



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Caracterização das condições oceanográficas em estuários de
macromaré: Complexo Estuarino Arraial-São José (MA)**

Vinicius Henrique Maciel dos Santos

São Luís - MA

2018

Vinicius Henrique Maciel dos Santos

**Caracterização das condições oceanográficas em estuários de
macromaré: Complexo Estuarino Arraial-São José (MA)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade Federal do Maranhão para obtenção do título de mestre em Oceanografia, área de Oceanografia Física.

Orientador: Prof. Dr. Francisco José da Silva Dias

São Luís - MA

2018

Santos, Vinicius Henrique Maciel dos.

Caracterização das condições oceanográficas em estuários de macromaré: Complexo Estuarino Arraial-São José MA / Vinicius Henrique Maciel dos Santos. - 2018. 140 p.

Orientador(a): Francisco José da Silva Dias.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Oceanografia, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

1. Barramento hidráulico. 2. Correntes. 3. Dinâmica de sedimentos. 4. Fluxos fluviais. I. Dias, Francisco José da Silva. II. Título.

Vinicius Henrique Maciel dos Santos

**Caracterização das condições oceanográficas em estuários de
macromaré: Complexo Estuarino Arraial-São José (MA)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade Federal do Maranhão para obtenção do título de mestre em Oceanografia, área de Oceanografia Física.

Julgada em ___/___/___.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Francisco José da Silva Dias (ICMar/UFMA)

Prof. Dr. Audálio Rebelo Torres Júnior (ICMar/UFMA)

Prof. Dr. Marcelo Dottori (IO/USP)

São Luís - MA

2018

“Vivendo e aprendendo”

Kintaro Oe

*As três mulheres que batalham e estão
comigo desde sempre, minha mãe, minha
irmã e minha sobrinha.*

Dedico

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos,

Ao meu orientador, **Prof. Dr. Francisco José da Silva Dias**, sem dúvida nenhuma grande parte desses agradecimentos vai para ele, onde volto a registrar toda a minha gratidão e admiração, pelas diversas oportunidades oferecidas e direcionamento na minha vida acadêmica. Muito obrigado pelos ensinamentos e pela valiosa contribuição a este trabalho. A jornada não acaba aqui, como o senhor próprio já diz, “*Restará sempre muito o que fazer...*”.

A minha família, minha mãe **Francisca Maciel**, minha irmã **Leila Maciel** e minha sobrinha **Halanna Marques**, pelo incentivo e amor incondicional.

A toda a galera Laboratório de Hidrodinâmica Costeira, Estuarina e de Águas Interiores (LHiCEAI/UFMA), **Laís Terto**, **Eduardo Kayk**, **Rômulo Soares**, **Vivian Santos**, **Rubens Marques**, **Júlio Martins**, **Jefferson Horley**, **Laila Leite**, **Igor Hamid**, **Hugo Lima (Huguano)**, **Thays Santos**, **Vanessa Gomes** e **Erlle Santos**. É indescritível o prazer de estar com vocês todos os dias.

A minha amada namorada **Jordana Adorno**, que ao longo dessa trajetória só me apoiou, demonstrando companheirismo e entendendo os momentos de ausência, muito obrigado pela compreensão.

Ao **Prof. Dr. Audálio Torres** pelos conhecimentos, debates, indagações e pela disponibilidade em passar o conhecimento adquirido ao longo de sua carreira científica.

Ao pessoal da “Expedição Fridtjof Nansen”, sem vocês grande parte deste trabalho não seria possível, em especial a **Rômulo Soares** pelo apoio técnico, braçal e de tratamento de dados. E também aos tripulantes dos catamarãs *Spartano* e *Larabela*.

A **Thamires Torres** e **Igor Hamid** pelas diversas horas de filtração. E a **Júlio Martins** por toda amizade ao longo da graduação e mestrado, sempre dando suporte nos cálculos e *scripts*, e soltando sempre suas piadas horríveis.

Aos amigos de turma, **Jefferson Horley**, pelas ideias e risadas compartilhadas ao longo desses dois anos, o Ord, Mendy, Mat e Isqueipe agradecem. E **Vivian Salles**, pelas caronas, risadas, muitas ajudas e “venenos” compartilhados.

Ao pessoal dos muitos embarques feitos ao longo da minha formação, é muito gratificante trabalhar, conversar e aprender com vocês.

As agências de fomento à pesquisa **CNPq** e **FAPEMA** pelo financiamento do projeto o qual estava inserido este trabalho. Em especial à **FAPEMA** pelo fomento da bolsa de Mestrado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade Federal do Maranhão, pela oportunidade de formação profissional.

RESUMO

Este estudo avaliou como a minimização dos fluxos fluviais influenciam na circulação hidrodinâmica e no transporte de materiais e constituintes no Complexo Estuarino Arraial-São José (CEASJ), sazonalmente. Inicialmente foram feitas doze campanhas de campo nos estuários dos rios Perizes e Sampaio, durante as estações de chuva, interface chuva/seca, e seca no biênio 2014-2015, em condições de maré de quadratura e sizígia. Posteriormente, foram feitas aquisições de dados ao longo do CEASJ, durante as estações de chuva e seca de 2017, em condições de maré de sizígia, onde foram realizados dois perfis Eulerianos em ciclos completos de maré (13 horas). Os resultados nos estuários dos rios Perizes e Sampaio sugerem que através dos gradientes horizontais térmicos e salinos, o ano de 2014 apresentou-se com águas mais quentes e menos salinas, enquanto que para o ano de 2015, observou-se águas mais frias e salinas. Fato esse, quando vinculado ao transporte de volume e fluxos de Material Particulado em Suspensão (MPS), sugerem uma minimização dos fluxos fluviais para o ano de 2015, facilitando a propagação da onda de maré estuário acima. Os resultados dos percentuais de água doce foram mais significativos durante a estação de chuva, com exceção do ano de 2015, cujos tempos de residência foram menores que uma hora, apresentando características que se assemelharam à períodos secos. Elevadas concentrações de MPS em detrimento a menores transportes de volume sugerem um barramento hidráulico devido a mudança da força de gradiente de pressão baroclínica, acarretando em retenção líquida e de materiais, principalmente em maré de quadratura. Através das estruturas térmicas e salinas observadas no CEASJ, temperaturas elevadas e salinidades tipicamente estuarinas na estação de chuva, e água mais frias e salinas na estação de seca, sugerimos uma interface Zona de Mistura/Zona Costeira (ZM/ZC) próxima ao fundeio I (situado na parte mais costeira) e uma interface Zona de Maré do Rio/Zona de Mistura (ZR/ZM) próxima ao fundeio II (situado mais adentro do complexo). Estas estruturas termohalinas mostraram-se quase homogêneas verticalmente, indicando condições de instabilidade vertical. As intensidades das correntes foram mais intensas em maré enchente, com velocidades residuais próximas de zero, mostrando a importância da componente marinha na região, cujo sistema estuarino na estação chuvosa foi classificado do tipo 2a na interface ZM/ZC e 1a na interface ZR/ZM, enquanto que na estação seca, foi classificado do tipo 1a em ambas as interfaces. O transporte de sal foi dominado pela parcela da descarga fluvial na maioria dos casos, cujo transporte total de sal foi estuário acima, sugerindo um acúmulo de sal no CEASJ, muito provavelmente associado à entrada de águas marinhas. A intrusão de água costeira, intensifica o componente baroclínico da força de gradiente de pressão, gerando o barramento hidráulico, e pode indicar que os fluxos de MPS oriundos da drenagem continental para o estuário e consequente plataforma adjacente é interrompido e o tempo de residência aumentado. A continuação deste estudo, pode gerar a médio prazo, a formação de um conjunto de informações ambientais que auxiliem nas tomadas de decisão dos gestores dos recursos hídricos, face a alterações no uso do solo da bacia de drenagem ou a uma realidade de mudanças climáticas (elevação do nível do mar), mitigando seus potenciais impactos.

Palavras chave: Fluxos fluviais, correntes, dinâmica de sedimentos, barramento hidráulico.

ABSTRACT

This study evaluated how the minimization of river flows influences the hydrodynamic circulation and transport of materials and constituents in the Arraial-Sao Jose Estuarine Complex (ASJEC), seasonally. Twelve field campaigns were initially carried out in the estuaries of Perizes and Sampaio rivers, during the rainy season, transition season (rainy/dry), and dry season in the years of 2014 and 2015, under neap and spring tide conditions. After that, data were acquired along the ASJEC, during the rainy and dry seasons of 2017, under spring tide conditions, where two Eulerian profiles were made in complete cycles of tide (13 hours). The results for Perizes and Sampaio rivers estuaries suggest that through the thermal and saline horizontal gradients, the year of 2014 presented warmer and less saline waters, whereas for the year of 2015, we observed cooler and saline waters. This fact, when linked to volume transport and Suspended Particulate Matter (SPM) flows, suggests a minimization of river flows for the year of 2015, making it easy the propagation of the tidal wave toward the inner estuary. The results of the percentages of fresh water were more significant during the rainy season, except for the year of 2015, which residence times were less than one hour, presenting dry period. High concentrations of SPM associated to lower volume transports suggest a hydraulic barrier due to the change/inversion of the baroclinic pressure gradient force, resulting in net and material retention, mainly in neap tide. Through the thermal and saline structures observed in ASJEC, high temperatures and typically estuarine salinities in the rainy season, and cooler and saline water in the dry season, we suggest a Mixing Zone/Coastal Zone (MZ/CZ) interface near the anchor station I (located at the coastal zone) and a Tidal River Zone /Mixing Zone (TRZ/MZ) interface near the anchor station II (located in an inner region, within the complex). These thermohaline structures were almost vertically homogeneous, indicating conditions of vertical instability. The currents intensities were more intense in flood tide, with residual velocities close to zero, showing the importance of the marine component in the region, in which estuarine system in the rainy season was classified as type 2a at the MZ/CZ interface and 1a at the TRZ/MZ interface, whereas in the dry season, it was classified as type 1a in both interfaces. The salt transport was dominated by the fluvial discharge in most cases, which total salt transport was toward the inner estuary, suggesting a salt accumulation in the ASJEC, most likely associated with the entrance of marine waters. Coastal water intrusion intensifies the baroclinic component of the pressure gradient force, generating the hydraulic barrier, and may indicate that MPS flows from the continental drainage to the estuary and consequently to the adjacent platform is interrupted and the residence time increased. The continuation of this study may generate, in a medium term, a set of environmental information that will help in the decision-making of water resources managers taking into account the changes in land use in the drainage basin or a reality of climate change (sea level rise), mitigating its potential impacts.

KeyWords: Fluvial flows, currents, sediment dynamics, hydraulic barrier.

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

AC - Água Costeira.

ADCP - *Acoustic Doppler Current Profiler*.

CEASJ - Complexo Estuarino Arraial-São José.

CESM - Complexo Estuarino de São Marcos.

CNB - Corrente Norte do Brasil.

CSE - Corrente Sul Equatorial.

CTD - *Conductive-Temperature-Depth*.

dv - Volume de água total.

MEB - Margem Equatorial Brasileira.

MPS - Material Particulado em Suspensão.

P_{ad} - Percentual de água doce.

P_{atm} - Pressão atmosférica.

P_c - Parâmetro circulação.

PC - Plataforma Continental.

PCA - Plataforma Continental Adjacente.

PCI - Plataforma Continental Interna.

PCM - Plataforma Continental Maranhense.

P_e - Parâmetro estratificação.

QPC - Quebra da Plataforma Continental.

Ri_L - Número de Richardson por camada.

S - Salinidade.

Sv - Svedrup.

T - Temperatura.

TC - Talude Continental.

T_{mps} - Transporte de Material Particulado em Suspensão.

T_r - Tempo de residência.

T_s - Transporte de sal.

T_v - Transporte de volume.

u - componente longitudinal da velocidade.

u_a - velocidade residual de u.

v - componente transversal da velocidade.

V_{fw} - Volume de água doce.

Z - Profundidade adimensional

ZC - Zona Costeira.

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical.

ZM- Zona de Mistura.

ZMT - Zona de Máxima Turbidez.

ZR - Zona de Maré do Rio.

ρ - densidade.

σ_t - densidade convencional.

ϕ - anomalia da energia potencial.

$\Delta\gamma$ - anomalia das propriedades.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização do Complexo Estuarino Arraial-São José, juntamente com os seus principais cursos de água.....	26
Figura 2: A - Precipitações médias históricas para a região do CEASJ entre os anos de 1971 a 2016. Observa-se de janeiro a junho a estação chuvosa, com máximo pluviométrico em abril. No segundo semestre observa-se a estação seca, onde outubro é o mês mais seco (INMET, 2016); B – Precipitação referente há 15 dias antes da aquisição de dados (seção 4.1) nos anos de 2014, 2015 e 2017.	29
Figura 3: Localização da área dos rios Perizes e Sampaio, juntamente com as estações hidrográficas.	32
Figura 4: Complexo Estuarino Arraial São José (MA). Os pontos em vermelho representam a estações hidrográficas realizadas na Expedição Oceanográfica. Os fundeios estão representados pelos triângulos azuis.	33
Figura 5: Representação da espacialização de áreas de representatividade para o MPS, variáveis de estado e interações continente-oceano, de acordo com a triangulação de Delaunay, para os estuários do rio Perizes e Sampaio. Quantidade de triângulos: 10905; Quantidade de nós: 6286.....	37
Figura 6: Representação da espacialização de áreas de representatividade para o MPS, variáveis de estado e interações continente-oceano, de acordo com a triangulação de Delaunay, para o Complexo Estuarino Arraial/São José. Quantidade de triângulos: 6359; Quantidade de nós: 3621.	37
Figura 7: Relação tempo de residência e percentual de água doce para estação de chuva, chuva/seca e seca, durante os anos de 2014 e 2015.....	53
Figura 8: Distribuição horizontal das anomalias do transporte de volume (A), salinidade (B), MPS (C) e tempo de residência (D), em maré de quadratura, durante a estação de chuva.	57
Figura 9: Distribuição horizontal das anomalias do transporte de volume (A), salinidade (B), MPS (C) e tempo de residência (D), em maré de sizígia, durante a estação de chuva.	58
Figura 10: Distribuição horizontal das anomalias do transporte de volume (A), salinidade (B), MPS (C) e tempo de residência (D), em maré de quadratura, durante o período de transição chuva/seca.	59

Figura 11: Distribuição horizontal das anomalias do transporte de volume (A), salinidade (B), MPS (C) e tempo de residência (D), em maré de sizígia, durante o período de transição chuva/seca.....	60
Figura 12: Distribuição horizontal das anomalias do transporte de volume (A), salinidade (B), MPS (C) e tempo de residência (D), em maré de quadratura, durante a estação de seca.	61
Figura 13: Distribuição horizontal das anomalias do transporte de volume (A), salinidade (B), MPS (C) e tempo de residência (D), em maré de sizígia, durante a estação de seca.	62
Figura 14: Distribuição horizontal da temperatura durante a estação de chuva no CEASJ. A – Superfície; B – Fundo.	64
Figura 15: Distribuição horizontal da salinidade durante a estação de chuva no CEASJ. A – Superfície; B – Fundo.	65
Figura 16 A: Distribuição vertical da temperatura no CEASJ, durante a estação de chuva. (Radial 1 – superior esquerdo; Radial 2 – superior direito; Radial 3 – inferior esquerdo; Radial 4 – inferior direito).....	67
Figura 16 B: Distribuição vertical da temperatura no CEASJ, durante a estação de chuva. (Radial 5 – superior esquerdo; Radial 6 – superior direito; Radial 7 – inferior)..	68
Figura 17 A: Distribuição vertical da salinidade no CEASJ, durante a estação de chuva. (Radial 1 – superior esquerdo; Radial 2 – superior direito; Radial 3 – inferior esquerdo; Radial 4 – inferior direito).....	69
Figura 17 B: Distribuição vertical da salinidade no CEASJ, durante a estação de chuva. (Radial 5 – superior esquerdo; Radial 6 – superior direito; Radial 7 – inferior)..	70
Figura 18 A: Distribuição vertical da densidade no CEASJ, durante a estação de chuva. (Radial 1 – superior esquerdo; Radial 2 – superior direito; Radial 3 – inferior esquerdo; Radial 4 – inferior direito).....	71
Figura 18 B: Distribuição vertical da densidade no CEASJ, durante a estação de chuva. (Radial 5 – superior esquerdo; Radial 6 – superior direito; Radial 7 – inferior)..	72
Figura 19: Perfil temporal da temperatura ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13h), para o fundeio I (A) e fundeio II (B), durante a estação de chuva. As letras H e L indicam os instantes de maré alta e maré baixa, respectivamente.	74
Figura 20: Perfis médios de temperatura (°C) ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13h), para o fundeio I (A) e fundeio II (B), durante a estação de chuva.	

<T(Z)> (linha contínua) é o perfil da média temporal da temperatura; T_a é o perfil médio espaço-temporal da temperatura.....	75
Figura 21: Perfil temporal da salinidade ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13h), para o fundeio I (A) e fundeio II (B), durante a estação de chuva. As letras H e L indicam os instantes de maré alta e maré baixa, respectivamente.....	76
Figura 22: Perfis médios de salinidade (gkg^{-1}) ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13h), para o fundeio I (A) e fundeio II (B), durante a estação de chuva. <S(Z)> (linha contínua) é o perfil da média temporal da salinidade; S_a (linha tracejada) é o perfil médio espaço temporal da salinidade.....	77
Figura 23: Distribuição horizontal da temperatura durante a estação de seca no CEASJ. A – Superfície; B – Fundo.	79
Figura 24: Distribuição horizontal da salinidade durante a estação de seca no CEASJ. A – Superfície; B – Fundo.	80
Figura 25 A: Distribuição vertical da temperatura no CEASJ, durante a estação de seca. (Radial 1 – superior esquerdo; Radial 2 – superior direito; Radial 3 – inferior esquerdo; Radial 4 – inferior direito).....	82
Figura 25 B: Distribuição vertical da temperatura no CEASJ, durante a estação de seca. (Radial 5 – superior esquerdo; Radial 6 – superior direito; Radial 7 – inferior)..	83
Figura 26 A: Distribuição vertical da salinidade no CEASJ, durante a estação de seca. (Radial 1 – superior esquerdo; Radial 2 – superior direito; Radial 3 – inferior esquerdo; Radial 4 – inferior direito).	84
Figura 26 B: Distribuição vertical da salinidade no CEASJ, durante a estação de seca. (Radial 5 – superior esquerdo; Radial 6 – superior direito; Radial 7 – inferior).....	85
Figura 27 A: Distribuição vertical da densidade no CEASJ, durante a estação de seca. (Radial 1 – superior esquerdo; Radial 2 – superior direito; Radial 3 – inferior esquerdo; Radial 4 – inferior direito).	86
Figura 27 B: Distribuição vertical da densidade no CEASJ, durante a estação de seca. (Radial 5 – superior esquerdo; Radial 6 – superior direito; Radial 7 – inferior).....	87
Figura 28: Perfil temporal da temperatura ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13h), para o fundeio I (A) e fundeio II (B), durante a estação de seca. As letras H e L indicam os instantes de maré alta e maré baixa, respectivamente.....	89
Figura 29: Perfis médios de temperatura ($^{\circ}C$) ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13h), para o fundeio I (A) e fundeio II (B), durante a estação de seca.	

<T(Z)> (linha contínua) é o perfil da média temporal da temperatura; T_a é o perfil médio espaço-temporal da temperatura.....	90
Figura 30: Perfil temporal da salinidade ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13h), para o fundeio I (A) e fundeio II (B), durante a estação de seca. As letras H e L indicam os instantes de maré alta e maré baixa, respectivamente.....	91
Figura 31: Perfis médios de salinidade (gkg^{-1}) ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13h), para o fundeio I (A) e fundeio II (B), durante a estação de seca. <S(Z)> (linha contínua) é o perfil da média temporal da salinidade; S_a é o perfil médio espaço-temporal da salinidade.....	92
Figura 32: Perfil temporal do componente da longitudinal da velocidade (u) ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13h), para a interface ZM/ZC (A) e interface ZR/ZM (B), durante a estação de chuva. As letras H e L indicam os instantes de maré alta e maré baixa, respectivamente.....	94
Figura 33: Perfis médios do componente longitudinal da velocidade ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13h), para a interface ZM/ZC (A) e interface ZR/ZM (B), durante a estação de chuva. <u(Z)> (linha contínua) é o perfil da média temporal da velocidade; u_a (linha tracejada) é a velocidade residual.....	95
Figura 34: Perfil temporal do componente da longitudinal da velocidade (u) ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13h), para a interface ZM/ZC (A) e interface ZR/ZM (B), durante a estação de seca. As letras H e L indicam os instantes de maré alta e maré baixa, respectivamente.....	97
Figura 35: Perfis médios do componente longitudinal da velocidade ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13h), para a interface ZM/ZC (A) e interface ZR/ZM (B), durante a estação de seca. <u(Z)> (linha contínua) é o perfil da média temporal da velocidade; u_a (linha tracejada) é a velocidade residual.....	98
Figura 36: Distribuição horizontal do transporte de volume ao longo do CEASJ. A – Estação de chuva; B – Estação de seca.....	100
Figura 37: Relação tempo de residência e percentual de água doce para estação de chuva e seca, no CEASJ.....	101
Figura 38: Variação temporal da velocidade média [u(t)] (linha tracejada) na coluna de água e da superfície livre [h(t)] (linha contínua). Os painéis superiores referem-se às interfaces ZM/ZC (A) e ZR/ZM (B) na estação de chuva. Os painéis inferiores referem-se às interfaces ZM/ZC (C) e ZR/ZM (D) na estação de seca.....	103

Figura 39: Variação temporal da salinidade média $[S(t)]$ (linha tracejada) na coluna de água e da superfície livre $[h(t)]$ (linha contínua). Os painéis superiores referem-se às interfaces ZM/ZC (A) e ZR/ZM (B) na estação de chuva. Os painéis inferiores referem-se às interfaces ZM/ZC (C) e ZR/ZM (D) na estação de seca.	104
Figura 40: Diagrama de Estratificação-Circulação de Hansen e Rattray (1966). Os painéis superiores referem-se às interfaces ZM/ZC (A) e ZR/ZM (B) na estação de chuva. Os painéis inferiores referem-se às interfaces ZM/ZC (C) e ZR/ZM (D) na estação de seca.	105
Figura 41: Variação temporal do número de Richardson por camada. Os painéis superiores referem-se às interfaces ZM/ZC (A) e ZR/ZM (B) na estação de chuva. Os painéis inferiores referem-se às interfaces ZM/ZC (C) e ZR/ZM (D) na estação de seca.	106
Figura 42: Componentes do transporte advectivo de sal durante a estação de chuva de 2017. Parcelas: descarga fluvial (1); deriva de Stokes (2); correlação de maré (3); circulação gravitacional (4); flutuações turbulentas (5); dispersão da maré (6); circulação residual (7). A soma das parcelas está indicada em (8) e o transporte resultante integrado durante o ciclo de maré em (9). Os painéis superiores referem-se às interfaces ZM/ZC (A) e ZR/ZM (B) na estação de chuva. Os painéis inferiores referem-se às interfaces ZM/ZC (C) e ZR/ZM (D) na estação de seca.....	108
Figura 43: Distribuição horizontal do MPS durante a estação de chuva no CEASJ. A – Superfície; B – Fundo.	110
Figura 44: Distribuição horizontal do MPS durante a estação de seca no CEASJ. A – Superfície; B – Fundo.	111
Figura 45: Distribuição horizontal do fluxo de MPS ao longo do CEASJ. A – Estação de chuva; B – Estação de seca.	112
Figura 46: Perfil temporal do MPS ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13h), para a interface ZM/ZC (A) e interface ZR/ZM (B), durante a estação de chuva. As letras H e L indicam os instantes de maré alta e maré baixa, respectivamente.	113
Figura 47: Perfil temporal do MPS ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13h), para a interface ZM/ZC (A) e interface ZR/ZM (B), durante a estação de seca. As letras H e L indicam os instantes de maré alta e maré baixa, respectivamente.	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Períodos das campanhas nos estuários dos rios Perizes, Sampaio e CEASJ, para condições de maré de quadratura e sizígia, durante o biênio de 2014-2015, em diferentes regimes sazonais.....	31
Tabela 2: Períodos das medições nos perfis transversais, nas estações de chuva e seca de 2017.	34
Tabela 3: Períodos das medições nos fundeios (I, II), nas estações de chuva e seca de 2017.	34
Tabela 4: Distribuição da temperatura ($^{\circ}\text{C}$), salinidade (gkg^{-1}), tempo de residência (horas) e MPS (mgL^{-1}), ao longo dos estuários dos rios Perizes, Sampaio e CEASJ, sob condições de maré de quadratura e sizígia, nos períodos de chuva, chuva/seca e seca, para o ano de 2014.	50
Tabela 5: Distribuição da temperatura ($^{\circ}\text{C}$), salinidade (gkg^{-1}), tempo de residência (horas) e MPS (mgL^{-1}), ao longo dos estuários dos rios Perizes, Sampaio e CEASJ, sob condições de maré de quadratura e sizígia, nos períodos de chuva, chuva/seca e seca, para o ano de 2015.	51
Tabela 6: Distribuição do transporte de volume (m^3s^{-1}) e do transporte de MPS (kgs^{-1}) ao longo dos estuários dos rios Perizes, Sampaio e CEASJ, sob condições de maré de quadratura e sizígia, nos períodos de chuva, chuva/seca e seca, para o ano de 2014 e 2015.....	55

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
2. HIPÓTESE E OBJETIVOS	25
2.1. Objetivo Geral.....	25
2.2. Objetivos específicos	25
3. ÁREA DE ESTUDO	26
3.1. Localização.....	26
3.2. Clima	28
3.3. Características Hidrodinâmicas	29
4. MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1. Aquisição de dados	31
4.1.1. Estuários dos rios Perizes e Sampaio	31
4.1.2. Complexo Estuarino Arraial/São José	33
4.2. Variáveis de estado e campo de massa.....	34
4.2.1. Remoção dos dados espúrios.....	34
4.2.2. Equi-Espaçamento Vertical.....	35
4.2.3. Filtragem por janela móvel.....	36
4.2.4. Gradeamento Horizontal	36
4.2.5. Gradeamento Vertical	38
4.3. Correntes	38
4.3.1. Decomposição da velocidade	38
4.3.2. Remoção de dados espúrios	39
4.4. Cálculo dos valores médios no espaço e no tempo.....	39
4.5. Interações Continente-Oceano	40
4.5.1. Transporte de Volume	40
4.5.2. Cálculos dos volumes e tempo de residência	41
4.5.3. Transporte advectivo de sal.....	42

4.5.4. Estabilidade da coluna de água.....	44
4.5.5. Determinação do Material Particulado em Suspensão (MPS)	46
4.5.6. Cálculos das Anomalias	47
4.5.7. Diagrama de Classificação de Hansen e Rattray.....	47
5. RESULTADOS	49
5.1. Estuários dos rios Perizes e Sampaio	49
5.1.1. Variáveis de estado	49
5.1.2. Propriedades Hidrodinâmicas	52
5.2. Complexo Estuarino Arraial-São José.....	63
5.2.1. Variáveis de estado e campo de massa.....	63
5.2.2. Correntes	93
5.2.3. Interações Continente oceano	99
6. DISCUSSÕES.....	115
6.1. Estuários dos rios Perizes e Sampaio	115
6.1.1. Estação de chuva	115
6.1.2. Interface Chuva/Seca.....	117
6.1.3. Estação de seca	120
6.2. Complexo Estuarino Arraial-São José.....	122
7. CONCLUSÕES.....	131
REFERÊNCIAS.....	133

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui um litoral com aproximadamente 8.000 km, e uma Plataforma Continental (PC) que se estende ao longo desse litoral, com largura máxima de 300 km na região Amazônica e mínima de 10 km ao largo do estado da Bahia. Segundo Zemruski (1979), a Quebra da Plataforma Continental (QPC) ocorre entre 40 e 180m. Ao largo do estado do Maranhão, a PC apresenta uma largura média de 150 km, cujas profundidades são geralmente inferiores a 45 m, enquanto que na QPC a profundidade da PC chega a 75 m, atingindo rapidamente 2000m na base do Talude Continental (TC) (CORRÊA; WESHENFELDER, 2015; GUALBERTO; EL-ROBRINI, 2005; SILVA; ALVARENGA, 1994).

A Plataforma Continental Maranhense (PCM) se localiza na borda oeste do oceano Atlântico equatorial, dentro do domínio da Margem Equatorial Brasileira (MEB), entre 2,5°S - 0,5°N de Latitude e 41,0°W - 45,0°W de Longitude, mais especificamente na região costeira do litoral amazônico, região em que ocorre boa parte da transferência de calor e massa do hemisfério Sul ao hemisfério Norte (STRAMMA et al., 2003; STRAMMA; SCHOTT, 1999). Ao longo da costa norte brasileira encontra-se a Corrente Norte do Brasil (CNB), transportando águas quentes e salinas em direção noroeste. A estimativa de seu transporte é de aproximadamente 15-20 Sverdrup (Sverdrup - Sv; 1 Sv = $10^6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), apresentando núcleo de máxima velocidade em superfície referente ao fluxo de ramos da Corrente Sul Equatorial (CSE). (SCHOTT; FISCHER; STRAMMA, 1998; SCHOTT; STRAMMA; FISCHER, 1995; SILVEIRA; MIRANDA; BROWN, 1994).

As PCs localizadas em baixas latitudes, apresentam-se geralmente mais largas, com águas mais quentes e salinas, devido a pequena razão de aspecto (razão entre os comprimentos verticais e horizontais) e maior atuação da radiação solar, associadas a presença de grandes descargas fluviais na Plataforma Continental Interna (PCI). Silva, Araújo e Bourlès (2005), mostram que na PCI do Maranhão as distribuições de salinidade e temperatura são corriqueiramente afetadas pelo aporte continental de água doce e material em suspensão. A PCM é uma região identificada como um sistema marinho de alta energia, resultado da ação combinada da corrente de contorno oeste, dos ventos alísios, das oscilações de marés, e do aporte de águas de baixa salinidade (SILVA; ARAÚJO; BOURLÈS, 2005; SILVA; ARAUJO; PINHEIRO,

2007) oriundas do Complexo Estuarino de São Marcos (CESM) e do Complexo Estuarino Arraial/São José (CEASJ).

Os processos físicos comuns aos estuários são seus movimentos e a mistura entre as massas de água de origens distintas: a água doce de origem fluvial e a água do mar do oceano adjacente. Diante destes processos, os estuários são corpos de água não homogêneo e os fenômenos em seu interior variam em amplos intervalos de escalas espacial e temporal (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002). Um estuário pode ser definido de várias maneiras e de acordo com o ponto de vista imediato. Entretanto, estas definições devem abranger características e processos essenciais, bem como o contexto no qual o estuário está inserido, permitindo assim critérios adequados de classificação (DYER, 1997).

Levando em consideração a gênese geológica e processos regionais (clima, sedimentação recente e forçantes dinâmicas), a definição de estuário apresentada por Kjerfve (1987) talvez seja a mais aceita pela comunidade científica atualmente, onde o autor definiu como: “*um ambiente costeiro que apresenta conexão restrita com o oceano adjacente. Tal conexão permanece aberta pelo menos intermitentemente. Este ambiente pode ser dividido em três zonas distintas:*

- *Zona de Maré do Rio (ZR): parte fluvial com salinidade praticamente zero, sujeita à influência da maré;*

- *Zona de Mistura (ZM): região onde ocorre a mistura da água fluvial com a água do mar:*

- *Zona Costeira (ZC): região costeira adjacente que se estende até a frente da pluma estuarina que delimita a Camada Limite Costeira (CLC) ”.*

Logo, os ambientes estuarinos são regiões onde os efeitos da maré e correntes associados, sobrepõem-se aos movimentos gerados pela descarga do rio, fazendo com que os processos de escoamento assumam características bastante complexas (FISCHER, 1979). As descargas fluviais ou vazões possuem ligações com a velocidade do escoamento fluvial, capacidade de transporte do rio e a lavagem das margens, interferindo no transporte de materiais (particulado e dissolvido) (MEDEIROS; KNOPPERS; JÚNIOR, 2007). O tipo de maré que atua em diferentes estuários localizados no Brasil e no mundo, pode influenciar o transporte de volume e de materiais na interface continente-oceano. Em particular, os estuários de macromaré possuem características em comum quanto a existência de um máximo de turbidez ligado à interação do fluxo das marés com os processos de erosão e

deposição (DYER, 1994), cuja a posição oscila com intensidade da descarga fluvial e da fase de maré.

Em ambientes influenciados por micromaré, como por exemplo, o estuário do rio Paraíba do Sul (RJ), as vazões variam de $180,0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (inverno) e podem chegar a $4,3 \times 10^3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (verão) (ALMEIDA; REZENDE; SOUZA, 2007; MIGUENS et al., 2016). Nos estuários dominados por mesomaré, como o rio Jaguaribe (CE) e o rio São Francisco (SE/AL), as maiores vazões são observadas na estação chuvosa e as menores na estação seca, apresentando uma variação de $72,0$ a $2,6 \times 10^3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e de $1,0 \times 10^3$ a $3,7 \times 10^3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, respectivamente (CAVALCANTE; MIRANDA; MEDEIROS, 2017; DIAS et al., 2016). Já nos estuários de macromaré como o rio Araguari (AP), em época chuvosa, as vazões são da mesma ordem de grandeza das máximas observadas nos estuários de mesomaré (Jaguaribe e São Francisco), variando de $1,2 \times 10^3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a $4,0 \times 10^3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (CUNHA et al., 2014). O estuário do rio Amazonas, também influenciado por macromaré, apresenta fluxos fluviais variando de $1 \times 10^5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a $2,2 \times 10^5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, para a estação de seca e chuva, respectivamente (ARMIJOS et al., 2017; CALLÈDE et al., 2010; GEYER et al., 1996; WISSER et al., 2010). Ao redor do mundo, as descargas fluviais variam de acordo com as características de cada ambiente, como por exemplo, no estuário do rio Morlaix na França e no estuário do rio Humber (UK), as descarga fluviais chegam a $20,9 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e $475 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, respectivamente (MONBET, 2006; UNCLES; STEPHENS; LAW, 2006). No estuário do rio Yangtze (China), que recebe um grande aporte fluvial, as descargas variam de $1 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a $5 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (SONG; WANG, 2013; WAN; WANG, 2017).

Elevados valores de descargas fluviais, tendem a transportar uma grande quantidade de Material Particulado em Suspensão (MPS), como resultado da lixiviação dos solos da bacia de drenagem ou erosão de suas margens. A concentração do MPS no estuário rio Paraíba do Sul (RJ), apresenta pouca variação sazonal, com valor médio menor que 100 mgL^{-1} (ALMEIDA; REZENDE; SOUZA, 2007; BERNARDES et al., 2012). No rio Jaguaribe (CE), as concentrações médias de MPS variam entre $72,3$ e $74,8 \text{ mgL}^{-1}$ na estação chuvosa, enquanto que na estação de seca apresenta-se com mínimo de $11,6 \text{ mgL}^{-1}$ e máximo de $52,9 \text{ mgL}^{-1}$ (DIAS et al., 2016). Para o baixo rio São Francisco (SE/AL), em termos anuais os valores médios das concentrações de MPS são de $72,0 \text{ mgL}^{-1}$ (MEDEIROS et al., 2011). Em um estuário de macromaré, como no rio Amazonas, as concentrações médias de MPS variam ao longo do ano de $1 \times 10^2 \text{ mgL}^{-1}$ a concentrações da ordem de $1 \times 10^3 \text{ mgL}^{-1}$ (ARMIJOS

et al., 2017; GIBBS, 1987). A nível global, assim como as descargas fluviais, as concentrações de MPS também variam com as características de cada ambiente, como no estuário do rio Yangtze na China, que excedem a valores da ordem de $4 \times 10^3 \text{ mgL}^{-1}$ (SONG; WANG, 2013; WAN; WANG, 2017; WANG; ANDUTTA, 2013).

Conhecer e compreender a dinâmica do transporte de sedimentos em suspensão oriundos das bacias de drenagem tem grande importância nas análises, por exemplo, de alterações de uso dos solos, da pressão humana sobre o desenvolvimento econômico e dos impactos das mudanças climáticas regionais e globais. A zona costeira está intrinsecamente ligada a este processo, pois os rios exportam para os oceanos grande parte dos materiais incluídos no processo de erosão. No estuário do rio Paraíba do Sul as descargas instantâneas de MPS variam de 2 kgs^{-1} (inverno) a 229 kgs^{-1} (verão) (ALMEIDA; REZENDE; SOUZA, 2007). Nos casos do rio Jaguaribe (CE) e o rio São Francisco (AL), as maiores descargas apresentam-se na estação de chuva e as menores no período seco, variando de $4,1$ a 150 kgs^{-1} e de $6,3$ a 240 kgs^{-1} , respectivamente (DIAS et al., 2016; MEDEIROS et al., 2011). A descarga de sedimentos do rio Amazonas para o oceano Atlântico o coloca como uns dos maiores do mundo, variando ao longo do ano entre $1,9 \times 10^4$ e $2,5 \times 10^4 \text{ kgs}^{-1}$ (FILIZOLA; GUYOT, 2011; GUYOT; FILIZOLA; LARAQUE, 2005). No estuário do rio Yangtze (China), considerado o terceiro rio mais longo do mundo, os fluxos de MPS podem chegar a valores de $1,6 \times 10^3 \text{ kgs}^{-1}$ (MILLIMAN et al., 1985; WANG; ANDUTTA, 2013).

O Complexo Estuarino Arraial-São José (CEASJ) situado no estado do Maranhão, que deságua na MEB, é resultado do deságue de importantes cursos de água localizados na interface Amazônia-Semiárido, tais como: rios Munim, Tibiri, Paciência e Itapecuru. O rio Itapecuru é o principal curso de água que chega ao CEASJ, pois drena cerca de um quinto ($1/5$) do estado do Maranhão e abastece com água potável 75% da população da ilha do Maranhão, onde se localiza a capital São Luís (MEDEIROS, 2001). Assim como os cursos de água da maioria das bacias de drenagem que desaguam na MEB, a bacia de drenagem do rio Itapecuru apresenta um elevado nível de estresse ambiental quanto ao uso/ocupação dos solos e vegetação em seu entorno. A falta de manejo e planejamento no entorno da bacia de drenagem pode, a curto prazo, contribuir para o aumento do assoreamento do rio, podendo levar a um estresse ecológico, e conseqüentemente, à perda dos estoques pesqueiros, podendo afetar a pesca de subsistência e a economia local (SILVA;

CONCEIÇÃO, 2011). Um outro aspecto a ser observado é a minimização dos fluxos fluviais das bacias de drenagem e/ou períodos cada vez menores de chuva, que pode afetar diretamente o transporte de materiais e constituintes no gradiente fluvio-marinho, gerando alterações de densidade que acarretam em modificações no balanço sedimentar na faixa costeira.

A água do mar que entra no ambiente estuarino é diluída pela água da descarga fluvial por processos de mistura (advecção e difusão turbulenta) gerados por forçantes oceanográficas (marés, ondas, ventos), geomorfológicas e do fluxo fluvial (MEDEIROS et al., 2014; MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002). Vários trabalhos (ANDUTTA et al., 2013; MIRANDA; BÉRGAMO; CASTRO, 2005; MOHAMMED; SCHOLZ, 2017; PEREIRA et al., 2010; PRITCHARD, 1955; WAN; WANG, 2017) evidenciam a ocorrência de movimentos gerados por influência baroclínica, que podem transportar concentrações de substâncias e sedimentos em suspensão para o interior do estuário, ou seja, estuário acima. Logo, a intrusão salina é um importante fator a ser observado em ambientes costeiros, visto que a salinidade é um relevante fator ecológico no ambiente estuarino, em razão do estresse osmótico que provoca nos organismos (MEDEIROS et al., 2014).

Além do transporte de volume e de materiais, nessa interação continente-oceano, o conhecimento sobre o volume de água total da região é importante na determinação da disponibilidade de água, bem como o volume de água doce presente, que serve de abastecimento para a população, contribuindo para o conhecimento da influência das massas de água na região. Associado a isso, o tempo de residência (T_r) das águas estuarinas aparece como um importante parâmetro que representa a escala de tempo do transporte de processos físicos, vinculados a comparações na escala de tempo de processos biogeoquímicos (WANG; HSU; KUO, 2004), constituindo-se como uma ferramenta no estudo da qualidade da água destes ambientes (GÓMEZ-GESTEIRA; DECASTRO; PREGO, 2003).

A busca pela minimização das emissões dos gases do efeito estufa, face a cenários de mudanças regionais e globais, é uma preocupação de todos, e tem gerado uma corrida incessante a alternativas sustentáveis para geração de energia. Neste sentido, a energia das marés tem se tornado nos últimos anos uma importante alternativa. Os sistemas estuarinos controlados por macromaré, que deságuam na MEB, tem sua hidrodinâmica e transporte de materiais controlados pela propagação da onda de maré estuário acima e das descargas fluviais oriundas das bacias de

drenagem, além de desempenhar um papel fundamental na relação disponibilidade/demanda hídrica da região. Logo, a compreensão do comportamento hidrodinâmico estuarino, sob diferentes pressões, pode auxiliar os gestores dos recursos hídricos na formulação de políticas públicas, norteando o uso sustentável face aos múltiplos usos de suas águas.

2. HIPÓTESE E OBJETIVOS

A importância da zona costeira e a diversidade de interações dos processos que ali ocorrem e sua contribuição para a Plataforma Continental Adjacente (PCA), torna indispensável o conhecimento da circulação hidrodinâmica como norteador da compreensão dos processos físicos que ocorrem nestes ambientes em diferentes escalas espaciais e temporais. Logo, o transporte de materiais e constituintes no gradiente continente-oceano tem sido fortemente alterados devido a minimização dos fluxos fluviais, ocasionados por períodos de chuva cada vez menores face a fatores naturais e/ou antrópicos, facilitando a propagação da onda de maré continente a dentro, modificando o padrão de circulação local, alterando o tempo de residência e o percentual de água doce no Complexo Estuarino Arraial/São José (CEASJ).

2.1. Objetivo Geral

Avaliar como a minimização dos fluxos fluviais influenciam na circulação hidrodinâmica e no transporte de materiais e constituintes no CEASJ, em diferentes regimes sazonais.

2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar a variação espaço-temporal das variáveis de estado e do campo de massa, em diferentes regimes sazonais;
- Caracterizar a variação temporal do campo de correntes, em diferentes regimes sazonais;
- Quantificação espaço-temporal do material particulado em suspensão, em diferentes regimes sazonais;
- Caracterização das interações continente-oceano, em diferentes regimes sazonais;
- Classificar o sistema estuarino com base no diagrama de estratificação-circulação de Hansen e Rattray (1966), em diferentes regimes sazonais.

3. ÁREA DE ESTUDO

3.1. Localização

O CEASJ (MA) (Figura 1) em seu contexto geográfico possui seus pontos extremos: ao Norte/Nordeste próximo ao município de Raposa, onde deságua o rio Paciência, e ao Sul/Sudoeste na desembocadura do canal do Estreito dos Mosquitos (canal que liga as massas de água do CEASJ e do CESH). Possui uma distância longitudinal de aproximadamente 63 km e uma largura máxima de 15 km (próximo a radial 1), ocorrendo um decréscimo da largura estuário acima. O CEASJ tem uma área de aproximadamente 580km² coberta por água, sendo formada pelos aportes dos rios Itapecuru, Munim, Tibiri e Paciência, além das águas marinhas advindas do Oceano Atlântico.

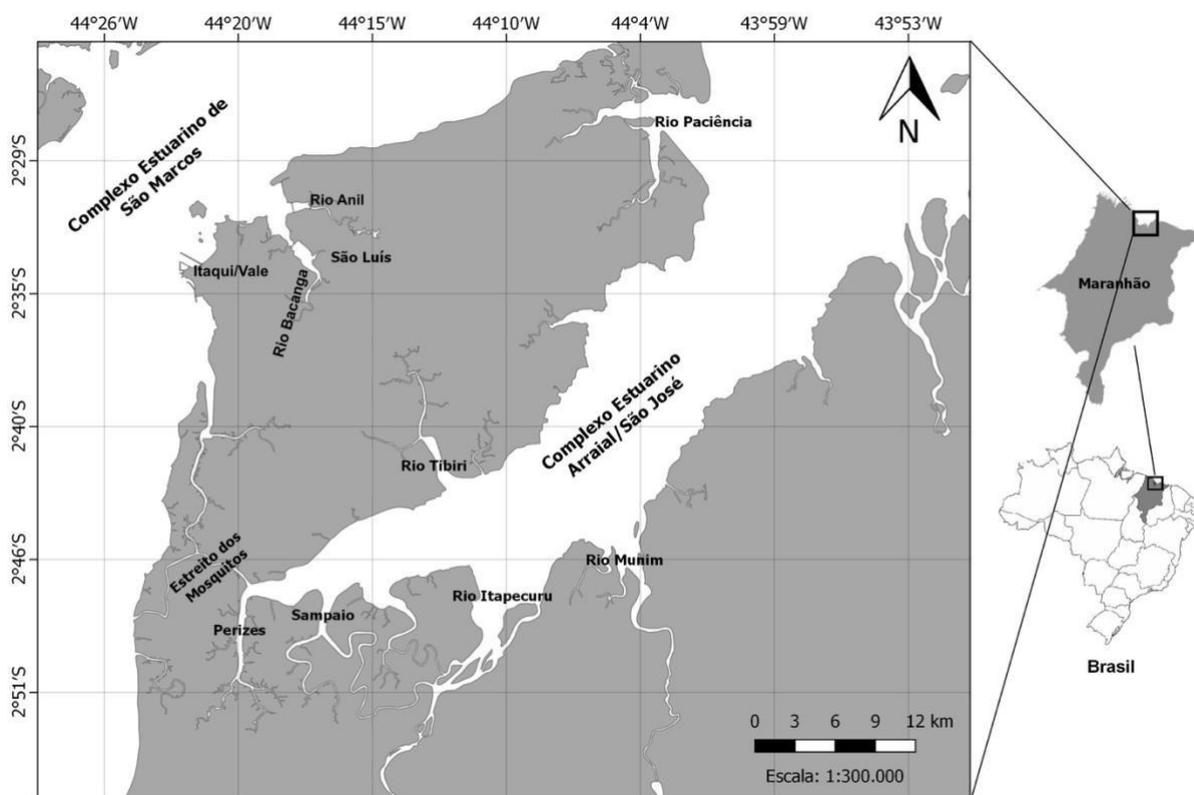


Figura 1: Localização do Complexo Estuarino Arraial-São José, juntamente com os seus principais cursos de água.

O principal curso de água que deságua no CEASJ é o rio Itapecuru, drenando uma área de aproximadamente 52.972 km², o que corresponde a 16% do território do estado do Maranhão (MMA, 2006), além de ser o manancial abastecedor da capital do estado e vários municípios, através do projeto ITALUÍS. Morfologicamente o rio Itapecuru foi segmentado de acordo com as regiões por onde

passa. O alto curso tem presenças de declives mais fortes, caracterizando esse trecho como tipicamente de planalto. Ao longo do médio curso, o rio se mostra de pequena inclinação e de forte correnteza. O trecho do baixo curso apresenta as menores declividades, influenciando na velocidade do rio, caracterizando-o como um rio de planície. Ainda em seu baixo curso é observada a entrada da cunha salina rio acima, onde foram detectadas oscilações diárias do nível das águas e influência das correntes, afetando a fauna e flora (MEDEIROS, 2001; MMA, 2006). De acordo com o IBGE (1997), na última estação fluviométrica do rio Itapecuru, localizada em seu baixo curso, a vazão média chega a $209 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, com máximo de $2020 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (balanço hídrico positivo) e a mínima de $36 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (balanço hídrico negativo), corroborando os dados da SUDENE (1980) cujo os dados hidrológicos mostram uma vazão média de $295 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Os múltiplos usos da água da bacia de drenagem do Itapecuru (abastecimento humano e animal, agricultura e fruticultura irrigada, aquacultura) tem provocado a perda de competência do transporte de materiais pelo fluxo fluvial, gerando ilhas de deposição (SANTOS; LEAL, 2010, 2013).

O rio Munim possui uma área de drenagem correspondente a 15.350 km^2 , com drenagem dendrítica de regime perene (SANTOS; LEAL, 2013), percorrendo uma extensão de 320 km até desaguar no CEASJ (IBGE, 1997). Conforme dados da SUDENE (1980) a vazão média total da bacia do Munim é de $279 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, no entanto, nos dias de hoje, apresenta-se bastante assoreado, sofrendo consequências dos desmatamentos e da mudança no uso do solo, através de atividades siderúrgicas, agricultura de soja e atividade alcooleira, que tornam suas águas escassas, turvas e poluídas, só adquirindo maior volume no baixo curso, já próximo à costa provocando danos ambientais na região e adjacências (IBGE, 1997; SANTOS; LEAL, 2013).

O rio Tibiri, localiza-se no município de São Luís - MA, na parte sudoeste da ilha do Maranhão (CAMPOS et al., 2009) e possui uma extensão de aproximadamente 13 km, com uma bacia de drenagem de 140 km^2 , sendo responsável pelo aporte terrígeno que carrega uma grande quantidade de nutrientes, tornando a água turva, sofrendo forte influência das marés, que chegam a atingir níveis de 7,0 a 8,0 metros (SILVA; ALMEIDA, 2002). É um dos cursos d'água mais comprometidos da ilha devido à proximidade com o Distrito Industrial. Em estudo realizado por Campos et al. (2009), os níveis de metais pesados em organismos

aquáticos foram extremamente preocupantes, prejudicando a qualidade dos recursos hídricos e da vida a população ribeirinha.

O rio Paciência localiza-se na porção Nordeste da ilha do Maranhão, possui uma área de drenagem de 171,74 km², com uma extensão de 32 km, desembocando no CEASJ, próximo a ilha de Curupu (OLIVEIRA et al., 2012). De acordo com Rangel, Pereira e Souza (2013) o regime hidrológico no período de seca é perene, porém muito limitado, tornando-se pouco relevante e dependente das contribuições de esgotos sanitários e de nascentes de pequeno e médio porte, no entanto não garantem fluxos constantes. Já durante o período chuvoso há um acréscimo de vazões que provocam mudanças nos níveis d'águas do canal. A qualidade da água do rio Paciência está relacionado com o uso do solo e com o grau de controle sobre as fontes de poluição, que são quase inexistentes.

3.2. Clima

O estado do Maranhão apresenta uma diversidade climática própria à sua posição geográfica, como área de transição entre os climas, amazônico superúmido, semiárido nordestino e de relevo do Planalto Central. O clima da região em questão é marcado por períodos chuvosos e secos bem definidos, controlados pela posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que durante o período do primeiro semestre apresenta ventos alísios de NE, trazendo massas de ar que ocasionam as chuvas no Nordeste brasileiro. No segundo semestre do ano o contrário ocorre, a ZCIT enfraquece, agora associada aos ventos alísios SE, gerando o período de seca. Portanto a ZCIT é o principal mecanismo associado à ocorrência de chuvas no Nordeste do Brasil (INFOCLIMA, 2017).

A sazonalidade da pluviosidade é refletida no regime fluviométrico da região, onde as variações de fluviais sazonais apresentam ritmos mais ou menos constantes, ocorrendo geralmente nos mesmos períodos, com poucos atrasos ou antecipação. Por conta da existência de uma estação das águas abundantes (balanço hídrico positivo) de janeiro a junho e das águas escassas (balanço hídrico negativo) de junho a novembro (Figura 2), há uma predominância do regime fluvial tropical (MMA, 2006).

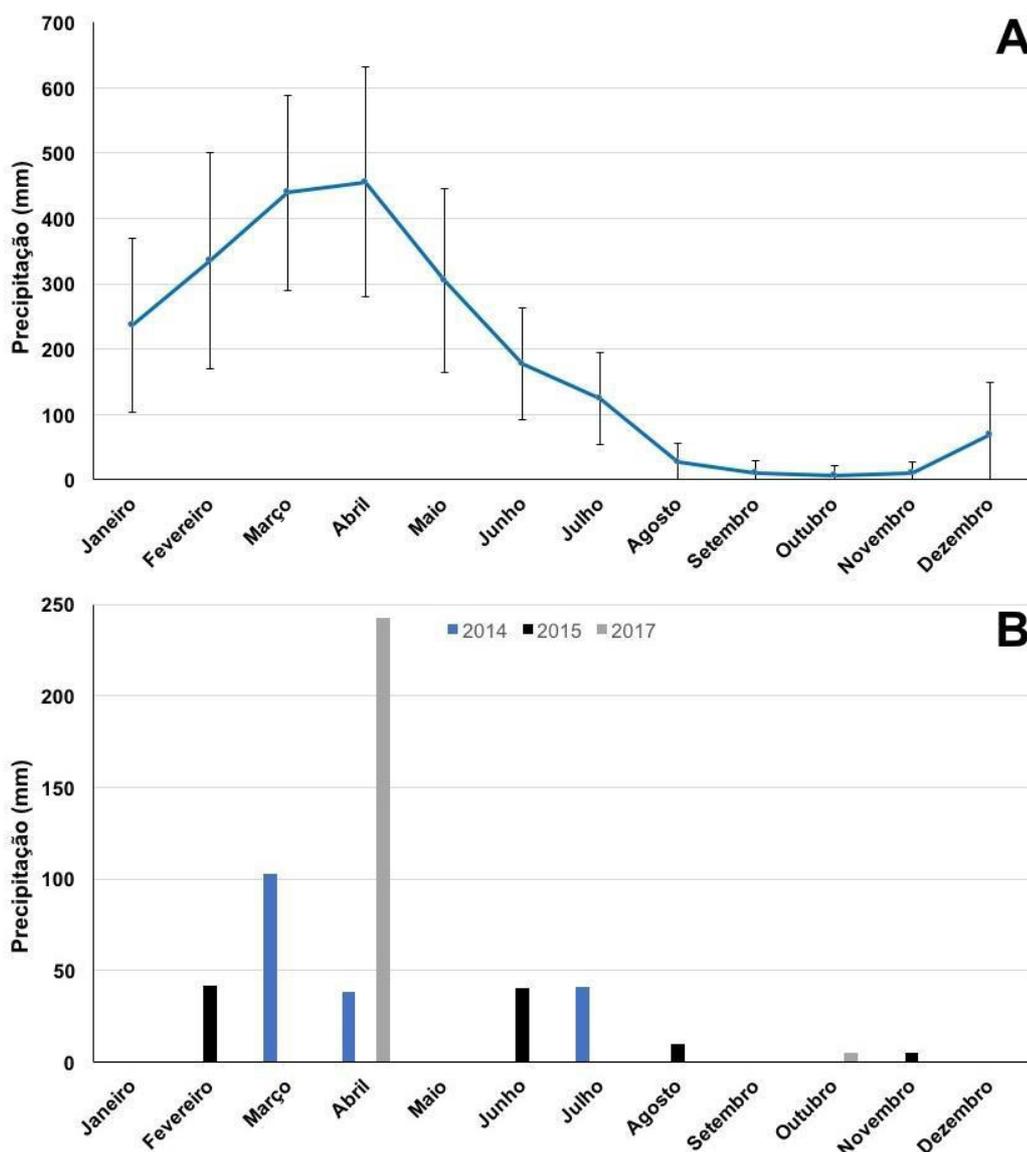


Figura 2: A - Precipitações médias históricas para a região do CEASJ entre os anos de 1971 a 2016. Observa-se de janeiro a junho a estação chuvosa, com máximo pluviométrico em abril. No segundo semestre observa-se a estação seca, onde outubro é o mês mais seco (INMET, 2016); B - Precipitação referente há 15 dias antes da aquisição de dados (seção 4.1) nos anos de 2014, 2015 e 2017.

3.3. Características Hidrodinâmicas

A região do CEASJ apresenta um regime de macromaré regida pelo sistema de marés semidiurnas, caracterizadas por duas marés altas e duas marés baixas por dia lunar (24 h e 50 min) e de acordo com Ferreira (1988) e Pereira e Harari (1995), as alturas das marés podem chegar a até 7 metros, com intensas correntes de maré que podem atingir valores de 2 a 3 ms^{-1} .

Os mapas cotidais, segundo Pereira e Harari (1995) indicam um aumento da amplitude da componente principal M_2 , desde valores abaixo de 1,0 m (no contorno aberto sobre a plataforma) até valores acima de 2,0 m (no interior os complexos

estuarinos Arraial-São José e São Marcos). As correntes e os transportes da M_2 são muito influenciados pelo canal que liga os estuários e a borda aberta oposta, havendo predominância do sentido sudoeste-nordeste na circulação. Na região do canal as correntes atingem valores máximos, muitas das vezes chegam a exceder $1,5 \text{ ms}^{-1}$. Os perfis verticais das correntes horizontais da M_2 indicam a grande influência do atrito no fundo e da viscosidade turbulenta vertical, havendo acentuado decaimento da velocidade com a profundidade a partir da meia água. A onda de maré é predominantemente progressiva nas áreas externas (plataforma); já nas áreas internas, como na CESH e CEASJ, há uma tendência a um comportamento estacionário (PEREIRA; HARARI, 1995), ou seja, ocorre com maior frequência a defasagem entre os máximos de correntes e as estofas de maré (FERREIRA, 1988).

Levando em conta a penetração da maré, que está associada a fatores hidrodinâmicos, Coutinho e Morais (1976) dividiram a região em zonas: Zona fluvial; Zona estuarina superior; Zona estuarina inferior e Zona de embocadura. Na zona estuarina: parte do material em suspensão que é transportado pelo rio Itapecuru deposita-se; registra-se a presença de sedimentos marinhos retrabalhados e que se mistura com os da Formação Itapecuru; há a existência de importantes correntes de maré e uma descarga fluvial mais intensa nas cheias.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Aquisição de dados

Foram realizados durante os anos de 2014, 2015 e 2017, aquisições de dados oceanográficos nos estuários dos rios Perizes e Sampaio e no Complexo Estuarino Arraial-São José (MA) (Figura 1). O período amostral foi dividido em dois momentos distintos: o primeiro, nos estuários dos rios Perizes e Sampaio (2014-2015), em diferentes regimes climáticos (chuva, interface chuva/seca e seca) e sob diferentes regimes de maré (quadratura e sizígia); o segundo, no Complexo Estuarino Arraial-São José, durante as estações de chuva (abril de 2017) e seca (outubro de 2017).

4.1.1. Estuários dos rios Perizes e Sampaio

Durante o biênio 2014-2015, foram realizadas 12 (doze) campanhas de campo, nas estações de chuva, interface chuva/seca e estação de seca, em eventos de maré de quadratura e sizígia (Tabela 1).

Tabela 1: Períodos das campanhas nos estuários dos rios Perizes, Sampaio e CEASJ, para condições de maré de quadratura e sizígia, durante o biênio de 2014-2015, em diferentes regimes sazonais.

Maré	Chuva	Interface Chuva/Seca	Seca
2014			
Quadratura	12/03/2014	31/07/2014	31/10/2014
Sizígia	04/04/2014	14/07/2014	25/10/2014
2015			
Quadratura	12/02/2015	23/06/2015	19/11/2015
Sizígia	05/02/2015	14/08/2015	12/11/2015

Foram feitas medidas em 9 (nove) estações hidrográficas nos estuários dos rios Perizes e Sampaio (Figura 3), onde as variáveis de estado (temperatura, salinidade) foram adquiridas com auxílio de um CTD (*Conductive-Temperature-Depth*) (EXO2) com amplitude de medição dos sensores de temperatura entre -5°C e 40°C , condutividade entre 0 e 90 mS cm^{-1} e pressão entre 0 e 2000 dbar. A frequência de aquisição dos dados pelo CTD foi de 15 Hz. Simultaneamente foram coletadas amostras de água para determinação do material particulado em suspensão.

O CTD foi utilizado como uma unidade autônoma, onde os dados foram armazenados na memória do equipamento, e quando o CTD era retirado da água os dados eram descarregados, passando por um controle de qualidade inicial. As lacunas foram preenchidas através do uso de uma interpolação linear: apenas os perfis que tiveram um nível de interpolação menores ou iguais a 5% foram considerados na análise. Apenas os dados obtidos durante a descida do CTD foram considerados, pois o processo de subida do aparelho é considerado mais turbulento que o processo de descida, gerando perturbações na estratificação original da coluna de água.

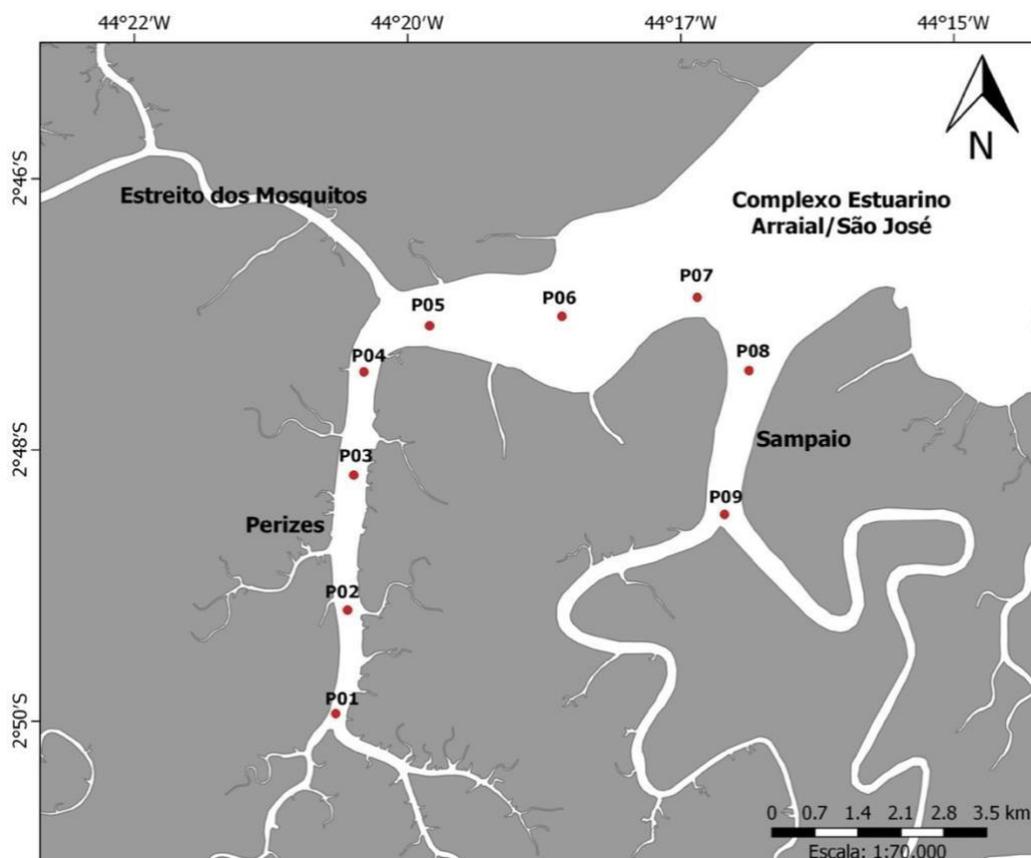


Figura 3: Localização da área dos rios Perizes e Sampaio, juntamente com as estações hidrográficas.

A caracterização hidrodinâmica foi realizada com auxílio de um ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) (Sontek/YSI) com frequência de 1,5 MHz em seções transversais ao escoamento, rebocado a boreste da embarcação, com aquisição de dados a cada 5 segundos (*Burst Interval*), acoplado ao uso do sistema *Bottom Tracking* que usa como referencial o fundo do canal e possibilitará a aquisição de velocidades na faixa de $0,001$ a $10 \text{ ms}^{-1} \pm 1\%$ com precisão de $0,001 \text{ ms}^{-1}$. A extensão vertical de cada célula será de 40 cm, com uma distância de branco de 40 cm e alcance máximo de 30 m.

4.1.2. Complexo Estuarino Arraial/São José

Durante as estações de chuva e seca de 2017, em evento de maré de sizígia, foram adquiridas informações de correntes, transportes de volume, variáveis de estado e campo de massa. Foram coletadas também amostras de água para determinação do material particulado em suspensão.

A variação horizontal das variáveis de estado, material particulado em suspensão e circulação hidrodinâmica foram adquiridas em 26 estações hidrográficas dispostas em 7 perfis perpendiculares ao escoamento (Figura 4 e Tabela 2). A variação temporal do MPS e variáveis de estado foram adquiridas em 2 (dois) fundeios (Figura 4 e Tabela 3) realizados nas radiais 2 e 5, durante um ciclo completo de maré de 12,4 horas, com amostragens a cada hora.

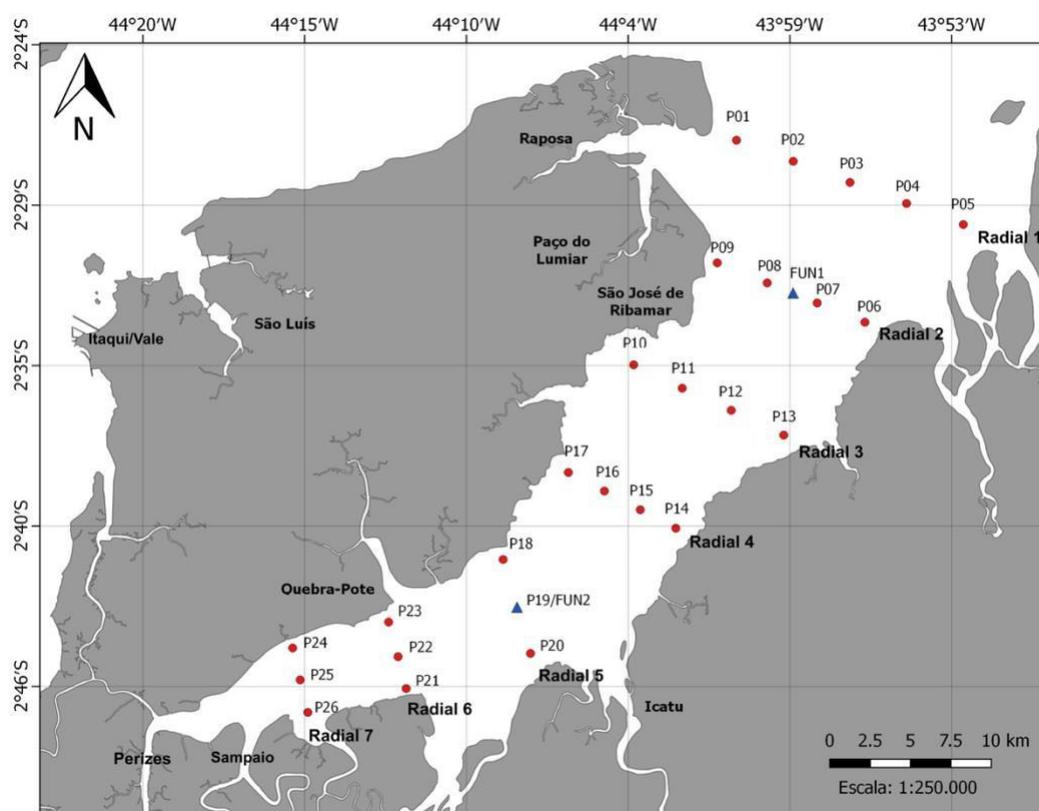


Figura 4: Complexo Estuarino Arraial São José (MA). Os pontos em vermelho representam as estações hidrográficas realizadas na Expedição Oceanográfica. Os fundeios estão representados pelos triângulos azuis.

A distância média entre as radiais foi aproximadamente 10 km. O CTD foi o mesmo utilizado na seção 4.1.1. Para a variação espacial do transporte de volume no CEASJ, foi utilizado um ADCP (Sontek/YSI), rebocado na popa da embarcação, com frequência de medição de 500 KHz e aquisição de dados a cada 5 segundos, acoplado ao uso do sistema Bottom Tracking. A variação temporal das correntes foi

medida pelo mesmo ADCP descrito acima, em dois pontos fixos no CEASJ, no entanto, a aquisição de dados se deu a cada 120 segundos.

Tabela 2: Períodos das medições nos perfis transversais, nas estações de chuva e seca de 2017.

Radial	Chuva	Seca
Radial 1 (P1, P2, P3, P4, P5)	12/04/2017	25/10/2017
Radial 2 (P6, P7, P8, P9)	12/04/2017	24/10/2017
Radial 3 (P10, P11, P12, P13)	14/04/2017	25/10/2017
Radial 4 (P14, P5, P16, P17)	12/04/2017	24/10/2017
Radial 5 (P18, P19, P20)	13/04/2017	24/10/2017
Radial 6 (P21, P22, P23)	13/04/2017	23/10/2017
Radial 7 (P24, P25, P26)	13/04/2017	23/10/2017

Tabela 3: Períodos das medições nos fundeios (I, II), nas estações de chuva e seca de 2017.

Fundeiio	Chuva		Seca	
	Início	Fim	Início	Fim
I	11/04/2017 -	12/04/2017 -	24/10/2017	25/10/2017
	16:00 h	05:00 h	17:00	06:00
II	12/04/2017 -	13/04/2017 -	23/10/2017	24/10/2017
	18:00 h	07:00 h	19:30	08:30

4.2. Variáveis de estado e campo de massa

As variáveis de estado (salinidade - gkg^{-1} ; temperatura - $^{\circ}\text{C}$) foram calculadas com base na convenção da *International Thermodynamic Equation of Seawater 2010* - TEOS-10 (<http://www.teos-10.org/>). Os procedimentos a seguir foram iguais para os estuários dos rios Perizes e Sampaio e CEASJ.

4.2.1. Remoção dos dados espúrios

Durante a 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. Desta forma, para uma melhor análise dos dados, os perfis hidrográficos realizados com CTD foram divididos em blocos de 0,5 m de espessura, da superfície ao fundo. Em cada bloco, os dados que foram diferentes da média ± 3 vezes o desvio padrão do bloco, foram eliminados (EMERY; THOMSON, 2001). Posteriormente, foi adotado uma janela móvel (seção 4.2.3), para preenchimento das lacunas deixadas pela remoção de dados inconsistentes.

4.2.2. Equi-Espaçamento Vertical

A utilização do CTD em uma velocidade de descida de 1 ms^{-1} e frequência de aquisição de dados de 15 Hz, permitiu a aquisição de 15 dados de temperatura e condutividade por metro de coluna de água. No entanto, devido ao jogo da embarcação, não pudemos garantir um equi-espacamento vertical entre as amostras no momento da amostragem. Assim, foi calculada uma média vertical para cada 1 m de coluna de água, o que resultou em perfis equi-espacados verticalmente.

A fim de minimizar a variação da profundidade da coluna d'água nos fundeios (perfis Eulerianos) feitos no CEASJ, devido à oscilação da maré, a profundidade de amostragem (z) foi adimensionalizada (equação 1), segundo metodologia de Kjerfve (1975):

$$Z = \frac{z}{|h(t)|}, \quad (1)$$

onde $|h(t)|$ é a profundidade da coluna de água durante a amostragem e Z é a profundidade adimensional. A estrutura termohalina (T , S) e os componentes da velocidade (u e v) (que ainda serão mostrados neste trabalho) foram interpolados na coluna de água em intervalos $\Delta Z = -0,1$, ou seja, desde a superfície ($Z = 0$) até o fundo ($Z = -1$), em um regime de maré vazante e enchente (BÉRGAMO; MIRANDA; CORRÊA, 2002; MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002). Os pares T , S foram extrapolados até o fundo, e a extrapolação da velocidade é feita assumindo a condição de contorno de não escorregamento.

4.2.3. Filtragem por janela móvel

Após a determinação de valores em cada intervalo e a remoção dos valores espúrios, os espaços deixados pelos dados de temperatura e salinidade em cada intervalo de 1 m foram preenchidos utilizando uma janela móvel e um procedimento de filtragem; os valores retirados nesse procedimento, são substituídos por uma média ponderada entre eles mesmos e os valores adjacentes. O número de valores adjacentes incluídos na média corresponde ao tamanho da janela e a distribuição dos valores corrigidos em relação ao valor central será determinado pelo tipo de janela utilizada. O alisamento por janela móvel que foi utilizada é a do tipo *Hanning*, que promove uma distribuição de pesos de caráter gaussiano, privilegiando a medida central. Para profundidades menores que 5 metros a janela utilizada foi de 1 m e para profundidades maiores que 5 metros a janela foi de 2 m.

A densidade convencional ou sigma-t (σ_t) foi calculada de acordo com equação 2:

$$\sigma_t = [\rho(S, T, P_{atm}) - 10^3], \quad (2)$$

onde ρ é a densidade da água do mar; S é a salinidade; T é a temperatura; P_{atm} é a pressão atmosférica.

4.2.4. Gradeamento Horizontal

Para a obtenção da distribuição horizontal das estruturas térmicas e salinas, foram usadas duas grades, a fim de compor as características das regiões estudadas, estuários dos rios Perizes e Sampaio (Figura 5) e Complexo Estuarino Arraial-São José (Figura 6). A área representativa para cada amostra de temperatura e salinidade foi determinada através da área de atuação de cada uma delas, utilizando os Polígonos de Voronoi (AURENHAMMER; KLEIN, 1989).

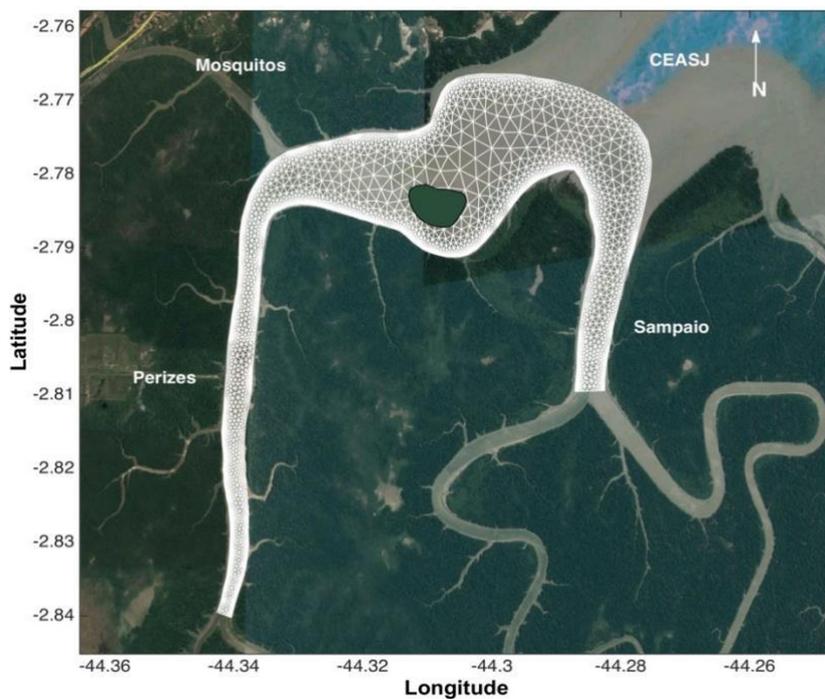


Figura 5: Representação da espacialização de áreas de representatividade para o MPS, variáveis de estado e interações continente-oceano, de acordo com a triangulação de Delaunay, para os estuários do rio Perizes e Sampaio. Quantidade de triângulos: 10905; Quantidade de nós: 6286.

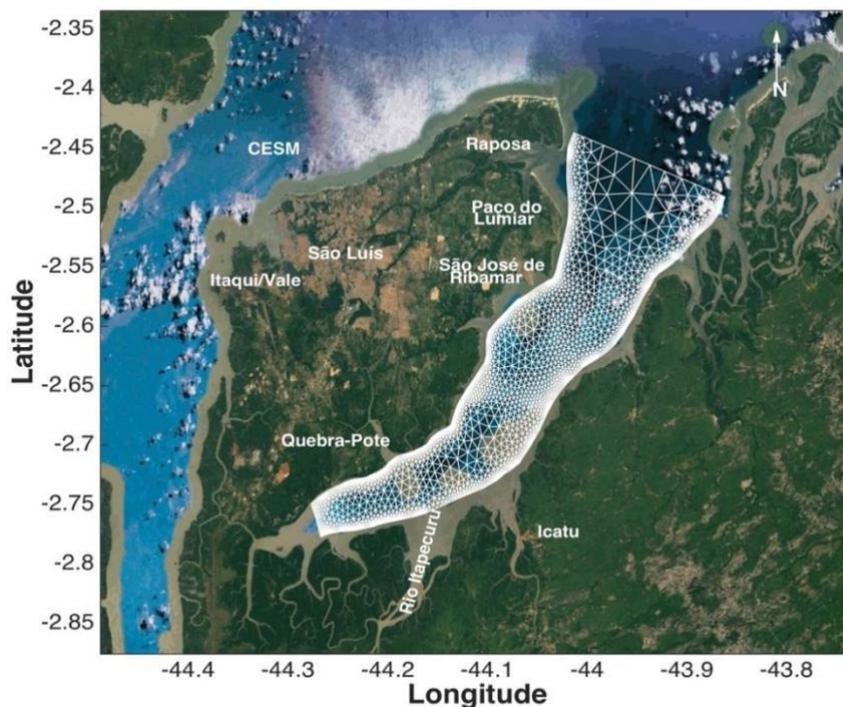


Figura 6: Representação da espacialização de áreas de representatividade para o MPS, variáveis de estado e interações continente-oceano, de acordo com a triangulação de Delaunay, para o Complexo Estuarino Arraial/São José. Quantidade de triângulos: 6359; Quantidade de nós: 3621.

4.2.5. Gradeamento Vertical

O gradeamento vertical dos campos de temperatura, salinidade e densidade (TSD) para o CEASJ foi realizado com a criação de grades regulares para cada radial, sendo os últimos pontos de grade delimitados pela profundidade local de cada estação hidrográfica. Buscando minimizar a forte anisotropia vertical dos dados, foi implementado um fator peso, que consiste de uma relação direta entre as maiores profundidades e a máxima distância de cada radial. A utilização deste fator de correção possibilitou o uso da Análise Objetiva (Interpolação Objetiva) como um interpolador ótimo. Os valores dos comprimentos de correlação foram equivalentes aos valores das distâncias entre os pontos mais distantes em casa radial, e o valor da variância do erro aleatório amostral foi igual a 0,005².

4.3. Correntes

Os procedimentos nesta seção foram utilizados somente nos perfis Eulerianos feitos no CEASJ.

4.3.1. Decomposição da velocidade

O vetor velocidade foi decomposto em componentes longitudinal (u , *Along Channel*) e transversal (v , *Cross Channel*), direção O_x e O_y , respectivamente, com valores positivos de u representando as correntes de vazante e valores negativos representando as correntes de enchente. A decomposição é feita através de relações trigonométricas de seno e cosseno (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002), como mostrado nas expressões a seguir:

$$u = |\vec{V}|\cos(90^\circ - (dd \pm D) \pm \gamma) \quad (3)$$

$$v = |\vec{V}|\sen(90^\circ - (dd \pm D) \pm \gamma), \quad (4)$$

onde \vec{V} é o vetor velocidade, dd é ângulo medido pelo ADCP, D é a correção pela declinação magnética e γ é o ângulo do eixo longitudinal. Detalhes sobre o procedimento para a correção e decomposição das velocidades de corrente foram descritos por Miranda, Castro e Kjerfve (2002).

4.3.2. Remoção de dados espúrios

Os mesmos fatores que podem ocasionar erros na aquisição de dados de corrente com o uso de um ADCP rebocado por uma embarcação, também atuam nos fundeios, ou seja, variação temporal. Para remoção dos dados inconsistentes armazenados no equipamento durante o tempo de fundeio, utilizamos o método estatístico de eliminação dos registros que excederam a média mais ou menos três vezes o valor do desvio padrão a partir da aplicação de uma janela móvel retangular com 0,5 horas de largura. As lacunas na série de original dos dados, geradas pela remoção dos dados espúrios, foram preenchidas com o uso de interpolação linear. O percentual de preenchimento de lacunas através da interpolação linear variou entre 0,5 e 0,8% do número total de dados da série original.

4.4. Cálculo dos valores médios no espaço e no tempo

As médias no espaço e tempo foram numericamente integradas de acordo com os métodos propostos por Miranda, Castro e Kjerfve (2002) e Bérigamo, Miranda e Corrêa (2002), onde o espaço equivale à profundidade. Para os perfis verticais de propriedades escalares denotados genericamente por $P = P(Z_j, t)$, amostradas em profundidades adimensionais discretas ($Z_j = 0, -0,1, -0,2, \dots -1$), as médias desses perfis no tempo e espaço foram calculadas por integração, conforme:

$$\langle P(Z_j, t) \rangle = P(Z_j) = \frac{1}{T} \int_0^T P(Z_j, t) dt \quad (5)$$

$$\overline{P(Z_j, t)} = P(t) = \int_{-1}^0 P(Z_j, t) dZ \quad (6)$$

$$\langle \overline{P(Z_j, t)} \rangle = P = \int_{-1}^0 P(Z_j) dZ \quad (7)$$

Os símbolos $\langle \rangle$ e a barra ($\overline{\quad}$) indicam médias no tempo e no espaço, respectivamente, durante intervalos de tempo iguais a um período de um ciclo completo de maré (T) e ao longo da coluna de água.

Nas equações (5), (6) e (7), $P(Z_j)$ é a média temporal, $P(t)$ é a média espacial e P é a média no tempo e espaço, aplicada ao perfil vertical observado de uma propriedade escalar qualquer $P(Z, t)$, que neste caso são representadas pela salinidade [$S= S(Z, t)$], temperatura [$T= T(Z, t)$] e componente longitudinal da velocidade [$u= u(Z, t)$]. Com base no período (T), equivalente ao ciclo completo de maré, a interpolação é feita com $T= n\Delta t= t_n - t_o$ (onde $\Delta t= 1h$ e $n= 13h$). As integrações foram feitas numericamente aplicadas aos valores discretos no tempo e/ou espaço, e discretizadas da seguinte forma (KJERFVE, 1979; MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002):

$$\langle P(Z_j, t) \rangle = \frac{1}{n} \left[\frac{P(Z_j, t_o)}{2} + \sum_k P(Z_j, t_k) + \frac{P(Z_j, t_n)}{2} \right] \quad (8)$$

$$\overline{P(t)} = \frac{1}{10} \left[\frac{P(0, t)}{2} + \sum_j P(Z_j, t) + \frac{P(1, t)}{2} \right] \quad (9)$$

$$\langle \overline{P(Z_j, t)} \rangle = P = \frac{1}{n} \left[\frac{P(t_o)}{2} + \sum_k P(t_k) + \frac{P(t_n)}{2} \right] \quad (10)$$

Através deste método, foram obtidos os perfis Eulerianos, os quase-estacionários da salinidade, temperatura e do componente longitudinal da velocidade, bem como seus valores residuais, S_a , T_a , e u_a para os quatro fundeios oceanográficos. Mais detalhes a cerca desta metodologia podem ser obtidos em Miranda, Castro e Kjerfve (2002).

4.5. Interações Continente-Oceano

4.5.1. Transporte de Volume

O transporte de volume (T_v) nas seções transversais ao fluxo médio de área $A=A(x, z)$ do estuários do rios Perizes e Sampaio e CEASJ foram calculados através da integração numérica da equação, segundo Miranda, Castro e Kjerfve (2002):

$$T_v = \iint_A \vec{v} \cdot \vec{n} dA, \quad (11)$$

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 e z é a profundidade. Essa quantidade física foi calculada em unidades do Sistema Internacional (SI) (m^3s^{-1}).

4.5.2. Cálculos dos volumes e tempo de residência

Estes cálculos foram utilizados tanto nos estuários dos rios Perizes, Sampaio e CEASJ.

4.5.2.1. Volume de água total

O volume de água total (dv) foi calculado a partir do T_v , em m^3 :

$$dv = \int_0^T |T_v|, \quad (12)$$

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

4.5.2.2. Volume de água doce

O volume de água doce existente na massa de água total estuarina, V_{fw} , em m^3 , foi obtido a partir da equação (13). A partir desse valor, considerando-se o volume de água total, será determinado o percentual de água doce (Pad) para cada período avaliado.

$$V_{fw} = \frac{1}{v} \int \frac{S_o - S_e}{S_o} dv \quad (13)$$

Na equação (13), S_o representa a salinidade observada regionalmente para a água do mar ($36,2 \text{ gkg}^{-1}$) e S_e a média aritmética da salinidade medida *in situ*, para a seção do canal estuarino.

4.5.2.3. Tempo de residência

O tempo de residência (Tr), indicador de acumulação e/ou renovação de substâncias potencialmente poluidoras do estuário, foi calculado com medidas do Tv em seções transversais e conhecimento do Vfw contido no estuário, por meio da simples razão:

$$Tr = \frac{Vfw}{Tv} \quad (14)$$

4.5.3. Transporte advectivo de sal

O transporte médio de sal (Ts) durante um ou mais ciclos completos de maré é dado pela equação 15 e foi aplicada somente para os perfis Eulerianos feitos no CEASJ:

$$Ts = \frac{1}{T} \int_0^T \left[\int_0^h \rho u S dz \right] dt = \langle \overline{\rho u S h} \rangle, \quad (15)$$

onde ρ , u e S indicam a densidade, o componente longitudinal da velocidade e a salinidade, respectivamente, e h é a espessura da coluna de água. A barra ($\overline{\quad}$) sobre as variáveis denota o valor médio ao longo da coluna de água e o símbolo $\langle \rangle$ denota a média no tempo, ou seja, o segundo membro da equação (15) envolve o cálculo de médias no espaço e no tempo das propriedades que foram calculadas numericamente pelas equações (8) a (10). No SI o Ts é dado em $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$.

Para que seja possível calcular os componentes do transporte advectivo de sal, visto que somente uma parte deste transporte de sal é calculado pela equação (15), é necessário decompor em parcelas o componente longitudinal da velocidade (quatro parcelas), a salinidade (quatro parcelas) e a espessura da coluna de água (duas parcelas) (BOWDEN, 1963; DYER, 1974; FISCHER, 1976; HUNKINS, 1981; KJERFVE, 1986). Para um canal estuarino, essa decomposição é expressa por:

$$u(x, Z, t) = u_a(x) + u_t(x, t) + u_s(x, Z) + u'(x, Z, t), \quad (16)$$

$$S(x, Z, t) = S_a(x) + S_t(x, t) + S_s(x, Z) + S'(x, Z, t), \quad (17)$$

$$h(x, t) = h_a + h_t(x, t). \quad (18)$$

As primeiras parcelas do segundo membro das equações (16) e (17) representam o efeito advectivo gerado pela descarga fluvial (u_a) na redistribuição advectiva da salinidade (S_a). Os segundos termos [$u_t(x, t)$ e $S_t(x, t)$] simulam os efeitos cíclico da corrente de maré, e os terceiros termos [$u_s(x, Z)$ e $S_s(x, Z)$] simulam o efeito da circulação gravitacional, ou seja, gradientes barotrópico e baroclínico da força de gradiente de pressão, para segundo e terceiro termo, respectivamente. E por fim, os últimos termos $u'(x, Z, t)$ e $S'(x, Z, t)$ são parcelas residuais, resultantes de processos físicos de pequena escala. O $h_a = \langle h \rangle$ é a média no tempo da profundidade local e $h_t(x, t)$ é a variação no tempo da altura da maré.

Substituindo as equações (16), (17) e (18) na equação (15), o transporte advectivo de sal resultante fica decomposto em 32 parcelas, no entanto, há termos muito pequenos que acabam sendo desprezados ou não há uma correlação com significado físico definido, resultando em sete (7) parcelas para o transporte total médio de sal:

$$Ts = \bar{\rho} (u_a h_a S_a + \langle h_t u_t \rangle S_a + h_a \langle u_t S_t \rangle + h_a \overline{u_s S_s} + h_a \langle \overline{u' S'} \rangle + \langle u_t S_t h_t \rangle + u_a \langle S_t h_t \rangle) \quad (19)$$

As 7 parcelas da equação (19) estão relacionadas, respectivamente, aos seguintes processos físicos: descarga fluvial, deriva de Stokes, correntes de maré, circulação gravitacional, flutuações turbulentas, correlação tríplice e corrente residual.

Detalhes acerca da metodologia empregada podem ser adquiridos em Bérghamo, Miranda e Corrêa (2002) e Miranda, Castro e Kjerfve (2002).

4.5.4. Estabilidade da coluna de água

Os procedimentos desta seção foram utilizados somente para os perfis Eulerianos amostrados no CEASJ.

4.5.4.1. Número de Richardson por camada

A estabilidade vertical da coluna de água pode ser expressa por vários números adimensionais. Neste trabalho utilizamos o número de Richardson por camada (Ri_L) definido por Bowden (1978), e foi calculado como:

$$Ri_L = \frac{gh}{(\bar{u})^2} \frac{\Delta\rho_v}{\bar{\rho}} \quad (20)$$

onde $h = h(t)$ é a profundidade local, $\Delta\rho_v$ é a diferença entre a densidade do fundo (ρ_f) e da superfície (ρ_s), \bar{u} é o valor médio da velocidade na coluna de água e $\bar{\rho}$ é a densidade média na coluna de água. Os limites inferior e superior ($Ri_L = 2$ e $Ri_L = 20$) estabelecem as condições de instabilidade e alta estabilidade vertical na coluna de água, respectivamente (DYER, 1986). Para valores de $Ri_L < 2$ indica condições de instabilidade, a turbulência torna-se efetivamente isotrópica e a mistura é totalmente desenvolvida (DYER, 1997). Há condições de fraca estabilidade quando os valores de Ri_L estão entre 2 e 20, ou seja, $2 < Ri_L < 20$. E para o $Ri_L > 20$, indica condições de alta estabilidade.

4.5.4.2. Anomalia da energia potencial

Outra relação com a estabilidade da coluna de água é através da anomalia da energia potencial, ϕ , visto que através desta grandeza pode-se calcular a energia do balanço cíclico da maré devido às suas modulações (neste caso, semidiurna) e a sua influência com a estabilidade vertical, definido por Simpson et al. (1990):

$$\phi = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 (\bar{\rho} - \rho)gzdz; \bar{\rho} = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 \rho(z)dz, \quad (21)$$

onde $\rho = \rho(z)$ e $\bar{\rho}$ são os perfis de densidade e densidade média, respectivamente. A grandeza física ϕ representa o trabalho, por unidade de volume, necessário para

misturar verticalmente a coluna de água (Jm^{-3} no sistema SI de unidades). Em condições homogêneas (estuário bem misturado), o valor de ϕ será igual ou perto de zero, e seu valor aumenta com a estratificação vertical.

Assumindo que a variação da profundidade, h , é independente da oscilação da maré e considerando para um fluido incompressível com fluxo unidirecional que a variação local da densidade está relacionada com o termo advectivo (advecção da densidade, equação 22):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -u \frac{\partial \rho}{\partial x} \text{ e } \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} = -\bar{u} \frac{\partial \rho}{\partial x}, \quad (22)$$

a variação no tempo de ϕ pode ser escrita como:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{g}{h} \frac{\partial \rho}{\partial x} \int_{-h}^0 (u - \bar{u}) z dz, \quad (23)$$

onde $u = u(z)$ e \bar{u} são os perfis do componente longitudinal da velocidade e da velocidade média, respectivamente, assumindo que o gradiente longitudinal da densidade $\left(\frac{\partial \rho}{\partial x}\right)$ é independente da profundidade. A equação acima ainda pode ser escrita em termos da profundidade adimensional (seção 4.2.2):

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = gh \frac{\partial \rho}{\partial x} \int_{-1}^0 (u - \bar{u}) Z dZ, \quad (24)$$

A variação da energia potencial, $\frac{\partial \phi}{\partial t}$, é utilizada para comparar a intensidade da mistura gerada pela agitação da maré. No entanto, nós decidimos ir mais além, transformar esta variação da energia potencial ao longo do ciclo de maré em potencial energético. Como ela dada em $\text{Jm}^{-3}\text{s}^{-1}$ decidimos transformá-la em giga watts hora por ano (GWhano^{-1}), visto que o *watt* é dado em Js^{-1} no sistema SI. Para o cálculo utilizou-se também a largura da seção onde ficou localizado o fundeio, a profundidade média e a média das velocidades absolutas de enchente e vazante, obtendo o volume de água da região durante o ciclo. Através disto, teremos uma base

de potencial energético para toda a seção dos fundeios, mas deixando claro que os valores obtidos estão além dos que realmente serão utilizados para geração de energia elétrica, cabendo aos gestores competentes a fomentação de usinas geradoras de energia maremotriz, que é uma fonte de energia renovável e limpa (LEITE NETO et al., 2011; LEITE NETO; SAAVEDRA; RIBEIRO, 2017).

4.5.5. Determinação do Material Particulado em Suspensão (MPS)

A concentração de MPS dos estuários dos rios Perizes e Sampaio e CEASJ foi determinado a partir de uma amostra de 5 litros de água, coletada com garrafa de Van Dorn lastreada com chumbo de 15kg para melhorar a estabilidade e direcionamento vertical. Durante o estudo, as amostras de água foram coletadas na camada superficial (0,5 m abaixo da superfície da água) e camada inferior (1 m acima do fundo), em todas as estações hidrográficas de coleta e nos fundeios ($\Delta t = 1h$). As amostras foram acondicionadas em frascos de polietileno de 500 ml (duplicata) e mantidas resfriadas a 4°C, até a chegada em laboratório. A determinação das concentrações do MPS foi por medida gravimétrica, segundo as metodologias descritas em Strickland e Parsons (1972), onde a diferença de peso antes e após a filtração, usando os filtros de fibra de vidro (Millepore AP040) de 47 mm de diâmetro, forneceu o MPS em mgL^{-1} . Nos perfis Eulerianos, foram feitos gráficos de isopletras, cujas concentrações de MPS foram interpoladas na coluna de água, através de interpolação linear.

De posse dos dados das concentrações de MPS, foram calculadas as descargas desse material, utilizando a equação de transporte de massa, segundo Miranda, Castro e Kjerfve (2002):

$$T_{mps} = \iint_A \varphi \vec{v} \cdot \vec{n} dA = \iint_A \varphi u dA = \overline{\varphi} u A \quad (25)$$

onde o T_{mps} representa o transporte de MPS (kgs^{-1}), A representa a área média da seção transversal à direção longitudinal do fluxo (m^2), \bar{u} é o valor médio do componente de velocidade normal a área A e $\overline{\varphi}$ indica a concentração média de MPS na seção transversal A .

4.5.6. Cálculos das Anomalias

Para os estuários dos rios Perizes e Sampaio, desenvolvemos as anomalias das propriedades ($\Delta\gamma$), que foram calculadas a partir da diferença entre os anos de 2014 e 2015, ou seja, consiste em valores das distribuições espaciais que resultam da diferença entre os anos de 2014 e 2015 nas mesmas condições sazonais e de maré, como observado na equação 26:

$$\Delta\gamma = \gamma P1_{(2014)} - \gamma P2_{(2015)} \quad (26)$$

onde γ é uma propriedade qualquer, representada neste estudo pelo transporte de volume, salinidade, material particulado em suspensão e tempo de residência. P1 é a sazonalidade e condição de maré de 2014 e P2 é a sazonalidade e condição de maré de 2015. A sazonalidade é representada pela chuva, chuva/seca e seca e as condições de maré por quadratura e sizígia. Logo, é possível obter valores positivos (+) ou negativos (-). Os valores positivos indicam que em 2014 o valor da propriedade analisada foi maior, enquanto que o valor negativo indica que em 2015 os valores foram mais acentuados.

4.5.7. Diagrama de Classificação de Hansen e Rattray

Para classificação do estuário no perfis Eulerianos feitos no CEASJ foi utilizado o Diagrama Estratificação-circulação proposto por Hansen e Rattray (1966), e em teoria foi deduzido com um modelo bidimensional estacionário, lateralmente homogêneo e com seção retangular, que simula perfis teóricos da velocidade longitudinal e da salinidade. Sendo estes perfis médios do componente longitudinal da velocidade (u) e de salinidade (S) usados para calcular os parâmetros de estratificação (Pe) e circulação (Pc):

$$Pe = \frac{\delta S}{\bar{S}} = \frac{S_f - S_s}{\bar{S}} \quad (27)$$

$$Pc = \frac{u_s}{u_f} \approx \frac{u_s}{\bar{u}} \quad (28)$$

onde $\delta S = S_f - S_s$ é a diferença entre os valores de salinidade no fundo (S_f) e de superfície (S_s), \bar{S} é o valor médio da salinidade na coluna de água, u_s é o valor médio do componente longitudinal de velocidade na superfície e u_f é a velocidade da descarga fluvial. Quando a descarga fluvial não é adequadamente conhecida, em vez de usar u_f , utiliza-se \bar{u} que é o valor médio da velocidade na coluna de água. O cálculo destes parâmetros, na prática, foi realizado com médias no tempo e no espaço utilizando as equações (8) a (10).

5. RESULTADOS

Os resultados obtidos são apresentados e discutidos em dois momentos (assim como o item 4.1). O primeiro (Seção 5.1), é apresentado os resultados dos estuários dos rios Perizes e Sampaio. Enquanto que o segundo momento (Seção 5.2), trata do Complexo Estuarino Arraial-São José referente à circulação e mistura estuarina em escalas espaciais e temporais.

5.1. Estuários dos rios Perizes e Sampaio

5.1.1. Variáveis de estado

As tabelas 4 e 5 mostram as variáveis de estado em diferentes períodos climáticos e sob diferentes regimes de maré durante o biênio 2014-2015, respectivamente. No ano de 2014 (Tabela 4), em evento de maré de quadratura, os maiores valores de temperatura (31,5 °C) foram observados na estação chuvosa associados às águas menos salinas (8,9 gkg⁻¹), enquanto que mínimos de temperatura (26,4 °C) ocorreram na estação de seca, associados aos valores de salinidade da ordem de 30,4 gkg⁻¹. Durante evento de maré de sizígia, os gradientes horizontais de temperatura e salinidade sugeriram o mesmo padrão do comportamento observado em maré de quadratura, com máximos de temperatura (30,5 °C) e mínimos de salinidade (12,5 gkg⁻¹) ocorrendo na estação de chuva, enquanto que na estação de seca observamos um decréscimo de 1,9 °C associada a águas mais salinas (29,7 gkg⁻¹).

Em 2015 (Tabela 5), durante evento de maré de quadratura, os maiores valores de temperatura foram encontrados na interface chuva/seca (30,4 °C) vinculados aos mínimos de salinidade (17,9 gkg⁻¹), comportamento esperado para a estação de chuva que, durante o período avaliado, apresentou um comportamento típico de estação de seca, com temperaturas máximas de 30,1 °C associadas a águas salinas (31,7 gkg⁻¹). Durante a estação de seca ocorreram as menores temperaturas (28,3 °C) ligadas aos máximos de salinidade (34,8 gkg⁻¹). Entretanto, em maré de sizígia, os máximos de temperatura foram observados na estação seca (30,2 °C), assim como os maiores valores de salinidade (34,9 gkg⁻¹), enquanto que os mínimos de temperatura (28,4 °C) e salinidade (26,1 gkg⁻¹) ocorreram no período chuva/seca.

Tabela 4: Distribuição da temperatura (°C), salinidade (gkg⁻¹), tempo de residência (horas) e MPS (mgL⁻¹), ao longo dos estuários dos rios Perizes, Sampaio e CEASJ, sob condições de maré de quadratura e sizígia, nos períodos de chuva, chuva/seca e seca, para o ano de 2014.

Variável	Maré	Local	Chuva			Interface Chuva/Seca			Seca			
			Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média	
Temperatura	Quadratura	Perizes	29,2	31,0	30,4	29,5	30,5	30,0	28,1	29,7	28,8	
		Sampaio	29,3	29,8	29,5	29,4	29,7	29,5	26,4	28,0	27,4	
		CEASJ	30,0	31,5	31,0	29,6	30,7	29,9	28,6	29,2	28,9	
	Sizígia	Perizes	28,8	30,5	29,6	28,7	30,4	29,4	28,6	29,9	29,5	
		Sampaio	29,3	29,8	29,5	29,3	29,9	29,4	28,8	28,9	28,9	
		CEASJ	29,5	29,9	29,6	29,5	29,7	29,6	29,0	29,6	29,3	
	Salinidade	Quadratura	Perizes	8,9	12,0	10,5	18,8	19,6	19,1	28,2	30,3	29,3
			Sampaio	12,8	12,8	12,8	20,1	20,2	20,1	29,8	30,4	30,1
			CEASJ	12,7	13,0	12,9	20,2	20,2	20,2	28,8	29,0	28,9
Sizígia		Perizes	12,5	12,8	12,6	15,9	16,7	16,4	28,8	29,7	29,2	
		Sampaio	12,8	12,8	12,8	17,1	17,2	17,2	28,2	28,2	28,2	
		CEASJ	12,7	13,4	13,0	16,8	17,7	17,2	28,2	28,3	28,3	
Tempo de residência		Quadratura	Perizes	4,2	4,7	4,4	2,8	3,0	2,9	1,0	1,4	1,2
			Sampaio	4,0	4,0	4,0	2,7	2,8	2,8	1,0	1,1	1,0
			CEASJ	4,0	4,0	4,0	2,7	2,7	2,7	1,2	1,3	1,3
	Sizígia	Perizes	4,0	4,1	4,0	3,3	3,5	3,4	1,1	1,3	1,2	
		Sampaio	4,0	4,0	4,0	3,3	3,3	3,3	1,4	1,4	1,4	
		CEASJ	3,9	4,0	4,0	3,2	3,3	3,3	1,3	1,4	1,4	
	MPS	Quadratura	Perizes	18,9	973,0	307,0	102,5	864,3	306,0	60,8	270,0	160,1
			Sampaio	44,1	58,5	51,3	260,0	268,5	264,3	108,8	142,3	125,6
			CEASJ	57,1	393,1	222,1	176,8	276,3	220,1	95,6	104,8	100,9
Sizígia		Perizes	402,5	1449,1	974,9	3134,3	5608,5	4465,3	63,4	118,0	100,0	
		Sampaio	391,9	627,2	509,6	3410,8	3938,9	3674,9	108,8	132,1	120,0	
		CEASJ	591,7	981,6	713,3	630,4	1730,3	1146,9	95,6	418,9	311,0	

Tabela 5: Distribuição da temperatura (°C), salinidade (gkg⁻¹), tempo de residência (horas) e MPS (mgL⁻¹), ao longo dos estuários dos rios Perizes, Sampaio e CEASJ, sob condições de maré de quadratura e sizígia, nos períodos de chuva, chuva/seca e seca, para o ano de 2015.

Variável	Maré	Local	Chuva			Interface Chuva/Seca			Seca			
			Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média	
Temperatura	Quadratura	Perizes	29,3	29,7	29,5	29,0	30,1	29,7	28,8	29,6	29,1	
		Sampaio	29,2	29,9	29,5	29,0	30,1	29,8	28,3	29,5	28,8	
		CEASJ	29,4	30,1	29,8	29,7	30,4	30,0	29,0	29,7	29,3	
	Sizígia	Perizes	28,5	29,1	28,8	29,3	30,0	29,6	29,8	30,2	30,0	
		Sampaio	28,5	28,8	28,6	28,4	29,0	28,9	28,9	29,4	29,1	
		CEASJ	28,6	29,1	28,8	29,1	29,4	29,2	29,2	29,4	29,3	
	Salinidade	Quadratura	Perizes	30,3	31,4	31,1	17,9	18,6	18,2	34,3	34,8	34,5
			Sampaio	31,1	31,7	31,1	19,0	19,2	19,1	34,1	34,2	34,1
			CEASJ	31,2	31,4	31,3	19,0	19,1	19,0	34,0	34,1	34,1
Sizígia		Perizes	31,1	31,8	31,5	26,3	26,3	26,3	34,4	34,9	34,6	
		Sampaio	31,7	31,8	31,7	26,4	26,4	26,4	34,4	34,6	34,5	
		CEASJ	31,9	32,2	32,1	26,1	26,3	26,2	34,5	34,9	34,6	
Tempo de residência		Quadratura	Perizes	0,8	1,0	0,9	3,0	3,1	3,1	0,2	0,3	0,3
			Sampaio	0,9	0,9	0,9	2,9	3,0	2,9	0,3	0,4	0,4
			CEASJ	0,8	0,9	0,8	2,9	3,0	2,9	0,4	0,4	0,4
	Sizígia	Perizes	0,8	0,9	0,8	1,7	1,7	1,7	1,5	1,6	1,6	
		Sampaio	0,8	0,8	0,8	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	
		CEASJ	0,7	0,7	0,7	1,7	1,7	1,7	1,5	1,6	1,6	
	MPS	Quadratura	Perizes	61,8	176,3	118,9	47,6	550,8	220,3	84,4	1878,4	586,0
			Sampaio	54,9	118,8	86,9	111,9	156,0	134,0	136,3	1099,8	618,1
			CEASJ	61,9	203,4	118,4	48,5	50,8	49,7	52,4	127,6	97,3
Sizígia		Perizes	113,3	745,1	347,4	25,3	104,6	59,4	20,5	84,6	38,0	
		Sampaio	291,5	326,4	309,0	19,9	86,1	53,0	19,0	79,3	49,2	
		CEASJ	53,1	575,9	281,7	44,0	811,4	396,4	32,0	701,9	298,2	

5.1.2. Propriedades Hidrodinâmicas

5.1.2.1. Tempo de residência e volume de água

A tabela 4 expressa a variabilidade do tempo de residência (Tr) no ano de 2014. Em maré de quadratura o Tr apresentou amplitude de variação de aproximadamente 3,7 horas, cujos menores valores ocorreram no período de balanço hídrico negativo, enquanto que os maiores Tr 's foram observados no período chuvoso. Este comportamento foi mantido em maré de sizígia, com os valores mínimos ocorrendo na estação de seca (1,1 horas) e os máximos ocorrendo no período de balanço hídrico positivo (4,1 horas). Para o ano de 2015 (Tabela 5), em maré de quadratura, os menores tempos de residência foram observados no período de seca (0,2 horas), enquanto que na interface chuva/seca o Tr chegou a 3,1 horas, resultando em uma amplitude de interestações de 2,9 horas. Entretanto, durante o evento de maré de sizígia, o comportamento foi divergente, onde os menores valores foram encontrados na estação de chuva, apresentando Tr de 0,7 horas, enquanto que os maiores valores de Tr (1,7 horas) ocorreram na interface chuva/seca.

A figura 7 mostra o resultado do percentual de água doce (Pad) influenciando no Tr . Durante a estação chuvosa de 2014, observou-se que os Pad 's superiores a 60% resultaram em Tr maiores que 3,5 horas, enquanto que na estação de chuva de 2015, observaram-se que os Pad 's inferiores a 20%, resultaram em Tr menores que uma hora. Na interface chuva/seca, quando $Pad > 40\%$ temos um aumento dos Tr 's chegando a 2,5 horas, enquanto que se o $Pad < 40\%$ o Tr chega a no máximo 1,8 horas, correspondendo a uma diminuição no Tr de 30%. Durante a estação de seca, o Pad não ultrapassou 30%, resultando em Tr 's de no máximo 2 horas. No biênio avaliado (2014-2015) o aumento do Pad eleva linearmente o Tr , onde valores de Pad maiores que 65% resultam em Tr que podem chegar até 4,5 horas.

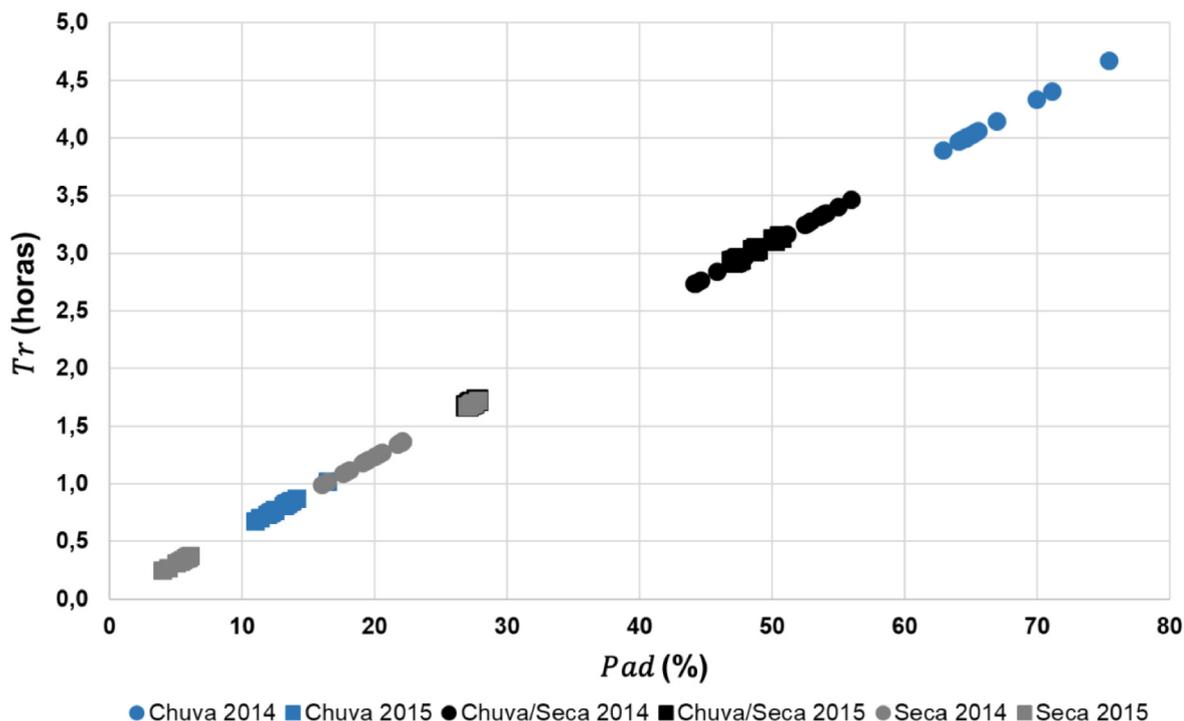


Figura 7: Relação tempo de residência e percentual de água doce para estação de chuva, chuva/seca e seca, durante os anos de 2014 e 2015.

5.1.2.2. Transporte de volume e fluxos de MPS

Os transportes de volume observados durante o biênio 2014-2015 são apresentados na tabela 6. Durante evento de maré de quadratura para o ano de 2014, os transportes variaram em uma ordem de grandeza, com os menores valores ($1,1 \times 10^2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) ocorrendo durante a estação de chuva, enquanto os maiores fluxos ($1,7 \times 10^3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) foram observados na estação de seca. Em maré de sizígia, foi possível observarmos um comportamento similar aos fluxos fluviais mínimos da estação de chuva em maré de quadratura, onde a estação de seca apresentou transporte de volume na mesma ordem de grandeza ($1,1 \times 10^2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) enquanto que na interface chuva/seca os valores foram da mesma ordem de grandeza dos maiores fluxos ($3,4 \times 10^3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) em maré de quadratura. No ano de 2015, o transporte de volume teve praticamente o mesmo comportamento observado em 2014, onde em condições de maré de quadratura, apresentaram diferença de uma ordem de grandeza ($1,6 \times 10^2$ a $1,6 \times 10^3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), entre estações de chuva e seca, respectivamente. Em maré de sizígia, houve um incremento de 27% ($31,6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) para os valores mínimos e uma redução de 19% ($650,8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) para os valores máximos dos transportes, em relação à maré de sizígia do ano anterior, onde os mínimos e

máximos ocorreram nas mesmas estações, seca e interface chuva/seca, respectivamente.

As concentrações de MPS para o ano de 2014 (Tabela 4) mostram que, em maré de quadratura, as menores ($18,9 \text{ mgL}^{-1}$) e maiores ($9,7 \times 10^2 \text{ mgL}^{-1}$) concentrações foram observadas em período de balanço hídrico positivo (estação chuvosa). Entretanto, em maré de sizígia, a presença de águas mais frias e salinas observadas na estação de seca apresentaram as menores concentrações de MPS ($63,4 \text{ mgL}^{-1}$). Na interface chuva/seca as concentrações de MPS foram até duas ordens de grandeza maiores ($5,6 \times 10^3 \text{ mgL}^{-1}$) associadas às águas mais salinas e quentes. Para o ano de 2015 (Tabela 5), observamos um comportamento oposto, onde em evento de maré de quadratura as menores concentrações de MPS foram da ordem de $47,6 \text{ mgL}^{-1}$, ocorrendo na interface chuva/seca, enquanto que as maiores concentrações ocorreram no período de balanço hídrico negativo ($1,8 \times 10^3 \text{ mgL}^{-1}$). Em maré de sizígia, com o avanço da propagação da onda de maré na estação de seca, observou-se as menores concentrações de MPS ($19,0 \text{ mgL}^{-1}$), enquanto que na interface chuva/seca as concentrações de MPS foi duas ordens de grandeza maior ($811,4 \text{ mgL}^{-1}$).

Utilizando o transporte de volume por unidade tempo, e as concentrações de MPS, calculamos os fluxos instantâneos de MPS (Tabela 6). Durante a estação chuvosa, e em evento de maré de quadratura para o ano de 2014, foram observados os menores fluxos de MPS ($2,2 \text{ kgs}^{-1}$), enquanto que na interface chuva/seca observou-se os maiores fluxos ($4,5 \times 10^2 \text{ kgs}^{-1}$). Em maré de sizígia, a estação de seca apresentou os menores fluxos ($13,6 \text{ kgs}^{-1}$) enquanto que, os maiores fluxos ($1,5 \times 10^4 \text{ kgs}^{-1}$) foram observados na interface chuva/seca. Podemos observar que há uma diferença de duas ordens de grandeza entre maré de sizígia e quadratura, denotando um aumento das concentrações de materiais na região em estudo.

Durante o ano de 2015, em evento de maré de quadratura, observamos que os menores fluxos de MPS ($10,0 \text{ kgs}^{-1}$) ocorreram na interface chuva/seca enquanto que na estação de seca os fluxos foram até duas ordens de grandeza maiores ($1,8 \times 10^3 \text{ kgs}^{-1}$). Por outro lado, em maré de sizígia os menores fluxos ocorreram na estação de seca ($3,8 \text{ kgs}^{-1}$), chegando a $843,9 \text{ kgs}^{-1}$ na interface chuva/seca.

Tabela 6: Distribuição do transporte de volume (m^3s^{-1}) e do transporte de MPS (kgs^{-1}) ao longo dos estuários dos rios Perizes, Sampaio e CEASJ, sob condições de maré de quadratura e sizígia, nos períodos de chuva, chuva/seca e seca, para o ano de 2014 e 2015.

Variável	Maré	Local	Chuva			Interface Chuva/Seca			Seca				
			Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média		
Transporte de volume	Quadratura	Sampaio	CEASJ	2014									
				Perizes	116,7	632,8	284,8	276,9	597,4	414,6	182,2	609,4	340,9
				Sampaio	1330,7	1596,8	1463,8	1690,8	1717,4	1704,1	1482,7	1789,0	1635,9
	Sizígia	Sampaio	CEASJ	Perizes	807,3	1156,3	981,8	706,7	1380,5	1043,6	904,3	1494,1	1199,2
				Perizes	557,3	872,2	714,8	668,8	2766,6	1789,9	114,9	334,5	223,1
				Sampaio	1868,8	2570,6	2219,7	2434,5	3479,0	2956,8	1993,8	3288,9	2641,4
	Quadratura	Sampaio	CEASJ	Perizes	1121,4	1619,8	1370,6	2849,6	3015,6	2932,6	1073,1	2550,3	1811,7
				Perizes	2,2	229,6	92,8	42,5	239,3	101,5	12,7	122,7	63,2
				Sampaio	58,7	93,4	76,0	446,5	454,0	450,3	194,7	211,0	202,8
Sizígia	Sampaio	CEASJ	Perizes	66,0	317,3	198,5	124,9	288,3	233,2	92,5	156,6	121,2	
			Perizes	224,3	1263,9	705,8	2096,2	15516,5	8857,0	13,6	29,7	20,8	
			Sampaio	732,4	1612,3	1172,3	8303,6	13703,4	11003,5	214,9	434,5	324,7	
Quadratura	Sampaio	CEASJ	Perizes	811,0	1030,1	953,7	1848,7	4930,7	3345,5	205,4	822,7	595,7	
			Perizes	169,0	671,9	424,5	210,8	658,6	441,2	169,9	1007,8	557,4	
			Sampaio	633,8	1083,2	858,5	1005,1	1224,9	1115,0	1371,1	1661,6	1516,3	
Sizígia	Sampaio	CEASJ	Perizes	681,4	700,4	690,9	745,2	918,5	831,9	1098,6	1280,3	1189,5	
			Perizes	416,0	601,7	514,5	156,6	446,9	300,7	146,5	437,7	292,6	
			Sampaio	378,7	1799,2	1089,0	897,0	2819,2	1858,1	901,4	2787,6	1844,5	
Quadratura	Sampaio	CEASJ	Perizes	836,4	1478,2	1157,3	1049,0	2226,1	1633,0	1157,0	2218,1	1669,4	
			Perizes	10,4	118,5	59,4	10,0	207,8	93,7	14,3	1893,1	534,9	
			Sampaio	34,8	587,3	81,7	112,5	191,1	151,8	186,9	1827,4	1007,2	
Sizígia	Sampaio	CEASJ	Perizes	42,8	481,6	81,5	37,9	44,5	41,3	62,3	163,4	116,2	
			Perizes	47,1	391,0	181,9	8,9	25,5	15,9	3,8	20,3	10,1	
			Sampaio	110,4	597,3	348,8	17,9	242,7	130,3	17,1	221,1	119,1	
Quadratura	Sampaio	CEASJ	Perizes	61,4	481,6	243,2	71,9	843,9	552,9	52,3	812,1	407,0	
			Perizes	61,4	481,6	243,2	71,9	843,9	552,9	52,3	812,1	407,0	
			Sampaio	61,4	481,6	243,2	71,9	843,9	552,9	52,3	812,1	407,0	

5.1.2.3. Anomalias

Os gradientes horizontais das anomalias de transporte de volume (ΔT_v), salinidade (ΔS), MPS (ΔMPS) e tempo de residência (ΔTr), durante a estação de chuva, em evento de maré de quadratura, variaram de -302,7 a 775,1 m^3s^{-1} (Figura 8A), -21,5 a -17,7 gkg^{-1} (Figura 8B), -104,2 a 814,4 mgL^{-1} (Figura 8C), 3,1 e 3,6 horas (Figura 8D), respectivamente. As anomalias mostram a presença de águas mais salinas em 2015, associadas às menores concentrações de MPS e Tr 's no complexo e no estuário do rio Perizes. Em evento de maré de sizígia, a ΔT_v apresentou variação de 32,5 a 2032,5 m^3s^{-1} (Figura 9A), associada aos valores negativos de ΔS com amplitude de -1,2 gkg^{-1} (Figura 9B). As variações das ΔMPS e ΔTr observadas foram de -353,2 a 1346,6 mgL^{-1} (Figura 9C) e 3,1 a 3,3 horas (Figura 9D), respectivamente.

Na interface chuva/seca e em maré de quadratura, a variação da ΔT_v foi de -318,2 a 736,3 m^3s^{-1} (Figura 10A), cuja ΔS variou positivamente de 0,3 a 1,3 gkg^{-1} (Figura 10B). Para a ΔMPS a variabilidade observada foi entre -448,3 e 659,5 mgL^{-1} (Figura 10C), associada a ΔTr com valores negativos muito próximos de zero, entre -0,3 e -0,1 horas (Figura 10D). Em maré de sizígia, a ΔT_v apresentou-se predominantemente positiva com valores máximos de 2774,9 m^3s^{-1} , com exceção da foz do rio Sampaio cuja anomalia foi negativa (-401,1 m^3s^{-1}) (Figura 11A). As ΔS indicaram maiores salinidades no ano de 2015, variando de -10,4 a -8,6 gkg^{-1} (Figura 11B), ligadas à ΔMPS cuja variação foi de -181,0 a 5588,6 mgL^{-1} (Figura 11C). As ΔTr apresentaram valores positivos, entre 1,5 e 1,8 horas (Figura 11D).

Em evento de maré de quadratura, para a estação de seca, o gradiente da ΔT_v variou de -414,6 a 451,9 m^3s^{-1} (Figura 12A), cujo os valores de ΔS mostraram-se negativos, entre -6,2 e -3,8 gkg^{-1} (Figura 12B). A variabilidade da ΔMPS e ΔTr foi de -1698,0 a 188,5 mgL^{-1} (Figura 12C) e 0,6 a 1,1 horas (Figura 12D), respectivamente. No entanto, em maré de sizígia, a variação da ΔT_v foi de -151,1 a 1140,6 m^3s^{-1} (Figura 13A), onde a ΔS variou entre 1,8 e 3,4 gkg^{-1} (Figura 13B). Para a distribuição da ΔMPS a variabilidade foi de -663,2 a 399,0 mgL^{-1} (Figura 13C), com ΔTr variando de -0,6 a -0,3 horas (Figura 13D).

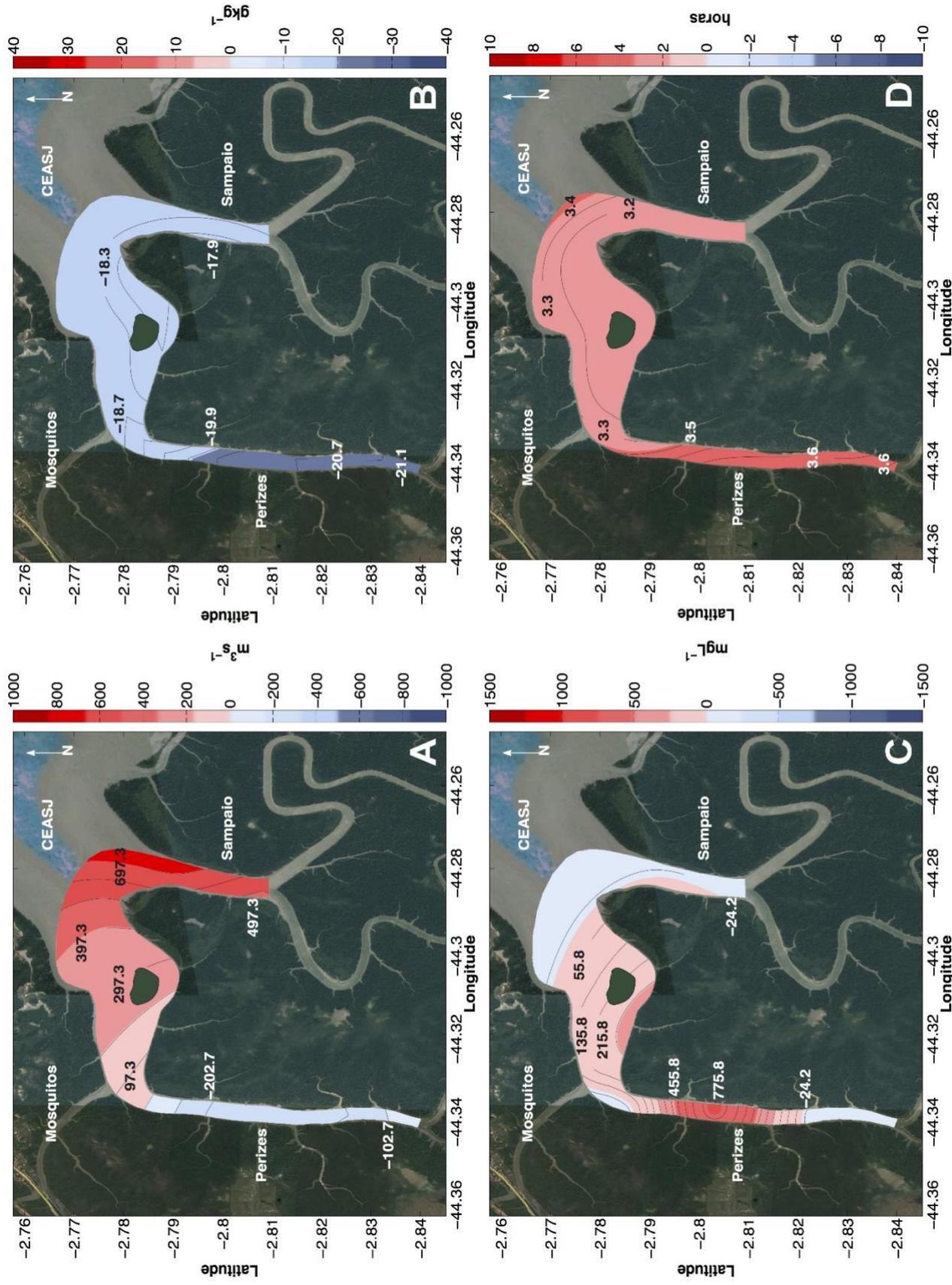


Figura 8: Distribuição horizontal das anomalias do transporte de volume (A), salinidade (B), MPS (C) e tempo de residência (D), em maré de quadratura, durante a estação de chuva.

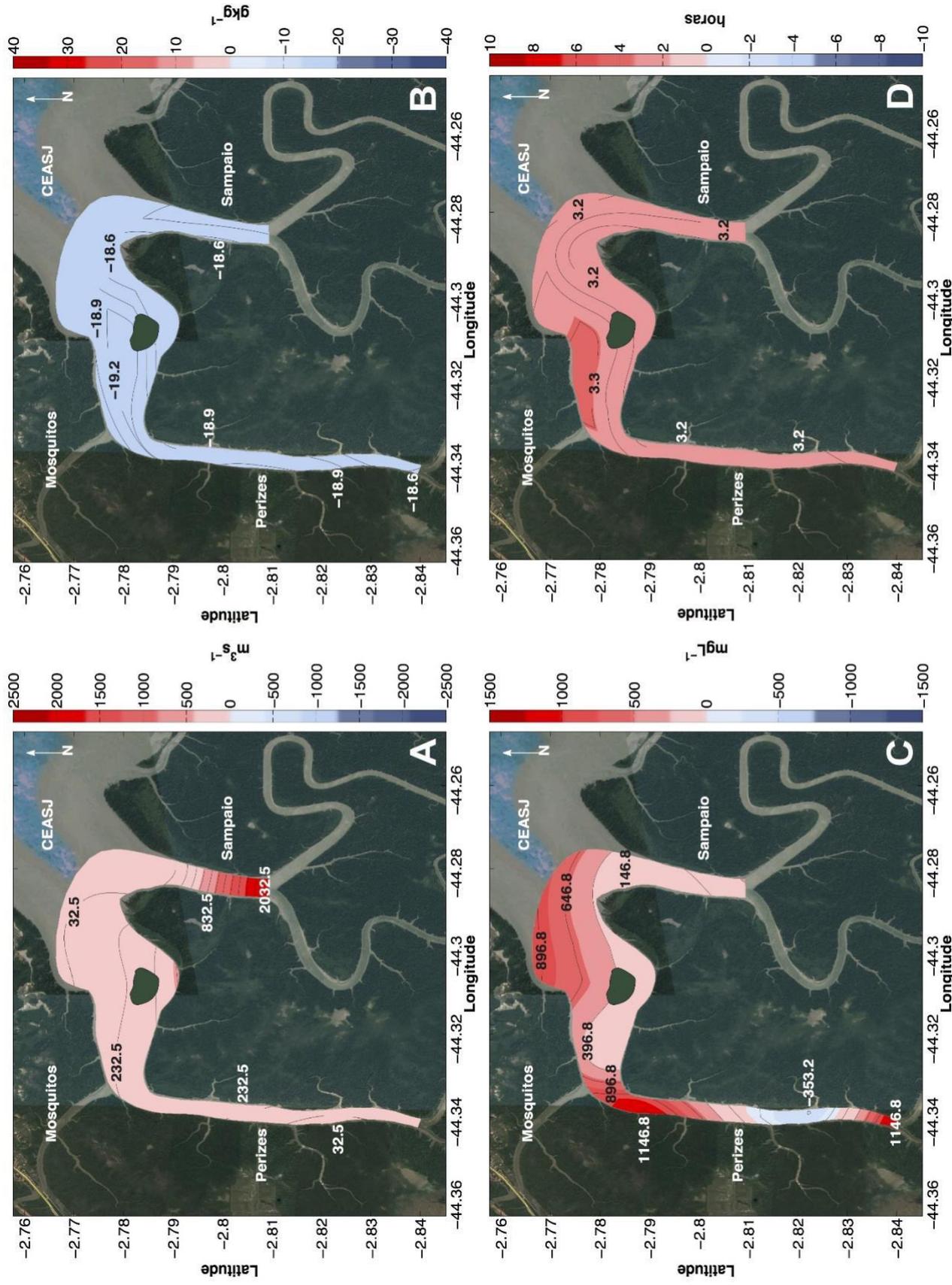


Figura 9: Distribuição horizontal das anomalias do transporte de volume (A), salinidade (B), MPS (C) e tempo de residência (D), em maré de sizígia, durante a estação de chuva.

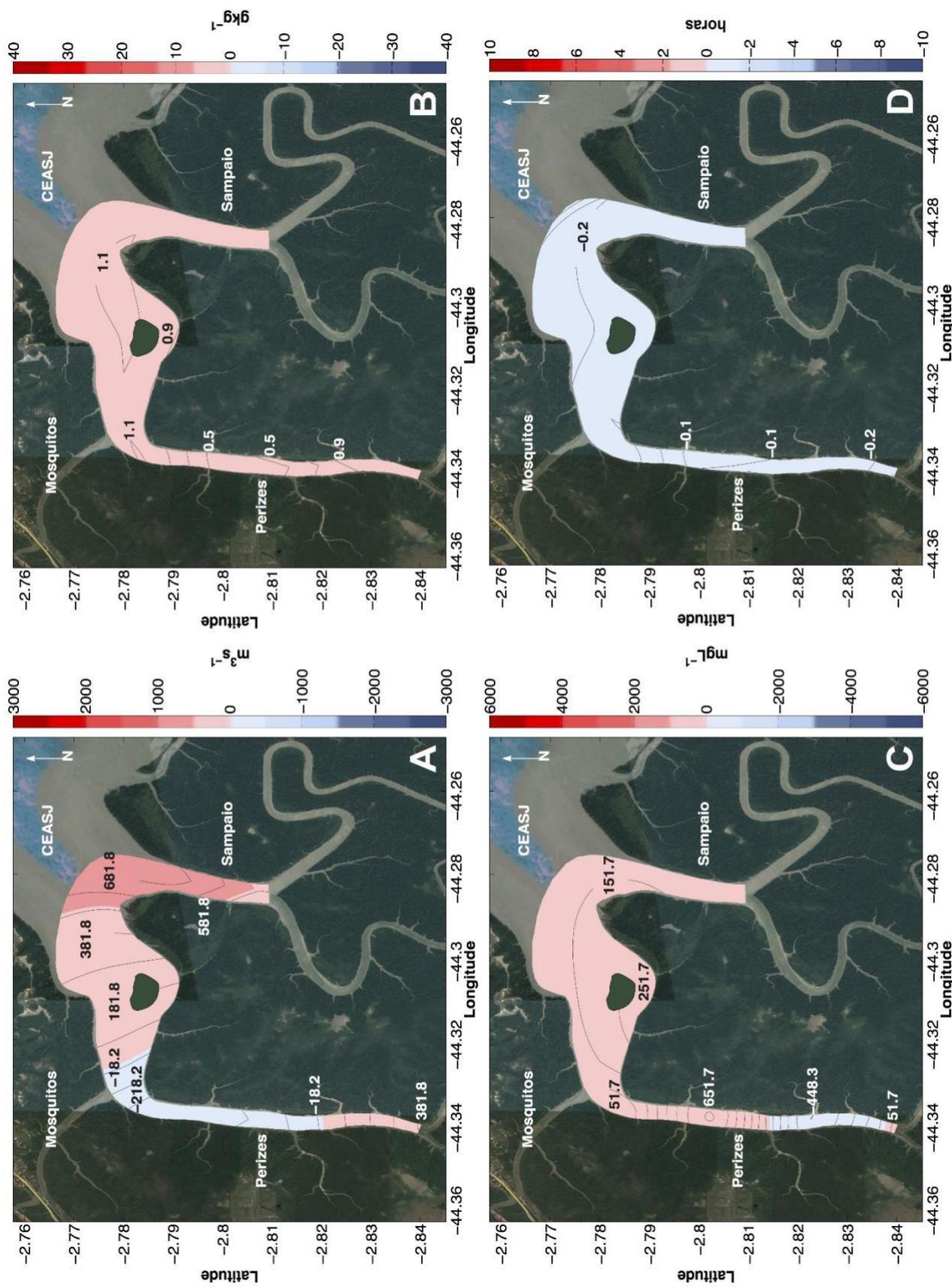


Figura 10: Distribuição horizontal das anomalias do transporte de volume (A), salinidade (B), MPS (C) e tempo de residência (D), em maré de quadratura, durante o período de transição chuva/seca.

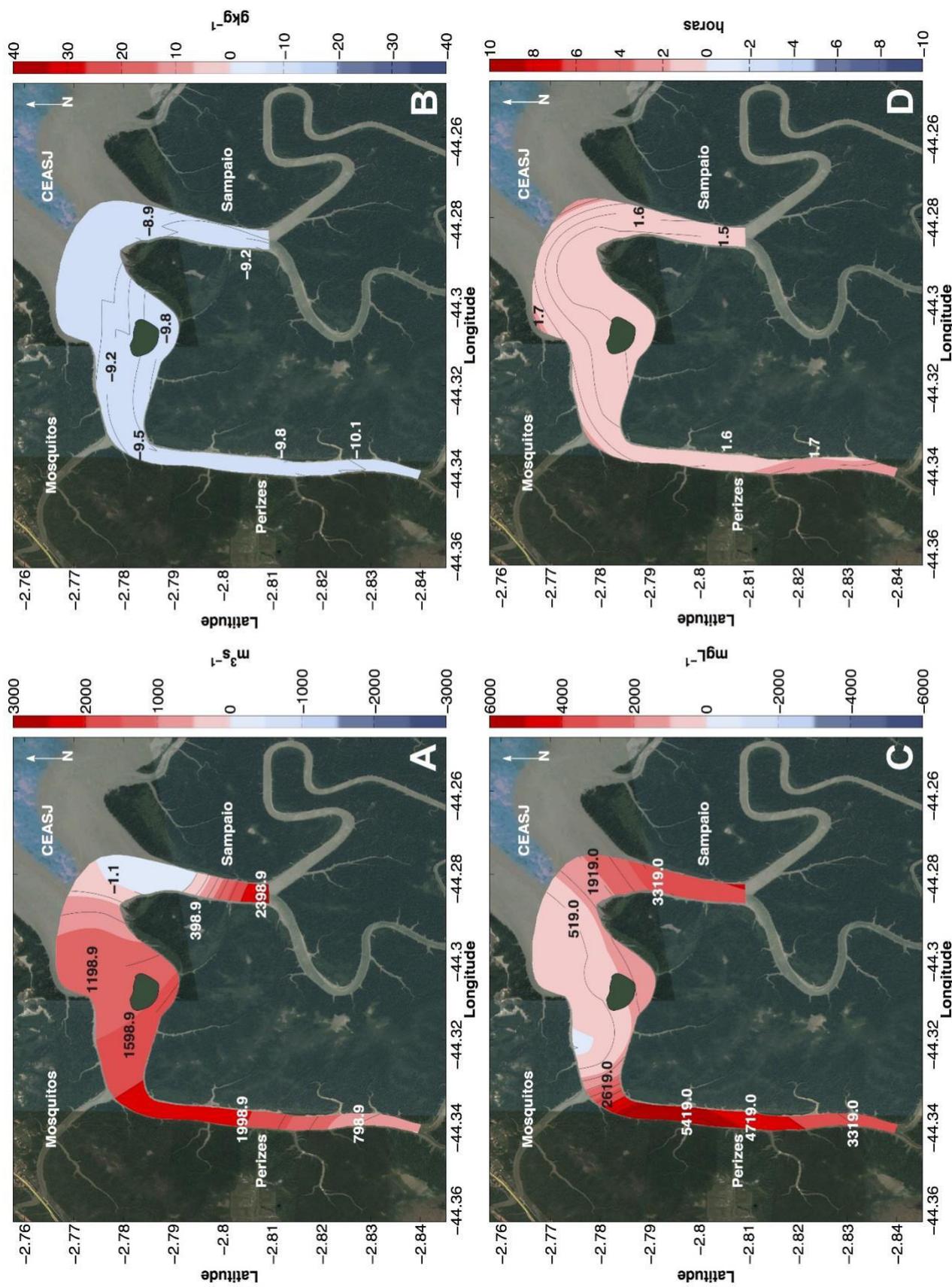


Figura 11: Distribuição horizontal das anomalias do transporte de volume (A), salinidade (B), MPS (C) e tempo de residência (D), em maré de sizígia, durante o período de transição chuva/seca.

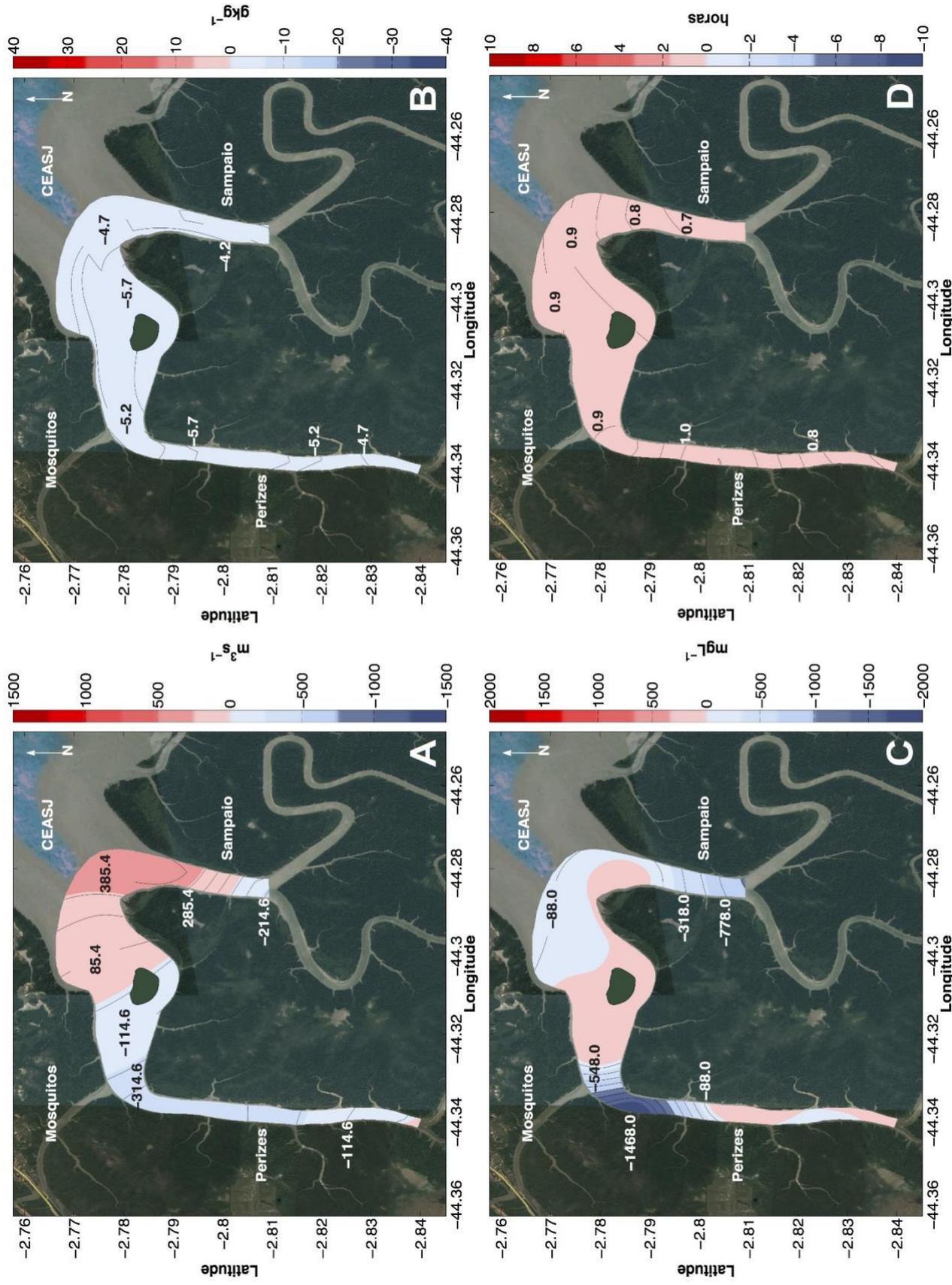


Figura 12: Distribuição horizontal das anomalias do transporte de volume (A), salinidade (B), MPS (C) e tempo de residência (D), em maré de quadratura, durante a estação de seca.

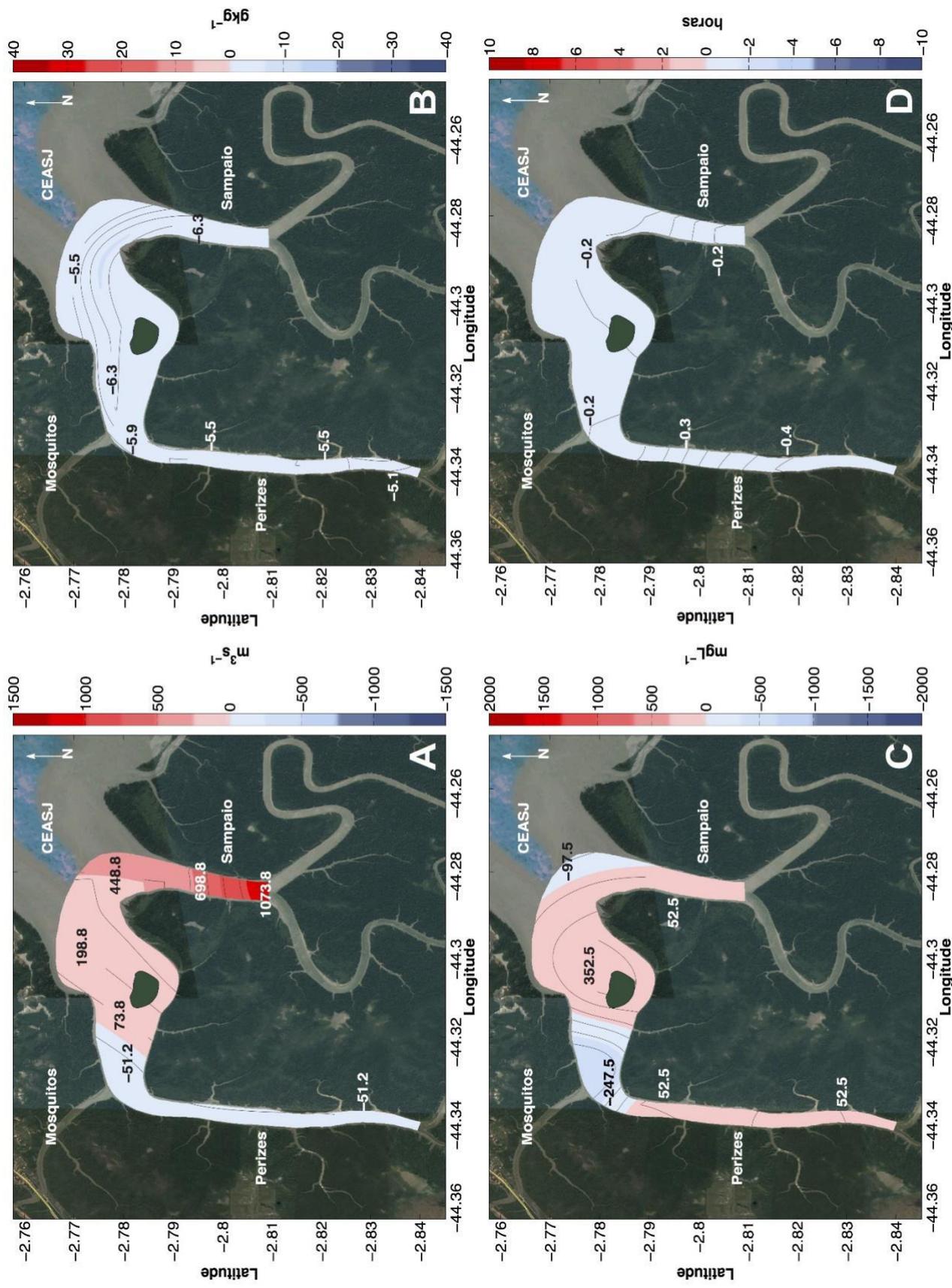


Figura 13: Distribuição horizontal das anomalias do transporte de volume (A), salinidade (B), MPS (C) e tempo de residência (D), em maré de sizígia, durante a estação de seca.

5.2. Complexo Estuarino Arraial-São José

5.2.1. Variáveis de estado e campo de massa

5.2.1.1. Estação de chuva

a) Distribuição Horizontal

As temperaturas para o CEASJ, em superfície, variaram entre 29,2 e 30,7 °C, com valor médio de 29,9 °C (Figura 14A) e os maiores valores ocorrendo na parte interior do estuário, próximo das radiais 4 e 7 (Figura 4 e Tabela 2). Junto ao fundo, uma menor amplitude térmica foi observada (1,2 °C) (Figura 14B), com menores temperaturas sendo encontradas. No entanto, podemos observar uma homogeneidade da coluna d'água, visto que a amplitude térmica média para a estação de chuva apresentou decréscimo da superfície ao fundo de 0,1 °C.

A salinidade na superfície ao longo do CEASJ variou de 8,9 a 27,0 gkg⁻¹, com média de 16,1 gkg⁻¹ (Figura 15A), onde os maiores valores ocorreram na parte mais costeira, próximo à radial 1, diminuindo gradativamente estuário acima. A salinidade possui um gradiente horizontal na ordem de 0,4 gkg⁻¹km⁻¹ (considerando um trajeto em linha reta), cujo comportamento também é observado no fundo (Figura 15B). A grande variabilidade da estrutura salina no CEASJ mostra uma importante contribuição fluvial neste período do ano para o estuário, visto que as águas oriundas da drenagem continental são menos salinas do que as águas do oceano adjacente.

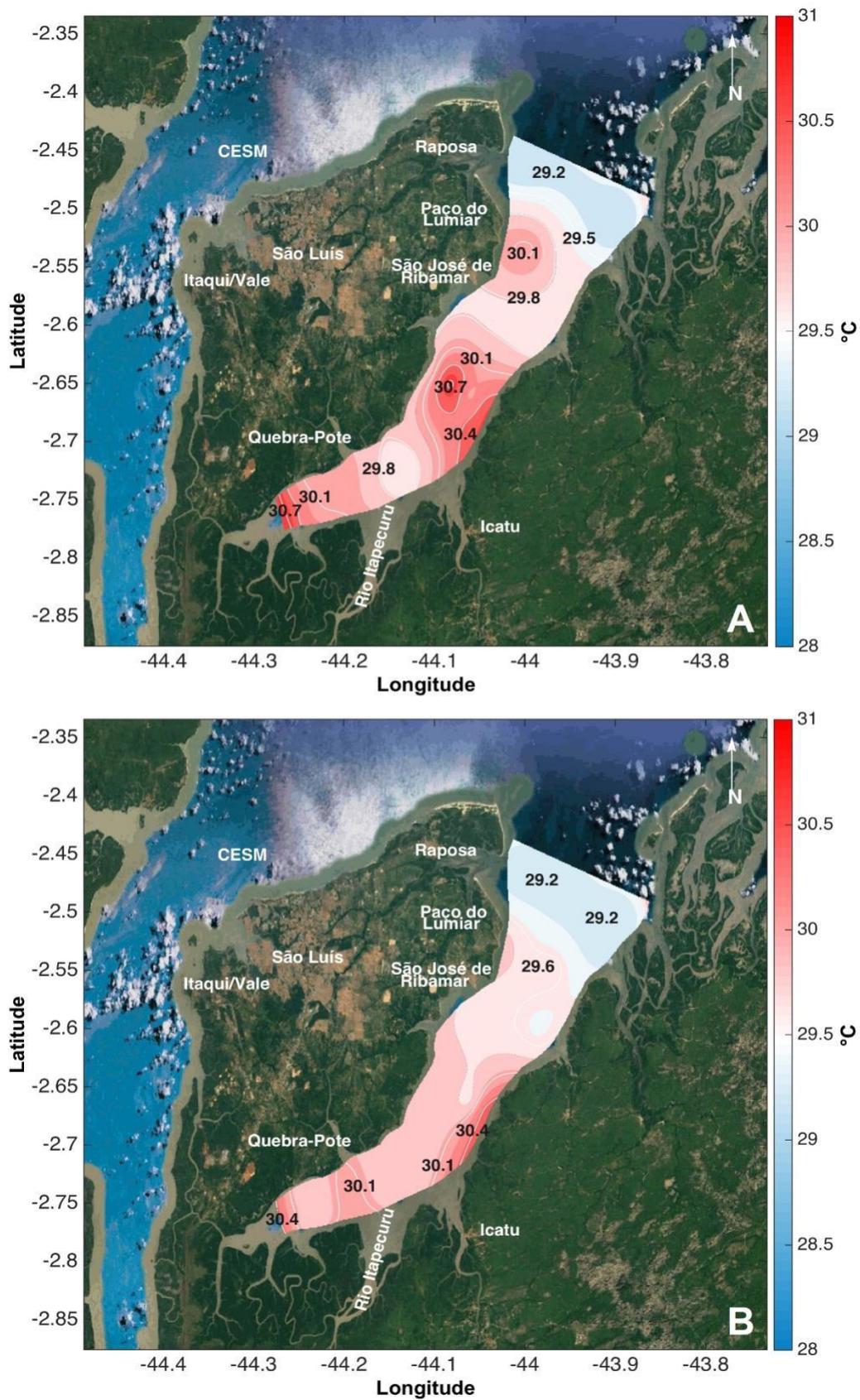


Figura 14: Distribuição horizontal da temperatura durante a estação de chuva no CEASJ. A – Superfície; B – Fundo.

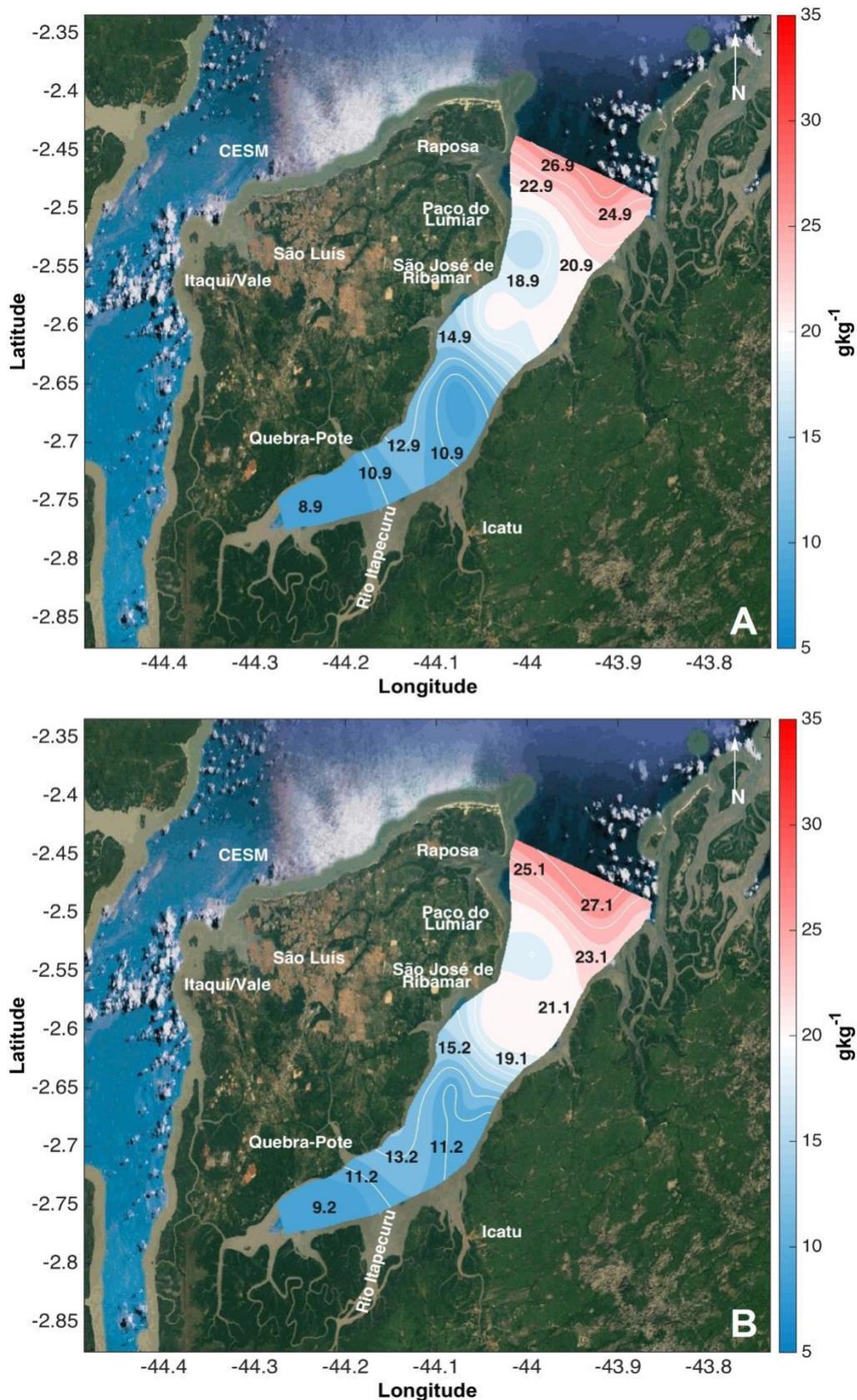


Figura 15: Distribuição horizontal da salinidade durante a estação de chuva no CEASJ. A – Superfície; B – Fundo.

b) Distribuição Vertical

No CEASJ a variação vertical da temperatura na radial mais costeira (Radial 1; Figura 16 A) foi praticamente inexistente, apresentando os menores valores de temperatura, variando de 29,2 a 29,3 °C. Na radial 2 (Figura 16 A) variação foi mais pronunciada, variando de 29,4 a 30,2 °C, com as maiores temperaturas encontradas na porção oeste a radial (ponto 09), muito provavelmente devido a um aporte do rio Paciência, que deságua próximo neste local. As radiais 3 e 6 (Figuras 16 A e B) apresentaram temperaturas praticamente constantes, com valores de 29,7 e 30,1 °C, respectivamente. Na radial 4 foi possível observar o maior gradiente vertical térmico, da ordem de 0,1 °Cm⁻¹. Para as radiais 5 e 7 (Figura 16 B), o mesmo padrão foi observado, no qual as maiores temperaturas ocorreram na superfície e diminuíram com a profundidade.

A estrutura vertical da salinidade apresentou os maiores valores na radial 1 (Figura 17 A), com mínimos na superfície e máximos ao fundo, com isohalinas praticamente horizontais, cuja variação foi de 25,1 a 27,8 gkg⁻¹. Nas radiais 2 e 3 (Figura 17 A) as isohalinas apresentaram-se verticalizadas, com as menores salinidades próximo à parte oeste do CEASJ, variando de 17,1 a 22,5 gkg⁻¹. Nas demais radiais (Figura 17 B), a distribuição vertical se manteve, com os menores valores em superfície e os maiores junto ao fundo, com isohalinas praticamente horizontais, resultando em gradientes halinos verticais praticamente inexistentes.

A distribuição vertical do campo de massa observada ao longo do CEASJ foi fortemente influenciada pelos campos de temperatura e salinidade, sendo este último o principal. Os maiores valores foram encontrados na radial 1 (Figura 18 A), parte mais costeira, cuja variação da densidade foi de 14,5 a 16,7 kgm⁻³. Foram observadas picnoclinas mais pronunciadas nas radiais 1, 3, 4 e 5, com os mínimos na superfície e máximos no fundo. As últimas radiais (Figura 18 B) apresentaram-se com densidades menores, por conta de menores salinidade, apresentando um gradiente vertical de $8 \times 10^{-2} \text{ kgm}^{-3}\text{m}^{-1}$.

Como foi mostrado na distribuição horizontal (seção 5.2.1.1 - a) destas propriedades acima, ao longo do CEASJ, foi possível observar as maiores salinidades nas primeiras radiais associadas à uma pouca variação na temperatura, sugerindo a presença de águas mais salinas e quentes nestas radiais. As distribuições verticais evidenciaram uma pequena variação na temperatura e grande variação na salinidade, modificando a estrutura do campo de massa neste período do ano.

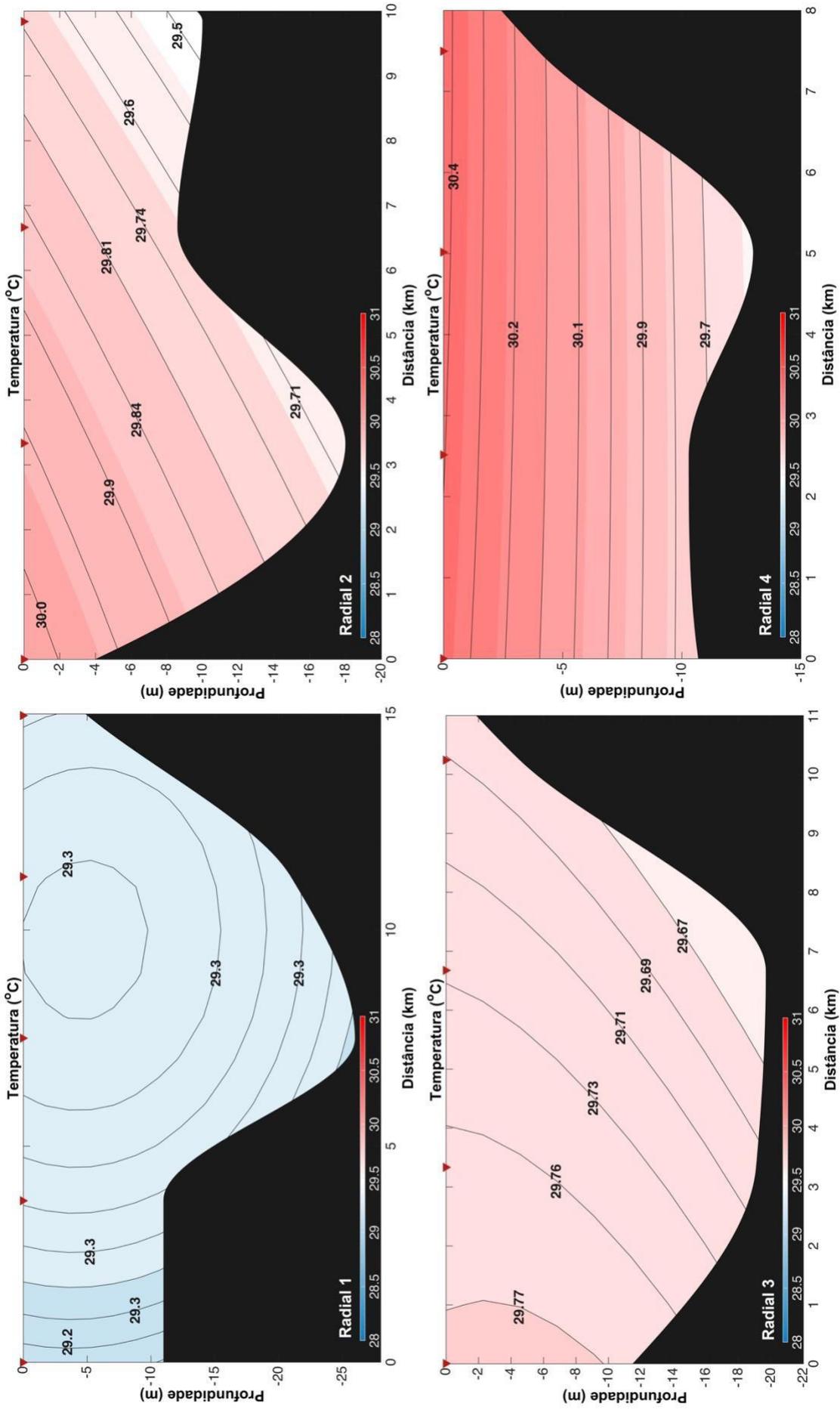


Figura 16 A: Distribuição vertical da temperatura no CEASJ, durante a estação de chuva. (Radial 1 – superior esquerdo; Radial 2 – superior direito; Radial 3 – inferior esquerdo; Radial 4 – inferior direito).

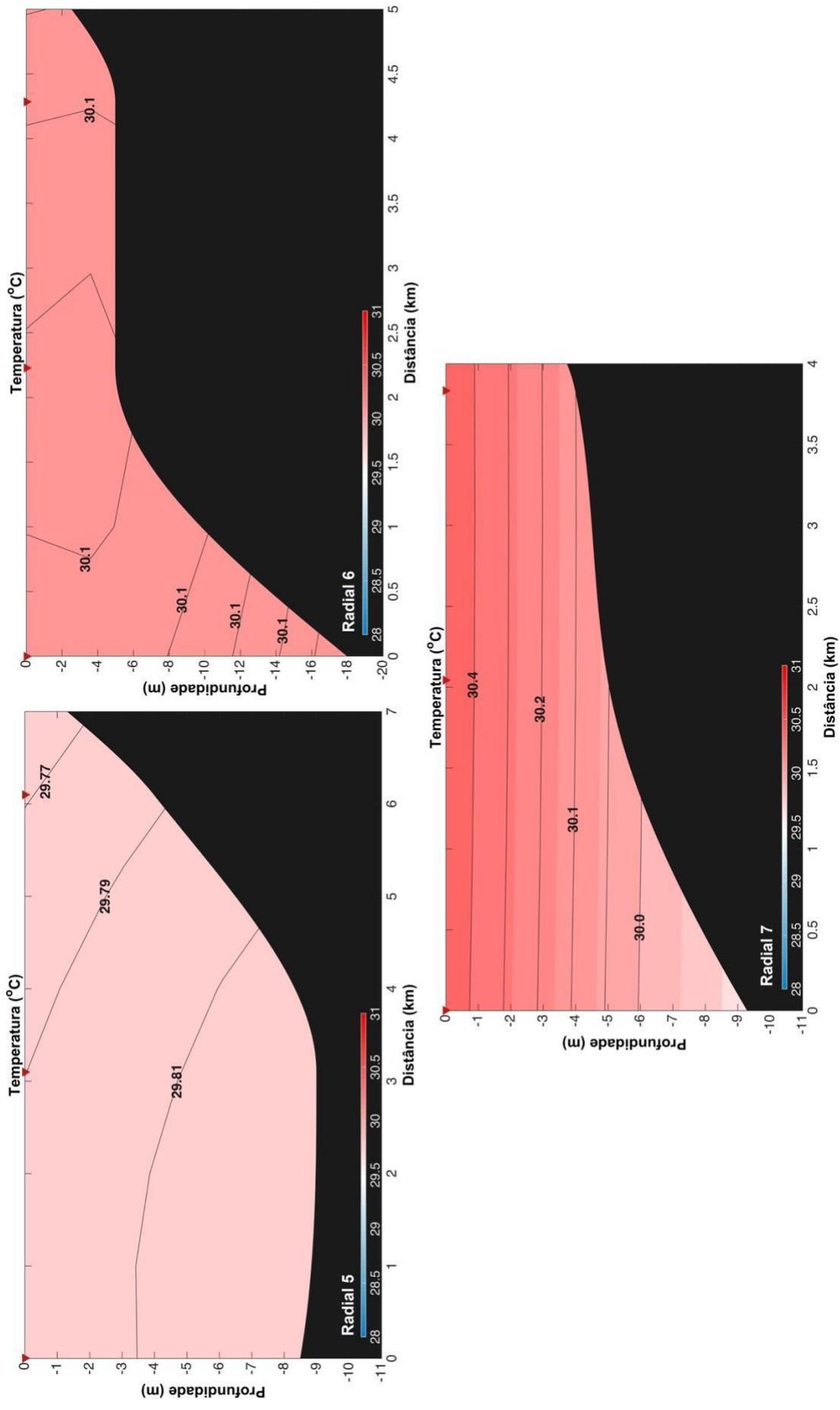


Figura 16 B: Distribuição vertical da temperatura no CEASJ, durante a estação de chuva. (Radial 5 – superior esquerdo; Radial 6 – superior direito; Radial 7 – inferior).

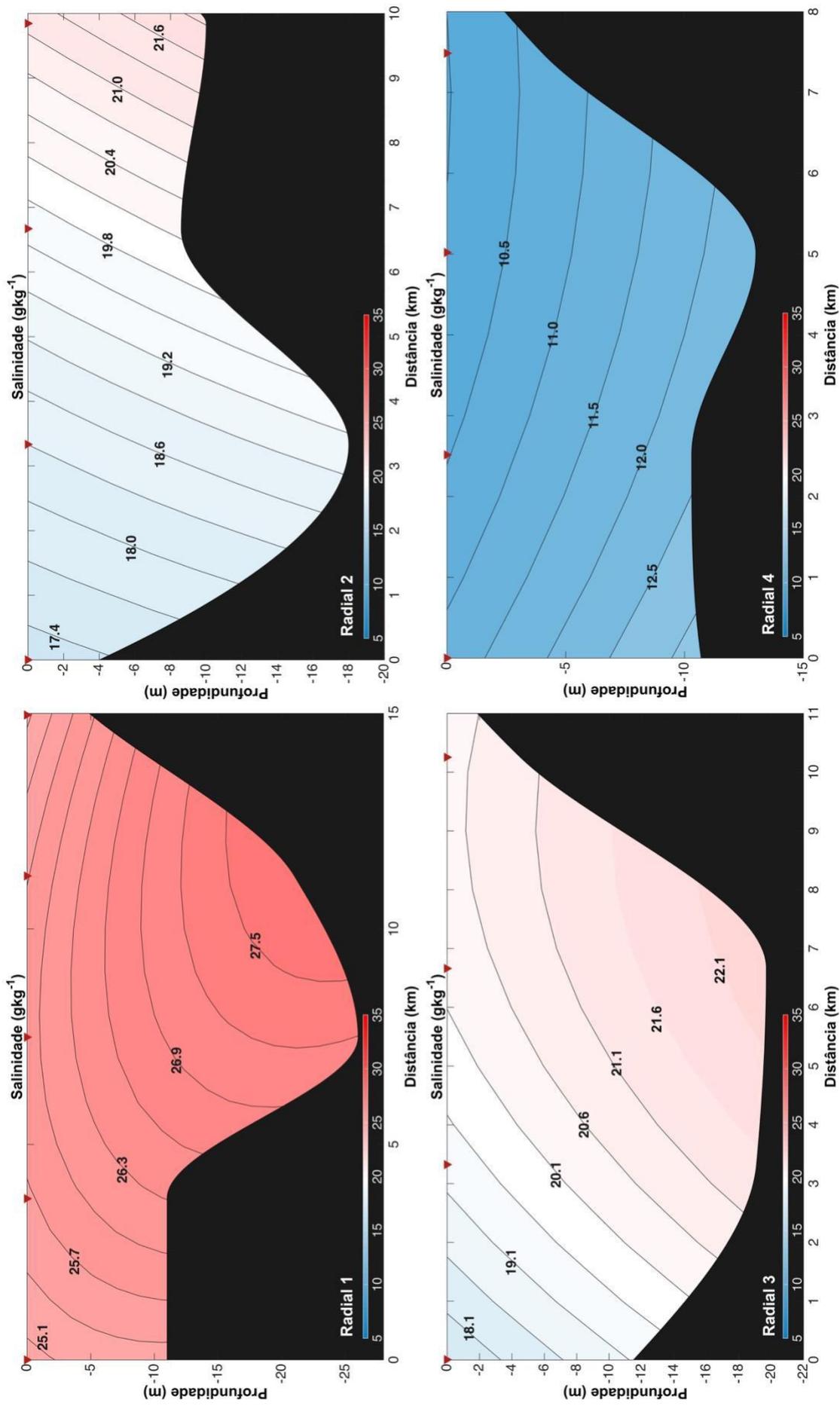


Figura 17 A: Distribuição vertical da salinidade no CEASJ, durante a estação de chuva. (Radial 1 – superior esquerdo; Radial 2 – superior direito; Radial 3 – inferior esquerdo; Radial 4 – inferior direito).

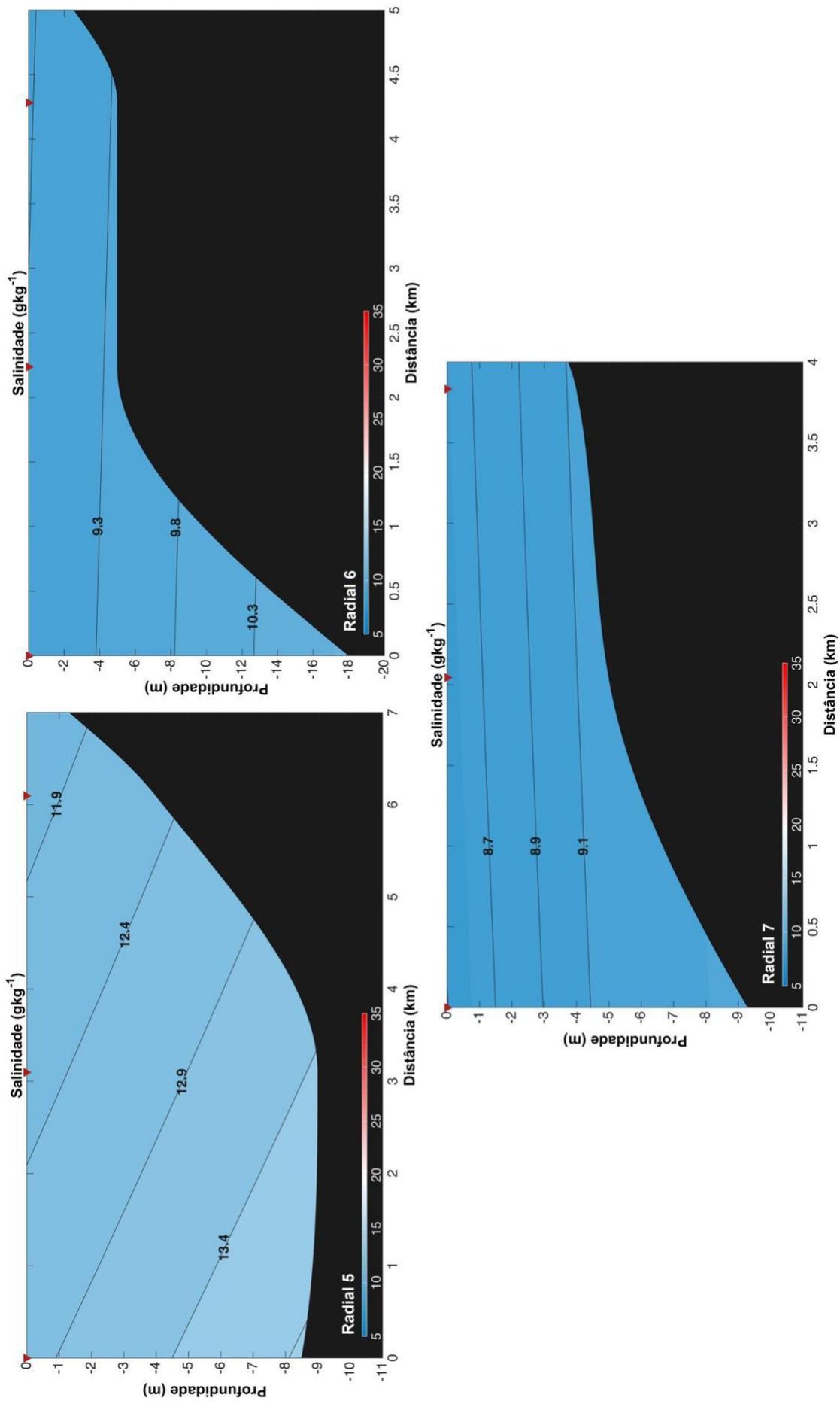


Figura 17 B: Distribuição vertical da salinidade no CEASJ, durante a estação de chuva. (Radial 5 – superior esquerdo; Radial 6 – superior direito; Radial 7 – inferior).

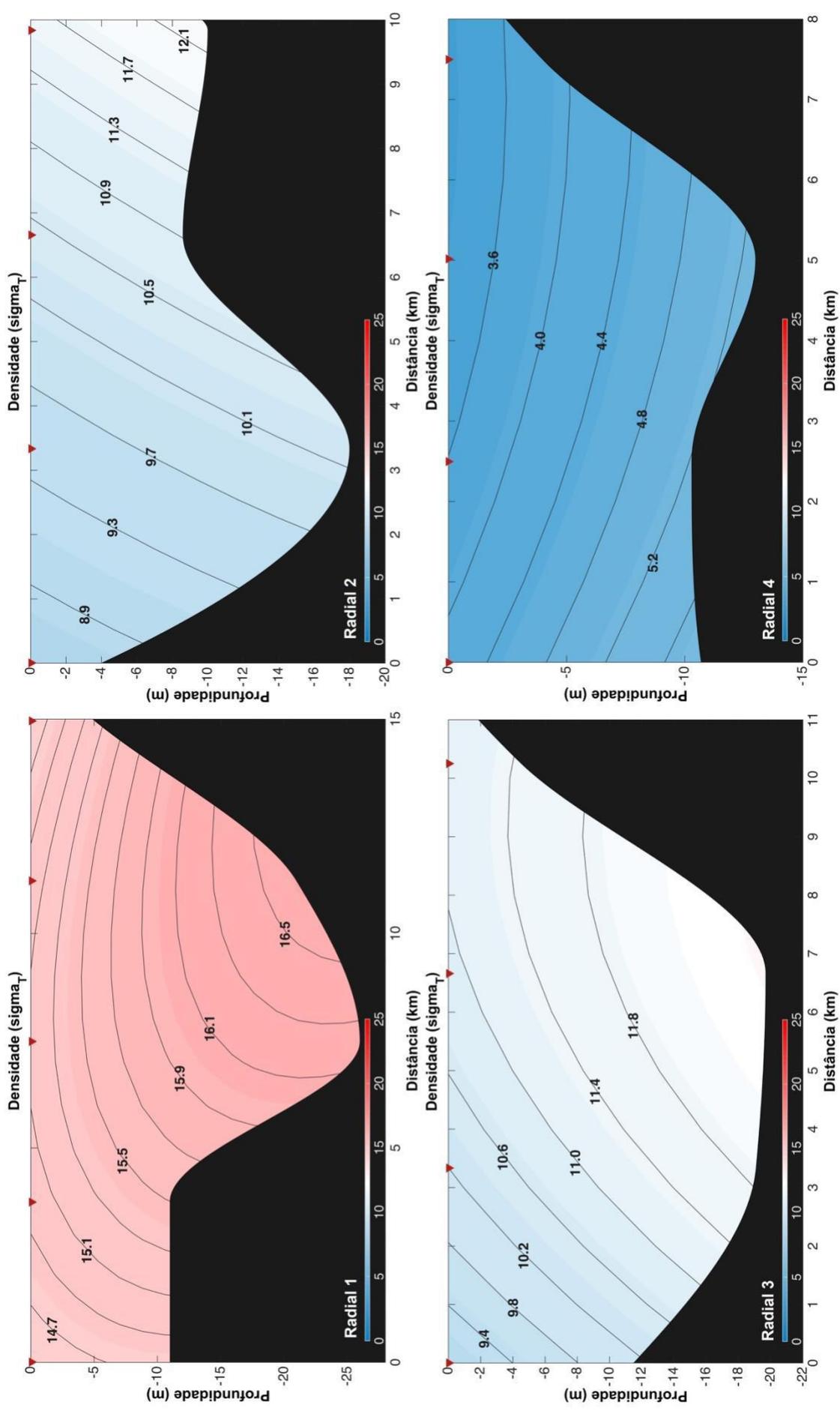


Figura 18 A: Distribuição vertical da densidade no CEASJ, durante a estação de chuva. (Radial 1 – superior esquerdo; Radial 2 – superior direito; Radial 3 – inferior esquerdo; Radial 4 – inferior direito).

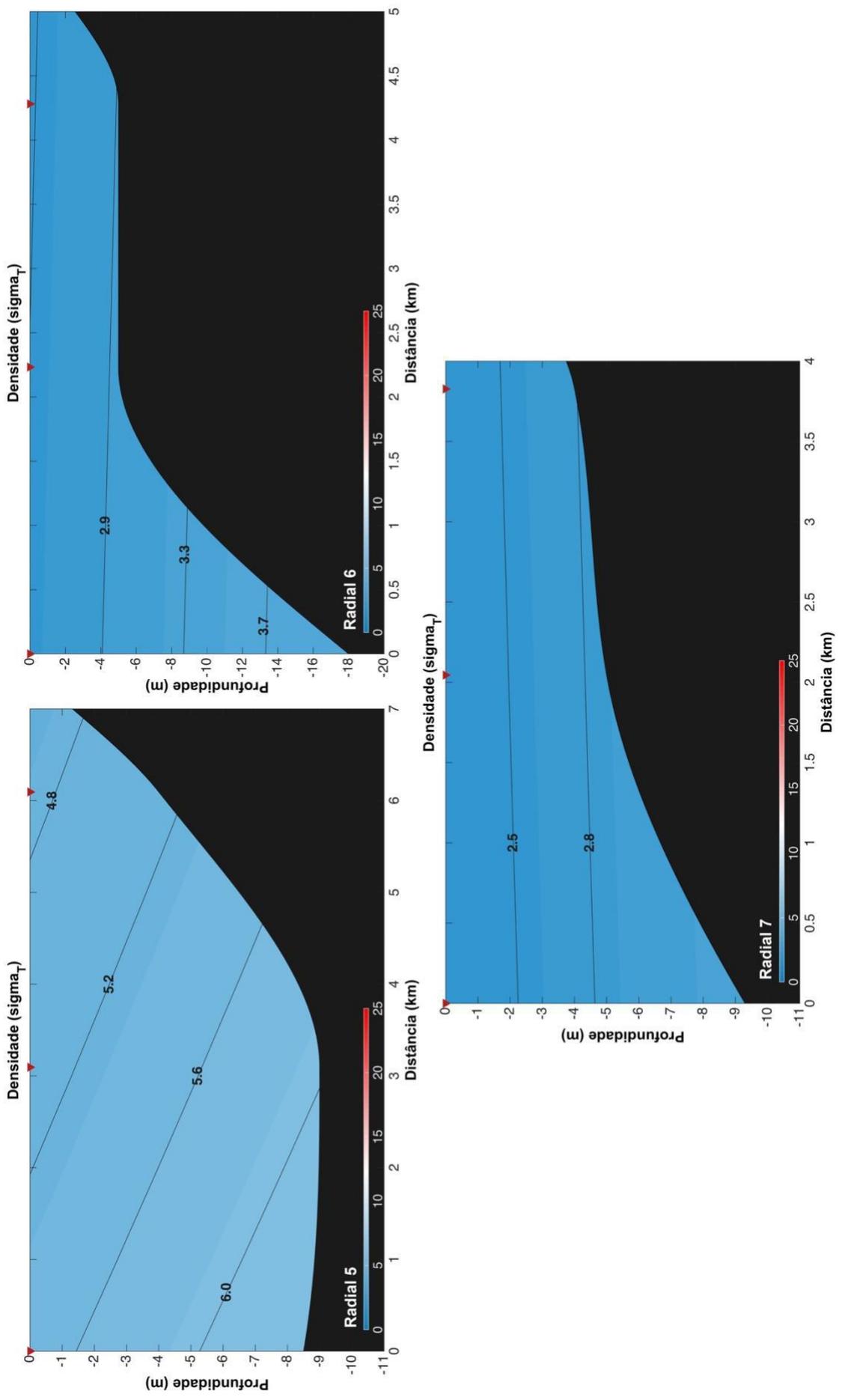


Figura 18 B: Distribuição vertical da densidade no CEASJ, durante a estação de chuva. (Radial 5 – superior esquerdo; Radial 6 – superior direito; Radial 7 – inferior).

Na abordagem Euleriana, fundeio I, realizado na região mais costeira do CEASJ, durante a estação de chuva, os valores de temperatura ao longo da coluna de água foram tipicamente de águas continentais, variando de $\sim 29,4$ a $\sim 29,8$ °C (Figura 19A), logo entre maré vazante e enchente a variação foi muito pequena. Calculando o valor médio estacionário da temperatura (T_a) para 13 horas de fundeio, obteve-se o valor de $29,5$ °C (Figura 20A). Esta característica de quase homogeneidade vertical também foi observada para o fundeio II, localizado na parte mais interior do CEASJ, no entanto com temperaturas levemente mais altas, que variaram entre $\sim 29,8$ e $\sim 30,5$ °C (Figura 19B). Em maré vazante, a amplitude térmica foi de $0,7$ °C ($29,8$ a $30,5$ °C), enquanto que em maré enchente a amplitude foi de $0,4$ °C ($29,8$ a $30,1$ °C). O T_a para o fundeio II foi de aproximadamente $29,9$ °C (Figura 20B).

A variação temporal da salinidade no fundeio I, apresentou-se tipicamente como água estuarina, cuja variação foi de $16,1$ a $25,0$ gkg^{-1} (Figura 21A), com haloclinas pouco intensas, onde em evento de maré vazante variou de $16,9$ a $25,0$ gkg^{-1} , e já em condições de maré enchente a variabilidade foi de $16,1$ a $24,3$ gkg^{-1} , sugerindo gradientes halinos muito semelhantes entre ambas as marés. O perfil médio no tempo da salinidade ($\langle S(Z) \rangle$) exibe uma fraca estratificação vertical com aumento da salinidade entre a superfície e o fundo, possuindo um valor médio estacionário (S_a) de $21,2$ gkg^{-1} (Figura 22A). No fundeio II (Figura 21B), o comportamento típico de águas estuarinas permaneceu, verificando uma quase homogeneidade vertical de salinidade, variando entre $6,4$ a $14,3$ gkg^{-1} , cujo estes mínimos e máximos são os mesmos para a maré vazante, enquanto que para maré enchente a variação foi de $8,2$ a $13,9$ gkg^{-1} . As estimativas dos $\langle S(Z) \rangle$ e dos valores residuais partem dos perfis Eulerianos de salinidade (Figura 22A e B), logo, no fundeio II o perfil médio possui diferença de salinidade entre o fundo e a superfície de aproximadamente $0,4$ gkg^{-1} e valor médio residual foi de $10,7$ gkg^{-1} (Figura 22B).

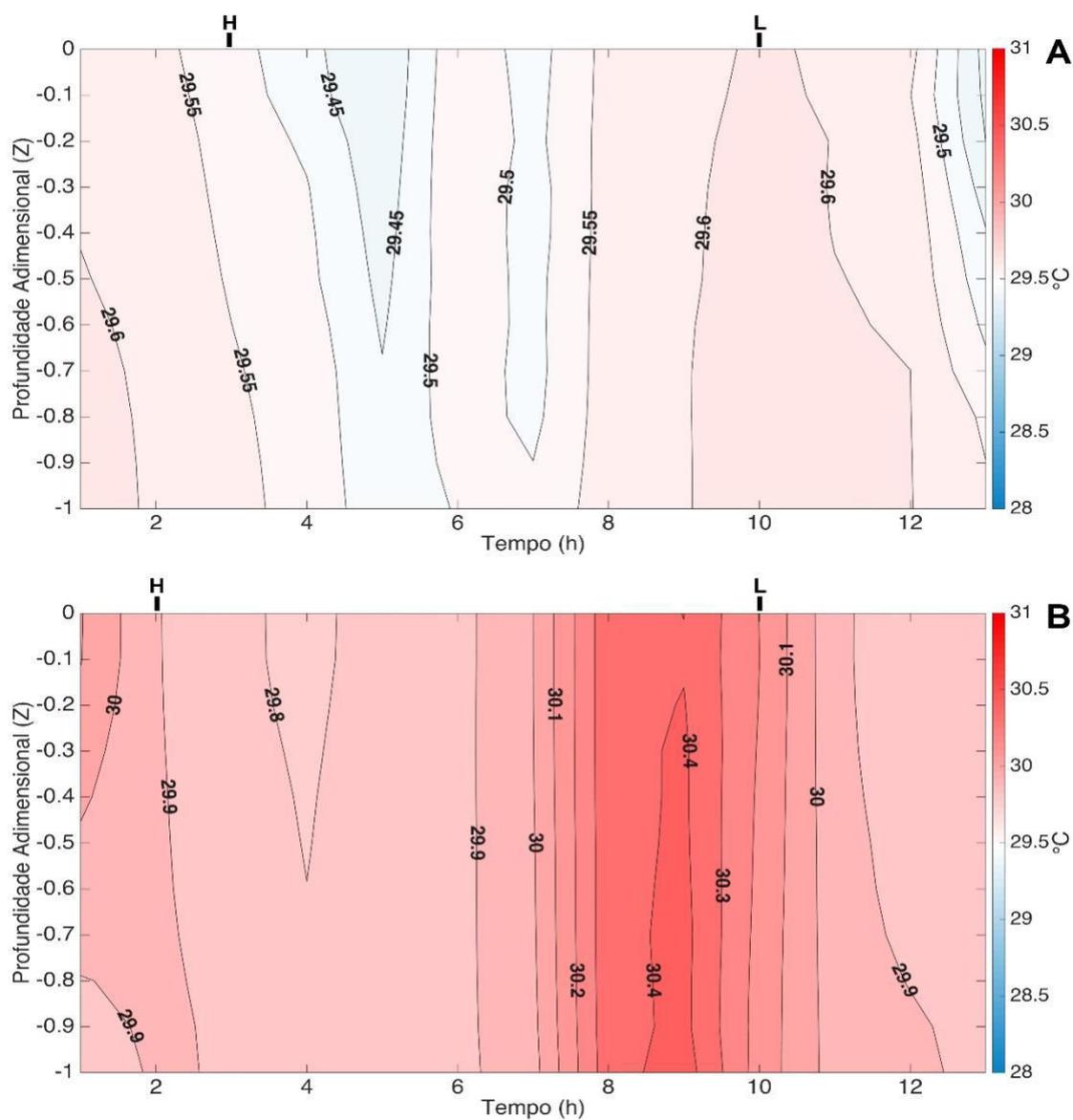


Figura 19: Perfil temporal da temperatura ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13h), para o fundeio I (A) e fundeio II (B), durante a estação de chuva. As letras H e L indicam os instantes de maré alta e maré baixa, respectivamente.

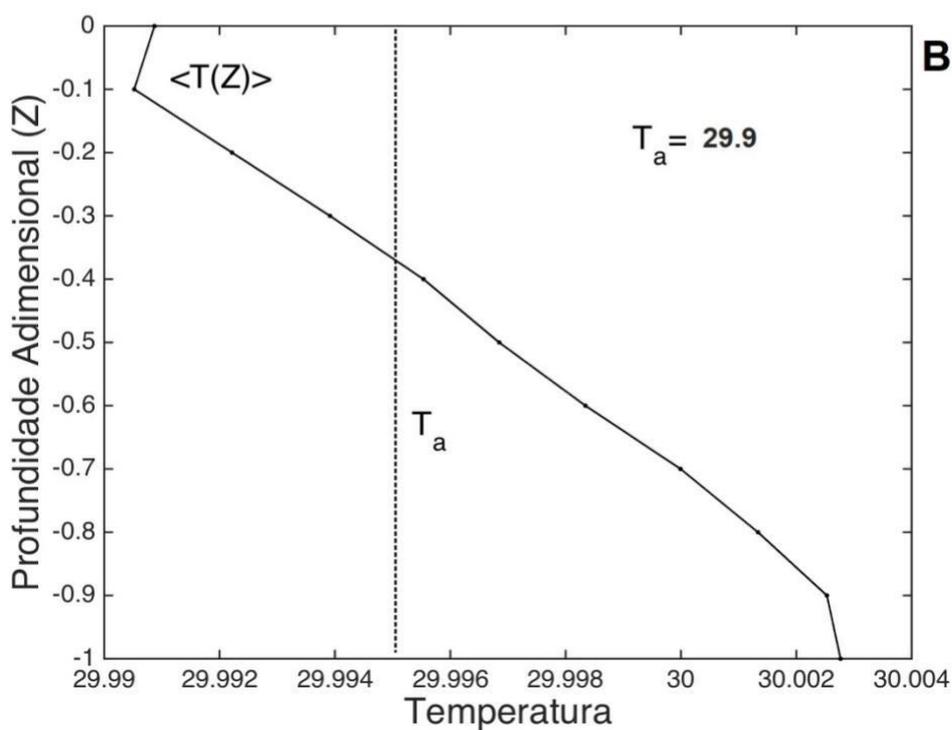
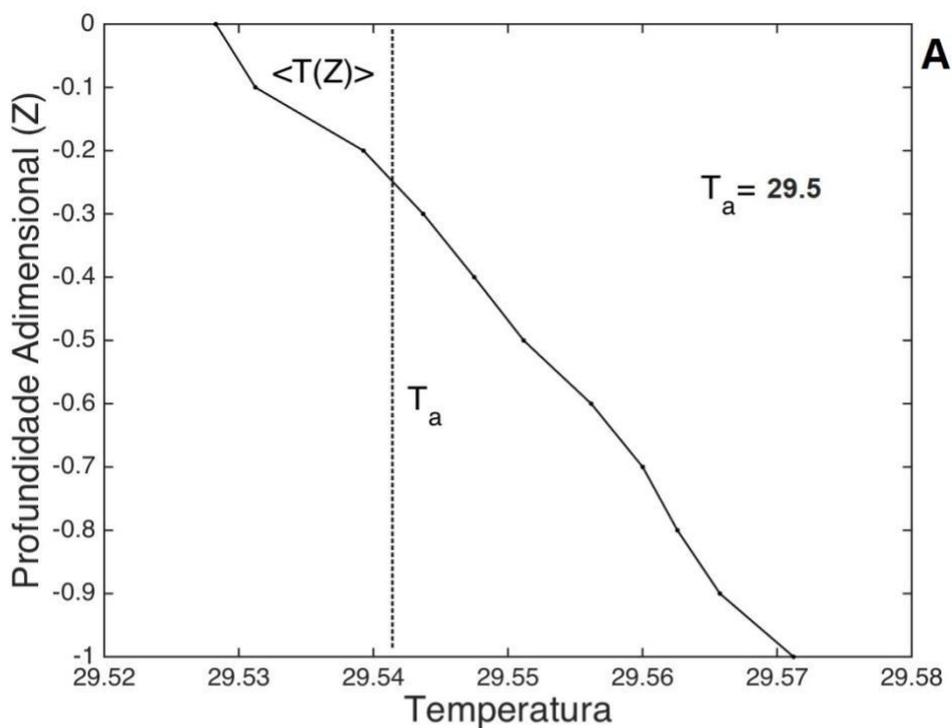


Figura 20: Perfis médios de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13h), para o fundeio I (A) e fundeio II (B), durante a estação de chuva. $\langle T(Z) \rangle$ (linha contínua) é o perfil da média temporal da temperatura; T_a é o perfil médio espaço-temporal da temperatura.

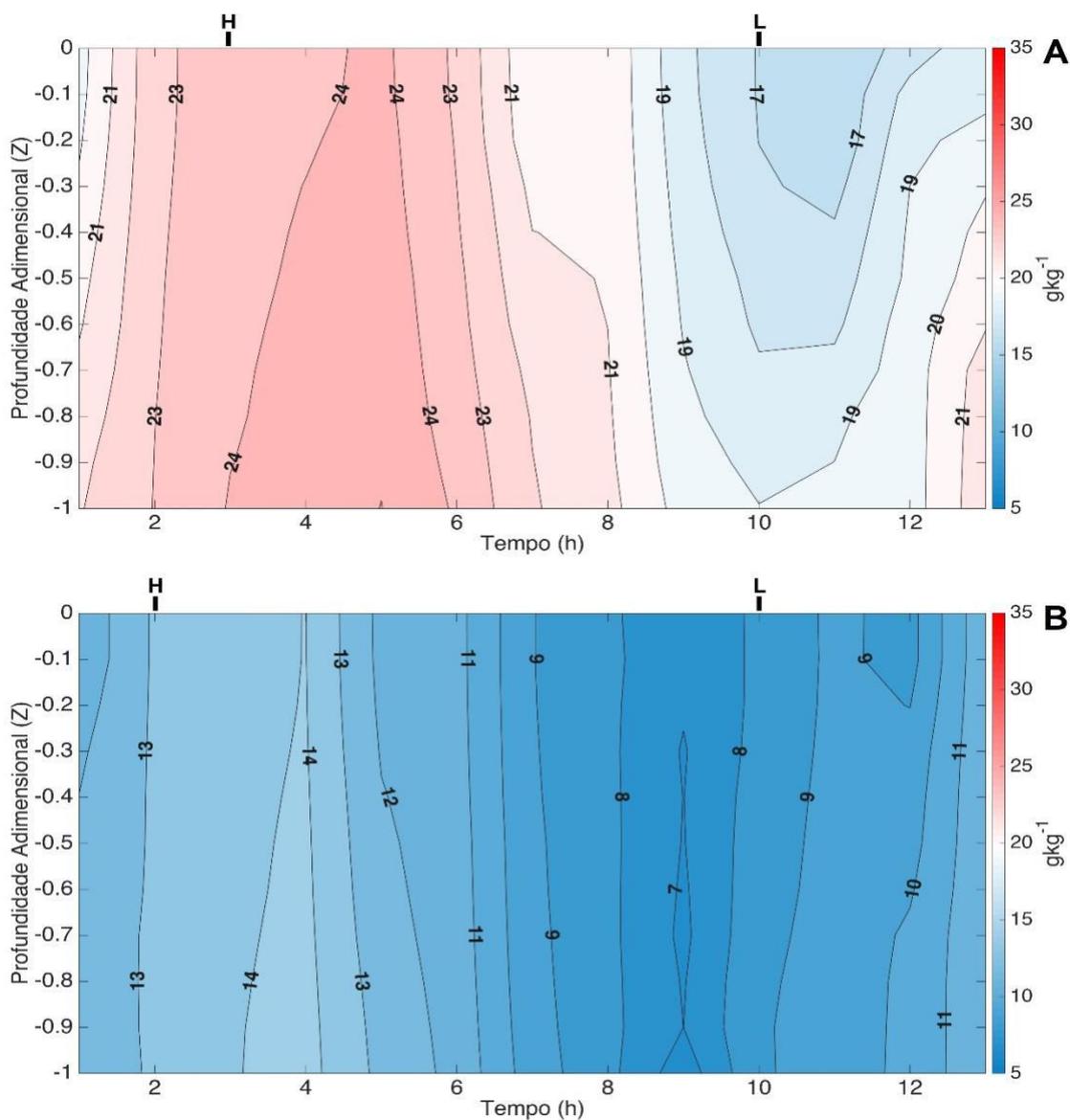


Figura 21: Perfil temporal da salinidade ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13h), para o fundeio I (A) e fundeio II (B), durante a estação de chuva. As letras H e L indicam os instantes de maré alta e maré baixa, respectivamente.

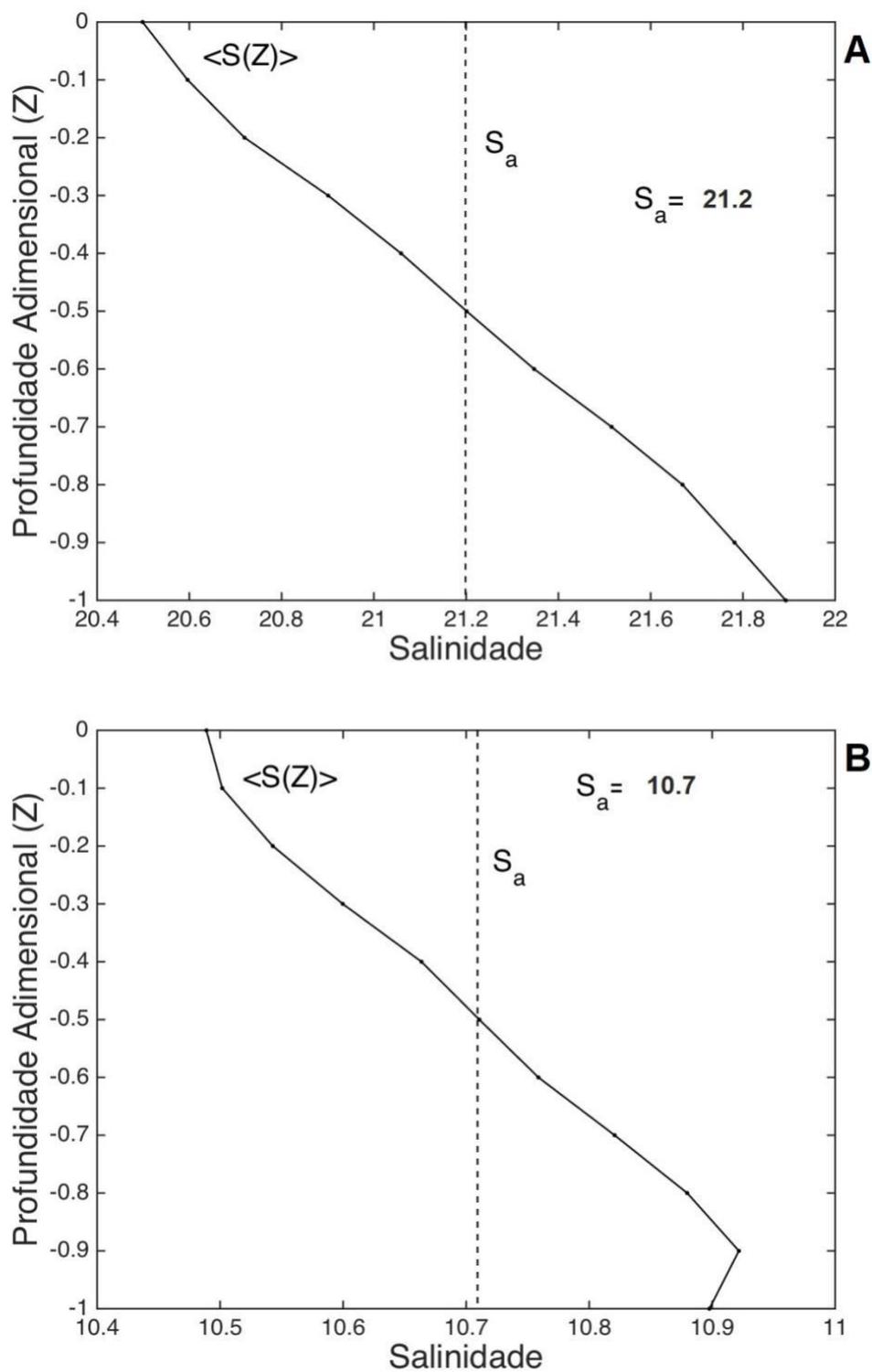


Figura 22: Perfis médios de salinidade (gkg^{-1}) ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13h), para o fundeio I (A) e fundeio II (B), durante a estação de chuva. $\langle S(Z) \rangle$ (linha contínua) é o perfil da média temporal da salinidade; S_a (linha tracejada) é o perfil médio espaço temporal da salinidade.

5.2.1.2. Estação de seca

a) Distribuição horizontal

A estrutura térmica no CESJ variou de 28,0 a 29,0 °C da superfície ao fundo, com valor médio de 28,5 °C (Figura 23). As maiores temperaturas tanto na superfície quanto no fundo foram observadas estuário acima, gerando um gradiente horizontal de 0,02 °Ckm⁻¹.

A salinidade superficial variou de 29,3 a 34,8 gkg⁻¹, com valor médio de 31,8 gkg⁻¹, cujos maiores valores foram encontrados na parte mais costeira, próximo à radial 1, ocorrendo uma minimização da salinidade estuário acima, gerando um gradiente horizontal de 0,1 gkg⁻¹km⁻¹ (Figura 24). Este comportamento foi similar ao observado no fundo, mostrando uma diminuição da salinidade estuário acima. A pouca variabilidade observada, quando comparada à estação chuvosa, pode indicar uma menor contribuição fluvial neste período do ano para o estuário, facilitando à propagação da onda de maré, visto que foi possível observar a massa de água costeira (AC).

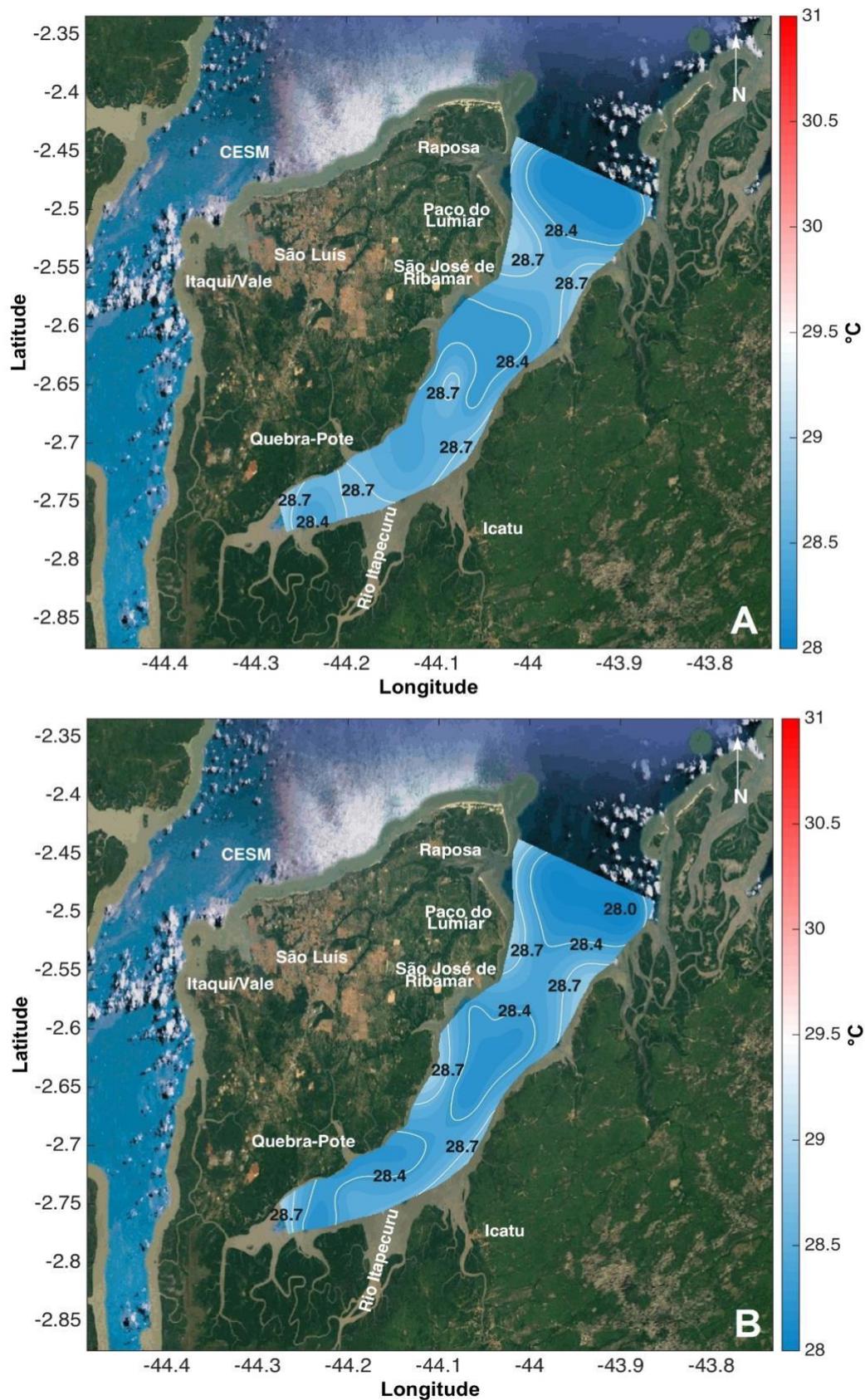


Figura 23: Distribuição horizontal da temperatura durante a estação de seca no CEASJ. A – Superfície; B – Fundo.

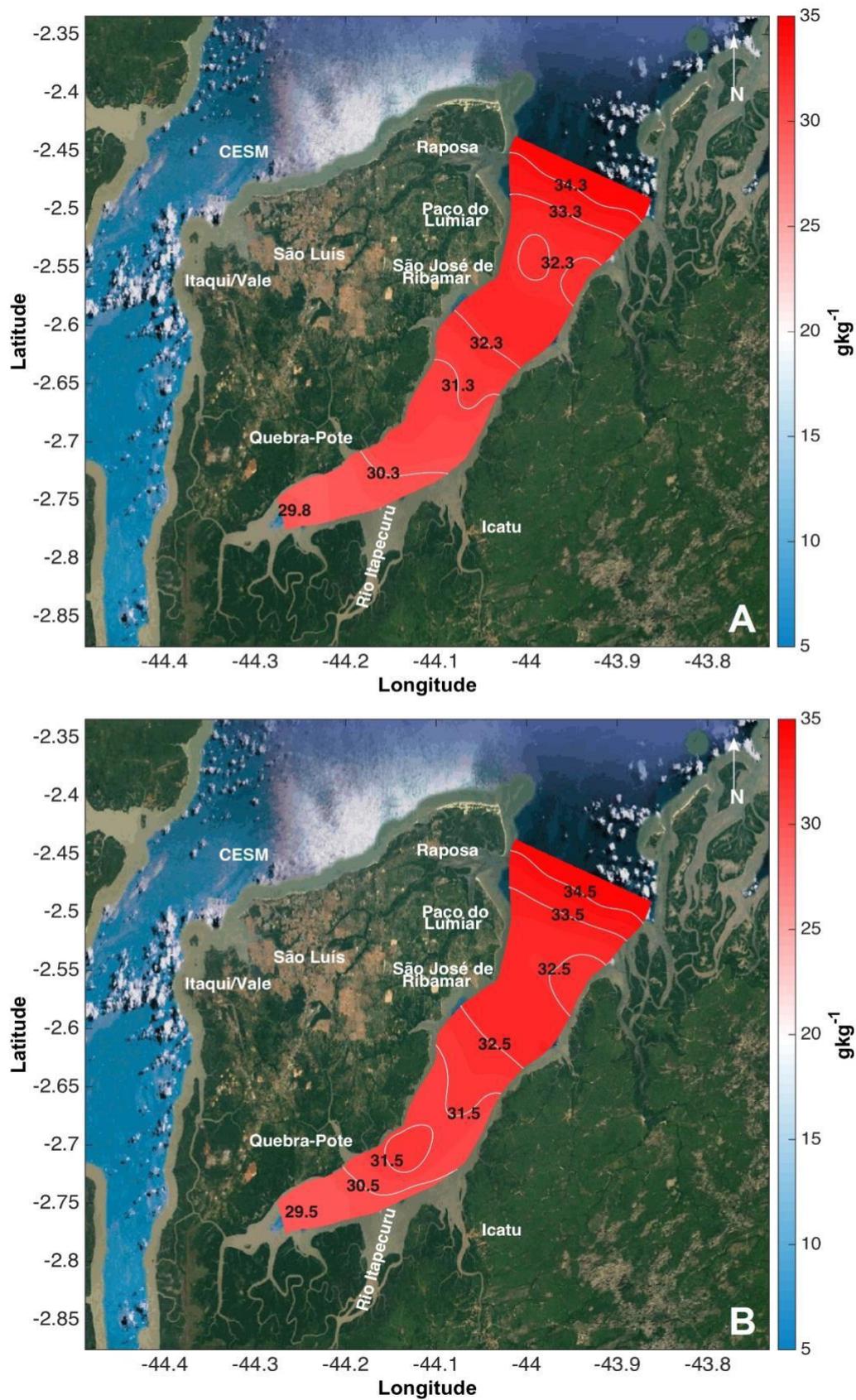


Figura 24: Distribuição horizontal da salinidade durante a estação de seca no CEASJ. A – Superfície; B – Fundo.

b) Distribuição Vertical

A variação vertical de temperatura ao longo das setes radiais (Figura 25) foi praticamente inexistente, assim como observado na estação chuvosa. No entanto, os valores foram menores com variabilidade de 28,1 °C a aproximadamente 29 °C, cujos gradientes verticais foram mais baixos que 0,03 °Cm⁻¹, com máximos na superfície e mínimos no fundo. A radial 1 foi a que apresentou maior gradiente de temperatura (~0,04 °Ckm⁻¹) de uma margem a outra, com valores de 28,1 °C na margem direita (próximo ao ponto 5) e de 28,7 °C na margem esquerda (próximo ao ponto 1).

A estrutura vertical de salinidade (Figura 26), apresentou isohalinas praticamente verticais em quase todas as radiais. Na radial 1 (Figura 26 A), observou-se os máximos de salinidade (34,8 gkg⁻¹) na margem direita. A radial 4 (Figura 26 A) apresentou isohalinas praticamente horizontais, cuja variação foi de 31,0 a 31,8 gkg⁻¹, superfície fundo, respectivamente, resultando em gradientes verticais de 0,06 gkg⁻¹m⁻¹. Através da verticalização das isohalinas, foi possível observar na radial 5 (Figura 26 B) a maior variação salina de uma margem a outra, com valores de 30,0 gkg⁻¹ na margem direita (ponto 20) e de 31,4 gkg⁻¹ na margem esquerda (ponto 18), mostrando gradiente horizontal de 0,2 gkg⁻¹km⁻¹.

A distribuição vertical do campo de massa (Figura 27), assim como observado para a estrutura salina, foi pouco variável, com isopicnais verticalizadas na maioria das radiais. Nas radiais 4, 6 e 7 (Figuras 27 A e B) as isopicnais mostraram um aumento da superfície para o fundo, com a maior variação sendo na radial 4, 19,1 a 19,9 kgm⁻³. A radial 5 (Figura 27 B), assim como na salinidade, apresentou o elevado gradiente horizontal de densidade de uma margem para outra, com valor de aproximadamente 0,2 kgm⁻³km⁻¹.

Estes gradientes halino e térmico observados acima, se comparado a estação de balanço hídrico positivo, denotam a entrada de águas menos quentes e mais salinas ao longo do CEASJ, com uma quase homogeneidade na coluna de água e horizontalmente.

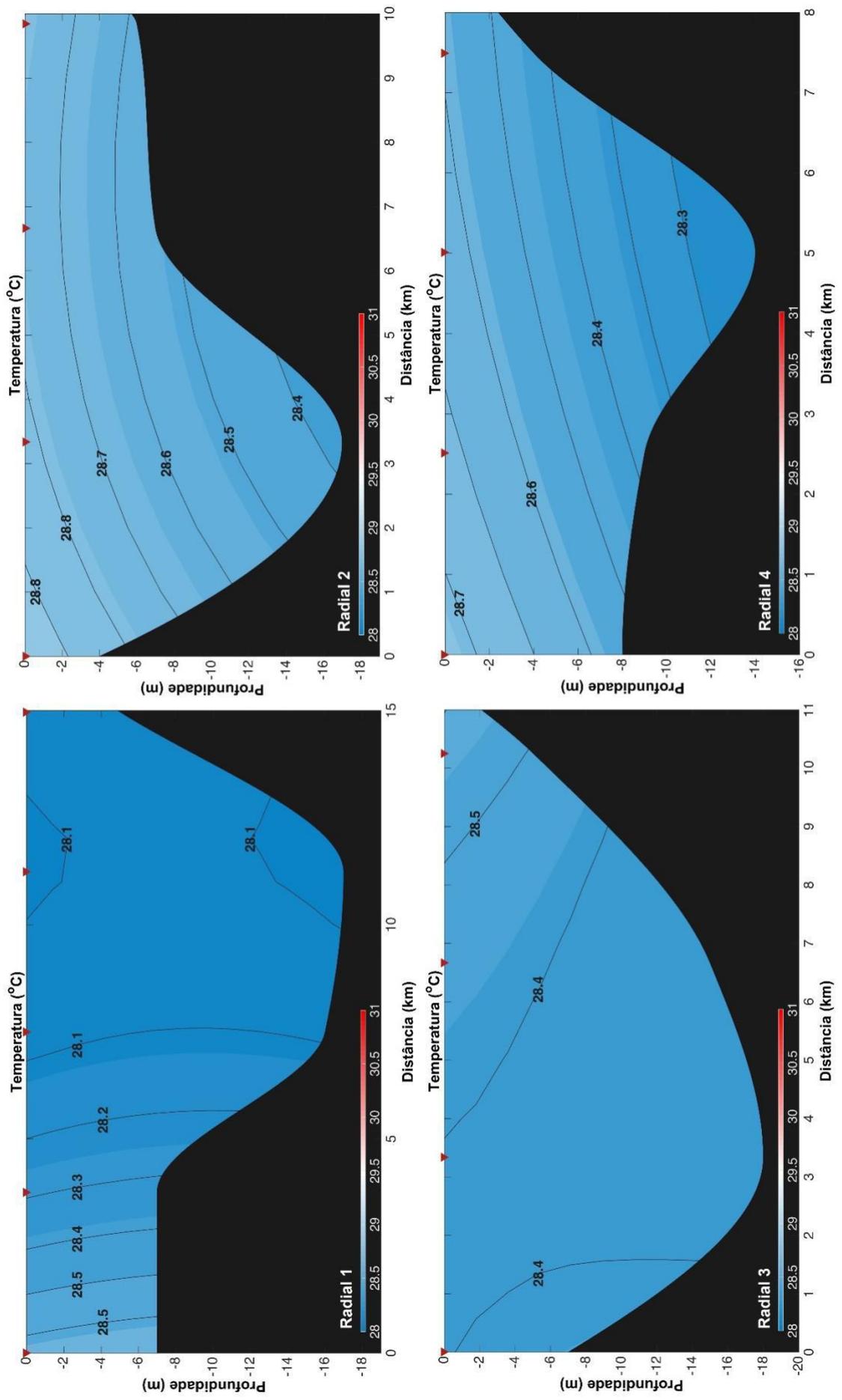


Figura 25 A: Distribuição vertical da temperatura no CEASJ, durante a estação de seca. (Radial 1 – superior esquerdo; Radial 2 – superior direito; Radial 3 – inferior esquerdo; Radial 4 – inferior direito).

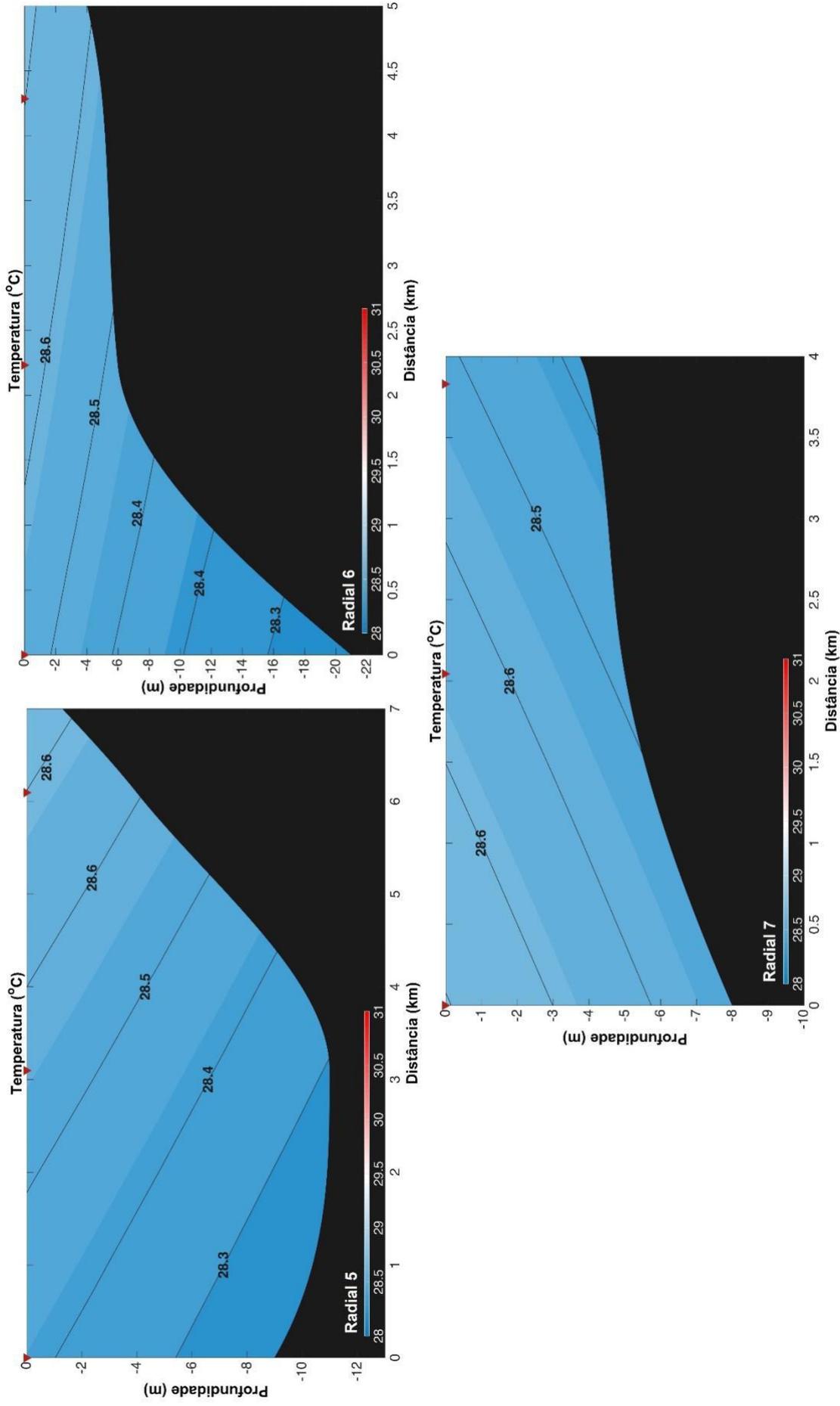


Figura 25 B: Distribuição vertical da temperatura no CEASJ, durante a estação de seca. (Radial 5 – superior esquerdo; Radial 6 – superior direito; Radial 7 – inferior).

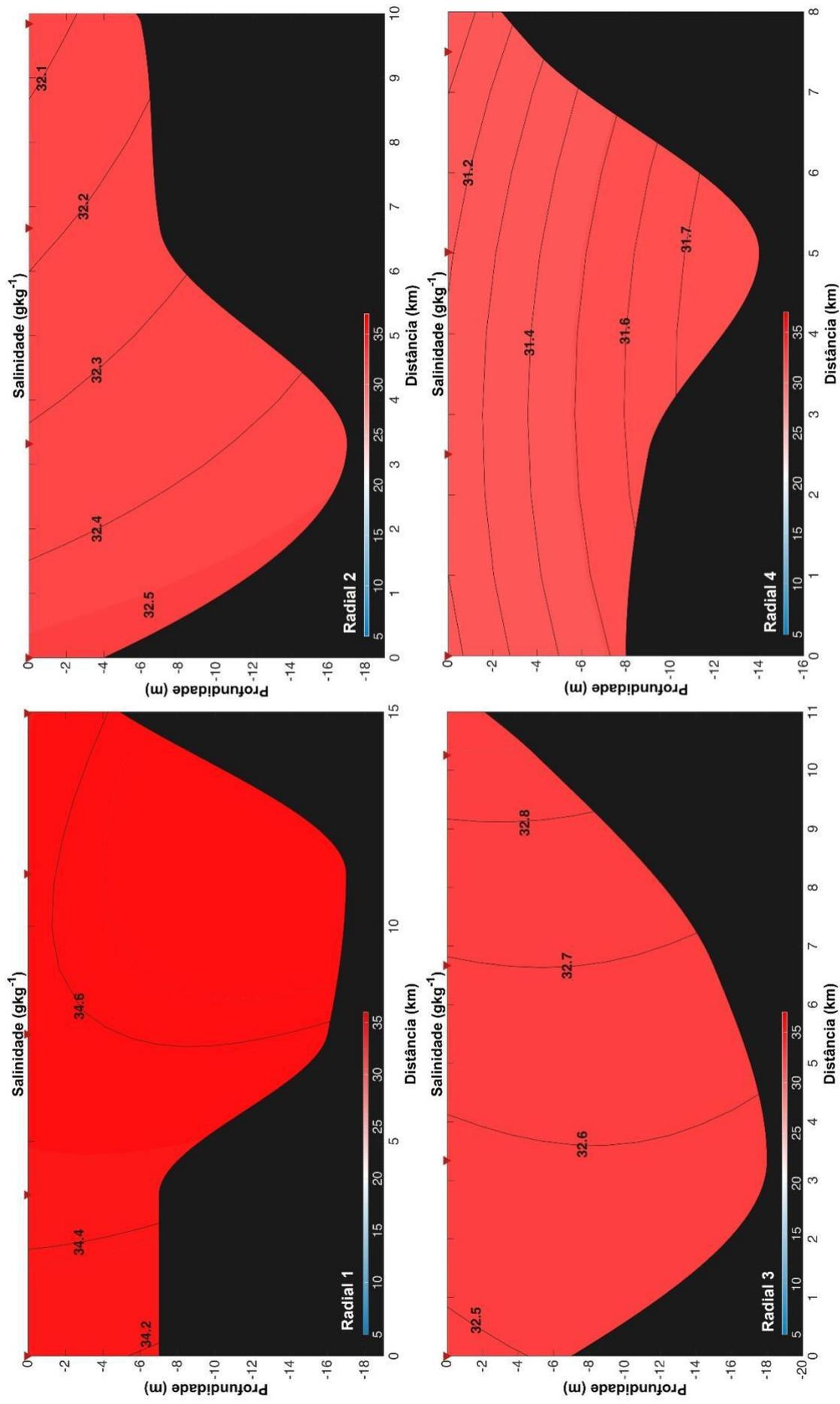


Figura 26 A: Distribuição vertical da salinidade no CEASJ, durante a estação de seca. (Radial 1 – superior esquerdo; Radial 2 – superior direito; Radial 3 – inferior esquerdo; Radial 4 – inferior direito).

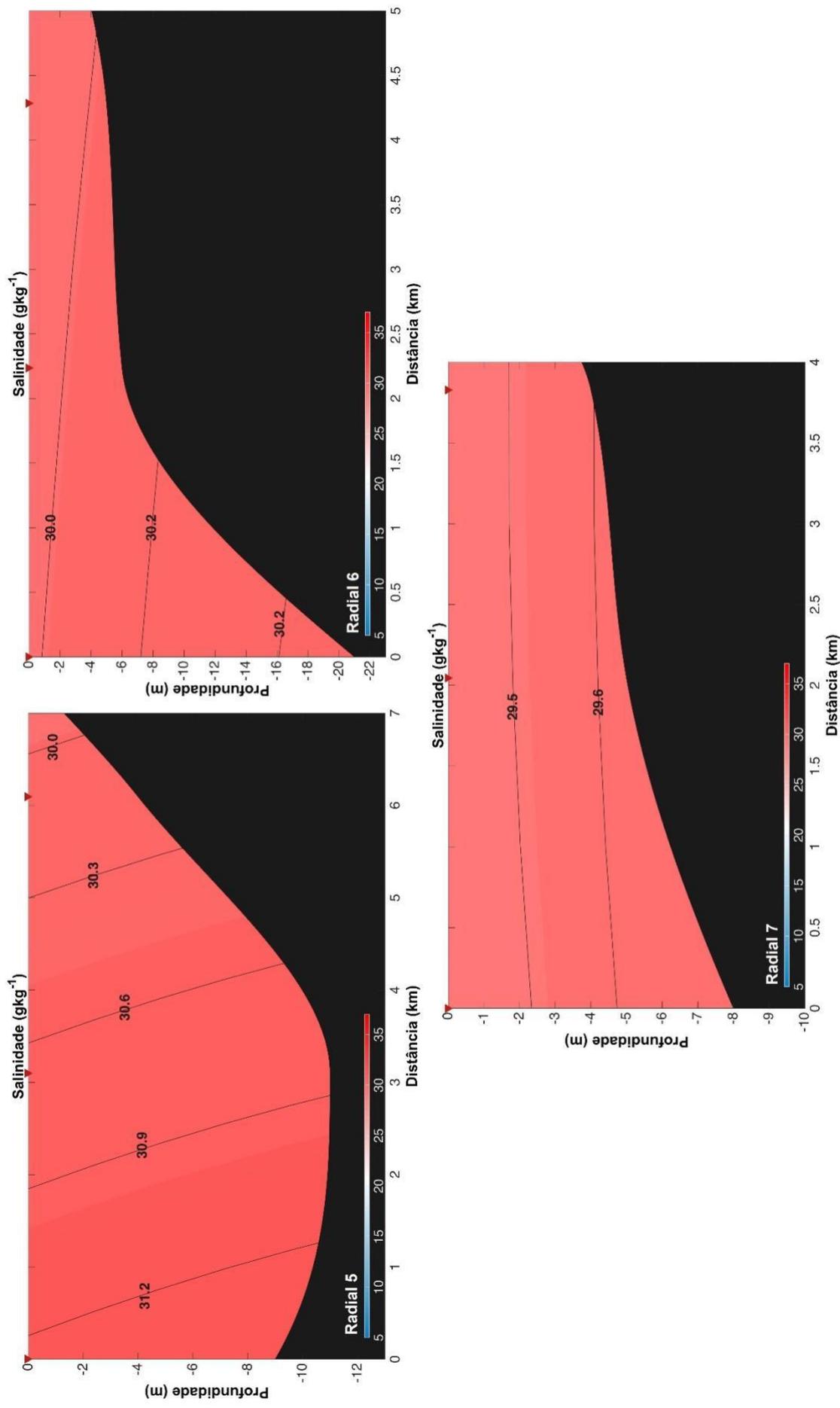


Figura 26 B: Distribuição vertical da salinidade no CEASJ, durante a estação de seca. (Radial 5 – superior esquerdo; Radial 6 – superior direito; Radial 7 – inferior).

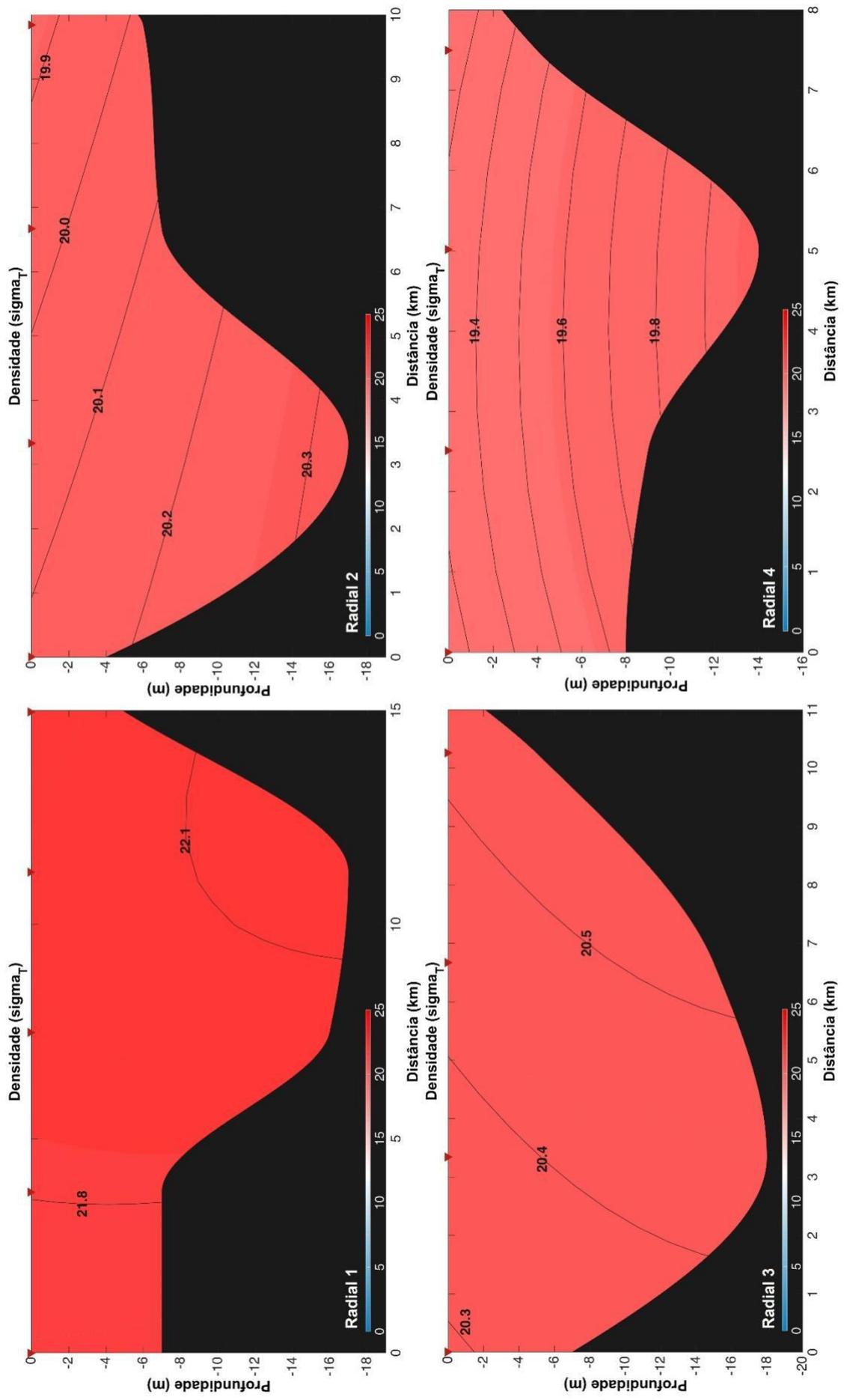


Figura 27 A: Distribuição vertical da densidade no CEASJ, durante a estação de seca. (Radial 1 – superior esquerdo; Radial 2 – superior direito; Radial 3 – inferior esquerdo; Radial 4 – inferior direito).

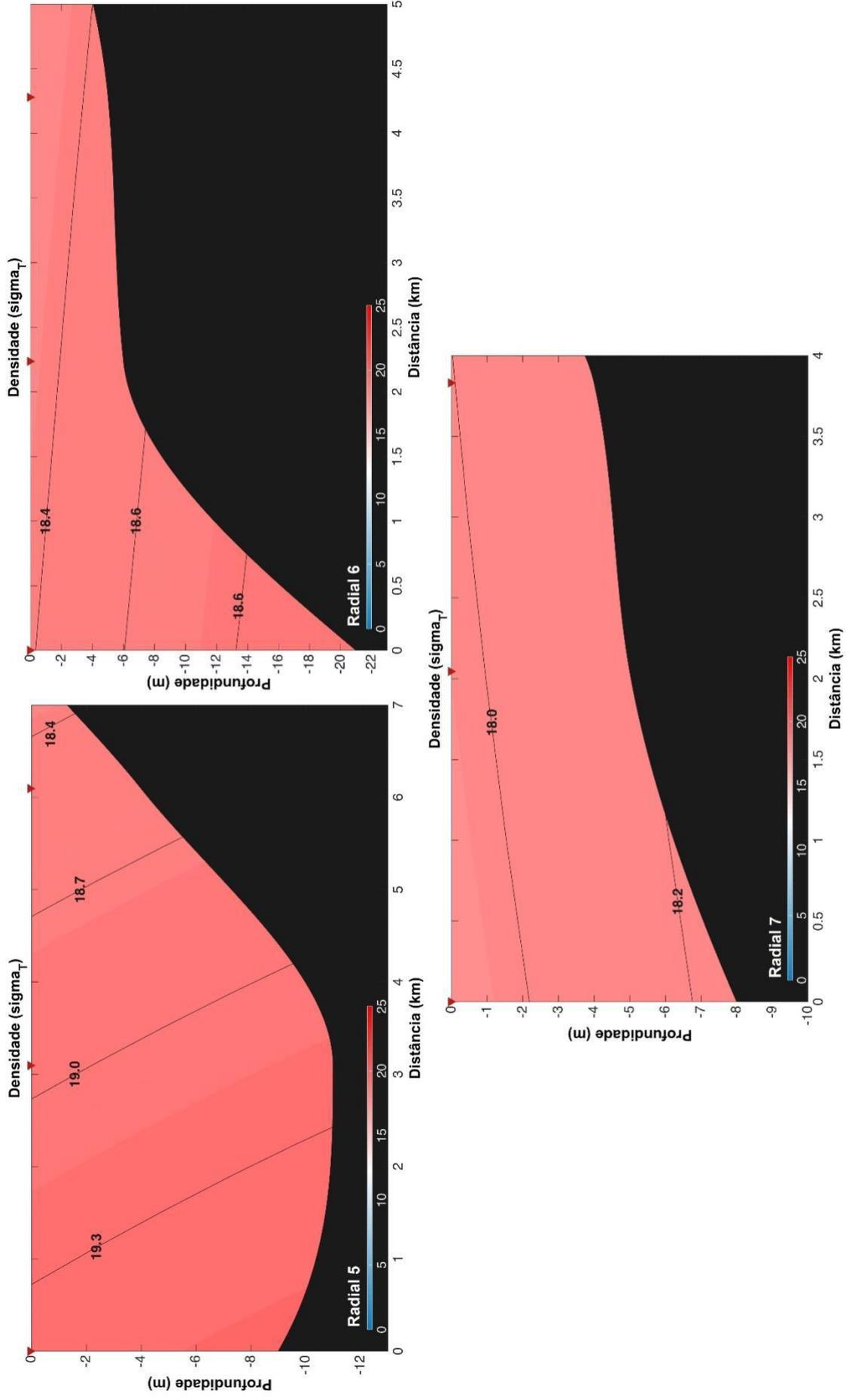


Figura 27 B: Distribuição vertical da densidade no CEASJ, durante a estação de seca. (Radial 5 – superior esquerdo; Radial 6 – superior direito; Radial 7 – inferior).

Na abordagem Euleriana, a temperatura nos fundeios I (mais costeiro) e II (parte mais interior), durante a estação de seca, apresentaram-se praticamente homogêneos, variando de 28,2 a 28,5 °C (Figuras 28A e B). Os valores médios da temperatura foram de aproximadamente 28,3 e 28,4 °C, para o fundeio I e fundeio II, respectivamente (Figuras 29A e B).

O perfil temporal de salinidade no fundeio I, apresentou variação de 32,4 a 34,1 gkg⁻¹ (Figura 30A), com salinidades mais altas observadas logo após a maré alta (1h), indicando a intrusão de água mais frias e salinas, características de águas costeiras oriundas da plataforma continental (DIAS; CASTRO; LACERDA, 2013). O perfil médio no tempo, da salinidade, exibe uma quase homogeneidade vertical com um leve aumento da salinidade da superfície para o fundo, possuindo um valor médio estacionário de 33,2 gkg⁻¹ (Figura 31A). Para o fundeio II (Figura 30B), o mesmo padrão de comportamento do fundeio I permaneceu, no entanto, com salinidades mais baixas, variando entre 30,0 e 31,2 gkg⁻¹, cujos máximos observados foram também após a maré alta (1h). O perfil médio temporal exibiu novamente uma fraca estratificação vertical com valor médio de 30,5 gkg⁻¹ (Figura 31B).

Estes perfis temporais, corroboram com os perfis espaciais apresentados, mostrando a pouca variação térmica e salina ao longo do CEASJ, tendo como base os fundeios I e II. E quando comparado à estação de chuva, mostra a intrusão e permanência de águas da plataforma continental no interior do complexo.

Ao observarmos os gradientes espaciais-verticais e temporais da estrutura termohalina no CEASJ, com temperaturas elevadas associadas a salinidades tipicamente estuarinas na estação de chuva e águas mais frias e mais salinas na estação de seca, podemos sugerir uma interface ZM/ZC próxima ao fundeio I (localizado na parte mais costeira do complexo estuarino) e uma interface ZR/ZM próxima ao fundeio II (localizado na parte mais interior), segundo critérios adotados por Kjerfve (1987) e Miranda, Castro e Kjerfve (2002). No decorrer deste trabalho será adotado esta classificação para as regiões dos fundeios I e II (interfaces ZM/ZC e ZR/ZM, respectivamente).

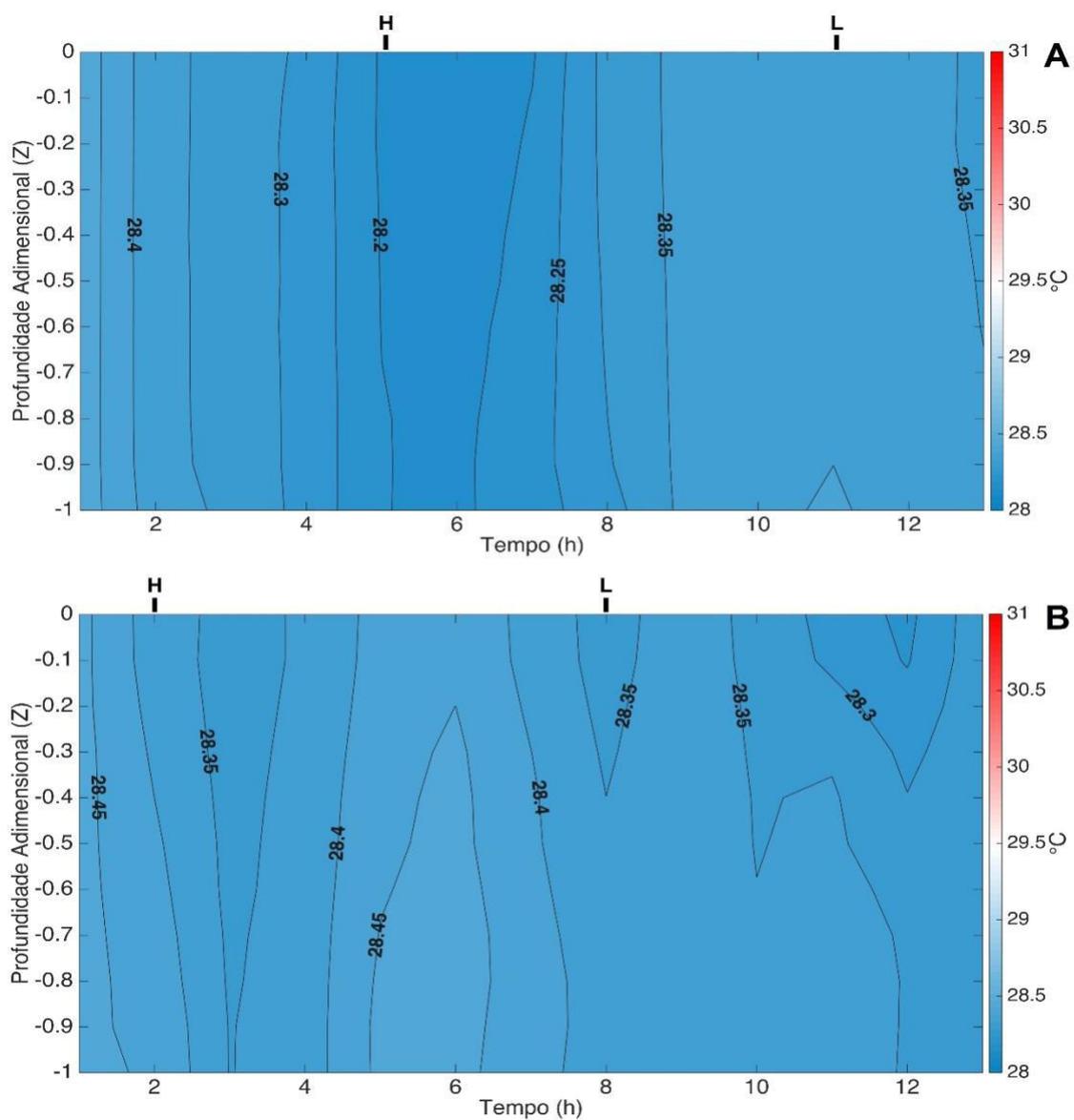


Figura 28: Perfil temporal da temperatura ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13h), para o fundeio I (A) e fundeio II (B), durante a estação de seca. As letras H e L indicam os instantes de maré alta e maré baixa, respectivamente.

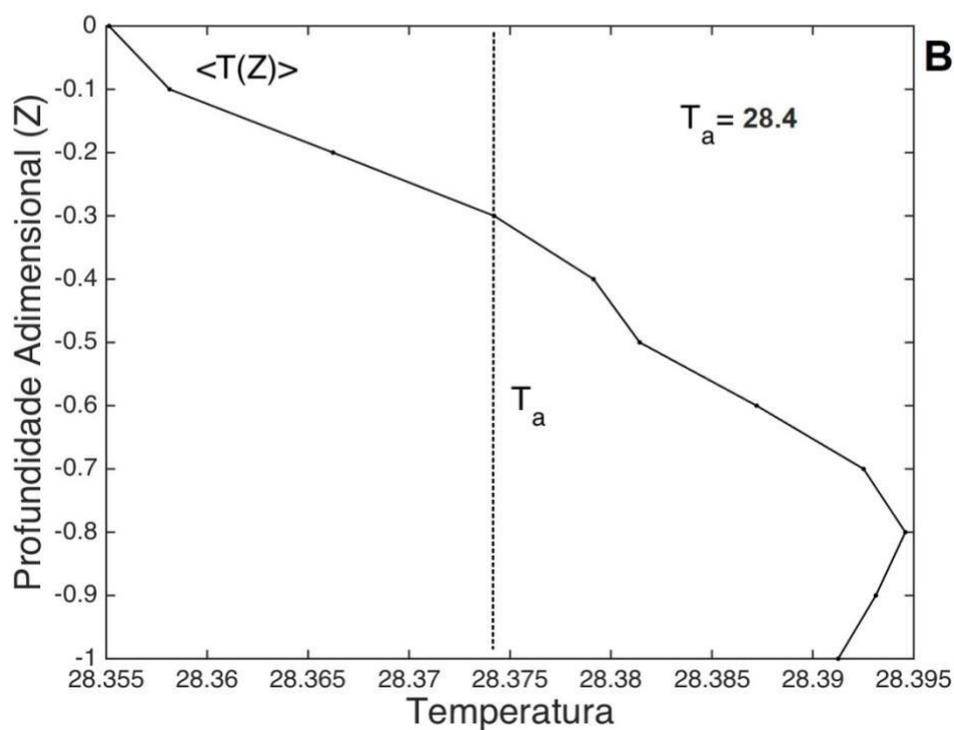
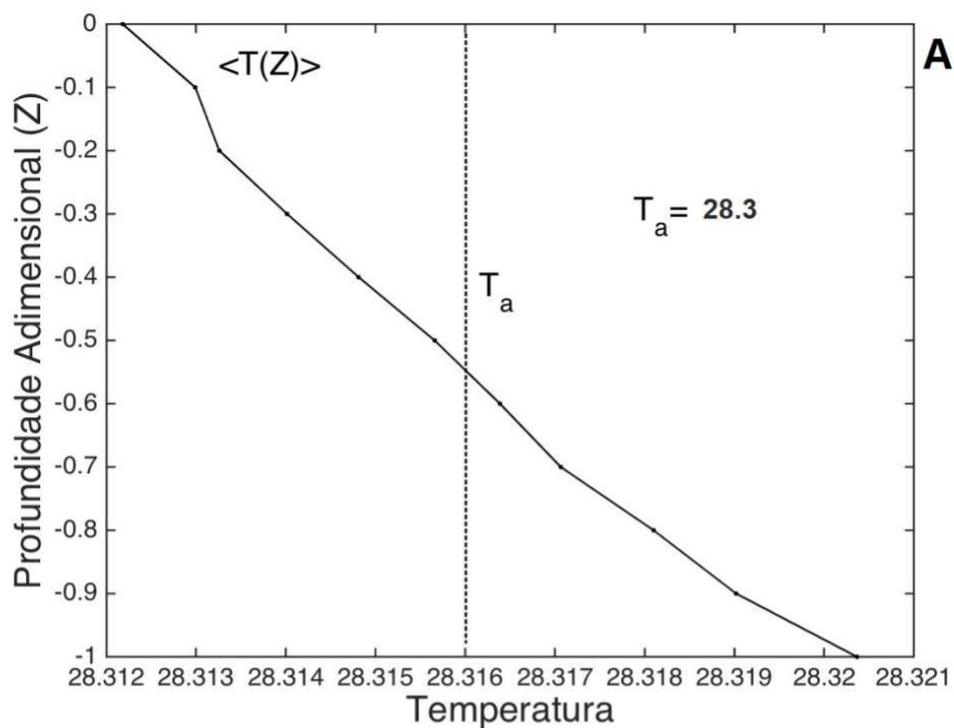


Figura 29: Perfis médios de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13h), para o função I (A) e função II (B), durante a estação de seca. $\langle T(Z) \rangle$ (linha contínua) é o perfil da média temporal da temperatura; T_a é o perfil médio espaço-temporal da temperatura.

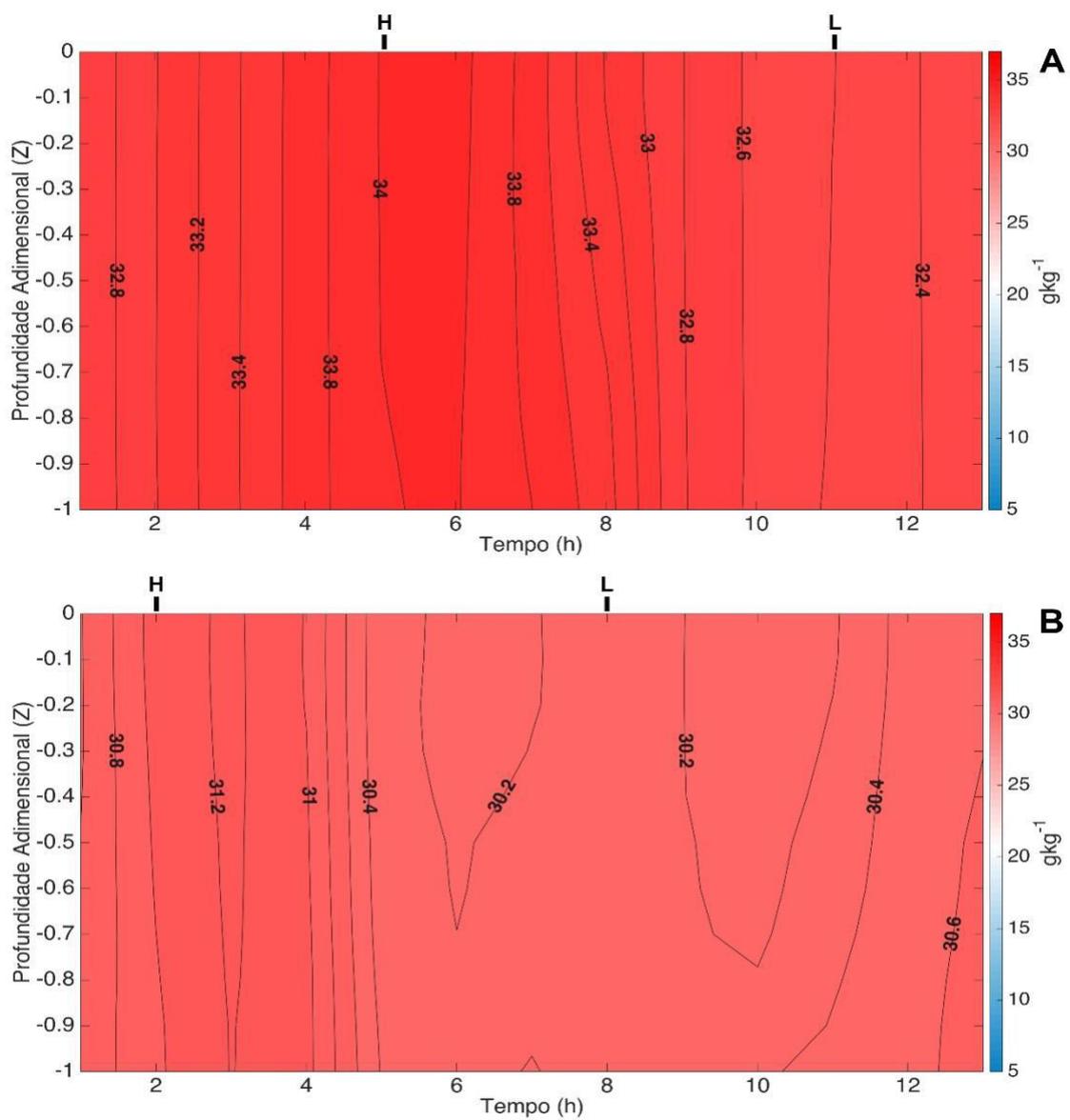


Figura 30: Perfil temporal da salinidade ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13h), para o fundeio I (A) e fundeio II (B), durante a estação de seca. As letras H e L indicam os instantes de maré alta e maré baixa, respectivamente.

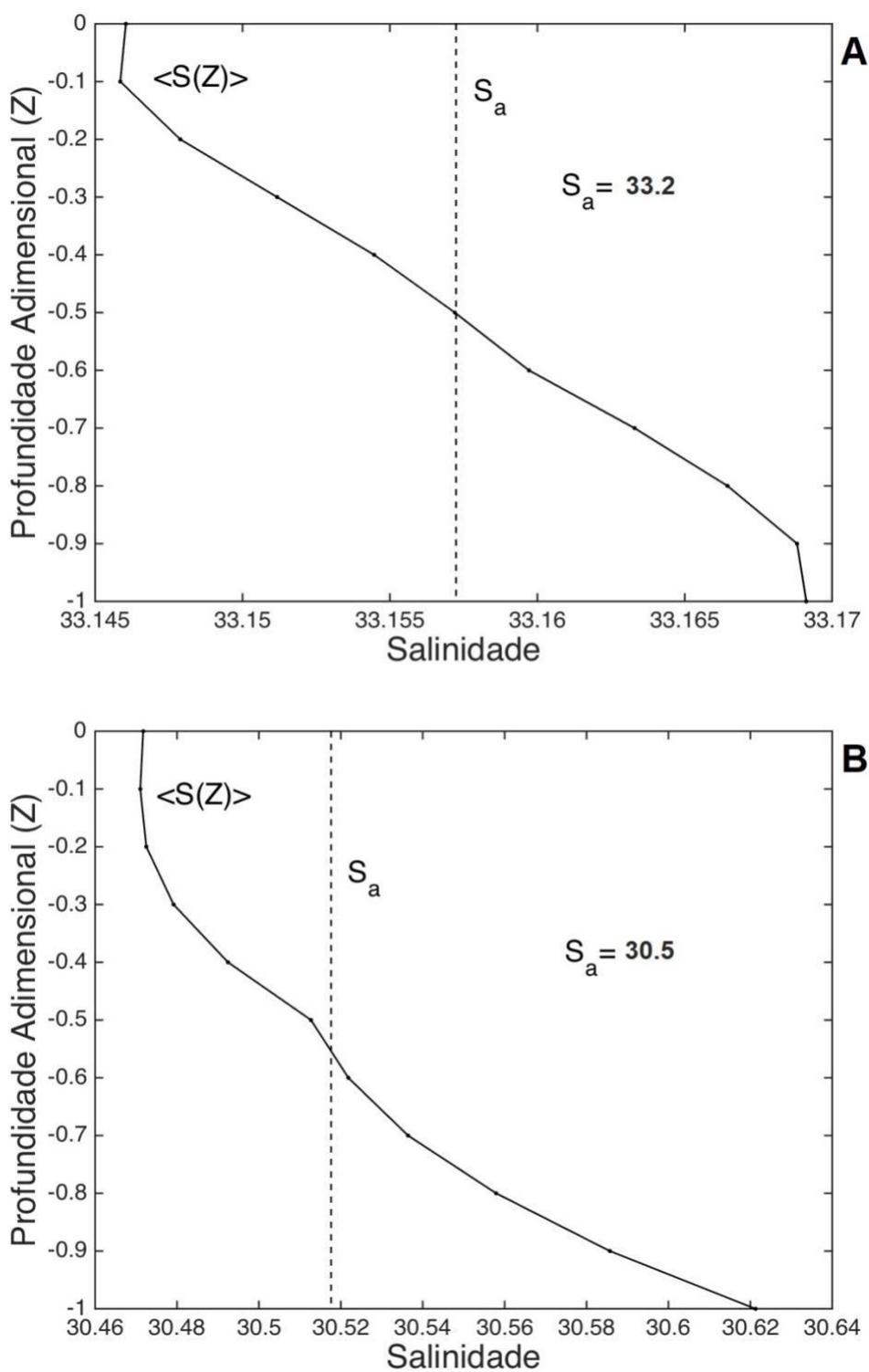


Figura 31: Perfis médios de salinidade (gkg^{-1}) ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13h), para o fundeu I (A) e fundeu II (B), durante a estação de seca. $\langle S(Z) \rangle$ (linha contínua) é o perfil da média temporal da salinidade; S_a é o perfil médio espaço-temporal da salinidade.

5.2.2. Correntes

Por convenção, utilizaremos $u > 0$ para o componente longitudinal da velocidade em maré vazante e $u < 0$ para o componente longitudinal da velocidade em maré enchente.

5.2.2.1. Estação de chuva

Na interface ZM/ZC, os perfis de velocidade ao longo de um ciclo de maré semidiurna (Figura 32A), mostram um escoamento bidirecional, com valores máximos de vazante e enchente atingindo intensidades de $1,30$ e $-1,44 \text{ ms}^{-1}$, respectivamente. As velocidades máximas de vazante ocorreram aproximadamente 3 horas antes da maré baixa e as de enchente ocorreram 3 horas após a maré baixa. É válido ressaltar um forçamento de inclinação na região mais próxima ao fundo, devido à imposição de condição de contorno de não escorregamento junto ao fundo (descrito na seção 4). Ao analisarmos o perfil médio da velocidade ($\langle u(Z) \rangle$), temos que as correntes de enchente predominam sobre as de vazante, com correspondente velocidade residual (u_a) de $-0,02 \text{ ms}^{-1}$ (Figura 33A), ou seja, com sentido estuário acima.

Na interface ZR/ZM, durante a estação de chuva, observamos uma quase simetria dos perfis de velocidade longitudinal, onde as maiores velocidades ocorreram em maré enchente ($-1,19 \text{ ms}^{-1}$) (Figura 32B), enquanto que em maré vazante, as velocidades atingiram $0,97 \text{ ms}^{-1}$. As velocidades máximas de vazante ocorreram aproximadamente 4 horas antes da maré baixa e as de enchente ocorreram cerca de 2 horas após a maré baixa. No perfil médio de velocidade, observamos predominância de enchente sobre as velocidades de vazante e velocidade residual de $-0,11 \text{ ms}^{-1}$ (Figura 33B).

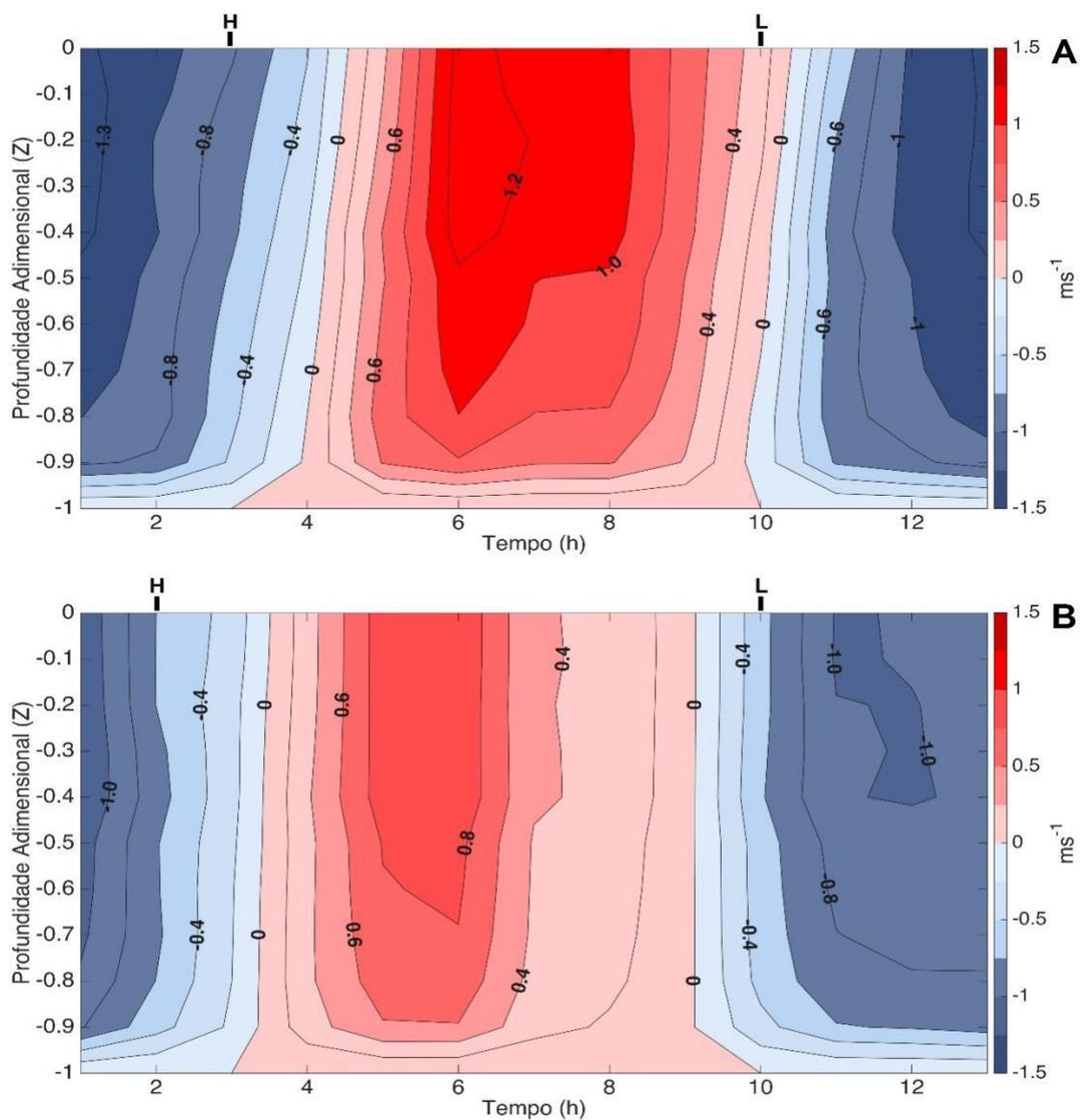


Figura 32: Perfil temporal do componente da longitudinal da velocidade (u) ao longo de um ciclo completo de maré semidurna (13h), para a interface ZM/ZC (A) e interface ZR/ZM (B), durante a estação de chuva. As letras H e L indicam os instantes de maré alta e maré baixa, respectivamente.

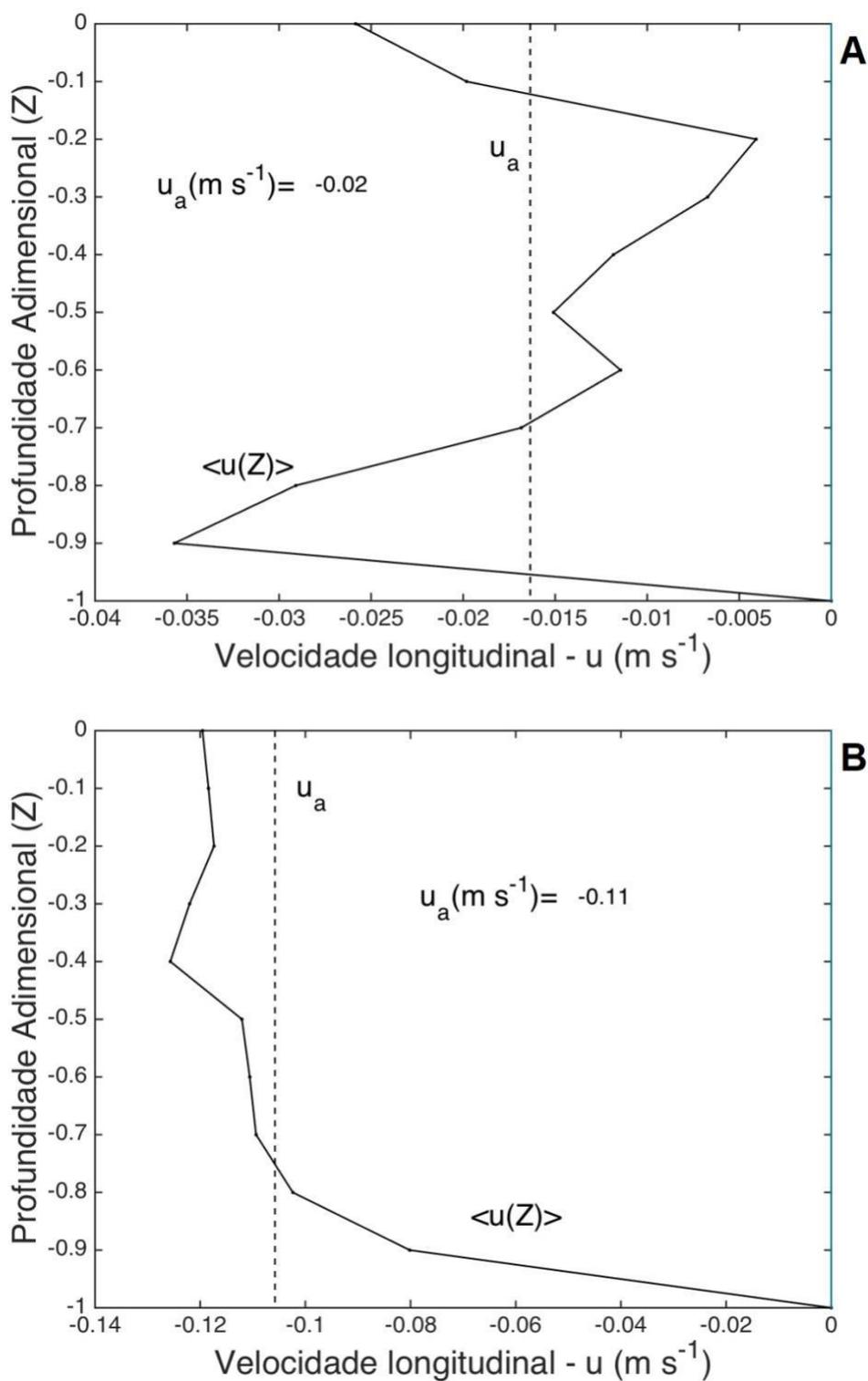


Figura 33: Perfis médios do componente longitudinal da velocidade ao longo de um ciclo completo de maré semidurna (13h), para a interface ZM/ZC (A) e interface ZR/ZM (B), durante a estação de chuva. $\langle u(Z) \rangle$ (linha contínua) é o perfil da média temporal da velocidade; u_a (linha tracejada) é a velocidade residual.

5.2.2.2. Estação de seca

O perfil temporal do componente longitudinal da velocidade (u) para a interface ZM/ZC (Figura 34A), mostra uma variação de $-0,86$ a $0,80 \text{ ms}^{-1}$, com valores máximos de vazante ocorrendo aproximadamente 3 horas antes da maré baixa, atingindo $0,80 \text{ ms}^{-1}$, enquanto que as de enchente ocorreram aproximadamente 3 horas antes da maré alta, atingindo o valor de $-0,86 \text{ ms}^{-1}$. Através do perfil médio da velocidade ($\langle u(Z) \rangle$), podemos inferir que as correntes de vazante ($u > 0$) predominaram sobre as correntes de enchente ($u < 0$), com valor de velocidade residual de $0,03 \text{ ms}^{-1}$ (Figura 35A), ou seja, com sentido estuário abaixo.

Na interface ZR/ZM, a variação temporal da velocidade longitudinal foi mais elevada, variando de $-1,09$ a $1,24 \text{ ms}^{-1}$ (Figura 34B), para enchente e vazante, respectivamente. As velocidades máximas de vazante ocorreram 3 horas antes da maré baixa, e as velocidades máximas de enchente ocorreram 3 horas após a maré baixa. O perfil médio temporal da velocidade ($\langle u(Z) \rangle$) mostra um domínio de enchente ($u < 0$), cujo respectivo valor médio calculado ao longo da coluna de água (u_a) representando a velocidade residual foi de $-0,04 \text{ ms}^{-1}$ (Figura 35B).

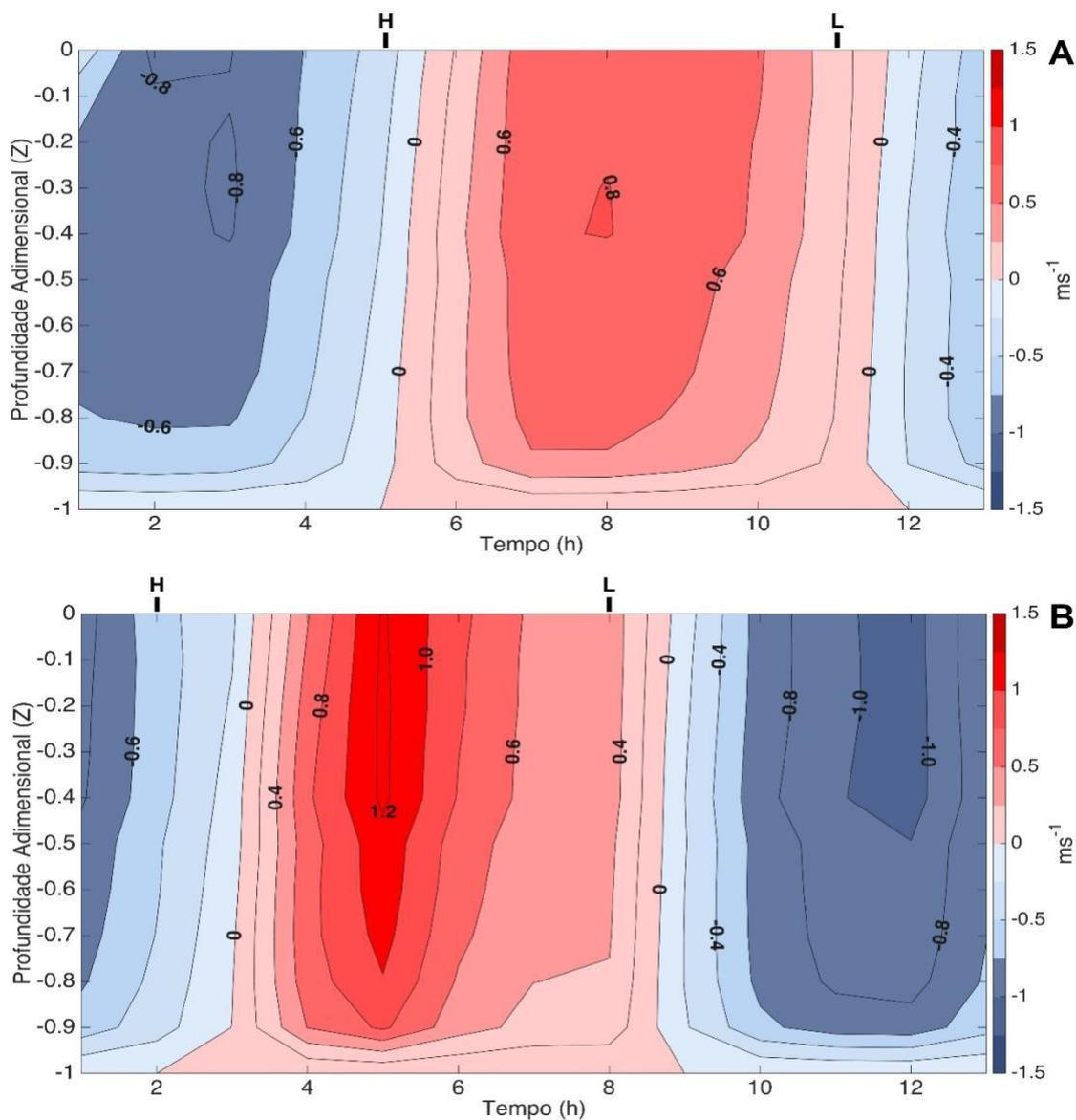


Figura 34: Perfil temporal do componente da longitudinal da velocidade (u) ao longo de um ciclo completo de maré semidurna (13h), para a interface ZM/ZC (A) e interface ZR/ZM (B), durante a estação de seca. As letras H e L indicam os instantes de maré alta e maré baixa, respectivamente.

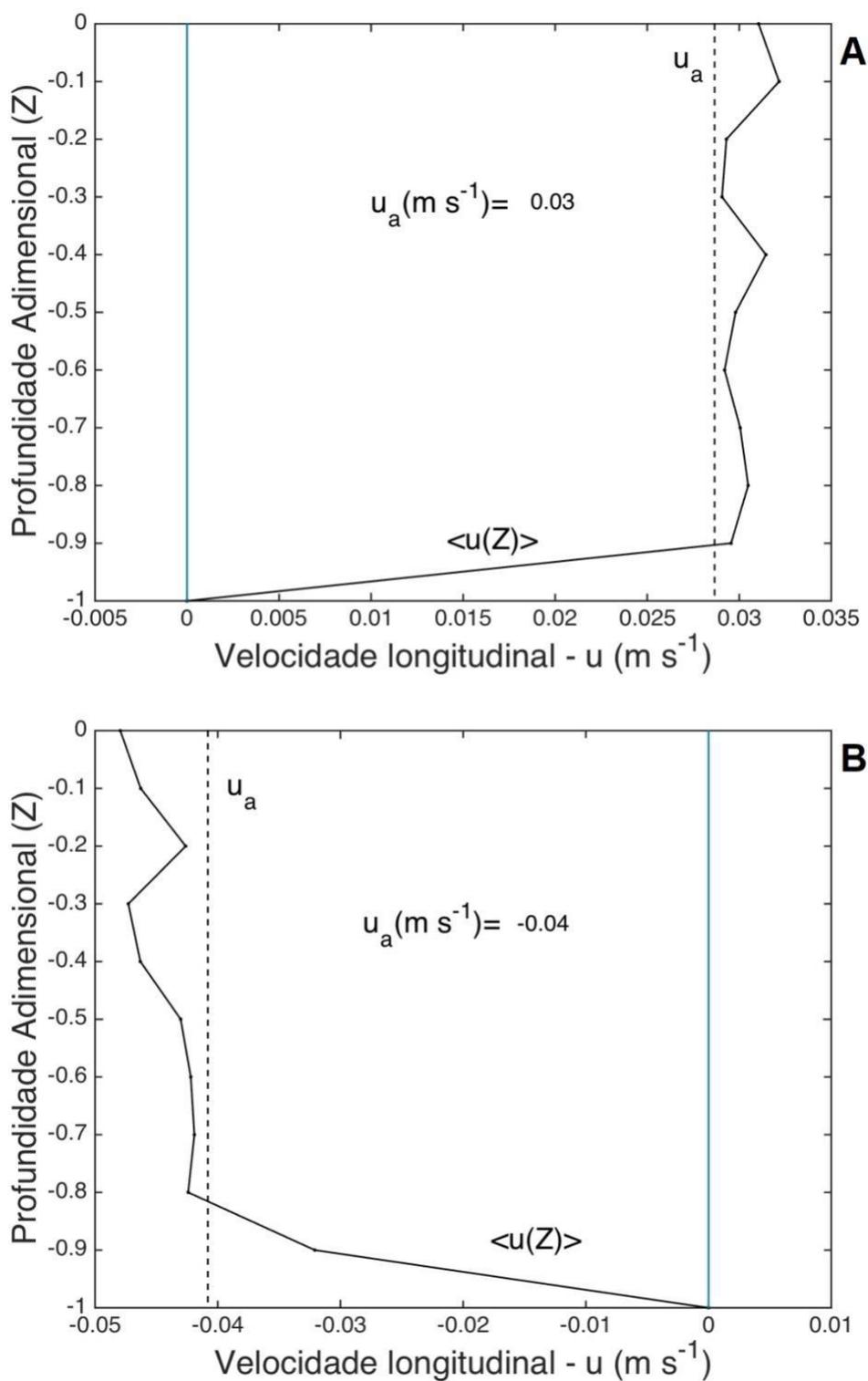


Figura 35: Perfis médios do componente longitudinal da velocidade ao longo de um ciclo completo de maré semidurna (13h), para a interface ZM/ZC (A) e interface ZR/ZM (B), durante a estação de seca. $\langle u(Z) \rangle$ (linha contínua) é o perfil da média temporal da velocidade; u_a (linha tracejada) é a velocidade residual.

5.2.3. Interações Continente oceano

5.2.3.1. Transporte de volume instantâneo nas estações de chuva e seca

Durante a estação chuvosa, ao longo do CEASJ, o transporte de volume diferiu em uma ordem de grandeza, variando de $2,8 \times 10^3$ a $8,4 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Figura 36A), com média de $4,6 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Os máximos ocorreram na parte costeira do complexo, próximo às radiais 1 e 2, diminuindo gradativamente estuário acima até a radial 6 onde foi possível observar um aumento do transporte de volume nessa região, diminuindo novamente em direção à radial 7. O gradiente horizontal desta propriedade ao longo do CEASJ foi de aproximadamente $1,8 \times 10^3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{km}^{-1}$.

Para a estação de seca, a distribuição espacial do transporte de volume ao longo do CEASJ variou de $5,0 \times 10^3$ a $1,2 \times 10^5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Figura 36B), ou seja, variou em duas ordens de grandeza, com valor médio de $6,2 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. O comportamento foi similar à estação de chuva, no entanto, com valores mais elevados, onde os máximos mostram-se próximos às radiais 1 e 2, observando uma minimização do transporte de volume estuário acima. Assim como na estação chuvosa, foi possível observar novamente, um aumento do transporte de volume na radial 6, diminuindo para a radial 7. E através disto, o gradiente horizontal foi da ordem de $2,6 \times 10^3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{km}^{-1}$.

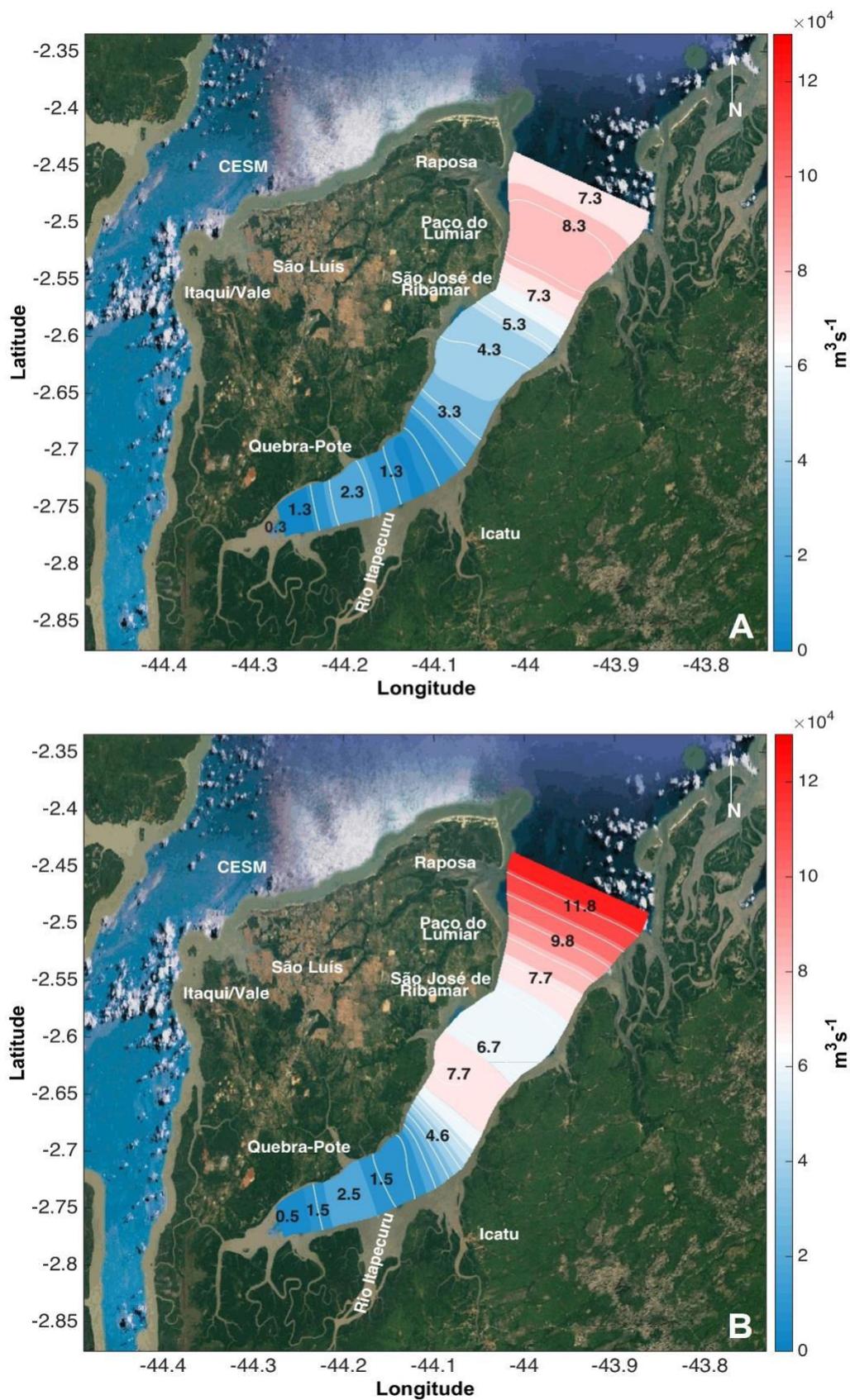


Figura 36: Distribuição horizontal do transporte de volume ao longo do CEASJ. A – Estação de chuva; B – Estação de seca.

5.2.3.2. Volume de água e tempo de residência nas estações de chuva e seca

No período de balanço hídrico positivo observou-se que ao longo do CEASJ (nas 7 radiais) o volume total de água variou em duas ordens de grandeza ($6,2 \times 10^7$ a $1,9 \times 10^9 \text{ m}^3$), e o mesmo comportamento foi observado na estação de seca ($1,1 \times 10^7$ a $2,7 \times 10^9 \text{ m}^3$). Em ambas as estações ocorreu uma minimização do volume de água estuário acima, muito provavelmente, por conta da diminuição da razão de aspecto.

A figura 37 mostra o resultado do percentual de água doce (Pad) influenciando no tempo de residência (Tr). Durante a estação chuvosa, observou-se que os Pad 's superiores a 25% apresentaram tempos de residência maiores que 1,5 horas, enquanto que na estação seca, observou-se que os Pad 's inferiores a 20% resultaram em tempos de residência menores que 1,5 horas. Ao longo do complexo estuarino o Pad eleva linearmente o tempo de residência, onde valores de Pad maiores que 70% podem resultar em tempo de residência de até 5 horas.

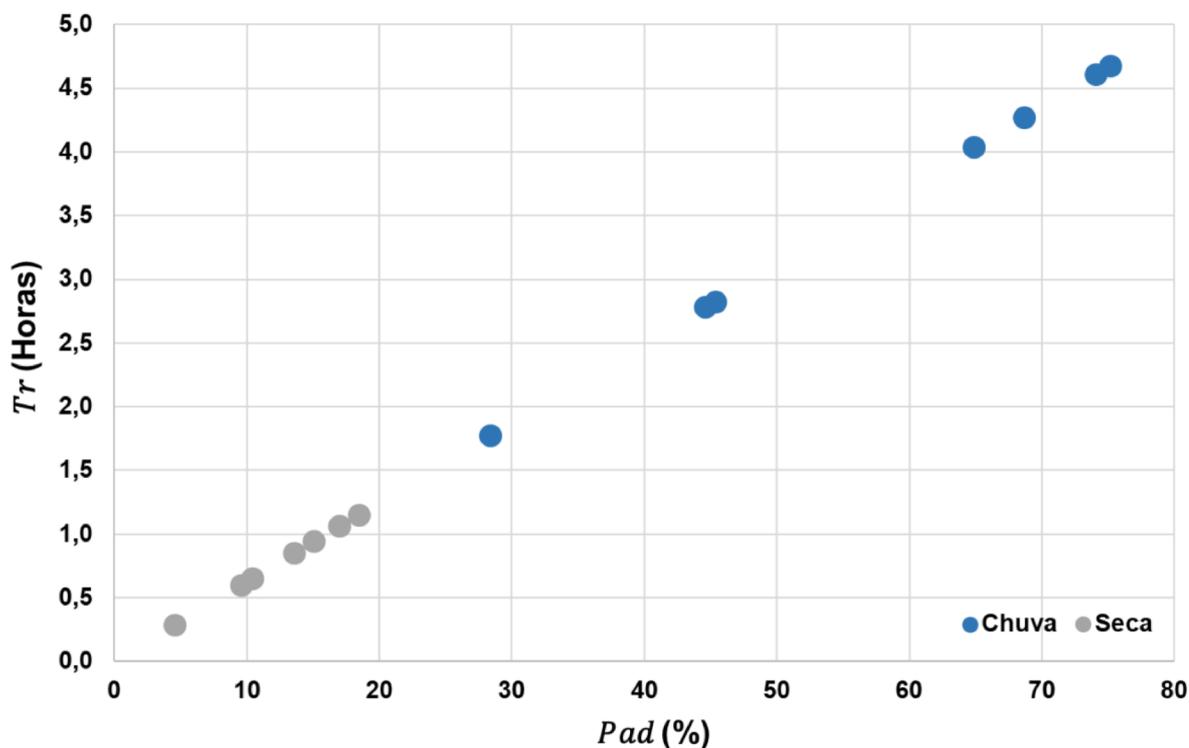


Figura 37: Relação tempo de residência e percentual de água doce para estação de chuva e seca, no CEASJ.

5.2.3.3. Hidrodinâmica e Classificação do Estuário nas estações de chuva e seca

Durante a estação de chuva, para a interface ZM/ZC, a velocidade longitudinal média [$\bar{u}(t)$] na coluna de água apresentou valores que chegaram a $-1,12 \text{ ms}^{-1}$ em maré enchente (horas 1 e 13) e a $0,95 \text{ ms}^{-1}$ em vazante (hora 7), enquanto o nível da superfície livre [$\bar{h}(t)$] ao longo do ciclo de maré oscilou cerca de 3 metros (Figura 38A), com a maré alta ocorrendo na hora 3 e a maré baixa na hora 10. Verificou-se que, os instantes de movimentos nulos (reversão de sentido) ocorreram 1 hora depois da maré alta ou estofa de enchente e no mesmo horário da maré baixa ou estofa de vazante. Na interface ZR/ZM, a velocidade média na coluna de água atingiu valores próximos de $-0,85 \text{ ms}^{-1}$ em enchente (hora 1) e de $0,7 \text{ ms}^{-1}$ em vazante (hora 6), e o nível de água teve uma oscilação de 2,6 metros entre as estofas (Figura 38B), com a maré alta ocorrendo na hora 2 e a maré baixa na hora 10. Podemos observar que os instantes de movimentos nulos ocorreram 1 hora e 30 minutos após a maré alta e 1 hora antes da maré baixa.

Para a estação seca, na interface ZM/ZC, a velocidade média chegou a valores próximos a $\pm 0,65 \text{ ms}^{-1}$, tanto em enchente quando em vazante (horas 2 e 8, respectivamente), enquanto que o nível da água ao longo do ciclo de maré teve uma oscilação de ~ 3 metros (Figura 38C), com a maré alta ocorrendo na hora 5 e maré baixa na hora 11. Foi observado também a reversão de sentido ocorreu cerca de 30 minutos após as estofas de maré. Para a interface ZR/ZM, observou-se que o nível da água variou em torno de 2,0 m ao longo do ciclo completo de maré, com maré alta ocorrendo na hora 2 e maré baixa na hora 8, enquanto que as velocidades longitudinais médias chegaram a $-0,76 \text{ ms}^{-1}$ em maré enchente (hora 11) e a $0,88 \text{ ms}^{-1}$ em maré vazante (hora 5) (Figura 38D). Foi possível verificar ainda uma defasem média de aproximadamente 1 hora entre a maré alta e o instante de movimento nulo e 1 hora entre a maré baixa e o instante de movimento nulo.

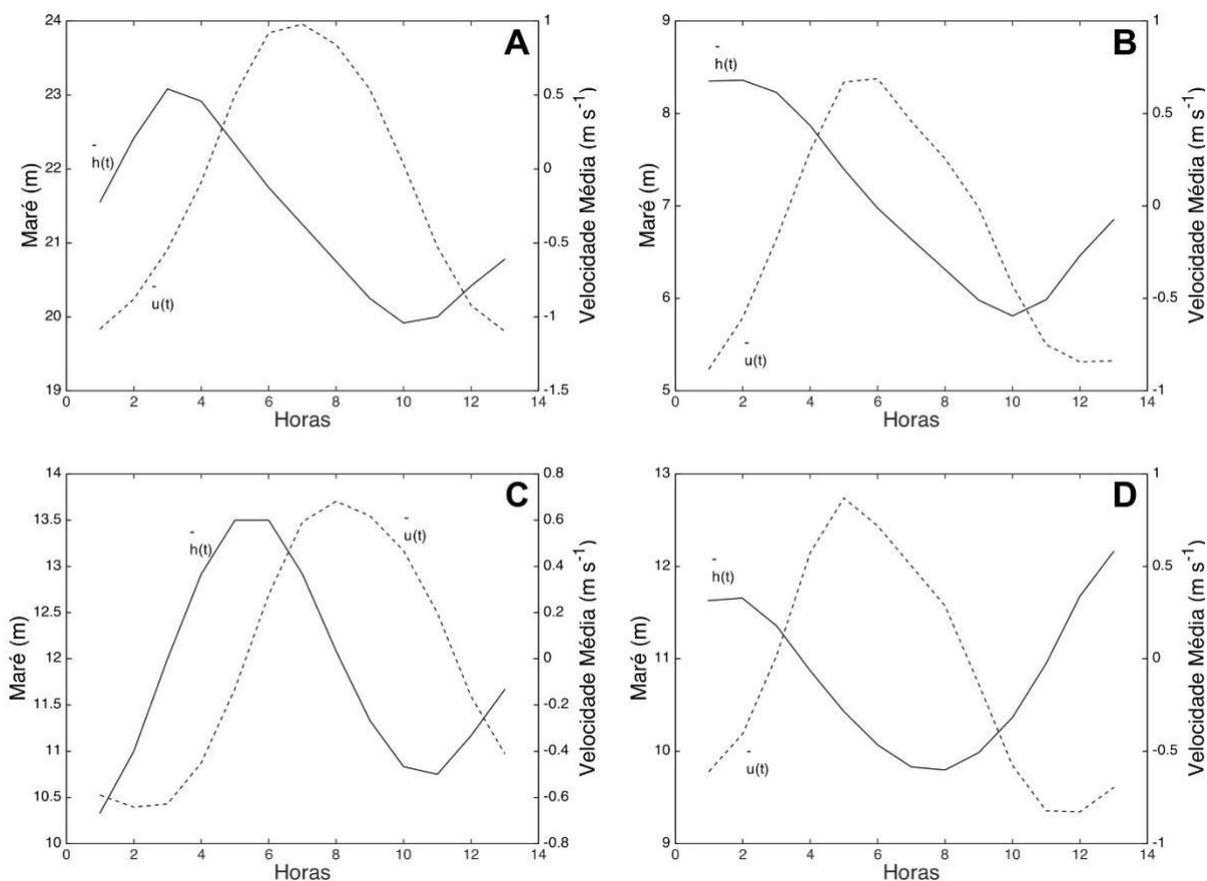


Figura 38: Variação temporal da velocidade média $[\bar{u}(t)]$ (linha tracejada) na coluna de água e da superfície livre $[\bar{h}(t)]$ (linha contínua). Os painéis superiores referem-se às interfaces ZM/ZC (A) e ZR/ZM (B) na estação de chuva. Os painéis inferiores referem-se às interfaces ZM/ZC (C) e ZR/ZM (D) na estação de seca

Na Figura 39, é possível observarmos a variação temporal da salinidade média $[\bar{S}(t)]$ na coluna de água e a variação temporal da superfície livre $[\bar{h}(t)]$, ou seja, há influência da maré dinâmica no campo de salinidade para a estação de chuva. Para a interface ZM/ZC (Figura 39A), nota-se um aumento da salinidade média com a maré enchente e diminuição com a vazante, havendo uma defasagem de aproximadamente 1 hora entre a maré alta e a máxima salinidade e de 1 hora entre a maré baixa e a mínima salinidade. Na interface ZR/ZM (Figura 39B), a defasagem foi de aproximadamente 1 hora entre a maré alta e o valor máximo de salinidade média, isto é, com o primeiro liderando o segundo, enquanto que na maré baixa ocorreu o contrário.

O comportamento observado, na estação chuvosa, da salinidade em relação à maré dinâmica, nos faz inferir que a redistribuição da salinidade decorre fortemente do efeito advectivo da maré, porque em maré enchente nota-se um

aumento da salinidade estuário acima, enquanto que em maré vazante, a salinidade diminui por conta de um maior aporte de água fluvial da drenagem continental.

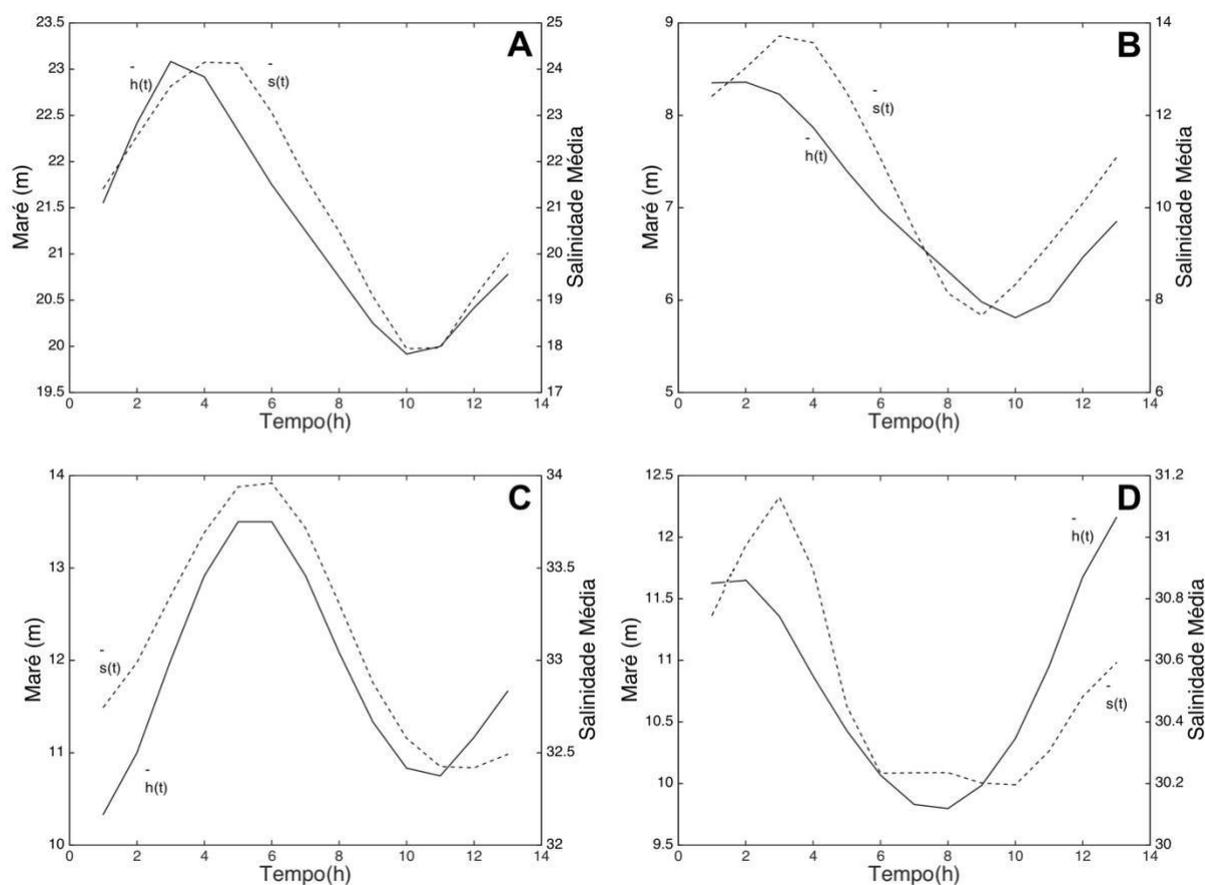


Figura 39: Variação temporal da salinidade média [$\bar{s}(t)$] (linha tracejada) na coluna de água e da superfície livre [$\bar{h}(t)$] (linha contínua). Os painéis superiores referem-se às interfaces ZM/ZC (A) e ZR/ZM (B) na estação de chuva. Os painéis inferiores referem-se às interfaces ZM/ZC (C) e ZR/ZM (D) na estação de seca.

No período seco, para a interface ZM/ZC, observou-se uma defasagem média de 1 hora entre a maré alta e o valor máximo de salinidade média e de 1 hora para a maré baixa e o valor mínimo de salinidade média (Figura 39C). Na interface ZR/ZM observou-se uma defasagem média de 1 hora entre a maré alta e o valor máximo de salinidade média e de 2 horas para a maré baixa e o valor mínimo de salinidade média (Figura 39D). Na região da interface ZR/ZM a relação entre a propagação da onda de maré estuário acima e a morfologia local, muito provavelmente é a responsável pela elevação da altura da maré e das intensidades das correntes, que está ligado ao afunilamento do canal estuarino nesta região e à uma consequente menor atuação do atrito que promove a elevação da maré, como foi observado também por Dias et al., 2016.

De acordo com o diagrama Estratificação-Circulação, para a interface ZM/ZC na estação chuvosa, o sistema estuarino foi classificado do tipo 2a (parcialmente misturado e fracamente estratificado) e o valor do parâmetro ν foi aproximadamente 0,99, indicando que o processo de difusão turbulenta foi predominante para o transporte de sal estuário acima (Figura 40A). Na interface ZR/ZM o sistema estuarino foi classificado do tipo 1a (bem misturado e fracamente estratificado) com valor do parâmetro ν igual a 1, onde não existe circulação gravitacional e o transporte de sal estuário acima é totalmente por difusão turbulenta (Figura 40B).

Para a estação de seca, em ambas as interfaces, o sistema estuarino foi classificado do tipo 1a (bem misturado e fracamente estratificado) com valores do parâmetro ν iguais a 1 (Figura 40C e D).

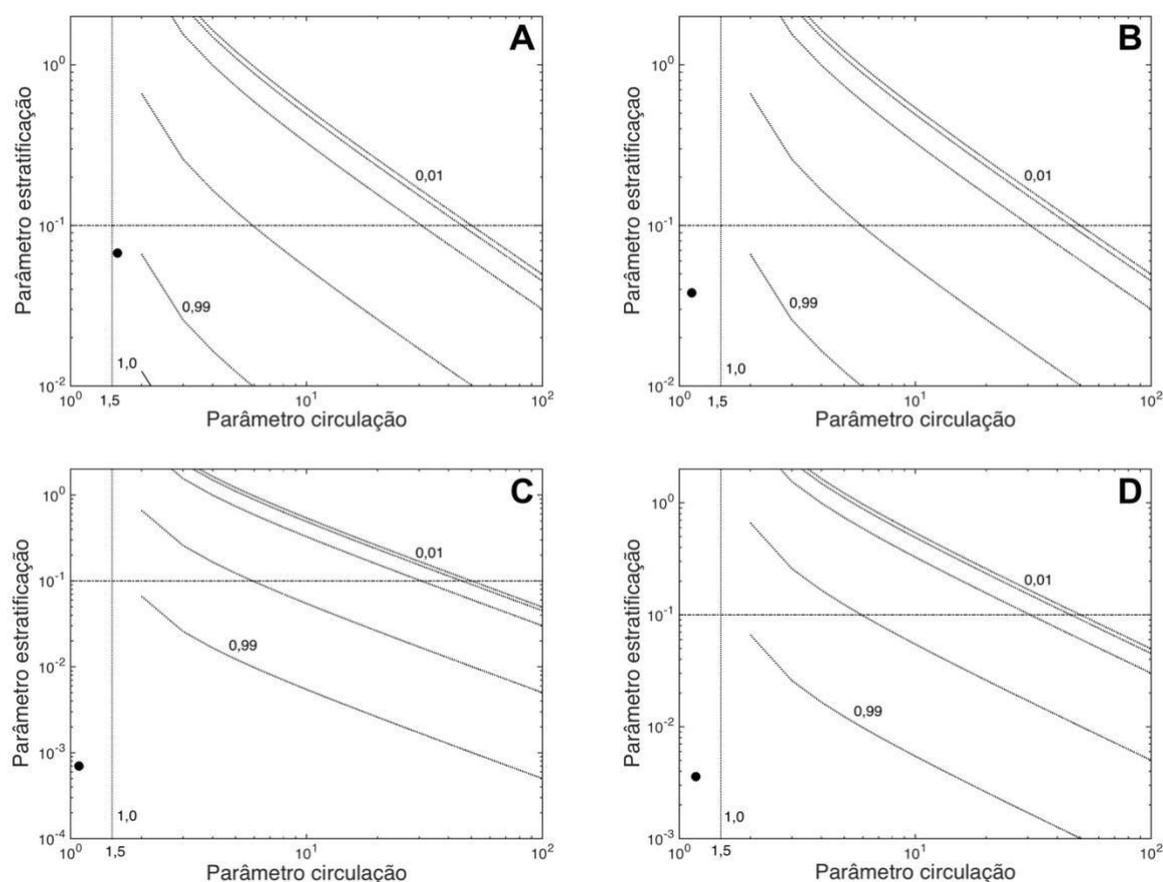


Figura 40: Diagrama de Estratificação-Circulação de Hansen e Rattray (1966). Os painéis superiores referem-se às interfaces ZM/ZC (A) e ZR/ZM (B) na estação de chuva. Os painéis inferiores referem-se às interfaces ZM/ZC (C) e ZR/ZM (D) na estação de seca.

5.2.3.4. Estabilidade da coluna de água nas estações de chuva e seca

As análises da variação temporal do número de Richardson por camada (Ri_L), para a estação de chuva, podem ser observadas na Figura 41. Na interface ZM/ZC (Figura 41A), o comportamento do Ri_L , em geral apresentou condições de fraca estabilidade vertical ($2 < Ri_L < 20$), com poucos instantes apresentando valores abaixo de 2. Apresentou também dois momentos com valores acima de 20, indicando condições de alta estabilidade vertical, muito provavelmente relacionado com os instantes de estufa de maré. Para a interface ZR/ZM (Figura 41B), o número adimensional Ri_L foi abaixo de 2 ($Ri_L < 2$) praticamente todo o tempo, ou seja, os processos de mistura dominaram durante a maior parte do tempo, indicando condições de instabilidade vertical.

Para o período seco, em ambas as interfaces (Figura 41C e D) o comportamento do Ri_L foi abaixo de 2, sugerindo uma total mistura, ou seja, a turbulência foi efetiva para gerar mistura durante todo o ciclo de maré.

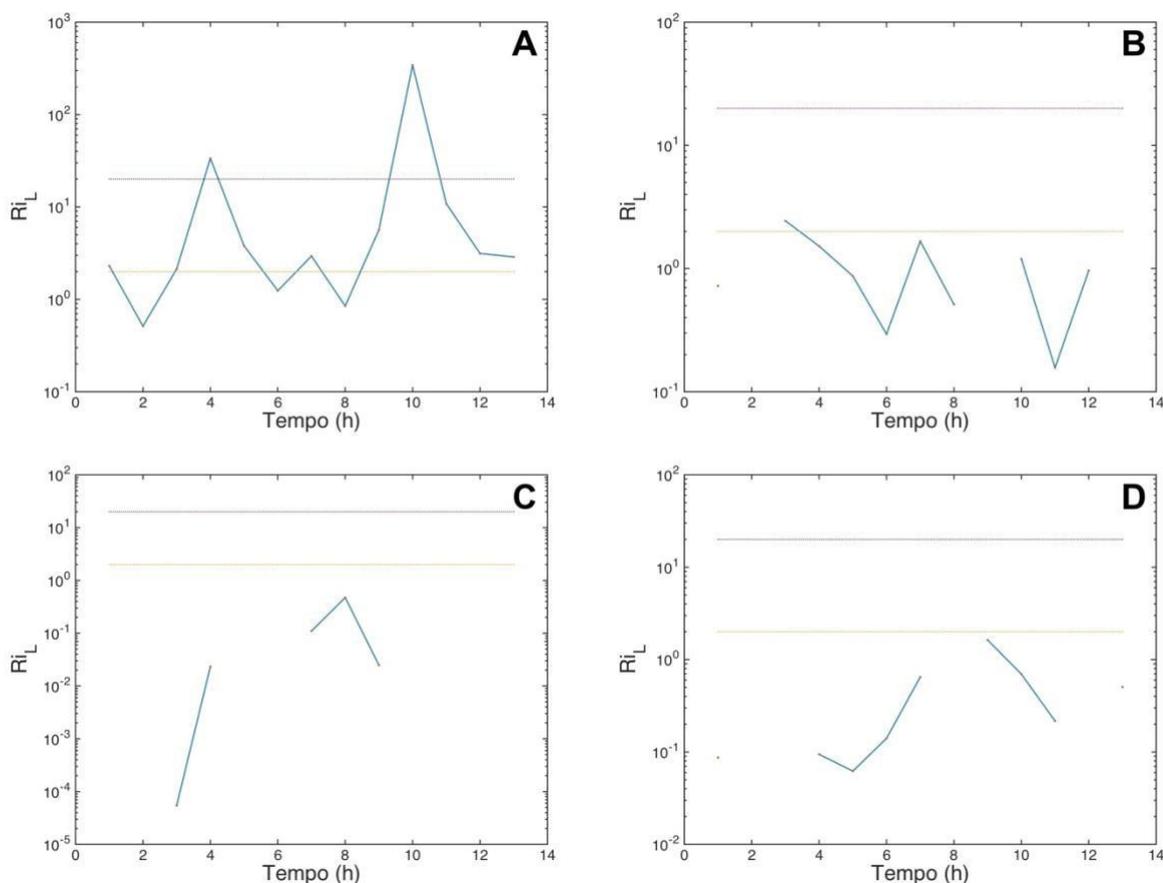


Figura 41: Variação temporal do número de Richardson por camada. Os painéis superiores referem-se às interfaces ZM/ZC (A) e ZR/ZM (B) na estação de chuva. Os painéis inferiores referem-se às interfaces ZM/ZC (C) e ZR/ZM (D) na estação de seca.

Em análise da anomalia da energia potencial durante a estação de chuva, ao longo do ciclo completo de maré semidiurna (13h) na interface ZM/ZC, o valor foi de $4,1 \times 10^{-5} \text{ Jm}^{-3}\text{s}^{-1}$, enquanto que interface ZR/ZM o valor foi de $2,2 \times 10^{-5} \text{ Jm}^{-3}\text{s}^{-1}$. Ao transformamos estes valores em potencial energético, para toda a seção dos dois fundeios (assumindo uma extrapolação linear e um escoamento uniforme), chegamos a valores da ordem de 418 GWhano^{-1} e 45 GWhano^{-1} , para o fundeio I (localizado na interface ZM/ZC) e II (localizado na interface ZR/ZM), respectivamente.

No período de balanço hídrico negativo, a anomalia da energia potencial foi de $3,8 \times 10^{-6} \text{ Jm}^{-3}\text{s}^{-1}$ e $4,9 \times 10^{-6} \text{ Jm}^{-3}\text{s}^{-1}$, para a interface ZM/ZC e ZR/ZM, respectivamente. Em se tratando de potencial energético, para toda a seção dos dois fundeios, obteve-se valores de 14 GWhano^{-1} para o fundeio I (ZM/ZC) e de 16 GWhano^{-1} para o fundeio II (ZR/ZM).

Ao idealizarmos o percentual de 20% destes potenciais energéticos calculados, transformados em energia elétrica via maremotriz, vislumbra-se uma nova fonte de energia renovável e limpa para a região. De acordo com o Anuário Estatístico de Energia Elétrica (EPE/MME, 2017), o consumo de energia elétrica anual do estado do Maranhão é de cerca de 7000 GWh.

5.2.3.5. Transporte de sal nas estações de chuva e seca

Para a estação de chuva, na interface ZM/ZC, as parcelas dominantes no transporte de sal foram: descarga fluvial, deriva de Stokes e correntes de maré (Figura 42A). O transporte relacionado à descarga fluvial teve o maior valor, chegando a $-7,4 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$, seguido da corrente de maré que apresentou valores de $6,6 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$. E por fim a deriva de Stokes com valores de $-1,5 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$, ou seja, com transporte orientado estuário acima, que normalmente seria apresentado com caráter advectivo. O valor do transporte de sal integrado durante o ciclo de maré foi de $-2,94 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ e o transporte total calculado através da somatória das parcelas advectivas e dispersivas, foi de $-2,96 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$. Este comportamento sugere que, para a interface ZM/ZC o estuário funcionou como importador de sal. Na interface ZR/ZM, a parcela dominante ficou atrelada ao transporte gerado pela descarga fluvial, com valores que chegaram a $-7,8 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ (Figura 42B). O valor calculado para componente da difusão da maré foi muito pequeno ($0,68 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$), o mesmo vale para a deriva de Stokes ($0,25 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$), ou seja, com transporte orientado estuário abaixo, de natureza

advectiva. O valor do transporte de sal integrado durante o ciclo de maré foi de $-7,30 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e o transporte total calculado através da somatória das parcelas advectivas e dispersivas, foi de $-7,29 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Igualmente à interface ZM/ZC, na interface ZR/ZM o estuário funcionou como importador de sal.

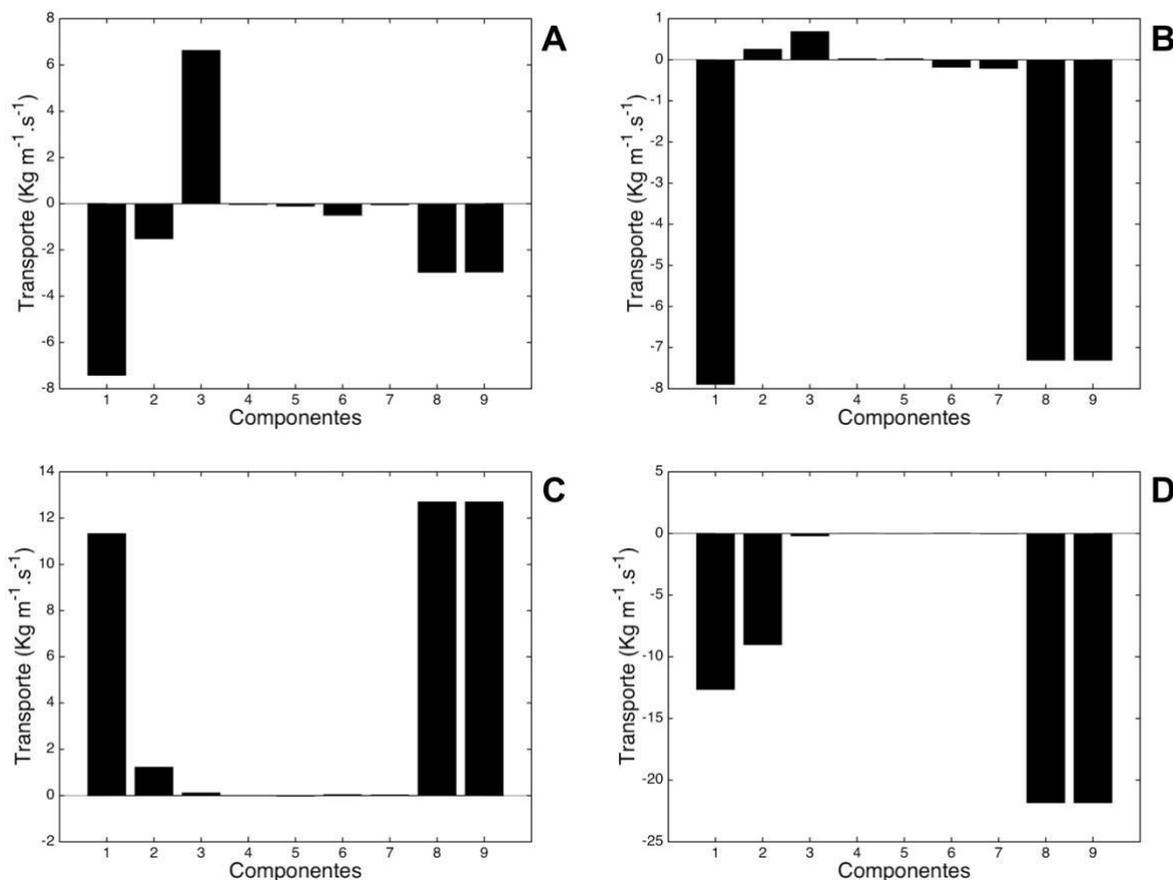


Figura 42: Componentes do transporte advectivo de sal durante a estação de chuva de 2017. Parcelas: descarga fluvial (1); deriva de Stokes (2); correlação de maré (3); circulação gravitacional (4); flutuações turbulentas (5); dispersão da maré (6); circulação residual (7). A soma das parcelas está indicada em (8) e o transporte resultante integrado durante o ciclo de maré em (9). Os painéis superiores referem-se às interfaces ZM/ZC (A) e ZR/ZM (B) na estação de chuva. Os painéis inferiores referem-se às interfaces ZM/ZC (C) e ZR/ZM (D) na estação de seca.

Na estação seca, as parcelas dominantes no transporte de sal da interface ZM/ZC foram a descarga fluvial e deriva de Stokes (Figura 42C). A maior parcela foi a descarga fluvial, com valor de $11,3 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$, indicando um transporte orientado estuário abaixo, enquanto que a deriva de Stokes apresentou o mesmo caráter advectivo, com valor da ordem de $1,2 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$. O valor do transporte de sal integrado durante o ciclo de maré foi de $12,68 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e o calculado através da somatória das parcelas advectivas e dispersivas foi de $12,67 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Este comportamento sugere que para a interface ZM/ZC, diferentemente da estação de chuva, o estuário funcionou

como exportador de sal. Na interface ZR/ZM, as parcelas dominantes foram a descarga fluvial e a deriva de Stokes, com valores de $-12,6$ e $-9,0 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ respectivamente, indicando um transporte estuário acima (natureza dispersiva) (Figura 42D). O valor do transporte de sal integrado durante o ciclo de maré e o calculado através da somatória das parcelas advectivas e dispersivas foram iguais a $-21,8 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$, sugerindo o estuário na interface ZR/ZM como importador de sal.

5.2.3.6. Material Particulado em Suspensão nas estações de chuva e seca

a) Distribuição espacial

A distribuição horizontal do Material Particulado em Suspensão (MPS) ao longo do CEASJ na estação chuvosa, integrado na vertical, variou de $6,1$ a $436,6 \text{ mgL}^{-1}$. Para a superfície a variação foi de $6,1$ a $253,7 \text{ mgL}^{-1}$, com média de $47,3 \text{ mgL}^{-1}$ (Figura 43A). Junto ao fundo a variabilidade foi mais elevada, no intervalo de $10,4$ a 436 mgL^{-1} , com valor médio de $106,7 \text{ mgL}^{-1}$, onde as maiores concentrações ocorreram estuário acima (Figura 43B).

Na estação de balanço hídrico negativo, as concentrações de MPS ao longo de todo o complexo variaram entre $20,0$ e $840,5 \text{ mgL}^{-1}$. Na superfície, a variação foi de $20,0$ a $189,8 \text{ mgL}^{-1}$, com média de $84,6 \text{ mgL}^{-1}$ (Figura 44A), enquanto que no fundo a variabilidade se deu entre $34,4$ e $840,5 \text{ mgL}^{-1}$, com média de $176,4 \text{ mgL}^{-1}$ (Figura 44B).

Na figura 45A podemos observar os fluxos de MPS da estação de chuva, cuja variação ao longo do CEASJ foi de $96,1$ a $2,0 \times 10^3 \text{ kgs}^{-1}$, com valor médio de $569,4 \text{ kgs}^{-1}$, enquanto que na estação de seca (Figura 45B), os fluxos foram mais elevados, variando de $117,9$ a $6,4 \times 10^3 \text{ kgs}^{-1}$, com média de $1,5 \times 10^3 \text{ kgs}^{-1}$. O aumento das descargas de MPS no período seco é muito provavelmente, devido a uma maior ressuspensão do sedimento de fundo e/ou erosão de margens.

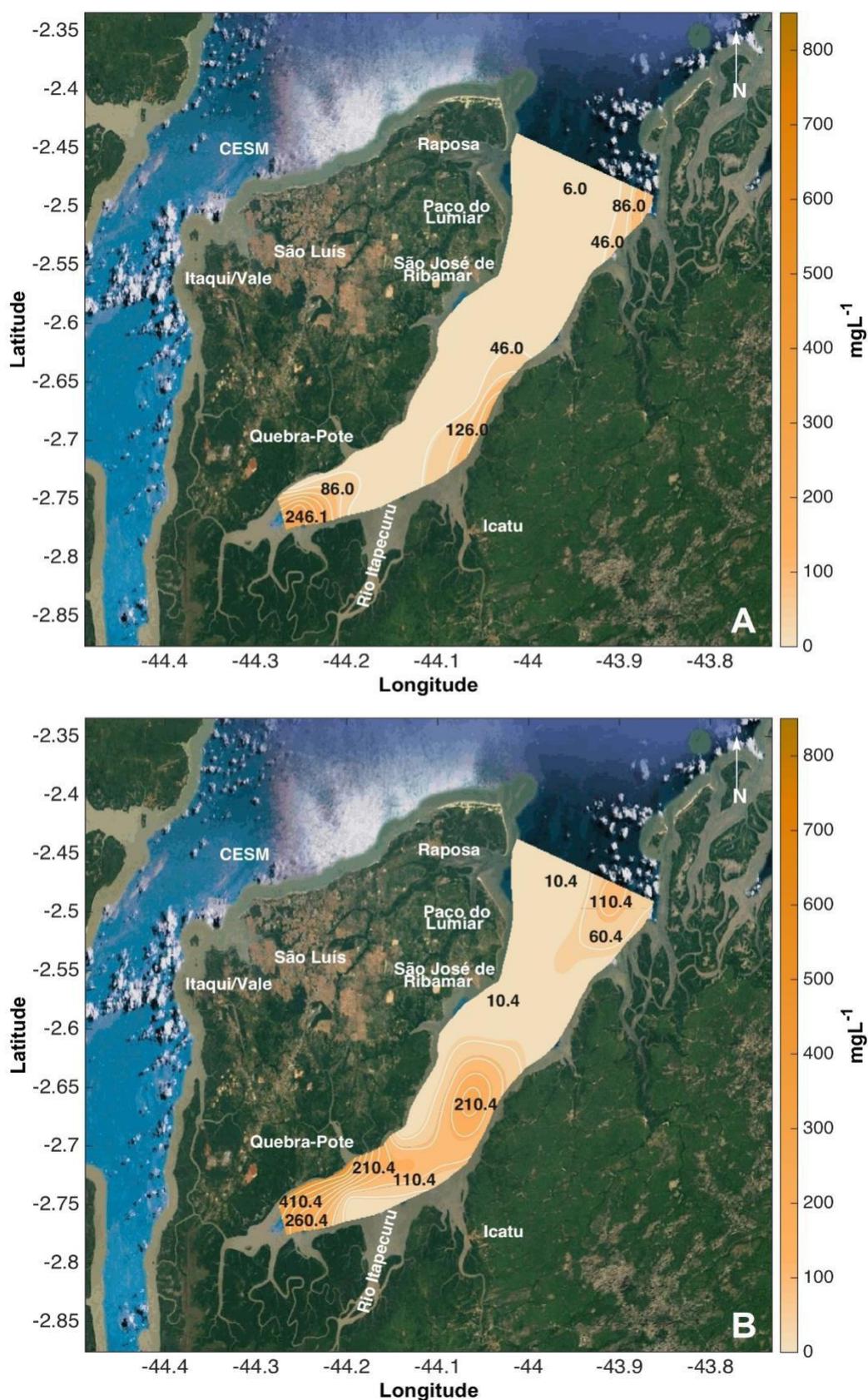


Figura 43: Distribuição horizontal do MPS durante a estação de chuva no CEASJ. A – Superfície; B – Fundo.

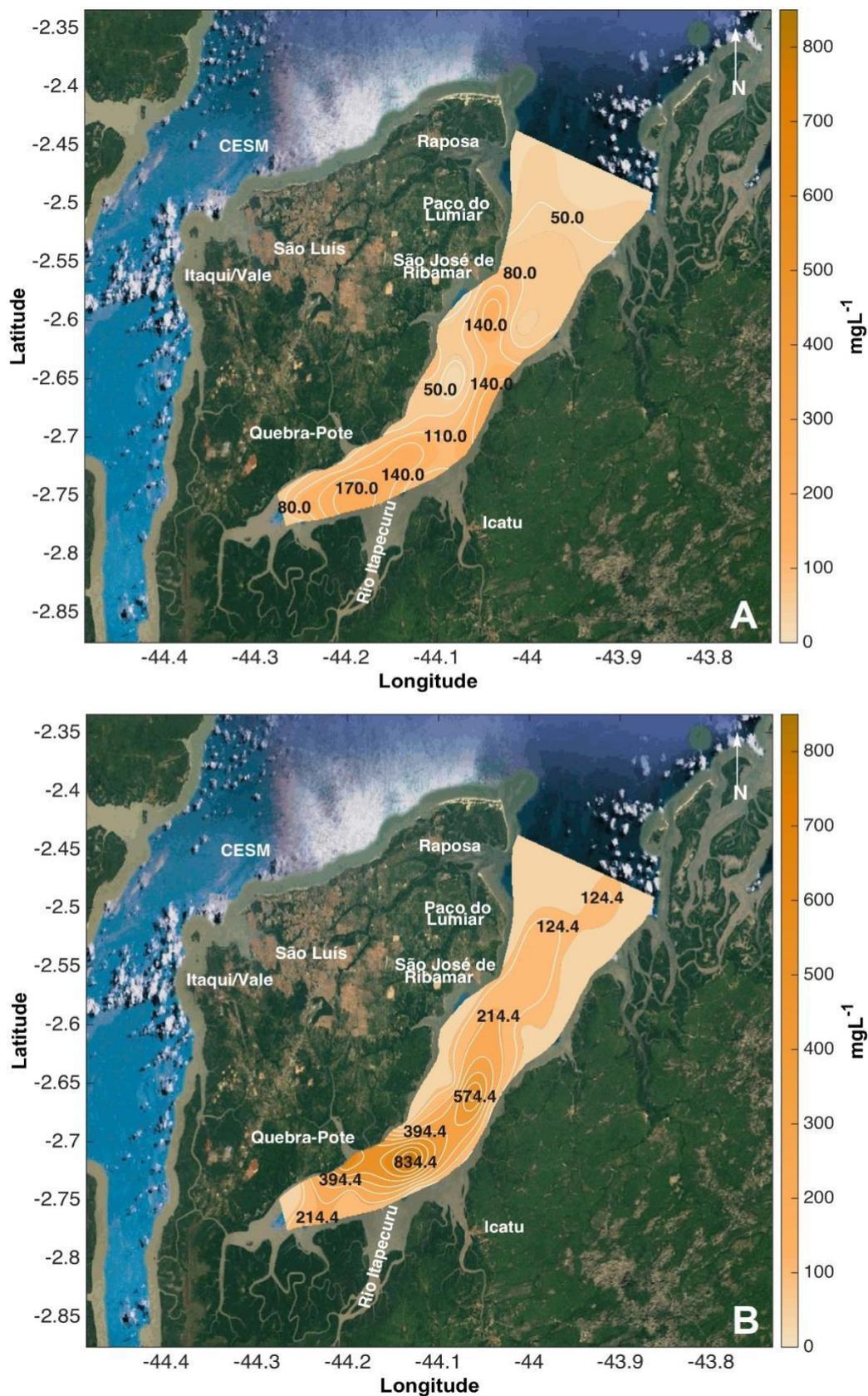


Figura 44: Distribuição horizontal do MPS durante a estação de seca no CEASJ. A – Superfície; B – Fundo.

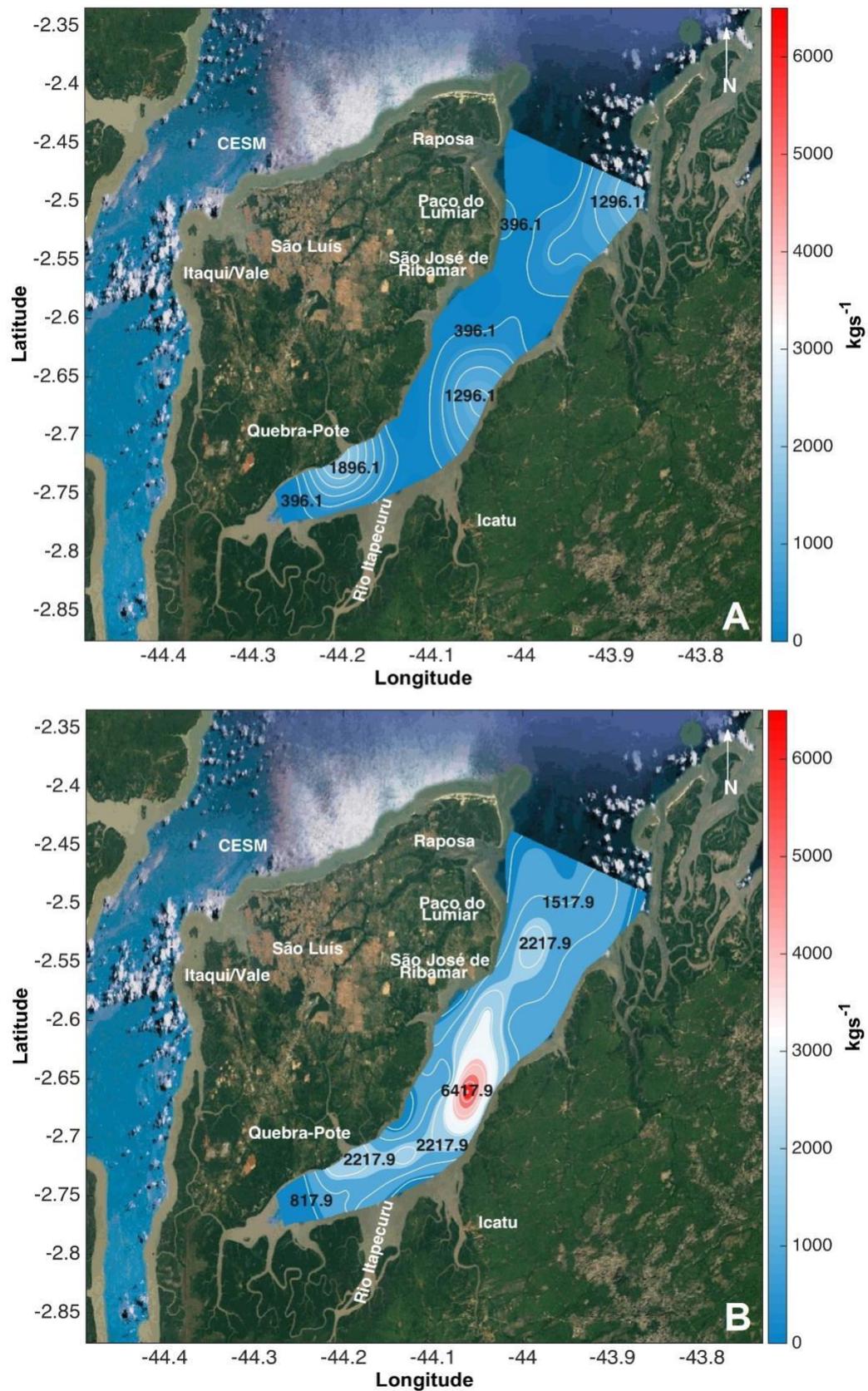


Figura 45: Distribuição horizontal do fluxo de MPS ao longo do CEASJ. A – Estação de chuva; B – Estação de seca.

b) Distribuição temporal

Analisando as concentrações de MPS nos perfis Eulerianos, observar-se que o perfil temporal de MPS ao longo da interface ZM/ZC (Figura 46A), na estação de chuva, variou de 5,0 a 135,2 mgL⁻¹, com valor médio de 33,0 mgL⁻¹, cujas maiores concentrações foram encontradas junto ao fundo, próximo às estofas de maré. Na interface ZR/ZM, as concentrações variaram de 8,2 a 254,0 mgL⁻¹, com média de 85,0 mgL⁻¹, onde os maiores valores foram observados em maré enchente, junto ao fundo (Figura 46B).

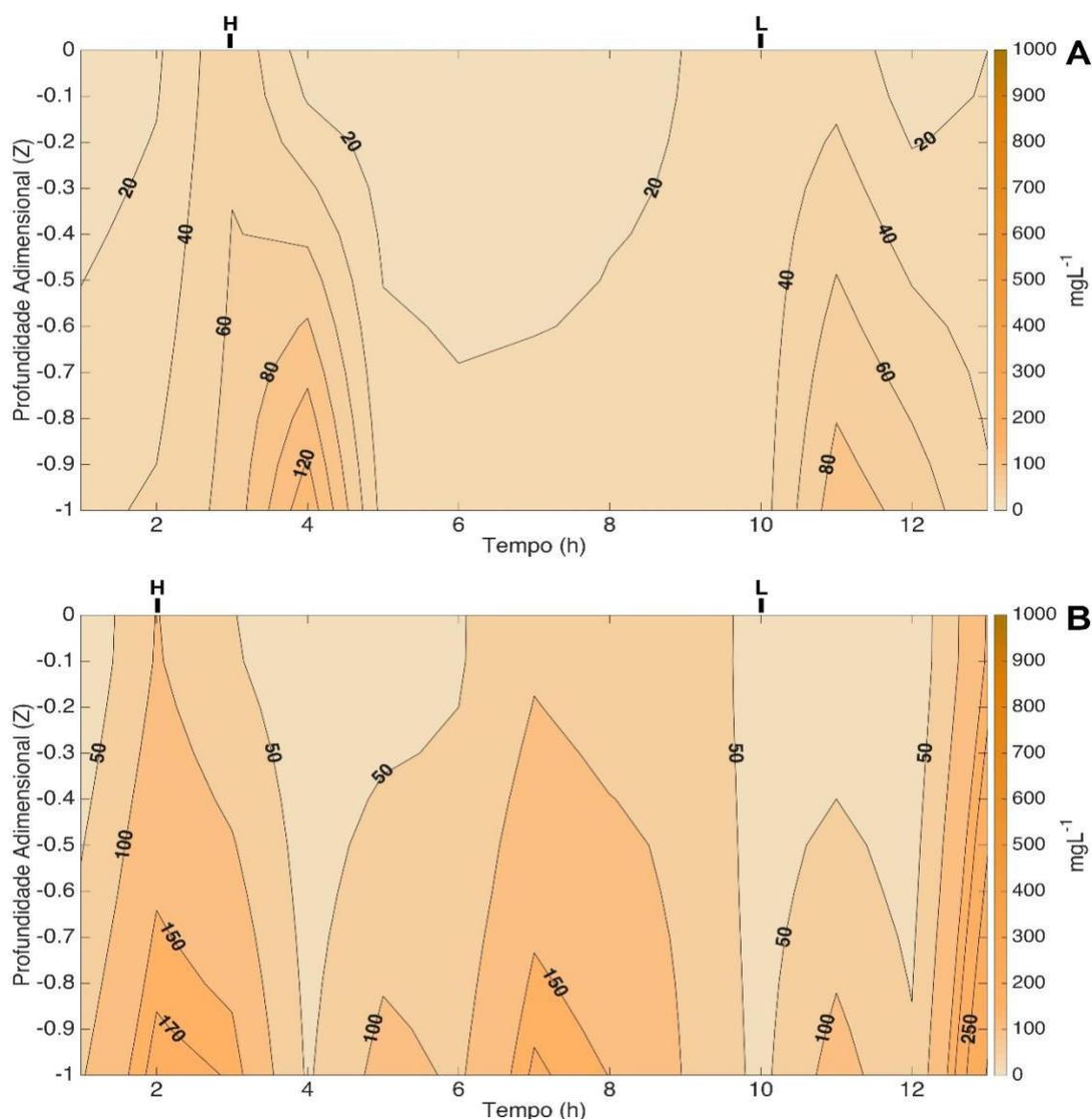


Figura 46: Perfil temporal do MPS ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13h), para a interface ZM/ZC (A) e interface ZR/ZM (B), durante a estação de chuva. As letras H e L indicam os instantes de maré alta e maré baixa, respectivamente.

Para a estação de seca, na interface ZM/ZC, as maiores concentrações de MPS foram observadas em maré enchente, chegando a valores de $185,0 \text{ mgL}^{-1}$ (Figura 47A). Na interface ZR/ZM, foi observado os maiores valores de MPS, variando entre $40,5$ a $952,9 \text{ mgL}^{-1}$, com média de $299,8 \text{ mgL}^{-1}$ (Figura 47B), evidenciando as concentrações de MPS observadas na distribuição espacial, que através da maior atuação da onda de maré estuário acima ocasionou ressuspensão do material de fundo ou erosão de margens no período de balanço hídrico negativo.

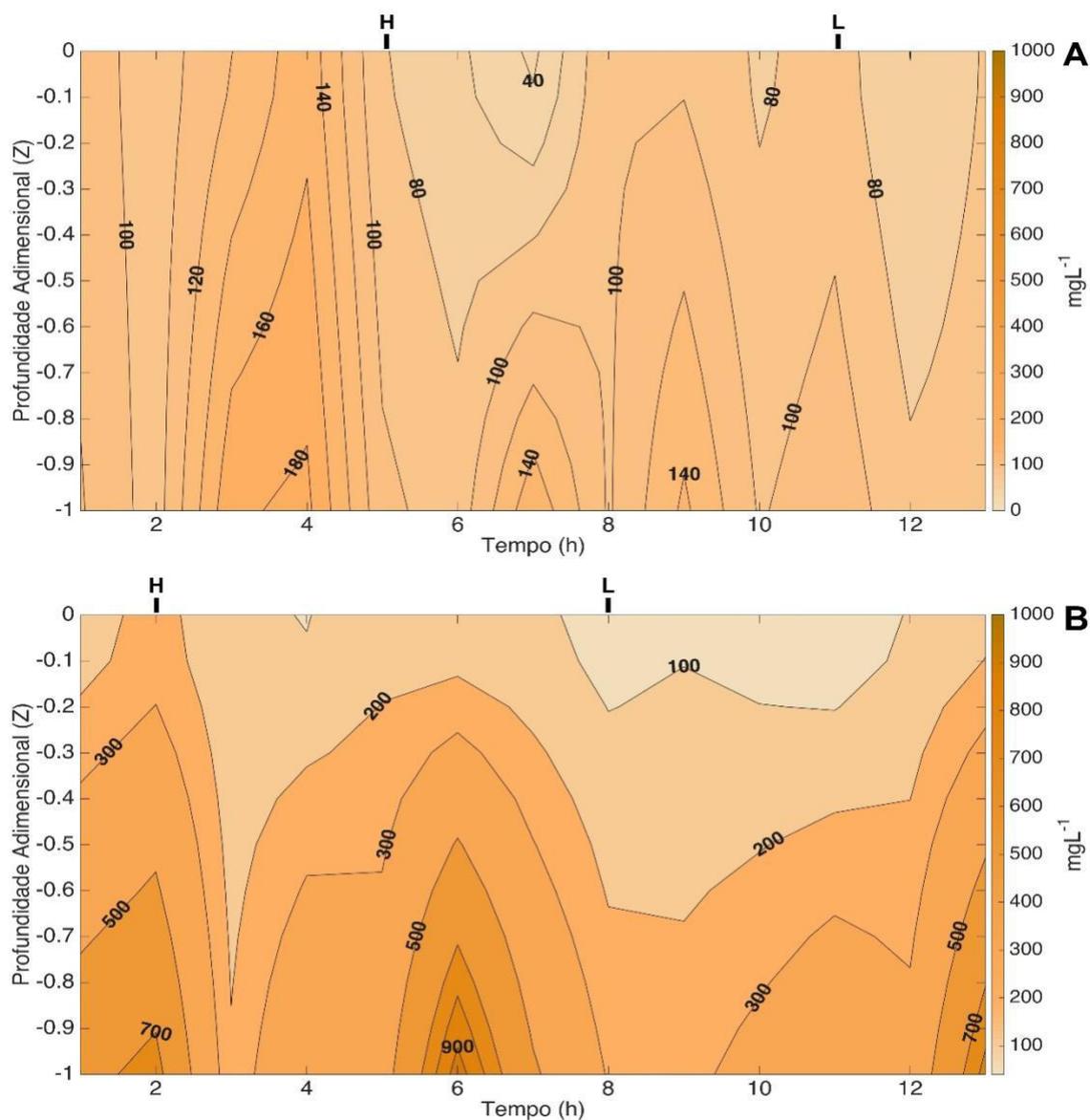


Figura 47: Perfil temporal do MPS ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13h), para a interface ZM/ZC (A) e interface ZR/ZM (B), durante a estação de seca. As letras H e L indicam os instantes de maré alta e maré baixa, respectivamente.

6. DISCUSSÕES

6.1. Estuários dos rios Perizes e Sampaio

6.1.1. Estação de chuva

Os gradientes espaciais das variáveis de estado durante a estação chuvosa (Tabelas 4 e 5), em marés de sizígia e quadratura, mostraram no ano de 2014 a presença de águas mais quentes (29,9 °C) e menos salinas (12,4 gkg⁻¹), enquanto que para o ano de 2015, devido a uma maior penetração da onda de maré no sistema estuarino, observou-se a presença de águas mais frias (0,7 °C abaixo da média) e salinas (31,5 gkg⁻¹). Assim, presume-se que a propagação da onda de maré em evento de maré de sizígia torna os gradientes horizontais e verticais de salinidade e temperatura homogêneos, levando a uma inversão da força de gradiente de pressão baroclínica, proporcionando um avanço de águas marinhas estuário acima. Lefèvre et al. (2017) em estudo realizado no CESH, que possui ligação com o CEASJ, mostraram que durante a estação de chuva as águas são menos salinas e mais quentes, corroborando com o período chuvoso de 2014 deste estudo, sugerindo um maior fluxo fluvial.

O transporte de volume por unidade de área, para a estação chuvosa em maré de quadratura (Figura 8A), apresentou anomalias positivas para o estuário do rio Sampaio e CEASJ, enquanto que para o estuário do rio Perizes observou-se anomalias negativas. Ou seja, este comportamento denota um maior transporte de volume no ano de 2015 (Tabela 6), que associado aos valores negativos de salinidade em toda região (Figura 8B), caracterizaram uma maior permanência de água marinha, em decorrência de uma menor influência fluvial no período chuvoso de 2015. Em condições de maré de sizígia, as anomalias positivas observadas para o transporte de volume (Figura 9A) evidenciam que no ano de 2014 o transporte de volume foi 32,4% superior quando comparado aos valores observados no ano de 2015. Estas ΔT_v quando associadas às ΔS negativas, assim como em maré de quadratura, caracterizaram águas mais salinas em 2015 (Tabela 5), devido a uma maior propagação da onda de maré estuário acima, elevando a salinidade do ambiente, fato não característico ao período de balanço hídrico positivo.

Em geral, as Δ MPS (Figura 8C e 9C) foram positivas, indicando que as maiores concentrações de MPS foram observadas no ano de 2014, gerando um acréscimo de 49,7% e 60,9% quando comparadas às concentrações observadas em 2015, em maré de quadratura e sizígia, respectivamente.

Dinamicamente, as concentrações de MPS no biênio 2014-2015 (Tabela 4 e 5), durante a estação de chuva, apresentaram os maiores valores no estuário do rio Perizes e em seu entorno (próximo à confluência de dois tributários ao rio e próximo à desembocadura), devido à diminuição da razão de aspecto (área da seção molhada) e das características geomorfológicas de suas margens que, minimizam a intensidade das correntes e transporte de volume através da ação do atrito lateral, ocasionando uma retenção/deposição de materiais. Um outro fator que deve ser considerado é a ligação entre o CESH e o CEASJ através do canal do estreito dos Mosquitos, gerando um *input* de MPS nos rios Perizes e CEASJ (Figura 9C). O aumento das concentrações de MPS no rio Perizes em detrimento dos menores transportes de volume observados para o biênio, sugerem um barramento hidráulico do MPS devido a uma mudança abrupta dos gradientes de densidade (minimização dos fluxos fluviais em decorrência de menores períodos de chuva e maior permanência da massa de água marinha no sistema), diminuindo a capacidade de transporte dos sedimentos em ambas as marés. Tal comportamento, pode acelerar o processo de sedimentação e afetam o balanço morfodinâmico na região costeira adjacente, podendo ocasionar na perda da faixa de praia, devido à ação das ondas. Azevedo, Castro e Santos (2016) corroboram os resultados deste estudo, mostrando que há um decréscimo de $1,6 \text{ cm ano}^{-1}$ entre a desembocadura do CEASJ e a região litorânea de São Luís do Maranhão.

Os fluxos de MPS (Tabela 6) que a chegam ao CEASJ oriundos dos estuários dos rios Perizes e Sampaio não conseguem chegar a região costeira adjacente, devido à falta de competência de transporte do regime fluvial face a elevada hidrodinâmica do regime de macromaré. O MPS que chega ao CEASJ em maré de quadratura fica aprisionado na região, sendo depositado no fundo, o que proporciona o aparecimento de ilhas de sedimentação que dificultam a navegação e impedem que pequenos fluxos de água sejam transportados para plataforma continental interna. Entretanto, em maré de sizígia o MPS depositado em maré de quadratura é remobilizado e entra novamente nos canais estuarinos dos rios Perizes e Sampaio.

As ΔTr positivas (Figura 8D e 9D) em ambas as marés, indicam que houve uma maior permanência de substâncias orgânicas e inorgânicas durante o ano de 2014, fato corroborado pelos gradientes horizontais do *Pad* (Figura 7) e salinidade, bem como as concentrações de MPS (Tabela 4 e 5). Durante o ano de 2014, os *Pad's* foram maiores que 60%, associados a *Tr's* maiores que 4 horas, salinidades máximas de $13,4 \text{ gkg}^{-1}$ e concentrações de MPS que chegaram a $1,4 \times 10^3 \text{ mgL}^{-1}$, denotando uma maior competência fluvial no transporte de sedimentos em suspensão, enquanto que no ano de 2015 os *Pad's* menores que 20%, acarretam em *Tr's* menores que 1 hora (Figura 7), devido à modulação da maré, denotando uma característica de seca para o período.

Park (2007), em estudo realizado na península coreana, encontrou concentrações médias de MPS que são uma ordem de grandeza menores que as encontradas no período chuvoso deste estudo, e constatou que haviam várias entradas de água doce, fortes correntes de maré e tensão de cisalhamento do vento elevada, indicando esses como os principais fatores na variação espacial e sazonal (temporal) do MPS. Pereira et al. (2010) em estudo feito no estuário do rio Caravelas (BA), observaram que as concentrações de MPS no período chuvoso foram uma ordem de grandeza menor que as observadas neste estudo, estes autores observaram que o regime de maré teve a maior influência nas concentrações de MPS, com pouca vazão fluvial e associados à água mais salinas e menos fria, indicando uma maior propagação da onda de maré.

6.1.2. Interface Chuva/Seca

Na interface chuva/seca, os índices TS sugerem fluxos fluviais menores, em ambas as marés para o ano de 2014 (Tabela 4), comportamento esperado para o período, considerando a diminuição das precipitações e uma maior atuação da massa de água costeira no sistema (DIAS; CASTRO; LACERDA, 2013), apresentando temperaturas médias de $29,6 \text{ }^\circ\text{C}$, e um acréscimo na salinidade média de 32% ($18,4 \text{ gkg}^{-1}$). Durante o ano de 2015 (Tabela 5), o mesmo comportamento foi observado, quando a presença de águas tipicamente estuarinas ($29,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $22,5 \text{ gkg}^{-1}$) refletiram os menores fluxos fluviais. Entretanto, ao compararmos este comportamento com a estação de chuva do ano de 2015, observou-se um acréscimo de $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ na amplitude térmica e um decréscimo de 9 gkg^{-1} na salinidade, denotando

mais uma vez a minimização dos fluxos fluviais associados aos baixos índices de precipitações na região da bacia de drenagem.

As ΔT_v , em maré de quadratura (Figura 10A), apresentaram o mesmo comportamento observado na estação chuvosa, com predominância de anomalias positivas no estuário do rio Sampaio e CEASJ, e anomalias negativas no estuário do rio Perizes. Em termos percentuais, o transporte de volume do ano de 2014 foi 20,8% maior o que do ano de 2015 (Tabela 6). Em maré de sizígia, foram observados os maiores valores do transporte de volume, apresentando anomalias positivas em toda a região estudada. Entretanto, foi possível observar anomalias negativas no estuário do rio Sampaio (Figura 10A). Desta forma, os maiores transportes de volume ocorreram no ano de 2014, cerca de 55,1% maiores que os fluxos observados em 2015, com valores na ordem de $3,4 \times 10^3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Ao compararmos os transportes obtidos neste estudo com um grande curso de água, temos que no CEASJ foram duas ordens de grandeza menores que aos observados no estuário do rio Amazonas (OLTMAN, 1968; MULLER-KARGER; MCCLAIN; RICHARDSON, 1988; WISSER et al., 2010).

As ΔS (Figura 10B) sob maré de quadratura, diferente da estação anterior, apresentaram-se com valores positivos, no entanto, muito próximos de zero, cujos valores dos dois anos foram tipicamente estuarinos (17.9 a 20.2 gkg^{-1}) (Tabelas 4 e 5), denotando pouca variação entre as salinidades da maré de quadratura. Entretanto, as ΔS (Figura 11B) em maré de sizígia apresentam valores negativos, indicando uma provável influência da massa de água costeira para o ano de 2015, corroborando com a estação anterior, cujas águas salinas dominaram.

As ΔMPS (Figura 10C) em maré de quadratura, indicam que as concentrações de MPS em 2014 foram 46,2% maiores que as observadas em 2015 (Tabelas 4 e 5). Entretanto, nas proximidades do ponto 2 (estuário do rio Perizes), foi possível verificarmos anomalias negativas, muito provavelmente, ligadas à perda de profundidade e maior atuação da maré no ano de 2015, o que pode ter modificado localmente a razão deposição/erosão. Assim como observado durante a estação de chuva, o estuário do rio Perizes apresentou as maiores concentrações de MPS, onde os valores médios observados foram de $306,0 \text{ mgL}^{-1}$ e $220,3 \text{ mgL}^{-1}$, para o biênio 2014-2015, respectivamente. Em maré de sizígia, as maiores concentrações de MPS também foram observadas nesta estação, no ano de 2014 (91% maiores que 2015), evidenciando gradientes de anomalias positivas (Figura 11C), principalmente para os

estuários dos rios Perizes e Sampaio, quando as maiores concentrações ocorreram (Tabela 4). Ao compararmos os valores médios com os resultados da estação de chuva, temos um aumento de 76,3% em relação ao ano de 2014. Historicamente, este período apresenta uma diminuição das precipitações se comparadas aos períodos de balanço hídrico positivos, sugerindo que o aumento das concentrações de MPS estão ligadas à propagação da onda de maré nas planícies de inundação do rio, o que altera as taxas de erosão/deposição dos sedimentos em suspensão.

Com a perda de competência de transporte por parte do fluxo fluvial e uma maior atuação da onda de maré estuário acima, as concentrações de MPS chegaram a $5,6 \times 10^3 \text{ mgL}^{-1}$, resultando em fluxos de MPS de $1,5 \times 10^4 \text{ kgs}^{-1}$. Desta forma, o aumento dos fluxos de MPS observado em 2014 sugerem um retrabalhamento do material depositado durante a estação de chuva e/ou uma maior erosão das margens durante a penetração da onda de maré. Em 2015, isto ocorreu em menor escala, devido a atipicidade verificada no período chuvoso, o que levou a menores concentrações de MPS.

No entanto, mesmo com a diferença do transporte de volume e nas concentrações de MPS no biênio, as ΔTr (Figura 10D) em maré de quadratura mostraram-se próximas de zero, denotando praticamente o mesmo tempo de residência para o período avaliado (Tabela 4 e 5). Em maré de sizígia, as variáveis de estado e as propriedades hidrodinâmicas são corroboradas pelo Pad e Tr , cujo percentual de água doce variou entre 25% e 60% e o Tr variou entre 1,5 e 3,5 horas (Figura 7).

Os maiores transportes de volumes associados aos percentuais de água doce maiores que 40%, mostram que a atuação da maré foi bastante significativa, elevando o volume de água total, fortalecendo a formação de uma barreira hidráulica que modifica o campo de massa de forma considerável, levando a uma inversão da força de gradiente de pressão baroclínica e conseqüentemente leva a uma maior entrada de água costeira rio acima. Em estudo recente no estuário do rio Urumajó (PA), Asp et al. (2016) observaram que a intrusão de sal rio acima ocorre devido a entrada da maré e diminuição dos fluxos fluviais em maré de sizígia. Schettini (2002), Vaz e Dias (2008), para o estuário do rio Itajaí-Açu (Brasil) e para o canal estuarino de Espinheiro (Portugal), respectivamente, encontraram um comportamento similar, ou seja, quando a descarga do rio é fraca, a penetração de água marinha vai mais a

montante, principalmente em maré de sizígia, e com o aumento da descarga fluvial, a água doce amplia sua influência a jusante.

6.1.3. Estação de seca

Para a estação de seca, a diminuição dos fluxos fluviais é percebida pelas variáveis de estado apresentadas nas Tabelas 4 e 5. Em ambas as marés, observa-se o avanço da massa de água costeira (DIAS; CASTRO; LACERDA, 2013) estuário acima, onde as temperaturas médias variaram entre 28,2 e 29,2 °C associadas às salinidades médias variando entre 29,0 e 34,3 gkg⁻¹, para os anos de 2014 e 2015, respectivamente. Este comportamento sugere uma maior atuação de águas costeiras estuário acima durante todo o ano de 2015, como foi visto nos outros períodos sazonais. Estes valores foram muito próximos aos encontrados por Lefèvre et al., (2017) no CESM, durante o período seco, quando foram observadas águas mais salinas e mais frias.

No período de balanço hídrico negativo, em condições de maré de quadratura, foram observadas $\Delta T v$ negativas (Figura 12A), demonstrando que o transporte de volume durante o ano de 2015 foi 6,8% maior que o observado em 2014 (Tabela 6). Em maré de sizígia, a $\Delta T v$ (Figura 13A) apresentou valores positivos para o estuário do rio Sampaio e CEASJ, entretanto para o estuário do rio Perizes foi possível observar anomalias negativas, cujo transporte de volume médio foi 15% maior em 2014 para toda a região. Ao compararmos o transporte de volume da estação de seca com a estação de chuva de 2015, período que houve uma maior atuação de águas marinhas, observamos que foram 22% maiores para a estação seca.

As ΔS em evento de maré de quadratura, apresentaram valores negativos (Figura 12B), caracterizando o domínio de águas marinhas em 2015, visto que a salinidade média observada foi de 34,5 gkg⁻¹ (Tabela 5). No entanto, ao observamos os gradientes horizontais de salinidade em 2014, temos a presença de águas salinas, com valor médio da ordem de 29,4 gkg⁻¹ (Tabela 4). Em maré de sizígia, a ΔS mesmo apresentando valores positivos (Figura 13B), mostram-se próximos aos valores observados em quadratura, com características de massa de água costeira (típica região de frente de pluma) com valores médios de 28,5 e 34,3 gkg⁻¹, para o biênio 2014-2015, respectivamente.

Ao analisarmos as Δ MPS (Figura 12C), em maré de quadratura, os valores distribuíram-se em positivos e negativos, ressaltando que as concentrações do ano de 2015 foram 69,1% maiores em relação as observadas em 2014 (Tabela 4 e 5). O aumento das concentrações de MPS se deve, muito provavelmente, a intensificação das correntes promovendo o retrabalhamento do material preteritamente depositado e/ou oriundo do retrabalhamento das margens, mais evidente no estuário do rio Perizes. Em maré de sizígia, a Δ MPS (Figura 13C) comportou-se de maneira semelhante à maré de quadratura, apresentando valores positivos e negativos ao longo da região avaliada, quando as concentrações de MPS em 2014 foram 2,5% maior que as observadas em 2015 (Tabela 4 e 5).

Diferentemente das estações anteriores, onde as maiores concentrações de MPS foram observadas no estuário do rio Perizes, o CEASJ apresentou as maiores concentrações de MPS durante a estação de seca, sugerindo a formação de uma Zona de Máxima Turbidez (ZMT). Em maré de quadratura, observou-se que mais de 50% dos fluxos de MPS não chegam ao CEASJ, ficando aprisionado nos sistemas estuarinos, enquanto que em maré de sizígia, mais da metade dos fluxos de MPS do CEASJ advém dos dois estuários.

O estuário do rio Amazonas pode ser considerado com um *outlier*, devido a sua alta capacidade de transporte de materiais no gradiente continente-oceano e transportes de volume que podem chegar a mais de um Sverdrup. Assim como o estuário do rio Amazonas, os estuários dos rios Perizes e Sampaio são influenciados por um regime de macromaré, o que torna a comparação das descargas de MPS interessante. Partindo desta premissa, durante a estação de chuva, os fluxos observados neste estudo são três ordens de grandeza menores em maré de quadratura e duas ordens de grandeza menores em maré de sizígia, quando comparados aos resultados obtidos por Filizola et al. (2009), Filizola e Guyot (2011) e Guyot, Filizola e Laraque (2005) que chegam a $800 \times 10^6 \text{ tonano}^{-1}$ ($2,5 \times 10^4 \text{ kgs}^{-1}$). Na interface chuva/seca, quando foram observados os maiores fluxos de MPS, a variabilidade temporal foi 40% menor que os fluxos de MPS observados no estuário do rio Amazonas. Durante a estação seca, os autores observaram que para o estuário do rio Amazonas que o fluxo sedimentar decresce, entretanto, sua variabilidade pode continuar na mesma ordem de grandeza da estação chuvosa. Por outro lado, os fluxos de MPS observados neste estudo variam de duas a três ordens de grandeza menores em maré de quadratura e sizígia.

A maior entrada de água marinha, devido às minimizações dos fluxos fluviais, acaba refletindo também no tempo de residência, cujas ΔTr (Figura 12D e 13D) foram positivas e menores que 2 horas, em ambas as marés, as quais resultaram em percentuais de água doce menores que 30% (Figura 7), sugerindo que a estação de chuva de 2015 apresentou característica de seca.

6.2. Complexo Estuarino Arraial-São José

Ao longo do Complexo Estuarino Arraial São José (CEASJ), na estação de chuva, o gradiente espacial de temperatura variou entre 29,2 e 30,7 °C, com um aumento estuário acima, apresentando uma quase homogeneidade na coluna de água. A estrutura salina apresentou variabilidade característica de águas estuarinas, variando de 8,9 a 27 gkg⁻¹, ocorrendo uma minimização gradativa estuário acima, associada à uma quase homogeneidade vertical. A variabilidade observada da estrutura termohalina durante o período chuvoso, mostra um importante aporte fluvial, uma vez que as águas oriundas da drenagem continental são mais quentes e menos salinas que às do oceano Atlântico adjacente. Durante o período seco, observou-se a presença de águas mais frias (28,0 a 29,0 °C) e mais salinas (29,3 a 34,8 gkg⁻¹), e com densidade variando de 18,0 a 22,2 kgm⁻³, cujas estruturas verticais apresentaram-se homogêneas. Este comportamento, muito provavelmente, foi devido a uma menor contribuição fluvial que facilita a propagação da onda de maré estuário acima, levando a uma mudança da componente baroclínica da força de gradiente de pressão, proporcionando o avanço de águas marinhas rio acima. Lefèvre et al. (2017) em estudo realizado no Complexo Estuarino de São Marcos (MA) observaram que no período chuvoso as águas são menos salinas e mais quentes sugerindo um maior fluxo fluvial, enquanto que no período seco as águas são mais salinas e mais frias mostrando a ascensão de águas marinhas, corroborando com os resultados obtidos neste estudo.

Analisando os gradientes temporais das variáveis de estado, pudemos observar na estação de chuva, temperaturas médias variando ao longo do ciclo completo de maré semidiurna entre 29,5 °C e 29,9°C, para as interfaces ZM/ZC e ZR/ZM, respectivamente. Os perfis Eulerianos de salinidade mostraram características típicas de águas estuarinas, corroborando os resultados observados

na abordagem Lagrangiana, cujos gradientes nas interfaces ZM/ZC e ZR/ZM foram de $\sim 8,9 \text{ gkg}^{-1}$ e $\sim 7,9 \text{ gkg}^{-1}$, respectivamente. Na estação de seca, a variação da temperatura em ambas as interfaces se apresentou praticamente inexistente, com valores médios de $\sim 28,3 \text{ }^\circ\text{C}$, enquanto que a salinidade variou entre 30,0 e $34,1 \text{ gkg}^{-1}$, com máximos observados na interface ZM/ZC. O gradiente de salinidade observado na estação de chuva durante o período dos fundeios foram similares ao encontrado por Schettini et al. (2016) no período seco ($\sim 10,0 \text{ gkg}^{-1}$) do estuário do rio Capibaribe (PE) mostrando a diluição da água do mar com a água doce. No entanto, para a estação de seca deste estudo, não foi possível observar esta diluição, visto que as salinidades foram maiores que 30 gkg^{-1} , característica de água de frente, corroborando o comportamento observado por Pereira et al. (2010), para o estuário do rio Caravelas (BA), que ressaltam um menor comportamento fluvial no sistema estuarino, facilitando a intrusão e permanência de águas de plataforma continental no interior no estuário.

As velocidades longitudinais durante o período de balanço hídrico positivo no CEASJ, para a interface ZM/ZC, não tiveram diferenças significativas em marés vazante ($u > 0$) e enchente ($u < 0$), com máximos de $1,30 \text{ ms}^{-1}$ e $-1,44 \text{ ms}^{-1}$, respectivamente, enquanto que para a interface ZR/ZM as velocidades máximas em maré enchente ($-1,19 \text{ ms}^{-1}$) foram 18% mais intensas que as velocidades máximas observadas em vazante ($0,97 \text{ ms}^{-1}$). Os perfis médios temporais de velocidade, em ambas as interfaces, apresentaram movimentos predominantes de enchente (estuário acima), ou seja, as correntes de enchente predominam sobre as de vazante e ao considerarmos a velocidade residual, obtivemos valores de $-0,02 \text{ ms}^{-1}$ e $-0,11 \text{ ms}^{-1}$. Durante a estação de seca, o comportamento é similar à estação de chuva na interface ZM/ZC com praticamente as mesmas intensidades de vazante e enchente (simetria), no entanto, com valores menos intensos, apresentando máximos de $0,80 \text{ ms}^{-1}$ e $-0,86 \text{ ms}^{-1}$. Pudemos observar para o perfil médio da velocidade movimentos unidirecionais (estuário abaixo), típico de estuário bem misturado, com velocidade residual de $0,03 \text{ ms}^{-1}$. Na interface ZR/ZM, a variação temporal da velocidade longitudinal foi mais elevada, cujas velocidades máximas em maré vazante ($1,24 \text{ ms}^{-1}$) foram 12% mais energéticas que as velocidades máximas observadas em maré enchente ($-1,09 \text{ ms}^{-1}$). O perfil médio da velocidade apontou movimentos com predominância de enchente, com respectiva velocidade residual de valor $-0,04 \text{ ms}^{-1}$ (estuário acima).

Os movimentos predominantes de enchente ou de vazante dos perfis médios da velocidade apresentados neste estudo, foram observados também por Andutta et al. (2013), próximo a boca do estuário do rio Peruípe (BA), com velocidade residuais mais elevadas. Os autores também observaram, na parte mais interior do rio Peruípe, uma circulação bidirecional (circulação estuarina clássica) dos perfis médios da velocidade, típico de um estuário parcialmente misturado.

Na estação de seca, na interface ZR/ZM os componentes longitudinais da velocidade (em ambas as marés) foram maiores quando comparado à interface ZM/ZC, como pode ser observado na figura 34. Este fato pode estar atrelado às diferenças nas seções molhadas em que os fundeios foram realizados, ou seja, a largura da seção transversal da interface ZR/ZM é menor que a largura da interface ZM/ZC, que está localizada na parte mais costeira do CEASJ. A diminuição da seção molhada (afunilamento do canal) pode aumentar a intensidade das correntes. Em maré vazante, a intensidade foi mais elevada porque, muito provavelmente, houve uma soma dos vetores marinho e fluvial.

As maiores intensidades de correntes no CEASJ foram encontradas durante o período chuvoso, na interface ZM/ZC. Ao compararmos os resultados obtidos neste estudo com os observados por Asp et al. 2012, na região mais costeira do estuário do rio Taperaçu (PA), durante a estação de chuva, as velocidades observadas no CEASJ foram 27% e 32% menos energéticas, para maré enchente e vazante, respectivamente. Ainda em seu estudo, os autores mostram que na parte mais interna do estuário, as velocidades de corrente são mais intensas, corroborando os resultados do período seco do CEASJ. O padrão de circulação para o estuário do rio Taperaçu deve-se essencialmente à morfologia, tendo em vista que a descarga fluvial é insignificante, o que não é o caso deste estudo no CEASJ, visto que o comportamento de maiores intensidades de corrente na interface ZR/ZM não foi observado durante a estação de chuva, por conta do importante aporte fluvial, diminuindo a competência da maré estuário acima.

Os transportes de volume observados ($2,8 \times 10^3$ a $8,4 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) na estação de chuva no CEASJ, quando associados às salinidades tipicamente estuarinas mostram a grande contribuição fluvial da bacia de drenagem para o CEASJ, cujo volume de água total variou em duas ordens de grandeza (10^7 a 10^9) e o percentual de água doce chegou a quase 80%, associados a tempos de residência menores que 5 horas. Durante a estação seca, os transportes de volume foram 25 %

mais elevados ($5,0 \times 10^3$ a $1,2 \times 10^5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) em relação à estação chuvosa, que associados às águas mais salinas e frias encontradas ao longo do CEASJ, caracterizam a intrusão de massa de água costeira (DIAS; CASTRO; LACERDA, 2013), visto que o percentual de água doce foi inferior a 20%, gerando tempos de residência menores que 1,5 horas. Este comportamento dos fluxos estuarinos, sugere uma modulação pela maré. O transporte de volume, em ambos os períodos, diminui estuário acima. No entanto, nota-se próximo à radial 6 (interface ZR/ZM) um ligeiro aumento nas descargas instantâneas, chegando a valores da ordem de $2,5 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, que pode ser explicado por um possível barramento hidráulico na região observado por Santos et al. (2017, no prelo).

Quando comparamos os transportes de volume médios apresentados neste estudo com ambientes influenciados por micromaré localizados no Brasil, como a baía de Tijucas (SC) e o estuário do rio Paraíba do Sul (RJ), os valores chegam a ser três ordens de grandeza e uma ordem de grandeza maiores, respectivamente (ALMEIDA; REZENDE; SOUZA, 2007; MIGUENS et al., 2016; SCHETTINI et al., 2010). Em ambientes de mesomaré, como o estuário do rio São Francisco (SE/AL) e o estuário do rio Jaguaribe (CE), que apresentam valores de $3,7 \times 10^3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e $2,6 \times 10^3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, respectivamente, observamos que estão uma ordem de grandeza maior (CAVALCANTE; MIRANDA; MEDEIROS, 2017; DIAS et al., 2016). Ao compararmos as descargas encontradas neste estudo à estuários influenciados macromaré, como o estuário do rio Amazonas, que descarrega em torno de $1,8 \times 10^5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, e do rio Araguari (AP) de $4,0 \times 10^3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, temos que os valores são uma ordem de grandeza menor em relação ao Amazonas e uma ordem de grandeza maior que o Araguari (CUNHA et al., 2014; WISSER et al., 2010). A comparação com outros estuários do mundo se torna ainda mais interessante, devido às diversas diferenças naturais e antrópicas que podem possuir. Partindo desta ideia, os transportes observados neste estudo são: da mesma ordem de grandeza que os observados no estuário do rio Yangtze (China), que é considerado o terceiro rio mais longo do mundo (SONG; WANG, 2013; WAN; WANG, 2017; WANG; ANDUTTA, 2013); duas ordens de grandeza maiores que as do estuário do rio Hudson (EUA), que pode sofrer um aumento devido a eventos de tempestades (RALSTON; GEYER; WARNER, 2012; WARNER; GEYER; LERCZAK, 2005); e também duas ordens que grandeza maiores que as observadas no estuário do rio Macuse (Moçambique/Leste

da África), que tem sido usado para desenvolvimento rural e projetos portuários do governo (MIGUEL; CASTRO; NEHAMA, 2017).

Ao observarmos a variação da velocidade longitudinal média em detrimento à oscilação da superfície livre, ao longo dos perfis Eulerianos, temos que as velocidades lideram estas oscilações, com os extremos de enchente e vazante ocorrendo antes das marés alta e baixa, respectivamente. Na interface ZM/ZC e ZR/ZM, da estação de chuva, as defasagens foram de 3 e 4 horas, respectivamente, enquanto que durante a estação de seca foram de 3 horas em ambas as interfaces. Nos dois períodos sazonais, em geral, a oscilação da superfície livre lidera a variação da salinidade média em ambas as interfaces, com defasagem de 1 hora. Com base nestes resultados, podemos inferir que as velocidades médias no tempo lideram as salinidades médias, ou seja, os extremos de velocidade ocorrem antes dos extremos de salinidade. Estes fatos podem ser observados no estuário do rio Caeté (PA) que apresentou defasagens similares a este estudo e atrasos de 3 h entre a curva de salinidade média e velocidade (CAVALCANTE; FEARY; KJERFVE, 2013).

O tipo de sistema estuarino determinado para a interface ZM/ZC no CEASJ durante a estação de chuva, de acordo com a classificação do diagrama Estratificação-Circulação de Hansen e Rattray (1966), foi do tipo 2a (parcialmente misturado e fracamente estratificado), com valor transporte de sal estuário acima cerca de 99% (parâmetro $\nu = 0,99$), indicando uma transição entre os tipos 2a e 1a, ocasionando uma mistura quase em sua totalidade gerada por difusão turbulenta. Esta mesma classificação foi observada por Cavalcante, Feary e Kjerfve (2013) em trabalho realizado no estuário do rio Caeté (PA), com o percentual relativo do processo difusivo para o transporte de sal estuário acima de aproximadamente 100%. Para a interface ZR/ZM o sistema estuarino passou a ser classificado do tipo 1a (bem misturado e fracamente estratificado), com valor do parâmetro ν igual a 1, assim como apresentado por Baltazar, Menezes e Rollnic (2011), Freitas, Menezes e Schettini (2015) e Pereira et al. (2010) em seus trabalhos, mostrando que estuários deste tipo o transporte de sal estuário acima é somente por difusão turbulenta. Para a estação de seca, ambas as interfaces foram classificadas do tipo 1a (bem misturado e fracamente estratificado), cujos valores do parâmetro ν foram iguais a 1. Nesta classificação o gradiente vertical de salinidade é praticamente zero, indicando que o estuário é forçado predominantemente pela maré, como mostrado anteriormente na figura 30 (DYER, 1997; MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002).

Corroborando estas classificações estuarinas, a interface ZM/ZC da estação chuvosa com base no número de Richardson por camada apresentou em geral condições de fraca estabilidade vertical, havendo a formação de estratificação em torno dos instantes de estufa de maré, enquanto que na interface ZR/ZM apresentou condições de instabilidade vertical. Este mesmo comportamento de instabilidade vertical foi observado para ambas as interfaces no período seco, indicando que os processos de mistura dominaram. Estas condições também foram encontradas para o estuário do rio Caeté (PA) em maré de sizígia, onde um estado instável foi a condição predominante ao longo do estuário (CAVALCANTE; FEARY; KJERFVE, 2013). DIAS et al. 2016 encontrou este mesmo comportamento para o estuário do rio Jaguaribe (CE) no período seco, onde a maior atuação da maré gerou instabilidade vertical.

Corroborados pela variação temporal do número de Richardson por camada e as classificações do diagrama Estratificação e circulação, podemos sugerir que as modulações de marés semidurnas apresentadas não tiveram energia potencial suficiente para provocar a erosão da haloclina, visto que a mistura vertical já era muito intensa. Para título de comparação os valores de anomalia de energia potencial foram duas ordens de grandeza menores que o trabalho de Andutta et al. (2013) cuja modulação foi quinzenal, não havendo erosão da haloclina.

Para o transporte advectivo de sal, a parcela dominante foi a descarga fluvial em todos os períodos. Durante a estação de chuva, na interface ZM/ZC, a parcela da descarga fluvial apresentou sentido estuário acima juntamente com a deriva de Stokes e a corrente de maré apresentou um caráter advectivo. O componente de bombeamento da maré, que normalmente seria orientado estuário abaixo, age aqui como um termo contra-dispersivo. A defasagem entre $u(t)$ e $h(t)$ e o atraso de $s(t)$ em relação à $u(t)$ de cerca de 3 horas faz com que o termo de correlação da maré seja orientado estuário abaixo. Na interface ZR/ZM a parcela de descarga de água doce apresentou novamente sentido estuário acima, enquanto que a deriva de Stokes e a corrente de maré apresentaram caráter advectivo. Em ambas as interfaces a parcela dominante apresentou-se de natureza dispersiva, que podem ter sido provocados pelo represamento de água no interior do estuário causado pela ação do vento na região costeira adjacente, e com base nesses resultados, através do transporte total de sal sugere-se que o estuário funcionou com um importador de sal.

Durante a estação de seca, na interface ZM/ZC a descarga fluvial apresentou sentido estuário abaixo, seguido pela deriva de Stokes, também de natureza advectiva. A deriva de Stokes está relacionada ao transporte de massa gerado pela propagação de maré no estuário, devido à inclinação do fundo. Para a interface ZR/ZM a descarga fluvial voltou a apresentar sentido estuário abaixo, juntamente com a deriva de Stokes. A inversão de sinal observada no transporte de Stokes pode ser associada à geometria complexa do sistema e às forças de atrito por ela produzidas. Valores negativos desta parcela foram encontrados no estuário do rio Hudson (EUA), confirmando o transporte de sal estuário acima (HUNKINS, 1981). Em estuário bem misturados, o transporte relacionado à circulação gravitacional (corrente de gravidade menos o componente gerado pela descarga fluvial) é pequeno, mas pode ser significativo em estuários altamente estratificados (HUNKINS, 1981; MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002).

O transporte de sal estuário acima, na maioria dos casos, sugere que há acúmulo de sal dentro do CEASJ, principalmente no período seco, associado à uma intrusão de águas marinhas o que resultou em aumento do teor de sal na interface ZR/ZM, como foi observado também por Miranda; Bérghamo e Castro (2005) no estuário do rio Curimatáu (RN-Brasil).

Analisando a distribuição espacial das concentrações de MPS no período de chuva ao longo do CEASJ, têm-se uma variação de 6,1 a 436,6 mgL^{-1} , com as maiores concentrações ocorrendo no fundo e estuário acima (interface ZR/ZM). No período seco as concentrações foram mais elevadas, cerca de 41% maiores, com máximo de 840,5 mgL^{-1} . Este fato pode estar atrelado à ressuspensão de material de fundo e à erosão de margens, fazendo com que as concentrações sejam mais elevadas na estação de seca.

Os gradientes temporais do MPS corroboraram os valores apresentados na distribuição espacial. Ao compararmos as concentrações de MPS, entre as estações de chuva e seca, observa-se um aumento de 68% na interface ZM/ZC e 71% na interface ZR/ZM, com máximos de 185,0 e 952,9 mgL^{-1} , respectivamente. Este comportamento, assim como observado na distribuição horizontal, se deve à maior atuação da onda de maré, afetando a circulação devido à força de gradiente de pressão baroclínica, ou seja, a entrada de água salina no CEASJ cria um gradiente de densidade longitudinal e introduz um efeito baroclínico significativo estuário acima, criando uma convergência de fluxo sedimentos na zona de mistura, levando a uma

elevada concentração de sedimentos em suspensão e taxas de deposição, sugerindo uma possível zona de máxima turbidez no local.

Ao compararmos as concentrações médias de MPS encontradas neste estudo com as concentrações de outros sistemas estuarinos brasileiros, observa-se que são uma ordem de grandeza maior em relação à baía de Tijucas (SC) e o estuário do rio Paraíba do Sul (RJ) (ALMEIDA; REZENDE; SOUZA, 2007; SCHETTINI et al., 2010). Em relação aos estuários dos rios São Francisco (AL) e Jaguaribe (CE) as concentrações de MPS também estão uma ordem de grandeza maior (DIAS et al., 2016; MEDEIROS et al., 2011). E ao compararmos as concentrações do CEASJ com as reportadas para o estuário do rio Amazonas, segundo Armijos et al. 2017 e Gibbs 1987, temos que foram uma ordem de grandeza menor e da mesma ordem, para os períodos de alta e baixa descarga fluvial do rio Amazonas respectivamente, respectivamente. A nível global, como no estuário do rio Yangtze (China) e no estuário superior do rio Hudson (EUA), as concentrações de MPS do CEASJ são uma ordem de grandeza menor e da mesma ordem, respectivamente (RALSTON; GEYER; WARNER, 2012; SONG; WANG, 2013; WAN; WANG, 2017).

Os fluxos instantâneos de MPS observados na estação de chuva apresentam os maiores valores ($2,0 \times 10^3 \text{ kgs}^{-1}$) na interface ZR/ZM e podem não conseguir chegar à região costeira adjacente, devido à falta de competência de transporte do regime fluvial face a elevada hidrodinâmica do regime de macromaré, mesmo estando durante a estação de balanço hídrico positivo. Este fato pode ser evidenciado ao observarmos os perfis médios da velocidade nas interfaces ZM/ZC e ZR/ZM, em que mesmo na estação de chuva, as velocidades de enchente evidenciam a importância da componente marinha na região. No período seco, os fluxos de MPS são 62% maiores que a estação de chuva, que atrelado a perda de competência de transporte por parte da descarga fluvial e uma maior propagação da onda de maré estuário acima, as concentrações de MPS chegam a 840 mgL^{-1} , resultando em fluxos instantâneos da ordem de $6,4 \times 10^3 \text{ kgs}^{-1}$, que se apresentam na interface ZR/ZM, onde está possivelmente localizada a zona de máxima turbidez.

Ao tomarmos como exemplo o estuário do rio Paraíba do Sul (RJ), temos que os seus fluxos de MPS são uma ordem de grandeza menor que os fluxos máximos observados neste estudo (ALMEIDA; REZENDE; SOUZA, 2007). Os fluxos de MPS observados no período chuvoso dos rios São Francisco (AL) e Jaguaribe (CE), são também uma ordem de grandeza menor que o observado no CEASJ, enquanto que

para o período seco são duas ordens de grandeza menores (DIAS et al., 2016; MEDEIROS et al., 2011). No estuário do rio Amazonas, os fluxos são uma ordem de grandeza maior em relação aos fluxos apresentados neste estudo, como reportados por Armijos et al. (2017), Filizola e Guyot (2011) e Guyot, Filizola e Laraque (2005). A nível global, como por exemplo na China, mais precisamente no estuário do rio Yangtze, os fluxos de MPS são da mesma ordem de grandeza que os observados neste estudo, chegando a valores de $1,6 \times 10^3 \text{ kgs}^{-1}$ (MILLIMAN et al., 1985; WANG; ANDUTTA, 2013).

7. CONCLUSÕES

Nos estuários dos rios Perizes e Sampaio, os maiores volumes de água doce foram observados durante a estação de chuva (> 60%) e na interface chuva/seca (> 40%), com exceção do ano de 2015, onde os volumes fluviais assemelharam-se aos observados em períodos de balanço hídrico negativo, associados às anomalias negativas de salinidade e positivas de MPS, que resultaram em tempos de residência maiores que 3 horas. Este comportamento sugere que o lançamento de efluentes urbanos e domésticos durante as estações de chuva e na interface chuva/seca podem acarretar em efeitos potencialmente deletérios a biota local e aos recursos hídricos, podendo afetar espécies de interesse comercial e conseqüentemente a pesca de subsistência e a economia local. Os ciclos de deposição e erosão durante as marés de sizígia-quadratura demonstraram a existência da deposição de partículas na região do Complexo Estuarino Arraial-São José durante as marés de quadratura. Durante esses períodos de elevada deposição, gerada pelo barramento hidráulico, os fluxos de MPS oriundos da bacia de drenagem para o estuário e conseqüente plataforma continental é interrompido e o tempo de residência das partículas são aumentadas.

Com base nas estruturas térmicas e salinas observadas no CEASJ, tanto espacialmente quanto temporalmente, com temperaturas elevadas associadas a salinidades tipicamente estuarinas na estação de chuva e águas mais frias e salinas na estação de seca, sugere-se uma interface ZM/ZC (Zona de Mistura/Zona Costeira) próxima ao fundeio I (situado na parte mais costeira) e uma interface ZR/ZM (Zona de Maré do Rio/Zona de Mistura) próxima ao fundeio II (situado mais adentro do complexo). Estas propriedades mostraram-se próximas à homogeneidade vertical em ambos os períodos sazonais, com correntes mais intensas de enchente e vazante ocorrendo antes das marés alta e baixa, respectivamente. No período chuvoso foi observado um importante aporte fluvial, enquanto que no período seco observou-se um avanço de águas marinhas, intensificando o gradiente de pressão baroclínico estuário acima.

Em geral, as velocidades mais intensas foram observadas em maré enchente e velocidades residuais próximas de zero. No período chuvoso, na interface ZM/ZC o sistema estuarino apresentou-se do tipo 2a (parcialmente misturado e fracamente estratificado), denotando uma transição entre os tipos 2a e 1a, sendo o processo de difusão turbulento predominando para o transporte de sal estuário acima,

enquanto que na interface ZR/ZM e ambas as interfaces do período seco o sistema foi do tipo 1a (bem misturado e fracamente estratificado), cuja circulação gravitacional é inexistente, denotando que o transporte de sal estuário acima é totalmente por difusão turbulenta.

Através do entendimento do padrão de circulação, em ciclos consecutivos de maré, vislumbra-se um elevado potencial energético vinculado à energia marémotriz, surgindo uma fonte de energia renovável capaz de trazer poucos danos ao ambiente. Os grandes desafios do setor energético mundial colocam estas fontes em posição de destaque, demonstrando ser bastante promissoras, visto que a geração híbrida pode elevar fontes renováveis na matriz energética brasileira, que diminuem drasticamente a emissão de toneladas de CO₂ para a atmosfera.

A minimização de fluxos fluviais, facilita a propagação da onda de maré que induz à intrusão salina no estuário, principalmente no período de seca, como pode ser observada também no transporte total de sal, que é estuário acima (importador). Esta entrada de água do mar no CEASJ intensifica o componente baroclínico da força de gradiente de pressão, que gera um barramento hidráulico sugerido por elevadas concentrações de sedimentos em suspensão, ocasionando uma retenção líquida e de materiais que acabar por formar a zona de máxima turbidez na interface ZR/ZM. Por esta razão, os fluxos de MPS oriundos da bacia de drenagem para o estuário e consequente plataforma continental é interrompido e o tempo de residência das partículas são aumentadas.

O barramento hidráulico observado neste estudo mostra que, as mudanças de uso e ocupação dos solos das bacias de drenagem com a retirada da cobertura vegetal são fatores potencialmente deletérios aos sistemas estuarinos, pois solos cada vez mais expostos proporcionam um aumento do *Runoff* superficial no início da estação de chuvas. Os sedimentos em suspensão que chegam ao estuário, ainda com pouco volume fluvial, ciclam neste ambiente formando novas ilhas de deposição. Um outro fato que deve ser considerado é a mistura das massas de águas costeira e fluvial, que proporcionam a troca de compartimento geoquímico de substâncias orgânicas e inorgânicas neste ambiente.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. G.; REZENDE, C. E.; SOUZA, C. M. M. Variação temporal, transporte e partição de Hg e Carbono Orgânico nas frações particulada e dissolvida da coluna d'água da bacia inferior do Rio Paraíba do Sul, RJ, Brasil. **Geochimica Brasiliensis**, v. 21, n. 1, p. 111–128, 2007.
- ANDUTTA, F. P. et al. Temporal variations of temperature, salinity and circulation in the Peruípe river estuary (nova Viçosa, BA). **Continental Shelf Research**, v. 70, n. November 2013, p. 36–45, 2013.
- ARMIJOS, E. et al. Measuring and modeling vertical gradients in suspended sediments in the Solimões/Amazon River. **Hydrological Processes**, v. 31, n. 3, p. 654–667, 2017.
- ASP, N. E. et al. The dynamics of a frictionally-dominated amazonian estuary. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 60, n. 3, p. 391–403, 2012.
- ASP, N. E. et al. Sediment source, turbidity maximum, and implications for mud exchange between channel and mangroves in an Amazonian estuary. **Ocean Dynamics**, v. 66, n. 2, p. 285–297, 2016.
- AURENHAMMER, F.; KLEIN, R. **Voronoi diagrams**. 1. ed. FernUniversität Hagen: Technical Report, 1989. 92 p.
- AZEVEDO, J. W. J.; CASTRO, A. C. L.; SANTOS, M. C. F. V. Siltation rate and main anthropic impacts on sedimentation of the São Luís tidal inlet - State of Maranhão, Brazil. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 64, n. 1, p. 9–18, 2016.
- BALTAZAR, L. R. S.; MENEZES, M. O. B.; ROLLNIC, M. Contributions to the Understanding of Physical Oceanographic Processes of the Marajó Bay - PA, North Brazil. **Journal of Coastal Research**, n. SI 64-Proceedings of the 11th International Coastal Symposium, p. 1443 – 1447, 2011.
- BÉRGAMO, A. L.; MIRANDA, L. B. DE; CORRÊA, M. A. Estuário: Programas para processamento e análise de dados hidrográficos e correntográficos. **Bolm Inst. Oceanogr.**, v. 26, n. 49, p. 1–16, 2002.
- BERNARDES, M. et al. Land-sea interface features of four estuaries on the South America Atlantic coast. **Brazilian Journal of Biology**, v. 72, n. 3 suppl, p. 761–774, 2012.
- BOWDEN, K.F. Mixing processes in estuaries. In: Kjerfve, B (ed.). **Estuarine Transport Processes**. W. Belle Baruch Institute Library in Marine Science, n 7, University of South Carolina Press, Columbia, SC, p. 11-36, 1978.
- BOWDEN, K.F. The mixing processes in a tidal estuary. **Inter. J. Air Water Pollution**, v. 7, p 343-356, 1963.

CALLÈDE, J. et al. Les apports en eau de l'Amazone à l'Océan Atlantique. **Revue des sciences de l'eau**, v. 23, n. 3, p. 247, 2010.

CAMPOS, A. E. L. et al. Avaliação da Contaminação do Igarapé do Sabino (Bacia do Rio Tibiri) por Metais Pesados, originados dos Resíduos e Efluentes do Aterro da Ribeira, em São Luís, Maranhão. **Quim. Nova**, v. 32, n. 4, p. 960–964, 2009.

CAVALCANTE, G. H.; FEARY, D. A.; KJERFVE, B. Effects of Tidal Range Variability and Local Morphology on Hydrodynamic Behavior and Salinity Structure in the Caeté River Estuary, North Brazil. **International Journal of Oceanography**, v. 2013, n. February 2016, p. 1–10, 2013.

CAVALCANTE, G.; MIRANDA, L. B.; MEDEIROS, P. R. P. Circulation and salt balance in the São Francisco river Estuary (NE/Brazil). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, n. 0, 2017.

CORRÊA, I.C.S; WESHENFELDER, J. Fisiografia do Fundo Oceânico. In: CASTELLO, J.P.; KRUG, L.C. **Introdução às Ciências do Mar**. Pelotas, RJ: Editora Textos, 2015. p 44-73.

COUTINHO, P. N.; MORAIS, J. O. Distribuição de sedimentos na Baía do São Jose, Estado do Maranhao (Brasil). **Arq. Cien. Mar**, v. 2, n. 16, p. 123–127, 1976.

CUNHA, A. C. et al. Evento Extremo de Chuva-Vazão na Bacia Hidrográfica do rio Araguari. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. April 2011, p. 95–110, 2014.

DIAS, F. J. S. et al. 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, n. August, p. 258–274, 2016.

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.

DYER, K. R. **Coastal and Estuarine Sediment Dynamics**. Wiley, New York, 1986. 342 p.

DYER, K. R. **Estuaries: a physical introduction**. 2. ed. New York, John Wiley & Sons, 1997. 140 p.

DYER, K. R. Estuarine sediment transport and deposition, In: Pye, K. **Sediment Transport and Depositional Processes**. Blackwell Scientific Publication, Oxford, 1994. p. 193-218

DYER, K. R. The salt balance in stratified estuaries. **Estuarine and Coastal Marine Science**, v. 2, n. 3, p. 273–281, 1974.

EMERY, W. J; THOMPSON, R. E. **Data Analysis Methods in Physical Oceanography**. 3. ed. Amsterdam: Elsevier Science, 2001, 654p.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA e MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2017**. Rio de Janeiro: EPE/MME, 2017.

FERREIRA, H. O. Contribuição ao Estudos das Correntes de Maré dos Estreitos dos Coqueiros e Mosquitos, Maranhão. **B. Lab. Hidro.**, v. 8, n. 1, p. 45–59, 1988.

FILIZOLA, N. et al. Study of the variability in suspended sediments discharge at Manacapuru, Amazon river, Brazil. **Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis**, v. 16, n. 2, p. 93–99, 2009.

FILIZOLA, N.; GUYOT, J. L. Fluxo de sedimentos em suspensão nos rios da Amazônia. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 41, n. 4, p. 566–576, 2011.

FISCHER, H. B. Mixing and dispersion in estuaries. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 8, p. 107–133, 1976.

FREITAS, P. P.; MENEZES, M. O. B.; SCHETTINI, C. A. F. Hydrodynamics and Particulate Suspended Matter Transport in a Shallow and Highly Urbanized Estuary: The Cocó Estuary, Fortaleza, Brazil. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 33, p. 1–12, 2015.

GEYER, W. R. et al. Physical oceanography of the Amazon shelf. **Continental Shelf Research**, v. 16, n. 5–6, p. 575–616, 1996.

GIBBS, R. Sources of estuarine sediment and their coagulation. In: National Research Council (Ed.) **Sedimentation control to reduce maintenance dredging of navigational facilities in estuaries**. Report and Symposium Proceedings, National Academy Press, Washington, D.C., 1987. p. 32-52.

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**, v. 58, n. 3, p. 567–573, 2003.

GUALBERTO, L. P. S.; EL-ROBRINI, M. Faciologia da Corbetura Sedimentar Superficial da Plataforma Continental do Maranhão. **Estudos Geológicos**, v. 15, p. 234–243, 2005.

GUYOT, J. L.; FILIZOLA, N.; LARAQUE, A. Régime et bilan du flux sédimentaire de l'Amazone à Óbidos (Pará, Brésil) de 1995 à 2003. **Sediments Budgets**, v. 2, n. April, p. 1–8, 2005.

HANSEN, D. V.; RATTRAY, M. New dimensions in estuary classification. **Limnology and Oceanography**, v. 11, n. 3, p. 319–326, 1966.

HUNKINS, K. Salt Dispersion in the Hudson Estuary. **Journal of Physical Oceanography**, v. 11, n. 5, p. 729–738, 1981.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Zoneamento Geoambiental do Estado do Maranhão**: subsídios gerais para a ordenação territorial. Salvador: IBGE, 1997.

INFOCLIMA, **Boletim de Informações Climáticas do INPE/CPTEC**, São José dos Campos, ano 24, n. 2, p. 1-3, 2017.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Precipitações históricas para o Complexo Estuarino Arraial-São José**. Em (<http://www.inmet.gov.br>) Acesso em 02 de fevereiro de 2017.

KJERFVE, B. Circulation and salt flux in a well mixed estuary. In: ed J. van de Kreeke. **Physics of Shallow Estuaries and Bays**. New York: Springer Verlag, p. 22-29, 1986.

KJERFVE, B. Estuarine Geomorfology and Physical Oceanography. In: Day Jr, J.W.; Hall, C.A.S., Kemp W.M.; Yanez-Arancibia, A. (eds). **Estuarine Ecology**. New York, Wiley, 1987 p. 47-78.

KJERFVE, B. Measurement and analysis of water current, temperature, salinity and density. In: Dyer, K. R. **Estuarine hydrography and sedimentation**. Cambridge, Cambridge University Press, 1979. p 186-226.

KJERFVE, B. Velocity averaging in estuaries characterized by a large tidal range to depth ratio. **Estuarine and Coastal Marine Science**, v. 3, n. 3, p. 311–323, 1975.

LEFÈVRE, N. et al. A source of CO₂ to the atmosphere throughout the year in the Maranhense. **Continental Shelf Research**, v. 141, n. May, p. 38–50, 2017.

LEITE NETO, P. B. et al. Exploração de energia maremotriz para geração de eletricidade: aspectos básicos e principais tendências. **Revista chilena de ingeniería**, v. 19, n. 2, p. 219–232, 2011.

LEITE NETO, P. B.; SAAVEDRA, O. R.; RIBEIRO, L. A. S. Analysis of a Tidal Power Plant in the Estuary of Bacanga in Brazil Taking Into Account the Current Conditions and Constraints. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 8, n. 3, p. 1187–1194, 2017.

MEDEIROS, P. R. P. et al. Aporte de material em suspensão no Baixo Rio São Francisco (SE/AL), em diferentes condições hidrológicas. **Brazilian archives of biology and technology**, v. 15, n. 1, p. 42–53, 2011.

MEDEIROS, P. R. P. et al. Características ambientais do Baixo São Francisco (AL/SE): efeitos de barragens no transporte de materiais na interface continente-oceano. **Geochimica Brasiliensis**, v. 28, n. 1, p. 65–78, 2014.

MEDEIROS, P. R. P.; KNOPPERS, B. A.; JÚNIOR, R. C. S. Aporte Fluvial E Dispersão De Matéria Particulada Em Suspensão Na Zona Costeira Do Rio São Francisco (Se/Al). **Geochimica Brasiliensis**, v. 21, n. 2, p. 212–231, 2007.

MEDEIROS, R. **Rio Itapecuru: águas que correm entre pedras**. São Luís: Ed. Grafic, 2001. 120p.

MIGUEL, L. L. A. J.; CASTRO, J. W. A.; NEHAMA, F. P. J. Tidal impact on suspended sediments in the Macuse estuary in Mozambique. **Regional Studies in Marine Science**, v. 16, p. 1–14, 2017.

MIGUENS, F. C. et al. Structural and elemental analysis of bottom sediments from the Paraíba do Sul River (SE, Brazil) by analytical microscopy. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 66, p. 82–96, 2016.

MILLIMAN, J. D. et al. Transport and deposition of river sediment in the Changjiang estuary and adjacent continental shelf. **Continental Shelf Research**, v. 4, n. 1–2, p. 37–45, 1985.

MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. **Princípios de oceanografia física de estuários**. São Paulo: EDUSP, 2002. 424p.

MIRANDA, L. B.; BÉRGAMO, A. L.; CASTRO, B. M. Interactions of river discharge and tidal modulation in a tropical estuary, NE Brazil. **Ocean Dynamics**, v. 55, n. 5–6, p. 430–440, 2005.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Caderno da Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Ocidental**, Secretaria de Recursos Hídricos, Brasília, 2006.

MOHAMMED, R.; SCHOLZ, M. Critical review of salinity intrusion in rivers and estuaries. **Journal of Water and Climate Change**, p. jwc2017334, 2017.

MONBET, P. Mass balance of lead through a small macrotidal estuary: The Morlaix River estuary (Brittany, France). **Marine Chemistry**, v. 98, n. 1, p. 59–80, 2006.

MULLER-KARGER, F. E.; MCCLAIN, C. R.; RICHARDSON, P. L. The dispersal of the Amazon's water. **Nature**, v. 333, n. June, p. 56–59, 1988.

OLIVEIRA, D. R. P. et al. Avaliação do grau de contaminação microbiológica do estuário do rio Paciência, estado do Maranhão. Evaluation of the microbiological contamination degree of the Paciência River estuary, Maranhão State. **Arq. Ciên. Mar**, Fortaleza, v. 45, n. 1, p. 56–61, 2012.

OLTMAN R.E. Reconnaissance investigation of discharge and water quality of the Amazon River. **US. Geological Survey Circular 552**, Washington DC. 16 p. 1968.

PARK, G. S. The role and distribution of total suspended solids in the macrotidal coastal waters of Korea. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 135, n. 1–3, p. 153–162, 2007.

PEREIRA, J. E. R.; HARARI, J. Modelo numérico tri-dimensional linear da plataforma continental do Estado do Maranhão. **Bolm Inst. Oceanogr.**, v. 43, n. 1, p. 11–26, 1995.

PEREIRA, M. D. et al. Hidrodinâmica e transporte de material particulado em suspensão sazonal em um estuário dominado por maré: Estuário de Caravelas (BA). **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 28, n. 3, p. 427–444, set. 2010.

PRITCHARD, D. W. Estuarine Circulation Patterns. **Proceedings of the American Society of Civil Engineers.**, v. 81, n. 717, p. 1-11, 1955.

PRITCHARD, D. W. Salt balance and exchange rate for Chincoteague Bay. **Coastal and Estuarine Research Federation**, v. 1, n. 1, p. 48–57, abr. 1960.

RALSTON, D. K.; GEYER, W. R.; WARNER, J. C. Bathymetric controls on sediment transport in the Hudson River estuary: Lateral asymmetry and frontal trapping. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 117, n. 10, p. 1–21, 2012.

RANGEL, M.E.S.; PEREIRA, C. R. P.; SOUZA, U.D.V. **Dinâmica socioambiental da área da Bacia do Rio Paciência, porção nordeste da Ilha do Maranhão/MA**. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2013, Foz do Iguaçu. XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2013.

SANTOS, L. C. A.; LEAL, A. C. Gerenciamento de recursos hídricos no Estado do Maranhão – Brasil. **Revista Eletrônica de Geografia**, v. 5, n. 13, p. 39–65, 2013.

SANTOS, L. C. A.; LEAL, A. C. Política de recursos hídricos no estado do Maranhão. In: CUNHA, L; PASSOS, M. M. dos; e JACINTO, R. (Org). **As novas geografias dos países de língua portuguesa: paisagens, territórios, políticas no Brasil e Portugal**. Guarda: CEI, 2010.

SANTOS, V. H. M. et al. Hydrodynamics and suspended particulate matter retention in macrotidal estuaries located in Amazonia-semiarid interface (Northeastern-Brazil). **Hydrological Processes**, (No Prelo).

SCHETTINI, C. A. F. Caracterização Física do Estuário do Rio Itajaí-açu, SC. RBRH - **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, p. 123–142, 2002.

SCHETTINI, C. A. F. et al. A snapshot of suspended sediment and fluid mud occurrence in a mixed-energy embayment, Tijucas Bay, Brazil. **Geo-Marine Letters**, v. 30, n. 1, p. 47–62, 2010.

SCHETTINI, C. A. F. et al. The circulation of the lower Capibaribe Estuary (Brazil) and its implications for the transport of scalars. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 64, n. 3, p. 263–276, 2016.

SCHOTT, F. A.; FISCHER, J.; STRAMMA, L. Transports and Pathways of the Upper-Layer Circulation in the Western Tropical Atlantic. **Journal of Physical Oceanography**, v. 28, n. 10, p. 1904–1928, 1998.

SCHOTT, F. A.; STRAMMA, L.; FISCHER, J. The warm water inflow into the western tropical Atlantic boundary regime , spring 1994 waters of the equatorial circulation. **Journal of Geophysical Research**, v. 100, p. 24745–24760, 1995.

SILVA, A. C.; ARAÚJO, M.; BOURLÈS, B. Variação sazonal da estrutura de massas de água na plataforma continental do amazonas e área oceânica adjacente. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 23, n. 2, p. 145–157, 2005.

SILVA, A. C.; ARAUJO, M.; PINHEIRO, L. S. Caracterização hidrográfica da plataforma continental do maranhão a partir de dados oceanográficos medidos, remotos e modelados. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 25, n. 3, p. 281–294, 2007.

SILVA, D. J.; CONCEIÇÃO, G. M. Rio Itapecuru: Caracterização Geoambiental e Socioambiental, Município de Caxias, Maranhão, Brasil. **Scientia Plena**, v. 7, n. 1, p. 1–26, 2011.

SILVA, J. R. R.; ALMEIDA, Z. S. Zoneamento Vertical dos Crustáceos Bentônicos em Substratos Inconsolidados do Manguezal do Quebra-Pote na Ilha de São Luís, Maranhão, Brazil. **Bol. Técn. Cient. CEPENE**, v. 10, n. 1, p. 65–83, 2002.

SILVA, L. C. F.; ALVARENGA, J. B. R. **Levantamento do estado da arte dos recursos vivos marinhos do Brasil** - Oceanografia Física da Região Nordeste. Ministério do Meio Ambiente. 200 p. 1994

SILVEIRA, I. C. A.; MIRANDA, L. B.; BROWN, W. S. On the origins of the North Brazil Current. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. C11, p. 22501, 1994.

SIMPSON, J. H. et al. Tidal Straining, Density Currents, and Stirring in the Control of Estuarine Stratification. **Estuaries**, v. 13, n. 2, p. 125, 1990.

SONG, D.; WANG, X. H. Suspended sediment transport in the Deepwater Navigation Channel, Yangtze River Estuary, China, in the dry season 2009: 2. Numerical simulations. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 118, n. 10, p. 5568–5590, 2013.

STRAMMA, L. et al. Circulation, variability and near-equatorial meridional flow in the central tropical Atlantic. **Elsevier Oceanography Series**, v. 68, n. C, p. 1–22, 2003.

STRAMMA, L.; SCHOTT, F. The mean flow field of the tropical Atlantic Ocean. **Deep-Sea Res. II**, v. 46, n. 1–2, p. 279–303, 1999.

STRICKLAND, J. D. H.; PARSONS, T. R. **A practical handbook of seawater analysis**. Ottawa: Bulletin Fisheries Research Board of Canada, 1972. n. 167. 310p.

SUDENE - Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. **Plano de Aproveitamento Integrado dos Recursos Hídricos do Nordeste do Brasil**. Departamento de Recursos Naturais. Recife. 1980.

UNCLES, R. J.; STEPHENS, J. A.; LAW, D. J. Turbidity maximum in the macrotidal, highly turbid Humber Estuary, UK: Floccs, fluid mud, stationary suspensions and tidal bores. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 67, n. 1–2, p. 30–52, 2006.

VAZ, N.; DIAS, J. M. Hydrographic characterization of an estuarine tidal channel. **Journal of Marine Systems**, v. 70, n. 1–2, p. 168–181, 2008.

WAN, Y.; WANG, L. Numerical investigation of the factors influencing the vertical profiles of current, salinity, and SSC within a turbidity maximum zone. **International Journal of Sediment Research**, v. 32, n. 1, p. 20–33, 2017.

WANG, C. F.; HSU, M. H.; KUO, A. Y. Residence time of the Danshuei River estuary, Taiwan. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 60, n. 3, p. 381–393, 2004.

WANG, X. H.; ANDUTTA, F. P. *Sediment transport dynamics in ports, estuaries and other coastal environments*. In: Manning, A. J. (Ed.) **Sediment Transport Processes and their Modelling Applications**. InTech, 2013. p. 3-36.

WARNER, J. C.; GEYER, W. R.; LERCZAK, J. A. Numerical modeling of an estuary: A comprehensive skill assessment. **Journal of Geophysical Research C: Oceans**, v. 110, n. 5, p. 1–13, 2005.

WISSER, D. et al. Reconstructing 20th century global hydrography: a contribution to the Global Terrestrial Network- Hydrology (GTN-H). **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 14, p. 1–24, 2010.

ZEMBRUSCKI, S. G. Geomorfologia da margem continental sul brasileira e das bacias oceânicas adjacentes. In: CHAVES, H. A. F. **Geomorfologia da margem continental brasileira e áreas oceânicas adjacentes**. Rio de Janeiro: Petrobrás, 1979. Série Projeto REMAC, 7, p. 129-177.