastern Brazilian coast and implications to the location of large scale accumulative and erosive zones: An overview. **Marine Geology**, v. 219, n. 4, p. 219–234, 2005.
- CLARK. J. **Integrated management of coastal zones**. National Park Service Program. Rosenstiel School of Marine Sciences. University of Miami. Miami, Florida, USA, 1994.
- CLOERN, J. E. Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem. **Marine Ecology Progress Series**, v. 210, p. 223–253, 2001.

- CORREA, I. C. S. Aplicação do Diagrama de Pejrup na Interpretação da Sedimentação e da Dinâmica do Estuário da Baía de Marajó-PA. **Pesquisas em Geociências**. Vol. 32, n. 2 (2005), p. 109-118, 2005.
- CUCCO, A.; UMGIESSER, G. Modeling the tide induced water exchanges between the Venice Lagoon and the Adriatic Sea. In: **Scientific research and safeguarding of Venice. Proceedings of the annual meeting of the CORILA research program**. p. 385-402, 2003.
- DA SILVA, A. G. Aquino et al. The Influence of Climatic Variations on River Delta Hydrodynamics and Morphodynamics in the Parnaíba Delta, Brazil. **Journal of Coastal Research (JCR)**, v. 31, n. 4, p. 930-941, 2015.
- DAVIES, J. L. A morphogenic approach to world shorelines. **Zeitschrift fur Geomorphologie**, v. 8, p. 127-142, 1964.
- DAY, J. W. Estuarine ecology. New York: **Wiley-Interscience**, 1989.
- DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação. Dados de Maré. 2018. Disponível em: https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav/dados-de-mare-mapa?field_tipo_de_dados_value=T%C3%81BUAS+DE+MAR%C9. Acesso em: 21 mai. 2018.
- DIAS, J. A. A análise sedimentar e o conhecimento dos sistemas marinhos. **Universidade do Algarve. E-Books**, 2004.
- DIAS, F. J. S.; MARINS, R. V.; MAIA, L. P. **Modelo de funcionamento hidrológico para o estuário do rio Jaguaribe – CE**. In: X Congresso Brasileiro de Limnologia, Ilhéus – Ba. In: CD-ROOM Anais do X Congresso Brasileiro de Limnologia. São Paulo: Sociedade Brasileira de Limnologia. 2005a.
- DIAS, F. J. S.; MARINS, R. V.; MAIA, L. P. **Avaliação da hidroquímica e tempo de residência no estuário do rio Jaguaribe - CE**. In: Anais/Resumos da 57ª Reunião Anual da SBPC, Fortaleza. SBPC. Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, São Paulo: 2005b.
- DIAS, F. J. S. **Hidrodinâmica das descargas fluviais para o estuário do Rio Jaguaribe (CE)**. 125 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará - Instituto de Ciências do Mar - LABOMAR, Fortaleza, 2007.
- DIAS, F. J. S. **Circulação e massas de água na plataforma continental leste do Ceará: Modelagem numérica e observações**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2011.
- DIAS, F.J.S.; LACERDA, L. D.; MARINS, R. V.; PAULA, F. C. F. Comparative analysis of rating curve and adp estimates of instantaneous water discharge through estuaries in two contrasting brazilian rives. **Hydrological Process**, p. 2188-2201, 2011.

- DIAS, F. J. S; CASTRO, B.M; LACERDA, L.D. CONTINENTAL SHELF WATER MASSES OFF THE JAGUARIBE RIVER (4S), NORTHEASTERN BRAZIL. **Continental Shelf Research**, v. 66, p. 123-135, 2013.
- DIAS, F. J. da S., CASTRO, B. M. de, LACERDA, L. D., MIRANDA, L. B., MARINS, R. V. **Physical characteristics and discharges of suspended particulate matter at the continent-ocean interface in an estuary located in a semiarid region in northeastern Brazil**. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 180, p. 258-274, 2016.
- DRONKERS, J. Tidal asymmetry and estuarine morphology. **Netherlands Journal of Sea Research**, v. 20, n. 2-3, p. 117-131, 1986.
- DUANE, D. B. Significance of skewness in recent sediments, western Pamlico Sound, North Carolina. **Journal of Sedimentary Research**, v. 34, n. 4, p. 864-874, 1964.
- DYER, K. R. Sediment transport processes in estuaries. In: **Developments in Sedimentology**. Elsevier, p. 423-449, 1995.
- DYER, K. R. **Estuaries: A Physical Introduction**. 2. Ed. Chichester. John Wiley & Sons: p.195, 1997.
- DYER, Keith Richard et al. An investigation into processes influencing the morphodynamics of an intertidal mudflat, the Dollard Estuary, the Netherlands: I. Hydrodynamics and suspended sediment. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 50, n. 5, p. 607-625, 2000.
- EMERY, W.; THOMSON, R. **Data analysis methods in physical oceanography**. Oxford: Pergamon/Elsevier Science, p. 643, 1997.
- FAGHERAZZI, S.; MARIOTTI, G.; BANKS, A. T.; MORGAN, E. J.; FULWEILER, R.W. The relationships among hydrodynamics, sediment distribution, and chlorophyll in a mesotidal estuary. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 144, p. 54-64, 2014.
- FALCÃO, L. C; AYRES NETO, A. Parâmetros físicos de sedimentos marinhos superficiais da região costeira de Caravelas, sul da Bahia. **Revista brasileira de geofísica**, v. 28, n. 2, p. 279-289, 2010.
- FLOR-BLANCO, G. Hydrodynamic controls of morpho-sedimentary evolution in a rock-bounded mesotidal estuary. Tina Menor (N Spain). **Journal of Iberian Geology**, v. 41, n. 3, p. 315-332, 2015.
- FOLK, R. L.; WARD, W. C. **Brazos river bar: a study of significance of grain size parameters**. *Journal of Sedimentary Petrology*: v. 27, n. 51, 1957.

- GAZE, F. N. **Tempo de residência na baía do Espírito Santo**. Monografia. Departamento de Ecologia e Recursos Naturais. Universidade Federal do Espírito Santo - UFES. 60p, 2005.
- GILBERT, E. R.; CAMARGO, M. G. de; SANDRINI-NETO, L. R. **Package “rysgran”**. 2015.
- GÓMEZ-GESTEIRA, M.; DECASTRO, M.; PREGO, R. Dependence of the water residence time in Ria of Pontevedra (NW Spain) on the seawater inflow and the river discharge. **Estuarine Coastal and Shelf Science**. 58. p. 567–573, 2003.
- GORDON, D.C.; Boudreau, P.R.; Mann, K.H.; Ong, J.E.; Silvert, W.L.; Smith, S.V.; Wattayakorn, G. WULFF, F.; YANAGI, T. LOICZ **Biogeochemical Modelling Guidelines**. LOICZ , n. 5, 1996.
- GREGÓRIO, A. M. S. **Contribuição à gestão ambiental da Baía de Guajará (Belém – Pará – Amazônia) através de estudo batimétrico e sedimentológico**. Dissertação - Mestrado. Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 128f, 2008.
- HASTENRATH, S. Circulation and teleconnection mechanisms of Northeast Brazil droughts. **Progress in Oceanography**, v. 70, n. 2–4, p. 407–415, 2006.
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. 2018. Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. Disponível em <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. Acesso em: 28 dez. 2018.
- IOC - Intergovernmental Oceanographic Commission. **The international thermodynamic equation of seawater – 2010: Calculation and use of thermodynamic properties**. Manuals and Guides No. 56, UNESCO (English), p.196, 2010.
- IZUMI, V. M. **Comparação entre as desembocaduras do Complexo Estuarino do Cassurubá (BA): Características hidrográficas e hidrodinâmicas**. Dissertação (Mestrado em Oceanografia), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- JOUON, A.; DOUILLET, P.; OVILLON, S.; FRAUNIÉ, P. Calculations of hydrodynamics time parameters in a semi-opened coastal zone using a 3D hydrodynamic model. **Continental shelf research**. 26. 1395-1415, 2006.
- KJERFVE, B. Estuarine Geomorphology and Physical Oceanography. In: Day Jr., J. W., C.H.A.S. Hall, Kemp, W.M.; Yáñez - Arancibia, A. (eds.). **Estuarine Ecology**. New York, Wiley, pp. 47-78, 1987.

- LE HIR, P., ROBERTS, W., CAZAILLET, O., CHRISTIE, M., BASSOULLET, P., BACHER, C. Characterization of intertidal flat hydrodynamics. **Continental shelf research**, v. 20(12-13), p. 1433-1459, 2000
- LIMA, E. F. Ictiofauna do Delta do rio Parnaíba, litoral Piauiense. In: GUZZI, A. (Org). **Biodiversidade do Delta do Parnaíba**: litoral piauiense. Parnaíba: EDUFPI, p. 466, 2012.
- LIMA, I.M.M.F. **Morfodinâmica e meio ambiente na porção centro-norte do Piauí, Brasil**. Tese (Doutorado em Geografia), Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p.309, 2013.
- LIMA, I. M. M. F. Elementos Naturais da Paisagem. In: ARAUJO, J. L.L. **Atlas Escolar do Piauí**. 2ª. Ed. João Pessoa: Grafset, p. 39-84, 2016.
- MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M. Aplicação do diagrama ts estatístico-volumetrico à análise das massas de água da plataforma continental do rio grande do sul. **Boletim do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo**, v. 28, n. 1, p. 185–200, 1979.
- MIRANDA, L. B. **Análise de Massas de Água de Plataforma Continental e da Região Oceânica Adjacente: Cabo de S. Tomé (RJ) à Ilha de São Sebastião (SP)**. Tese de Livre Docência. Universidade de São Paulo, SP: 194 p., 1982.
- MIRANDA, L. B. Forma da correlação ts de massas de água das regiões costeira e oceânica entre cabo de são Tomé (RJ) e a ilha de são Sebastião (SP), Brasil. **Boletim do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo**, v. 33, n. 2, p. 105–119, 1985.
- MIRANDA, L. B.; CASTRO, B.M.; KJERFVE, B. **Princípios de Oceanografia física de estuários**. Editora da Universidade de São Paulo - Edusp. São Paulo, v. 1. P. 424, 2002.
- MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Secretaria de Políticas Públicas para o Desenvolvimento Sustentável. Projeto-Piloto Zoneamento Ecológico-Econômico do Baixo Rio Parnaíba – 1ª Aproximação. Brasília: 2005.
- MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Caderno da Região Hidrográfica Parnaíba, Secretaria de Recursos Hídricos, Brasília, p. 184. 2006.
- OLIVEIRA, D. C.; MOHRIAK, W.U. Jaibaras trough: An important element in the early tectonic evolution of the Parnaiba interior sag basin, Northern Brazil. **Marine and Petroleum Geology**, 20(3-4), p. 351-383, 2003.
- OLIVEIRA, A. O. de. Caracterização sedimentar e aplicação do diagrama de pejrup para interpretação da dinâmica em uma enseada estuarina na lagoa dos Patos/Brasil. **Geographia Meridionalis**, v. 1, n. 2, p. 363-383, 2015.

- PAULA, J. E. A. **Dinâmica Morfológica da Planície Costeira do Estado do Piauí: Evolução, Comportamento dos Processos Costeiros e a Variação da Linha de Costa**. Tese (Doutorado em Ciências Marinhas Tropicais), Instituto de Ciências do mar, Universidade Federal do Ceará, 242f, 2013.
- PAULA FILHO, F. J. **Avaliação integrada da bacia de drenagem do Rio Parnaíba através de fatores de emissão de cargas de nitrogênio e fósforo e índices de qualidade de águas**. Tese (Doutorado em Ciências Marinhas Tropicais), Instituto de Ciências do mar, Universidade Federal do Ceará, 192f, 2014.
- PAULA FILHO, F. J. D., Marins, R. V., Chicharo, L., Souza, R. B., Santos, G. V., & Braz, E. M. A. Evaluation of water quality and trophic state in the Parnaíba River Delta, northeast Brazil. **Regional Studies in Marine Science**, v. 34, p. 101025, 2020.
- PEJRUP, M. The triangular diagram used for classification of estuarine sediments: a new approach. In: BOER, P.L.; van GELDER, A; NIO, S. D. (Eds). **Tide-influenced Sedimentary Environments and Facies**. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company. p. 289-300, 1988.
- PERILLO, G. M. E. Geomorphology and sedimentology of estuaries: An introduction. In: **Developments in sedimentology**. Elsevier, 1995. p. 1-16.
- PONÇANO, W. L. Sobre a interpretação ambiental de parâmetros estatísticos granulométricos: exemplos de sedimentos quaternários na costa brasileira. **Revista Brasileira de Geociências**, 16 (2): 157-170, 1986.
- PRITCHARD, D. W. Salinity distribution and circulation in the Chesapeake Bay estuarine system. 1. **Mar. Res**, v. 11, p. 106-123, 1952.
- PRITCHARD, D. W. **Estuarine circulation patterns: Proceedings of the American Society of Civil Engineers**, v. 81, n. 717, p. 1-11, 1955.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria R Foundation for Statistical Computing, 2009.
- SAITO, Y; YANG, Z; HORI, K. The Huanghe (Yellow River) and Changjiang (Yangtze River) deltas: a review on their characteristics, evolution and sediment discharge during the Holocene. **Geomorphology**, v. 41, n. 2-3, p. 219-231, 2001.
- SANTOS, V. S. **Caracterização hidrodinâmica e fluxos de sedimentos em suspensão no complexo Portuário de São Luis – MA durante a atividade de dragagem**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em oceanografia, Universidade Federal do Maranhão, São Luis: 114f, 2018.

- SCHOELHAMER, D. H. Influence of salinity, bottom topography, and tides on locations of estuarine turbidity maxima in northern San Francisco Bay. **Elsevier Science B.V.**, p. 343-357, 2001.
- SEMAR - SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DO PIAUÍ. Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Piauí. Teresina: 2010.
- SOUSA, J. M. **Desafios da medição experimental da descarga de fundo no estuário do Timbó. Construção e testes de um amostrador.** Dissertação. Programa de pós-graduação em engenharia mecânica, Universidade federal de Pernambuco, Recife: 155f, 2011.
- STRICKLAND, J. D. H; PARSONS, T. R. **A Practical Handbook of Seawater Analysis.** Bulletin Fisheries Research Board of Canada. Ed. 2ª, 1972.
- SUGUIO, K. **Introdução à sedimentologia.** São Paulo, Edgard Blucher. Editora da Universidade de São Paulo – Edusp: p. 317, 1973.
- SYVITSKI, J. P. M; KETTNER, A. J; CORREGGIARI, A; BRUCE, W. N. Distributary channels and their impact on sediment dispersal. **Marine Geology**, v. 222, p. 75-94, 2005.
- TUCKER, M. E. (Ed.). **Sedimentary petrology: an introduction to the origin of sedimentary rocks.** John Wiley & Sons, 2009.
- UDDEN, J. A. Mechanical composition of clastic sediments. **Bulletin of the Geological Society of America**, v. 25, n. 1, p. 655-744, 1914.
- WANG, C. F.; HSU, M. H.; KUO, A. Y. Residence time of the danshuei river estuary, Taiwan. **Estuarine Coastal and Shelf Science**, 60. 381-393, 2004.
- WENTWORTH, Chester K. A scale of grade and class terms for clastic sediments. **The journal of geology**, v. 30, n. 5, p. 377-392, 1922.