



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

SAYONARA RAÍZA RODRIGUES DE MEDEIROS LINS

**PROPAGAÇÃO DAS MARÉS SALINA E DINÂMICA NO RIO IPOJUCA-
PE, BRASIL**

Recife
2018

SAYONARA RAÍZA RODRIGUES DE MEDEIROS LINS

**PROPAGAÇÃO DAS MARÉS SALINA E DINÂMICA NO RIO IPOJUCA-
PE, BRASIL**

**Dissertação apresentada ao Colegiado do
Programa de Pós-graduação em
Oceanografia, como requisito para obtenção
do título de Mestre em Oceanografia.**

**Área de concentração: Oceanografia
Abiótica**

**Orientador: Profa. Dra. Carmen Medeiros
Limongi**

Recife

2018

Catálogo na fonte

Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

L759p

Lins, Sayonara Raíza Rodrigues de Medeiros.

Propagação das marés salina e dinâmica no Rio Ipojuca-PE, Brasil / Sayonara Raíza Rodrigues de Medeiros Lins - 2018.

121 folhas, il.; tab.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Carmen Medeiros Limongi.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-graduação em Oceanografia, 2018.

Inclui Referências.

1. Oceanografia. 2. Maré salina. 3. Maré dinâmica. 4. Hidrodinâmica estuarina.

I. Limongi, Carmen Medeiros (Orientadora). II. Título.

UFPE

551.46 CDD (22. ed.)

BCTG/2018-298

SAYONARA RAÍZA RODRIGUES DE MEDEIROS LINS

**PROPAGAÇÃO DAS MARÉS SALINA E DINÂMICA NO RIO IPOJUCA-
PE, BRASIL**

Dissertação apresentada ao colegiado do Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco como requisito para obtenção do título de Mestre em Oceanografia na área de Oceanografia Abiótica.

Data de aprovação: 30 de abril de 2018

EXAMINADORES:

Profa. Dra. Carmen Medeiros Limongi – Orientadora - UFPE

Prof. Dr. Alex Costa da Silva - UFPE

Prof. Dr. Carlos Esteban Delgado Noriega - UFPE

AGRADECIMENTOS

À minha avó (Severina), por ter sempre dado seu melhor para que eu crescesse bem e crescesse nos estudos, meus pais (Aldicéia e João) e irmãos (Shara, Silvio, Silvana e Sérgio) que estiveram me apoiando em todos os momentos.

Ao meu esposo (Maurício) por todo apoio durante essa etapa corrida de minha vida.

Aos meus amigos (especialmente Liza, Syumara e Bárbara) por toda ajuda e conselhos recebidos desde a graduação e durante meu mestrado.

À minha orientadora, Profa. Carmen Limongi, pela orientação, ensinamentos e por todo o suporte e paciência.

Aos demais amigos dos “Oceanógrafos perdidos” por todo o apoio, Cristielen (que sempre me abrigou durante os dias de coletas), kleyton (sempre presente mesmo em outro centro), Rafaela (que mesmo distante está sempre olhando por nós), Isabelle, Jéssica, Talita e Lucas.

À Babie, sempre torcendo pelo meu sucesso e acompanhando meu crescimento no curso desde os primeiros momentos da graduação.

Ao Sr. Isaac Cristiano de Freitas e ao Sr. Hermes Ferreira de Paula pelo apoio e assistência durante os trabalhos de mar.

À Agência Pernambucana de Águas e Climas, APAC, pela cessão dos dados climatológicos e em especial ao Sr. Thiago Luiz do Vale Silva.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela concessão da bolsa de mestrado.

RESUMO

O rio Ipojuca figura dentre os rios Pernambucanos que sofreram maiores alterações em sua geometria/desembocadura e descargas fluviais. O presente projeto visou identificar e analisar a propagação e o comportamento das marés ao longo do trecho estuarino do rio Ipojuca, obtendo informações atualizadas sobre a hidrologia e hidrodinâmica de suas águas para que possam subsidiar atividades direcionadas a proteção e recuperação de sua função ecológica e capacidade produtiva. Os trabalhos foram desenvolvidos ao longo de um trecho do rio Ipojuca (13,6 km). Foram realizados o levantamento morfobatimétrico, perfis CTD, fundeio de sensores de pressão e medições do campo das correntes, de modo a caracterizar os estágios da maré em ciclos de sizígia e quadratura durante o período de estiagem (dez/17) e chuvoso (jun-ago/17). O estuário é em geral raso (-1,4 a 9,5m), com presença de um canal central profundo e de bancos de areia emersos em seu trecho inferior. A maré apresentou defasagem em fase e amortecimento das amplitudes ao longo do estuário, principalmente durante a sizígia. A temperatura mostrou-se verticalmente homogênea ao longo da coluna d'água. A distribuição e intrusão salina e dinâmica variaram sazonalmente e ao longo do ciclo das marés. A excursão da maré salina alcança 2,0-5,7km para montante da desembocadura, sendo fortemente influenciada pelo regime das chuvas e secundariamente pelo ciclo das marés. A condição de barra estrangulada dificulta as trocas com a área costeira, a entrada das águas marinhas e a drenagem de águas de fundo. O limite dinâmico da maré foi máximo durante o período chuvoso, alcançando as proximidades da estação S5, possuindo velocidades e direções de fundo de $6,8\text{cm.s}^{-1}; 5^\circ$ e $60,2\text{cm.s}^{-1}; 131^\circ$ para as estações S3 e S5, respectivamente, nas preamares de sizígia. A concentração de sólidos suspensos totais variou ao longo do estuário e do ciclo de maré, a estação mais próxima à desembocadura do rio apresentou os menores valores de concentrações, sendo durante os estágios de enchente ($241,2\text{mg.L}^{-1}$) e baixa-mar do período chuvoso os que apresentaram maiores concentrações. A localização da zona de turbidez máxima esteve localizada no trecho intermediário do estuário durante o período chuvoso e trechos mediano e superior no chuvoso. O baixo estuário do Ipojuca foi classificado como tipo 1b durante todos os períodos

amostrados, característico de ambientes homogêneos dominados por processos difusivos, recebendo moderadas a elevadas descargas fluviais no período chuvoso e tendendo a parcialmente estratificado, com baixas entradas de água doce durante o período de estiagem. O presente projeto contribuiu para o conhecimento da propagação das marés no estuário do rio Ipojuca em função da sazonalidade do regime das chuvas e suas implicações para o regime salino e de circulação. Tal conhecimento constitui importante subsídio para o desenvolvimento de atividades direcionadas para a recuperação deste sistema e para a gestão e tomada de decisões voltadas à prevenção e/ou minimização de possíveis impactos causados pelo lançamento de efluentes e em caso de eventuais acidentes que aportem contaminantes para a área.

Palavras-chave: Maré salina. Maré dinâmica. Hidrodinâmica estuarina.

ABSTRACT

The Ipojuca river is one of the Pernambuco's rivers that suffered major changes in its geometry/river mouth and river discharge. The present project aimed to identify and analyze the propagation and behavior of the tides along the Ipojuca estuary, obtaining updated information about the hydrology and hydrodynamics of their waters so they can subsidize activities directed to the protection and recovery of their ecological function and capacity productive. The works were developed along a section of the river Ipojuca (13.6 km). Morphobathymetric survey, CTD profiles, pressure sensors foundations and current field measurements were carried out in order to characterize the stages of the tide in cycles of spring and neap during the dry season (Dec/17) and rainy (Jun-Aug/17) season. The estuary is generally shallow (-1.4 to 9.5m), with the presence of a deep central channel and emerged sandbanks in its lower section. The tide presented phase lag and amplitudes damping along the estuary, being greater during the spring. The temperature was vertically homogeneous along the water column. Salt and dynamic intrusion and distribution varied seasonally and throughout the tidal cycle. The excursion of the salt tide reaches 2.0-5.7km upstream from its mouth, being strongly influenced by the rainfall regime and secondarily by the tidal cycle. The condition of a choked inlet reduces the exchange with the coastal area, the entrance of the marine waters and the drainage of bottom waters. The tidal dynamic limit was maximum during the rainy season, reaching the vicinity of station S5, having deep speeds and directions of $6,8\text{cm.s}^{-1}; 5^{\circ}$ and $60,2\text{cm.s}^{-1}; 131^{\circ}$ for S3 and S5 stations, respectively, in the spring. The total suspended solids concentration varied throughout the estuary and the tidal cycle, the lowest station at the mouth of the river had the lowest concentration values, during the flood stages ($241,2\text{mg.L}^{-1}$) and low-water of the rainy season. The maximum turbidity zone was located in the intermediate estuary section during the rainy season and medium to upper section in the rainy season. The low Ipojuca estuary was classified as type 1b during all the periods sampled, characteristic of homogeneous environments dominated by diffusive processes, receiving moderate to high river discharge in the rainy season and tending to partially stratified, with low freshwater inflows during the dry season. This project contributed to the knowledge of the tidal

propagation in the Ipojuca river estuary due to the rainfall regime seasonality and its implications for the saline and circulation regime. Such knowledge constitutes an important subsidy for the activities development aimed at this system recovery and for the management and decision-making aimed at preventing and/or minimizing possible impacts caused by the effluents discharge and in accidents case that afford contaminants to the area.

Keywords: Salinity intrusion. Dynamical tide. Estuarine hydrodynamics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação funcional de um sistema estuarino, com delimitação de sua zonas fluvial, de mistura e costeira.....	23
Figura 2 - Tipos morfológicos de estuários. (1) Fiorde; (2) Ria; (3) Planície Costeira; (4) Delta Estuarino; (5) Construído por Barra; (6) Delta; (7) Laguna Costeira e (8) Tectônico.....	24
Figura 3 - Tipos de estuário quanto ao balanço hídricos. (A) Positivos; (B) Negativos e (C) Neutros.	27
Figura 4 - Diagrama de Hansen e Rattray para classificação dos estuários com indicação da fração do transporte total horizontal de sal causado por difusão (v).	30
Figura 5 - Decomposição dos componentes de velocidade residual em uma sessão estuarina ideal baseada nas simulações de Buchard et al. (2011). Os círculos vermelhos indicam a entrada de água no estuário, enquanto que os azuis estão escoando em direção ao oceano.	34
Figura 6 - Vista geral da área de estudo, bacia de drenagem do rio Ipojuca e localização das estações amostrais S0 a S6 e estações de refinamento R _{ij}	48
Figura 7 - Malha de sondagem do levantamento batimétrico do estuário do rio Ipojuca.....	50
Figura 8 - Precipitação pluviométrica (barras azuis) e Temperatura (linha vermelha) média mensal para a estação meteorológica do Porto de Suape, Ipojuca para o período de 2013 a 2017.	54
Figura 9 - Média de temperatura e precipitação acumulada mensal para a estação meteorológica do Porto de Suape (A) e Curado (B), durante o ano de 2017.	56
Figura 10 - Direção e velocidade do vento predominantes para a estação de Ipojuca (Suape) para todo o ano de 2017 e durante os meses de coletas.	57
Figura 11 - Carta morfobatimétrica do estuário do rio Ipojuca. Cotas referidas ao RN da DHN.	59
Figura 12 - Localização das sessões transversais a cada 500 metros de distância da desembocadura do estuário do rio Ipojuca.	60
Figura 13 - Sessões transversais a cada 500 m a montante da desembocadura do estuário Ipojuca. Sendo as letras de A – P os perfis de 500 a	

8.000 m de distância, respectivamente. Cotas referidas ao RN da DHN.	61
Figura 14 - Oscilação das marés às estações S0 (estação costeira), S1 (desembocadura) e às estações S3 e S5, durante os períodos chuvoso (C) e de estiagem (E).....	63
Figura 15 - Oscilação das marés às estações S0 (estação costeira), S1 (desembocadura) e às estações S3 e S5, durante os períodos chuvoso (C) e de estiagem (E) para os regimes de sizígia (S) e quadratura (Q). A linha vermelha corresponde às previsões da DHN, enquanto que a linha preta corresponde aos dados obtidos <i>in situ</i>	64
Figura 16 - Distribuição vertical da temperatura (painel superior) e salinidades (painel inferior) nas estações S1 a S6 no estuário do rio Ipojuca durante uma sizígia no período chuvoso.....	67
Figura 17 - Distribuição vertical da temperatura (painel superior) e salinidades (painel inferior) nas estações S1 a S6 no estuário do rio Ipojuca durante uma quadratura no período chuvoso.....	68
Figura 18 - Distribuição vertical da temperatura (painel superior) e salinidades (painel inferior) nas estações S1 a S6 no estuário do rio Ipojuca durante uma sizígia no período de estiagem.....	69
Figura 19 - Distribuição vertical da temperatura (painel superior) e salinidades (painel inferior) nas estações S1 a S6 no estuário do rio Ipojuca durante uma quadratura no período de estiagem.	70
Figura 20 - Limites de penetração da maré salina, próximo ao fundo, ao longo do estuário do rio Ipojuca durante os estágios de baixa-mar (BM, enchente (EM), preamar (PM) e vazante (VZ) em regime de sizígia no período chuvoso.....	73
Figura 21 - Limites de penetração da maré salina, próximo ao fundo, ao longo do estuário do rio Ipojuca durante os estágios de baixa-mar (BM, enchente (EM), preamar (PM) e vazante (VZ) em regime de quadratura no período chuvoso.....	74
Figura 22 - Limites de penetração da maré salina, próximo ao fundo, ao longo do estuário do rio Ipojuca durante os estágios de baixa-mar (BM, enchente (EM), preamar (PM) e vazante (VZ) em regime de sizígia no período de estiagem.....	75
Figura 23 - Limites de penetração da maré salina, próximo ao fundo, ao longo do estuário do rio Ipojuca durante os estágios de baixa-mar (BM, enchente (EM), preamar (PM) e vazante (VZ) em regime de quadratura no período de estiagem.	76

Figura 24 - Direção e intensidade das correntes superficiais durante a sizígia do período chuvoso. A linha azul corresponde à orientação da sessão amostral.....	79
Figura 25 - Direção e intensidade das correntes de fundo durante a sizígia do período chuvoso. A linha azul corresponde à orientação da sessão amostral.....	80
Figura 26 - Direção e intensidade das correntes superficiais durante a quadratura do período chuvoso. A linha azul corresponde à orientação da sessão amostral.....	80
Figura 27 - Direção e intensidade das correntes de fundo durante a quadratura do período chuvoso. A linha azul corresponde à orientação da sessão amostral.	81
Figura 28 - Direção e intensidade das correntes superficiais durante a sizígia do período de estiagem. A linha vermelha corresponde à orientação da sessão amostral.	81
Figura 29 - Direção e intensidade das correntes de fundo durante a sizígia do período de estiagem. A linha vermelha corresponde à orientação da sessão amostral.	82
Figura 30 - Direção e intensidade das correntes superficiais durante a quadratura do período de estiagem. A linha vermelha corresponde à orientação da sessão amostral.....	82
Figura 31 - Direção e intensidade das correntes de fundo durante a quadratura do período de estiagem. A linha vermelha corresponde à orientação da sessão amostral.....	83
Figura 32 - Direção e intensidade das correntes superficiais durante a sizígia do período de estiagem. A linha vermelha corresponde à orientação da sessão amostral.	86
Figura 33 - Direção e intensidade das correntes de fundo durante a sizígia do período de estiagem. A linha vermelha corresponde à orientação da sessão amostral.	87
Figura 34 - Direção e intensidade das correntes superficiais durante a quadratura do período de estiagem. A linha vermelha corresponde à orientação da sessão amostral.....	88
Figura 35 - Direção e intensidade das correntes de fundo durante a quadratura do período de estiagem. A linha vermelha corresponde à orientação da sessão amostral.....	89
Figura 36 - Concentração de sólidos suspensos totais para superfície, meio e fundo das estações amostrais durante a sizígia do período	

chuvoso.....	91
Figura 37 - Concentração de sólidos suspensos totais para superfície, meio e fundo das estações amostrais durante a quadratura do período chuvoso.....	92
Figura 38 - Concentração de sólidos suspensos totais para superfície e fundo das estações amostrais durante a sizígia do período de estiagem.	92
Figura 39 - Concentração de sólidos suspensos totais para superfície e fundo das estações amostrais durante a quadratura do período estiagem....	93
Figura 40 - Concentração de sólidos suspensos totais para superfície e fundo das estações de refinamento durante a sizígia do período chuvoso....	96
Figura 41 - Concentração de sólidos suspensos totais para superfície e fundo das estações de refinamento durante a sizígia do período chuvoso....	96
Figura 42 - Concentração de sólidos suspensos totais SST (mg.L^{-1}) para as camadas superficiais e de fundo às estações amostrais S1, S2, S3 e S5 e de refinamento R1-RR3, durante a sizígia do período de estiagem.....	97
Figura 43 - Concentração de sólidos suspensos totais SST (mg.L^{-1}) para as camadas superficiais e de fundo às estações amostrais S1, S2, S3 e S5 e de refinamento R1-RR3, durante a quadratura do período de estiagem.....	98
Figura 44 - Diagrama de Hansen & Rattray para o estuário do rio Ipojuca às estações S1 a S3, durante ciclos de sizígia e quadratura nos períodos chuvoso e de estiagem.....	101
Figura 45 - Limites da maré salina ao longo do estuário do rio Ipojuca. Cada estágio da maré apresentou um limite distinto, sendo a área hachurada correspondente à área de variação do limite salino.	109
Figura 46 - Limites da maré dinâmica ao longo do estuário do rio Ipojuca para os períodos chuvoso e de estiagem, em regime de sizígia e quadratura. Região hachurada corresponde à área de variação do limite salino.....	110
Figura 47 - Localização da zona de turbidez máxima no estuário do rio Ipojuca (áreas hachuradas) para os períodos chuvoso e de estiagem, em regime de sizígia e quadratura e para os estágios de enchente, preamar, vazante e baixa-mar.....	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das marés com base na energia/amplitude.....	39
Tabela 2 - Coordenadas UTM (25L) e distâncias a partir da desembocadura das estações permanentes S1 a S6 na área de estudo.	47
Tabela 3 - Máximos, mínimos e média mensal de dados meteorológicos para as estações do Curado (Recife) e Ipojuca (Suape).	55
Tabela 4 - Máximos mínimos e média diária de dados meteorológicos para a estação de Ipojuca (Suape) durante o ano 2017.....	57

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	JUSTIFICATIVA.....	18
3	OBJETIVOS.....	20
4	HIPÓTESE DE TRABALHO	21
5	REFERENCIAL TEÓRICO.....	22
5.1	Estuários, conceito e zonação	22
5.2	Tipos e classificação dos estuários	23
5.2.1	Quanto à geomorfologia.....	23
5.2.2	Quanto ao balanço hídrico	26
5.2.3	Quanto à estratificação salina	28
5.2.4	Quanto à hidrodinâmica	29
5.3	Circulação e mistura em estuários	31
5.4	Marés astronômica e meteorológica	34
5.4.1	Geração das Marés (forçantes astronômicos e meteorológicos)	35
5.4.2	Ciclo das marés.....	36
5.4.3	Marés de equilíbrio e marés reais	38
5.4.4	Marés oceânicas x Mares costeiras e estuarinas.....	39
5.5	Sólidos em suspensão totais e zona de turbidez máxima.....	41
6	MATERIAIS E MÉTODOS	44
6.1	Área de estudo	44
6.2	Base cartográfica	47
6.3	Condicionantes meteorológicas	49
6.4	Levantamento morfobatimétrico.....	49
6.5	Caracterização e propagação das marés	50
6.6	Estrutura termohalina e regime salino	51
6.7	Regime das correntes e circulação estuarina	52
6.8	Sólidos totais suspensos e zona de turbidez máxima.....	52
6.9	Classificação do estuário do rio Ipojuca.....	53

7	RESULTADOS.....	54
7.1	Condições meteorológicas.....	54
7.2	Morfobatimetria	58
7.3	Propagação e caracterização das marés	62
7.4	Estrutura termohalina e maré salina.....	65
7.4.1	Estrutura Termohalina.....	66
7.4.2	Marés Salina	72
7.5	Circulação estuarina e maré dinâmica	79
7.5.1	Campo das Correntes	79
7.5.2	Limite da Maré Dinâmica.....	85
7.6	Sólidos suspensos totais e zona de turbidez máxima.....	90
7.6.1	Sólidos Suspensos Totais	91
7.6.2	Zona de Turbidez Máxima (ZTM)	94
7.7	Classificação estuarina.....	101
8	DISCUSSÃO	103
9	CONCLUSÕES	114
	REFERÊNCIAS.....	116

1 INTRODUÇÃO

Os estuários são ambientes costeiros transitórios, extremamente produtivos. Desempenham papéis ecológicos importantes, servindo de sítio de reprodução, crescimento, alimentação e como área de refúgio para inúmeras espécies de crustáceos, moluscos, peixes e aves. De forma ampla, Whitfield e Elliott (2011) definiram o estuário um “Corpo d’água costeiro semi-fechado conectado permanentemente ou periodicamente ao mar, com salinidade diferente daquela do oceano aberto adjacente devido a entrada de água doce, e que possui biota característica”.

Cerca de 70% das espécies potencialmente comercializadas utilizam os estuários em algum estágio de seu desenvolvimento (FRENCH, 1997). Junto com as zonas de ressurgência e baías, os estuários, embora correspondam a apenas 10% da superfície marinha, produzem mais de 95% do alimento que o homem captura no mar (CIRM, 1981).

Os estuários estão sujeitos à ação dos aportes fluviais, dos ventos e da oscilação das marés. Os padrões de circulação e mistura estuarina são bastante diversos dependendo ainda da morfologia e batimetria do sistema e do uso e ocupação de sua bacia de drenagem. Os mecanismos físicos que controlam a hidrodinâmica dos ambientes estuarinos variam horizontalmente e em profundidade, influenciando diretamente o transporte e distribuição de materiais como sais, nutrientes, sedimentos, poluentes, etc. (DYER, 1995).

Os ambientes estuarinos são propícios ao desenvolvimento de diversas atividades econômicas, incluindo àquelas ligadas a navegação, urbanização e lazer, indústria e comércio, pesca e aquicultura, em virtude da condição abrigada, paisagística, boa disponibilidade hídrica e condições hidroquímicas e geoquímicas peculiares. Essas ações e usos, quase sempre requerem modificações de suas características geométricas (alteração do traçado, retificação e dragagem de calha, etc.); modificam os aportes de água doce e marinha (construção de barragem, modificação da foz etc.); alteram a qualidade de suas águas (descarte de efluentes domésticos e industriais) e modificam a fisiografia de sua bacia (remoção da

vegetação, ocupação agrícola, industrial, etc.). Todas essas alterações repercutem fortemente no regime salino, nos processos de circulação e mistura das águas estuarinas, no tempo de residência de suas águas e nas trocas de materiais com as áreas costeiras (MIRANDA et al., 2002) e assim na sua qualidade ambiental.

2 JUSTIFICATIVA

Estima-se que cerca de 70% da população mundial habita a zona costeira, e, nas áreas tropicais, boa parte em áreas próximas aos estuários e recifes (UNEP, 2006). Ao longo do tempo, os ambientes estuarinos contribuíram para o desenvolvimento dos centros urbanos e industriais sofrendo, em consequência, desmatamento e ocupação de suas margens para o desenvolvimento de atividades agrícolas e de aquicultura, bem como para implantação de áreas residenciais e de instalações hoteleiras, de lazer, etc. (BARBIER, 2011). Sofreram também modificações de suas características geométricas pelas alterações de configuração de sua calha, através de retificação, dragagem, construções de guias-correntes e quebra-ondas, e modificação dos aportes de água doce e marinha, pela modificação de sua desembocadura e construção de barragem e captação de água para abastecimento doméstico e uso industrial (MIRANDA et al., 2002).

A área litorânea é um importante meio de distribuição das produções continentais e interceptação de extração marítima (pesca mineração, extração de gás e petróleo, etc.). O transporte de mercadorias intercontinentais é majoritariamente executado pelo transporte marítimo, neste cenário, se fazendo imperativa a construção de portos (MORAES, 2007).

Quanto ao uso e ocupação do solo ao longo da bacia hidrográfica do rio Ipojuca, predomina a atividade agrícola, ocupando 47,37% de sua extensão, 11,57% correspondendo à cultura da cana-de-açúcar (PERNAMBUCO, 2010.a). Com a crise da indústria açucareira no estado, devido à concorrência dos produtores do Centro-Sul, sobretudo depois da extinção do Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA) e da política governamental de subsídios, muitas áreas utilizadas para o plantio da cana-de-açúcar e usinas foram vendidas e incorporadas ao Complexo Industrial Portuário de Suape.

Hoje o rio Ipojuca figura dentre os rios Pernambucanos que sofreram maiores alterações em sua geometria e desembocadura (construção do Porto de Suape) bem como alterações das descargas fluviais pelas várias barragens e captação a fio d'água ao longo do mesmo. Figura ainda dentre os mais poluídos, recebendo grande

carga de efluentes domésticos e industriais ao longo de seu curso, estando entre os três primeiros entre os anos 2010-2012 e em sexto lugar durante o ano de 2015, pesquisa mais recente disponibilizada (IBGE, 2015).

É neste panorama que o presente projeto busca contribuir com informações sobre a propagação das marés no estuário do rio Ipojuca em função da sazonalidade do regime das chuvas e suas implicações para o regime salino, para os processos de circulação e mistura. Tal conhecimento constitui importante subsídio para o desenvolvimento de atividades direcionadas para a recuperação deste sistema e para a gestão e tomada de decisões voltadas à prevenção e/ou minimização de possíveis impactos causados pelo lançamento de efluentes e em caso de eventuais acidentes que aportem contaminantes para a área

3 OBJETIVOS

O objetivo geral do presente projeto é identificar e analisar a propagação e o comportamento das marés ao longo do trecho estuarino do rio Ipojuca e suas implicações para o regime salino neste sistema e para o tempo de residência de materiais e organismos dentro do mesmo. Mais especificamente, visa:

- Identificar o limite de penetração da maré salina e caracterizar os padrões de distribuição da salinidade e da temperatura no estuário do rio Ipojuca, e suas variabilidades espacial e temporal em função das forçantes astronômica e locais;
- Identificar o limite de penetração da maré dinâmica e caracterizar o padrão de circulação no estuário do rio Ipojuca, bem como suas variabilidades espacial e temporal em função da sazonalidade das chuvas e das marés;
- Identificar os limites superior e inferior de excursão e a localização média da zona de turbidez máxima no estuário do rio Ipojuca, em função da sazonalidade das chuvas e do regime das marés;
- Identificar o tipo no qual se enquadra o estuário do rio Ipojuca, segundo o sistema de classificação de Hansen e Rattray para os períodos chuvoso e de estiagem e em função das forçantes astronômicas e locais.

4 HIPÓTESE DE TRABALHO

A interação da onda da maré com a geometria do estuário e com o fluxo de água doce resulta em modificações na amplitude da onda de maré. No estuário do rio Ipojuca, as modificações de sua calha e estrangulamento de sua desembocadura pelo aterro para construção do Porto de Suape, hoje restrita a uma pequena abertura no recife principal, resultaram em uma acentuada assimetria no ciclo de enchente e vazante das marés e em um maior tempo de residência de suas águas.

O comportamento descrito acima bem como os limites da intrusão salina, da maré dinâmica e localização da zona de turbidez máxima respondem também à sazonalidade do regime das chuvas e captação de água para abastecimento que controlam a entrada de água doce no sistema.

5 REFERENCIAL TEÓRICO

Nas sessões a seguir estão discutidos os conceitos e características dos estuários, bem como suas diferentes formas de classificações, a teoria e comportamento das marés e sua dinâmica no ambiente estuarino e por fim a interação entre os sólidos em suspensão na coluna d'água com o sistema físico estuarino.

5.1 Estuários, conceito e zonação

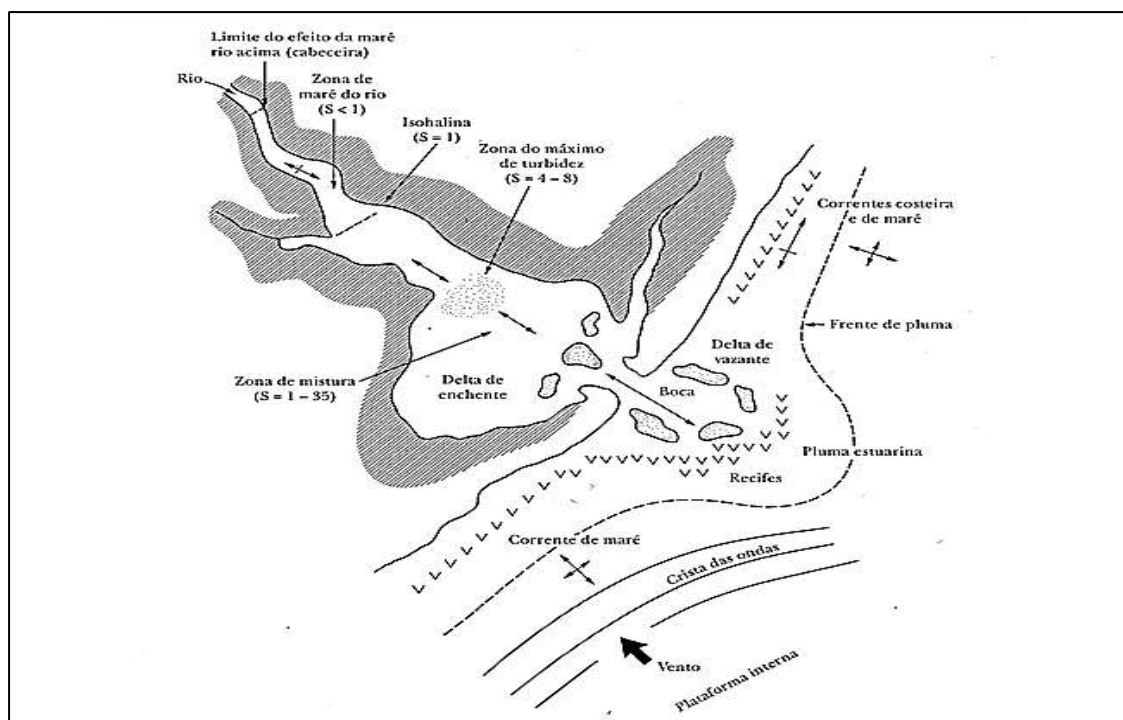
Classicamente, tem-se definido como estuários, os corpos de água costeira semifechados, com uma livre ligação com o oceano aberto, e no interior dos quais a água do mar era mensuravelmente diluída pela água doce oriunda da drenagem continental (CAMERON & PRITCHARD, 1963; PRITCHARD, 1967). Essa definição, embora amplamente utilizada, exclui vários sistemas e regiões com características de estuários.

Modernamente, prefere-se a definição de Kjerfve (1989), que os considera como reentrâncias costeiras com conexão restrita com o oceano, permanecendo aberta pelo menos de forma intermitente.

Segundo Miranda et al. (2002), esses sistemas assim definidos, podem ser subdivididos em 3 zonas (Figura 1), apresentando características distintas, a saber: (1) uma zona de maré do rio (ZR), caracterizada por ausência de salinidade na água, mas submetida à subida e descida e excursão das marés; (2) uma zona de mistura (ZM), caracterizada pela mistura de água doce proveniente da drenagem continental com a água salgada oriunda da região costeira adjacente e apresentando gradientes químicos, físicos, bióticos; e (3) uma zona costeira (ZC) correspondendo a uma região com turbidez elevada, à jusante da embocadura do estuário e entendendo-se tão longe quanto for observada a pluma de maré vazante no momento de descarga máxima.

O limite superior da zona fluvial correspondendo ao limite de penetração da maré dinâmica e a interface entre as zonas fluvial e de mistura correspondendo ao limite de propagação da maré salina.

Figura 1. Representação funcional de um sistema estuarino, com delimitação de sua zonas fluvial, de mistura e costeira.



Fonte: Miranda et al. (2002)

5.2 Tipos e classificação dos estuários

Por apresentarem características muito diversas, vários sistemas têm sido propostos ao longo dos anos para a classificação dos estuários, com base em diferentes aspectos.

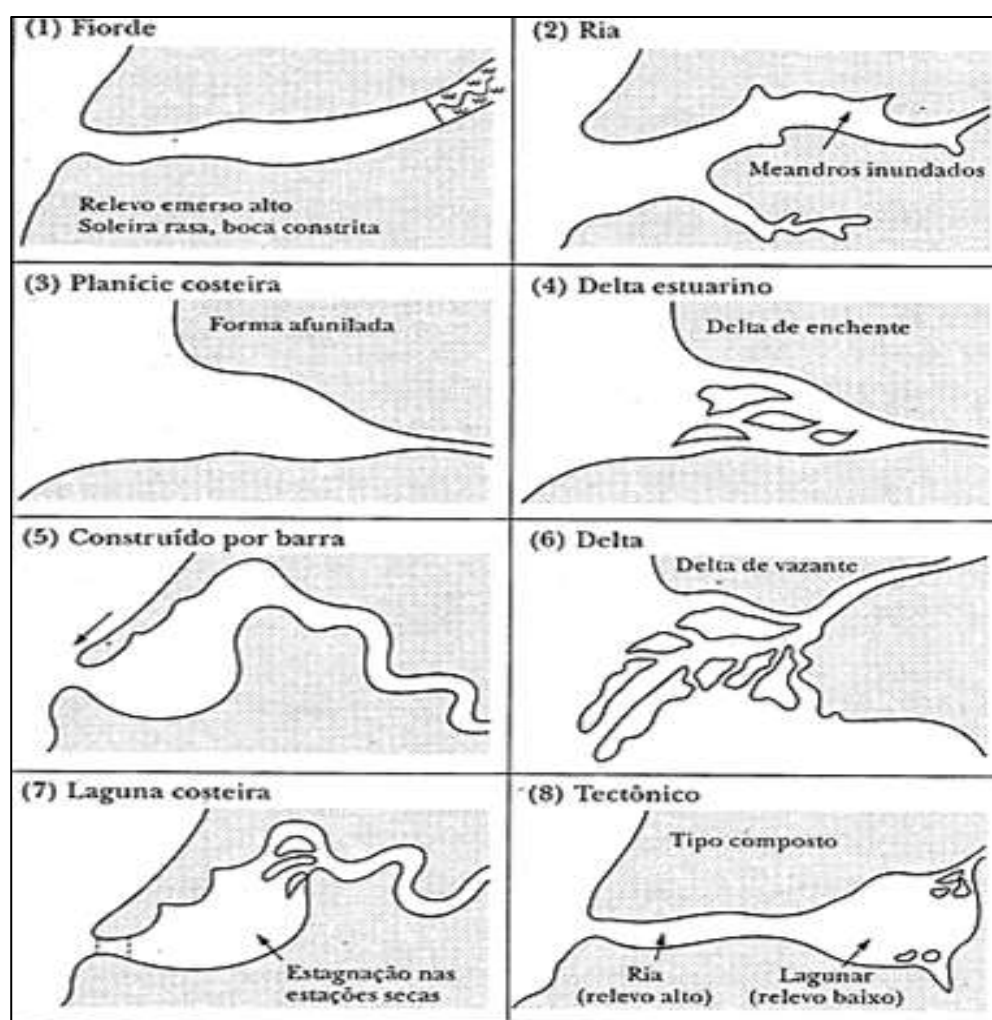
5.2.1 Quanto à geomorfologia

O sistema de classificação dos estuários proposto por Fairbridge (1980) enfatizava o caráter Morfológico dos estuários e identifica 8 tipos básicos (Figura 2).

Os estuários do tipo Fiorde são encontrados em regiões de altas latitudes, sujeitos a intensa atividade de geleiras como as áreas do Alasca, Groelândia, Columbia Britânica, Noruega, Nova Zelândia, Antártica e Chile. Foram formados pelo rebaixamento do relevo devido ao peso do gelo, e/ou pela escavação de vales estreitos, alongados e profundos quando da movimentação de blocos de gelo desgarrados (VALLE-LEVINSON, 2010). À medida que esses blocos deslizavam em

direção à costa, a ação erosiva do gelo e das águas de degelo foram diminuindo, resultando no acúmulo de grandes quantidades de rochas e sedimentos próximo à sua desembocadura, formando as soleiras ou morenas que restringem grandemente as trocas com as áreas oceânicas adjacentes. Nos fiordes a descarga fluvial e a circulação ficam praticamente restritas a camada mais superficial, acima do nível da soleira com a camada de água mais profunda mais salina e praticamente isohalina e com o nível da haloclina muito próximo ao da soleira (MIRANDA et al., 2002).

Figura 2. Tipos morfológicos de estuários. (1) Fiorde; (2) Ria; (3) Planície Costeira; (4) Delta Estuarino; (5) Construído por Barra; (6) Delta; (7) Laguna Costeira e (8) Tectônico.



Fonte: Miranda et al. (2002)

Outro estuário que também pode ter sua origem de atividades glaciais e tectonismo são os estuários do tipo Ria. Estes foram formados pela elevação de áreas continentais em que havia trechos interiores de rios. Esta elevação tendo

ocorrido quando do derretimento de grandes geleiras, resultando em um alívio do peso que exerciam. As Rias correspondem assim a vales de rios soerguidos e posteriormente preenchido pela elevação eustática do nível relativo do mar (VALLE-LEVINSON, 2010). Ocorrem em áreas montanhosas de altas latitudes ocupadas no passado por geleiras e apresentam normalmente uma calha semelhante a um canal entrecortado em seu trecho superior e afunilado em seu trecho mais próximo ao mar (MIRANDA et al., 2002).

Os estuários de Planície Costeira são aqueles formados pela inundação de meandros de antigos vales fluviais a partir da transgressão do mar durante o Pleistoceno Tardio-Holoceno (VALLE-LEVINSON, 2010). Em geral este tipo de estuário apresenta formato afunilado e calha larga (vários quilômetros) e rasa, com uma profundidade média de 10 metros ao longo de seu curso e de 20-30 metros em sua desembocadura (PERILLO, 1996), estando sua circulação principalmente dependente da descarga fluvial e das variações da maré.

Em regiões em que os rios transportam grandes quantidades de sedimentos, os mesmos podem ser depositados próximos à desembocadura do estuário originando diferentes conformações em função da ação da descarga do rio, das ondas e das marés. No caso do estuário estar localizado em áreas de macromaré, a deposição dos sedimentos ocorre mais internamente, formando os deltas estuarinos. No caso dos estuários estarem localizados em áreas de micromaré, sofrendo maior influência do fluxo dos rios, os depósitos de sedimentos ocorrerão sobre a plataforma e serão trabalhados pelas ondas, formando os deltas (MIRANDA et al., 2002).

Os estuários construídos por barra foram originados a partir da última transgressão marinha pelo fechamento parcial de áreas de baías e reentrâncias. A deriva litorânea resultante do trabalho das ondas acumularam sedimentos em uma de suas margens formando cordões de sedimentos e limitando seu contato com o oceano (MIRANDA et al., 2002). Esses estuários tendem a se fecharem e perderem contato com o mar, podendo dar origem a lagunas costeiras.

As lagunas costeiras são zonas de represamento de águas rasas que estão

separadas do oceano por uma barra arenosa paralela à costa, podendo possuir conexão com o oceano através de pequenas passagens intermitentes, sendo o vento o principal fator de movimento. O contato limitado com o mar tende a atenuar o efeito da maré no interior desses sistemas. Em função de sua conexão com o mar, as lagunas costeiras são subdivididas em três tipos: (1) lagunas sufocadas, quando conectadas apenas por um canal estreito que atua como um filtro dinâmico; (2) lagunas restritas, quando apresentam dois ou mais canais de conexão com o mar e (3) laguna vazada, havendo a presença de múltiplos canais de maré (MIRANDA et al., 2002).

Estuários tectônicos são formados quando, devido a algum evento tectônico não característico dos demais tipos estuarinos, formam-se falhas em regiões adjacentes ao oceano, sendo então preenchidos com a água marinha. Normalmente possuem vários caracteres morfológicos, sendo chamados de estuários de tipo composto.

5.2.2 Quanto ao balanço hídrico

Quanto ao balanço hídrico, os estuários podem ser classificados em (1) Positivos; (2) Negativos e (3) Neutros (Figuras. 3A-C).

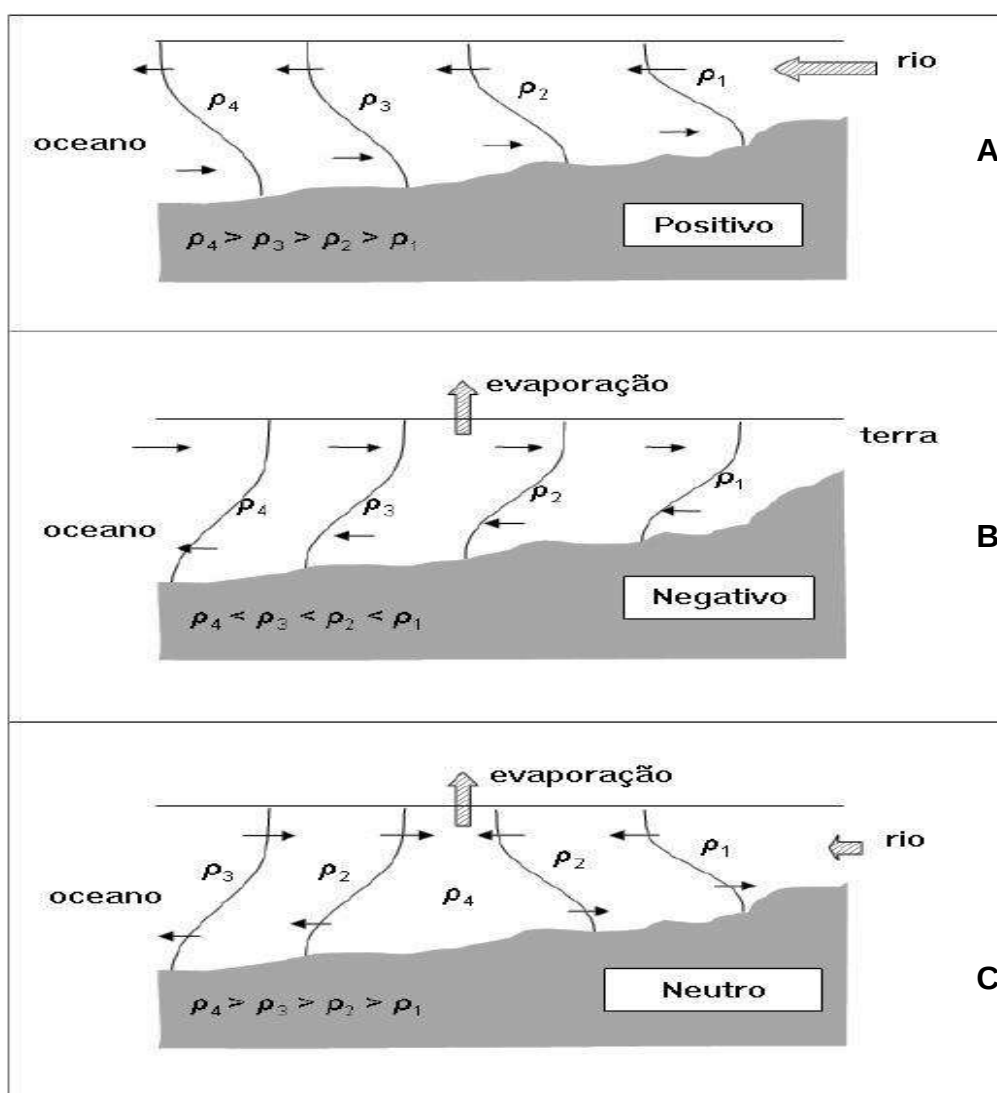
Os estuários são ditos positivos (Figura 3A) quando as adições de água doce derivadas dos rios, chuvas, degelos, etc. excedem a quantidade de água que é perdida pelo sistema (evaporação, evapotranspiração, percolação, etc.), criando um gradiente longitudinal de densidade em direção ao oceano, resultando em um escoamento superficial em direção ao mar mais forte que o fluxo para montante próximo ao fundo, e uma circulação do tipo gravitacional ou estuarina clássica (VALLE-LEVINSON, 2010). A maioria dos estuários são classificados como positivos.

Os estuários do tipo negativo (Figura 3B) são assim chamados por apresentarem um gradiente de densidade inverso ao dos positivos (aumenta para montante). Ocorrem em regiões áridas, com elevada taxa de evaporação, onde as perdas de água excedem os ganhos, provocando uma condição de águas

hipersalinas relativas àquelas oceânicas adjacentes (VALLE-LEVINSON, 2010). Esses sistemas apresentam um fluxo líquido para montante associado a um forte fluxo para montante próximo à superfície e um fluxo menor para jusante próximo ao fundo.

Os estuários do tipo neutro (Figura 3C) sofrem baixa influência da descarga fluvial. Em decorrência, durante estações de seca ocorre a formação de uma zona de salinidade máxima, fazendo com que o estuário apresente características de tipo positivo à sua montante e características negativas à jusante desta zona.

Figura 3. Tipos de estuário quanto ao balanço hídricos. (A) Positivos; (B) Negativos e (C) Neutros.



Fonte: Valle-Levinson (2010).

5.2.3 Quanto à estratificação salina

Os estuários podem também ser classificados em função de sua estrutura vertical salina, ou seja, levando em consideração o balanço entre os forçantes que tendem a estratificar a coluna d'água (entrada de água doce) e aqueles que tendem a homogeneizá-la (marés, ventos, etc.). Nessa ótica, reconhecem-se quatro tipos distintos: (1) Cunha salina; (2) Fortemente Estratificado; (3) Parcialmente Estratificado e (4) Bem Misturados (PRITCHARD, 1955).

Os estuários de cunha salina correspondem àqueles sistemas que recebem um elevado fluxo fluvial e que estão sujeitos a uma fraca a moderada ação das marés, fazendo com que a camada superior da coluna de água seja preenchida basicamente por água doce, enquanto que a água salgada oceânica, mais densa, penetra em forma de cunha, apenas muito próximo ao leito estuarino principalmente durante o estágio de maré enchente. Esta cunha pode não estar presente durante os períodos de estiagem (VALLE-LEVINSON, 2010). Este tipo de estuário apresenta um gradiente vertical de salinidade estável, com uma haloclina bem definida, quase horizontal. O fluxo médio dominante está direcionado para o mar ao longo de quase toda coluna d'água e por um reduzido fluxo estuário acima, apenas para a camada próxima ao fundo. Praticamente não ocorre mistura entre as duas camadas, apenas um entranhamento mínimo da água salgada para a camada superior e que é transportada advectivamente estuário abaixo (MIRANDA et al., 2002).

Os estuários fortemente estratificados assemelham-se aos estuários de cunha salina, porém a estratificação da coluna d'água é um pouco mais suave e se mantém ao longo de todo ciclo das marés. São normalmente estuários profundos, sob moderada a grande influência fluvial e sob uma ação fraca a moderada das marés, esta insuficiente para promover a mistura completa da coluna d'água. Apresentam uma haloclina bem desenvolvida separando uma camada mais superficial de baixa salinidade e uma camada mais profunda com salinidade próxima à das águas costeiras adjacentes. O fluxo líquido é para montante na camada acima da haloclina e para jusante na camada abaixo dela. A mistura entre essas duas camadas é bastante reduzida (MIRANDA et al., 2002; TRUJILLO & THURMAN, 2010).

Os estuários parcialmente estratificados, também denominados parcialmente misturados, caracterizam-se por receberem uma descarga fluvial moderada, serem fortemente influenciados pelas marés e apresentam uma vigorosa mistura ao longo da coluna d'água (VALLE-LEVINSON, 2010). A haloclina é suave, com a salinidade aumentando progressivamente da superfície até o fundo. Apresentam um padrão de circulação dita estuarina clássica, em que a água salgada adentra o estuário abaixo da camada de água doce proveniente do continente e o volume transportado na camada acima da haloclina estando direcionado para jusante e equivalendo ao volume descarregado pelo rio (MIRANDA et al., 2002).

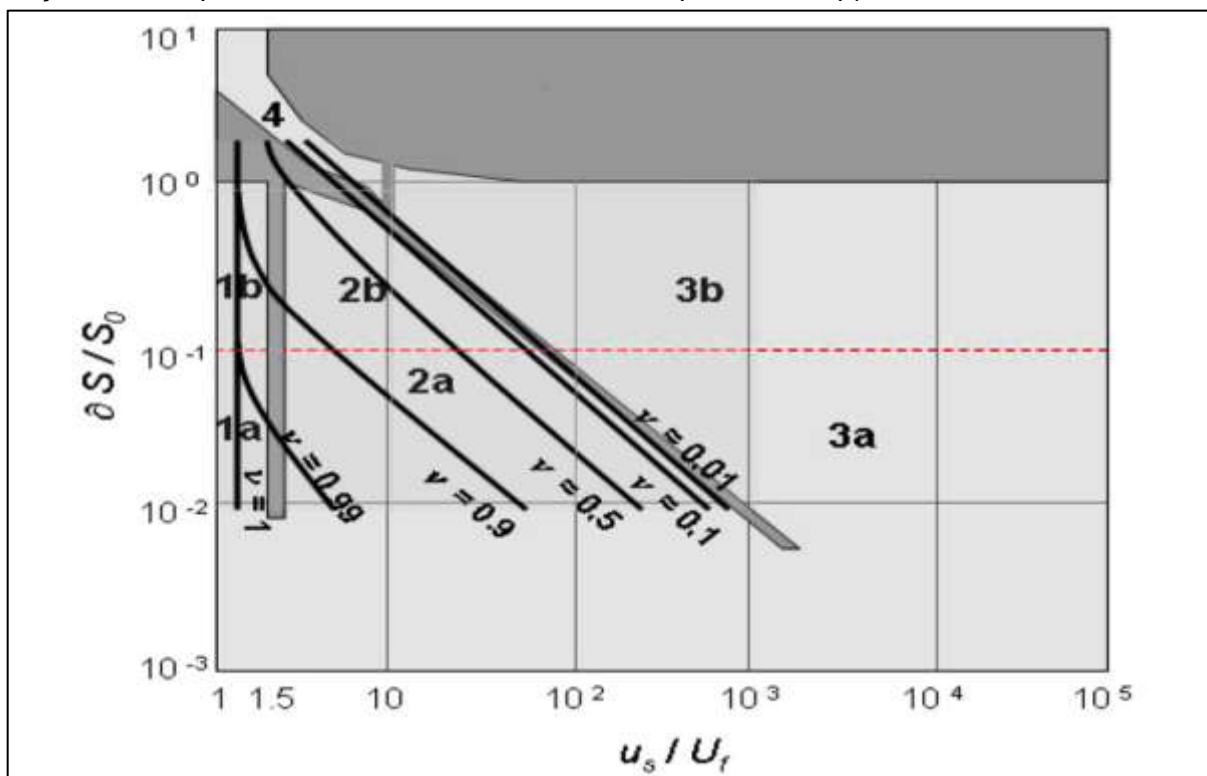
Os estuários bem misturados são em geral rasos e/ou estreitos e recebem um reduzido aporte de água doce. Aqui a turbulência causada pelas correntes de maré é capaz de homogeneizar toda a coluna d'água impedindo a formação de uma haloclina permanente (VALLE-LEVINSON, 2010). O fluxo de sal para montante ocorre por difusão turbulenta e é balanceado pela advecção de água doce para jusante. Em sistemas de regiões temperadas, onde o aporte de água doce experimenta marcada sazonalidade, uma haloclina temporária pode surgir nos períodos de maior fluxo de água doce continental (GARRISON, 2010).

5.2.4 Quanto à hidrodinâmica

Uma classificação dos estuários com base em sua hidrodinâmica é desejável, uma vez que permitiria identificar e compará-los em função das principais forçantes e/ou processos que atuam nos mesmos. Neste sentido, várias proposições têm sido apresentadas. Muitas delas baseiam-se em parâmetros adimensionais que representam o balanço entre duas forças ou processos, a exemplo dos números de Richardson, Froude, Reynolds, etc.

O sistema proposto por Hansen e Rattray (1966) é o mais amplamente empregado. Consiste em um diagrama conectando dois parâmetros adimensionais que representam o grau de circulação (eixo OX) e de estratificação (eixo OY) nos estuários integrados ao longo do ciclo das marés (Figura 4).

Figura 4. Diagrama de Hansen e Rattray para classificação dos estuários com indicação da fração do transporte total horizontal de sal causado por difusão (v).



Fonte: Valle-Levinson (2010).

O parâmetro de circulação é U_s/U_f , onde U_s é a corrente média longitudinal à superfície e U_f é a corrente média longitudinal através da secção estuarina. O parâmetro da estratificação é $\partial S/S_0$, onde ∂S é a diferença entre a salinidade à superfície e de fundo e S_0 é a salinidade média da coluna d'água.

A partir dos parâmetros de circulação e estratificação é possível determinar os processos que governam o fluxo de sal que adentra o estuário. Seja v a fração do transporte total horizontal de sal causado por difusão e variável de 0 a 1. O parâmetro v classifica o transporte salino como dominado por processos advectivos dos efeitos fluviais e gravitacionais ($v \rightarrow 0$), ou como dominado por difusão turbulenta gerada pela maré ($v \rightarrow 1$) (VALLE-LEVINSON, 2010). Em função de sua localização no diagrama, os estuários podem ser grupados em quatro tipos distintos, tipos de 1 a 4, admitindo-se ainda os subtipos **a** e **b** para os tipos 1 a 3. Os estuários do subtipo **a** seriam aqueles fracamente estratificados, e os do subtipo **b**, os

altamente estratificados. O valor de referencia $\partial S/S_0 = 10^{-1}$ corresponde a um valor de transição entre os estuários dos subtipos **a** (fortemente estratificados) e **b** (parcialmente estratificado).

Um estuário é classificado como tipo 1 quando apresenta dominância de transporte salino a partir de processos de difusão e homogeneidade lateral. Verticalmente, pode apresentar leve estratificação (Tipo 1a) com fraca descarga fluvial ou apresentar condições de maior estratificação (Tipo 1b) quando submetido a maiores entradas de água doce.

O estuário do Tipo 2 apresenta inversão de fluxo com a profundidade, apresentando influências tanto de processos advectivos e dispersivos para o transporte salino para montante, podendo ser pouco (Tipo 2a) ou altamente (Tipo 2b) estratificado.

Já estuários do Tipo 3, são aqueles que apresentam características próprias de Fjorde, apresentando fluxo em duas camadas e transporte salino principalmente de forma advectiva para a montante, também podendo ser classificado em pouco (Tipo 3a) ou altamente (Tipo 3b) estratificado.

Estuários ditos como de cunha salina são classificados como Tipo 4, apresentam uma haloclina bem definida, estando o fluxo de água doce restrito a área superior do perfil vertical. O transporte salino pode ocorrer tanto de modo advectivo como dispersivo (SILVA, 2000; MIRANDA et al., 2002; VALLE-LEVINSON, 2010).

5.3 Circulação e mistura em estuários

A circulação e mistura em um estuário responde a diversos fatores, dentre os quais, a descarga fluvial, as correntes de maré, o gradiente de densidade, os ventos e a batimetria do sistema. Sendo também condicionada pela intensidade das correntes nos distintos regimes de maré. Os aportes de água doce e penetração da água marinha pelas marés são os principais forçantes que governam a hidrodinâmica e os processos advectivos, dispersivos e de difusão turbulenta que misturam a água doce com a água do mar nos estuários, condicionando o transporte

e a distribuição das concentrações de propriedades nesses sistemas bem como o tempo de residência das águas estuarinas e suas trocas com as áreas costeiras (PARKER, 1991; BONETTI FILHO & MIRANDA, 1997; MIRANDA et al., 2002).

Coligado com a circulação estuarina está a corrente residual no estuário, ou seja, a direção predominante do fluxo. Segundo Dyer (1995), existem dois tipos de correntes residuais, a circulação clássica ou gravitacional e a por bombeamento de maré.

A circulação gravitacional é gerada por diferenças de densidade, sendo caracterizada pelo fluxo bidirecional em duas camadas. A camada superficial é ocupada pela água doce fluvial, de menor densidade e que geralmente apresenta velocidade residual em direção ao oceano; enquanto que a camada de fundo é ocupada pela água marinha, mais densa e com velocidade residual rio adentro, dando origem a um gradiente vertical e longitudinal de salinidade. Esse tipo de circulação é característico de estuários parcialmente misturados.

No modo de circulação por bombeamento de maré, o gradiente salino ocorre apenas longitudinalmente no estuário, de forma unidirecional. Esse tipo de circulação é observado em ambientes com dominância da maré e/ou pouca influência fluvial, ou ainda nos casos em que os rios recebem elevada descarga fluvial, relativa à força da maré (sistemas com micromarés, por exemplo), sendo comum em estuários bem misturados. A velocidade residual se dá segundo o regime da maré, quando esta é dominante, ou em direção ao oceano, quando o fluxo fluvial seja sempre dominante.

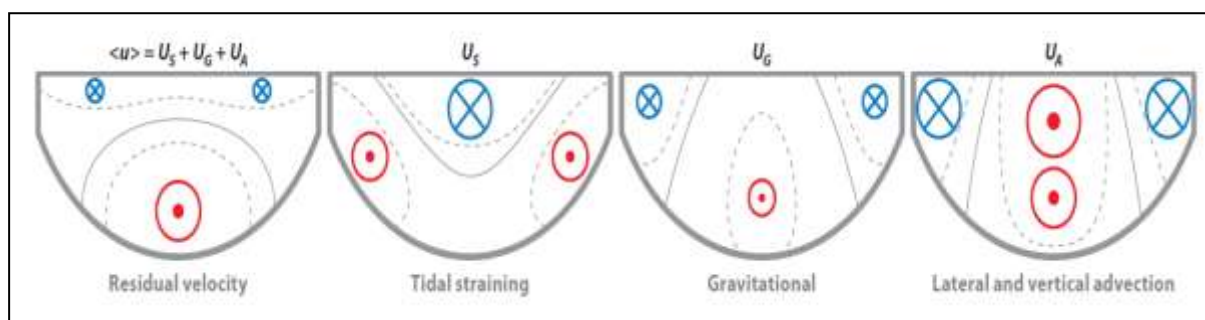
Outro fator que pode influenciar a circulação estuarina, dependendo do formato e profundidade do estuário, é o cisalhamento do vento. Estuários rasos e com área extensa abertas, a exemplo das lagoas costeiras, podem ser fortemente influenciadas pelos ventos, gerando um modo de circulação denominado de circulação eólica. Neste tipo de circulação, em sendo a pista sujeita à ação do vento larga suficiente e o vento duradouro, tensão friccional é produzida na direção de ação do vento gerando ondas e correntes que podem causar distúrbios dos gradientes verticais de salinidade (MIRANDA et al., 2002).

Segundo Geyer & Maccready (2014), a topografia desempenha um papel importante na circulação de um estuário, com as correntes de maré tendendo a entrar preferencialmente pelas áreas mais profundas e a deixarm o sistema pela superfície do canal central ou áreas mais rasas. Lee et al. (2013), ao estudar as correntes de maré na desembocadura de um estuário raso do Golfo do México, concluiu que a batimetria e a forma da desembocadura de um estuário pode ocasionar vórtices e fluxos opostos tanto à jusante quanto à montante da mesma, principalmente em estuários em que há uma mudança brusca de comprimento, como por exemplo pela presença de costões rochosos. As maiores velocidades de fluxo são encontradas nas áreas de maior profundidade, enquanto que as menores velocidades encontram-se próximos aos costões.

O rio fornece energia potencial com a diferença de densidade entre a água doce e marinha, causando circulação gravitacional vertical (dependente do gradiente longitudinal da salinidade), enquanto a maré fornece energia cinética ao estuário, provocando diferentes tipos de mistura e dissipando a energia da maré. Dentre os tipos de mistura provocados pela maré tem-se a turbulenta (mistura advectiva), cisalhamento, aprisionamento de água nas marés e nas extremidades mortas (em estuários estreitos e com grande diferença de fase), correntes residuais na seção transversal, correntes residuais sobre as planícies de maré e águas rasas e mistura cruzada entre canais de irrigação (SAVENIJE, 2012)

A principal força motriz para a intrusão salina é o gradiente de profundidade, contudo, principalmente em estuários fracamente estratificados e com amplitude de maré irrisória em comparação com a profundidade (estuários profundos ou de micro-marés), a circulação lateral, ou transversal, originada por advecção diferencial, rotação e camadas de limites difusivas, pode funcionar como uma força adicional ao movimento, o atrito lateral faz com que a vazante seja mais intensa do que a enchente. Em geral, a velocidade residual estuarina depende das forças da maré, gravitacional e de advecção (Figura 5) (LERCZAK & GEYER, 2004; BURCHARD et al., 2011; GEYER & MACCREADY, 2014).

Figura 5. Decomposição dos componentes de velocidade residual em uma sessão estuarina ideal baseada nas simulações de Buchard et al. (2011). Os círculos vermelhos indicam a entrada de água no estuário, enquanto que os azuis estão escoando em direção ao oceano.



Fonte: Geyer & Maccready (2014)

Segundo a esquematização acima, nas regiões profundas centrais da parábola, as correntes residuais estão adentrando o estuário, enquanto o fluxo sai do estuário pela superfície, sendo o principal componente o de advecção (U_A).

A salinidade em estuários profundos tendem a ter um perfil tipo 1 de Pickard, com uma haloclina bem definida separando as duas camadas. A transferência vertical nesse caso se dá por entranhamento e ressurgência induzido pelo cisalhamento entre as camadas. À medida que se afasta da desembocadura do estuário, a circulação gravitacional ganha força (DEVINE, 1983). Em estuários rasos parcialmente estratificados, ou seja, com maior influência fluvial, a transferência vertical de sal se dá principalmente pela mistura gravitacional.

5.4 Marés astronômica e meteorológica

Por marés, entende-se o movimento vertical de subida e descida do nível do mar que ocorre durante o dia, podendo ser observado a partir de áreas litorâneas (TRUJILLO & THURMAN, 2010). As marés são resultantes da combinação dos efeitos dos corpos celestes, principalmente da Lua e do Sol sobre os mares e oceanos e seus movimentos relativos. As marés são consideradas ondas forçadas, pois estão sempre ligadas às forças que lhe dão origem. São fundamentalmente ondas de águas rasas, cujo comprimento corresponde à metade da circunferência terrestre (GARRISON, 2010), com a crista e o cavado desta onda correspondendo, respectivamente, à preamar e baixa-mar.

Marés resultantes das forças gravitacionais da Lua, Sol e Terra e seus movimentos são ditas marés astronômicas, enquanto que fatores como tempestades, ventos, entradas de frentes, etc. que possam resultar em uma elevação ou redução do nível das águas em um período ou região, são referidos como marés meteorológicas (VAN RIJN, 2010).

5.4.1 Geração das Marés (forçantes astronômicos e meteorológicos)

A amplitude das marés astronômicas responde primordialmente às posições relativas do Sol, Lua e Terra. A Lua exerce uma influência sobre as marés 2,18 vezes superior a do Sol, mesmo apresentando uma massa 27 milhões inferior a dele (GARRISON, 2010). Isso porque as forças geradoras das marés são inversamente proporcionais ao cubo da distancia que separa cada corpo celeste da Terra.

A cada 27,3 dias o sistema Terra-Lua gira em torno de seu centro de massa, localizado a cerca de 1.650 km abaixo da superfície terrestre. Segundo a teoria do equilíbrio de Newton para as marés, que desconsidera a geomorfologia da Terra e considera que o oceano está sempre em equilíbrio com as forças que agem sobre ele, a gravidade da Lua atrai a superfície do oceano em direção a esta, formando um bulbo, e o movimento da Terra ao redor do centro de massa do sistema cria outro bulbo na face oposta da Terra (WRIGHT, 1999). Devido aos movimentos de rotação da Terra e variações no movimento da Lua (circundando a Terra a cada 24h 50min, cinquenta minutos a mais do que o dia solar, um dado local apresentará marés altas, correspondendo aos bulbos, ou marés baixas, correspondendo às cavas. Da mesma forma, o Sol também influencia nas marés, contudo com apenas 46% da influência da Lua, pois se encontra 387 vezes mais distante (TRUJILLO & THURMAN, 2010). As marés solares, causadas pelo sistema Sol-Terra, de forma semelhante às lunares, também produzem bulbos que são alinhados com a posição do sol, no entanto menos proeminentes.

As marés reais são um fenômeno complexo, uma vez que inúmeros fatores podem contribuir para que as mesmas não estejam sempre em equilíbrio com as forças que a geram. A morfologia variada dos fundos oceânicos, a presença dos continentes, o intervalo maior de tempo para que as águas dos oceanos respondam

aos movimentos do sistema Terra-Sol-Lua e a força de Coriolis interferem e modificam os padrões de maré em todo o globo (WRIGHT, 1999). Além dessas variáveis, cerca de 140 forças e variantes podem originar ou modificar as marés. Ainda, alterações temporais são também responsáveis por modificar a dinâmica da maré em uma determinada área. Estas marés meteorológicas podem ser causadas por desde um vento fraco e persistente em uma área rasa até por grandes tsunamis (GARRISON, 2010). As marés meteorológicas podendo assim ser consideradas como variantes locais das marés astronômicas.

5.4.2 Ciclo das marés

A maré é o resultado de uma conjuntura de fatores astronômicos que ocorrem em diferentes períodos. Separando cada um dos principais fatores conhecidos, têm-se os diferentes tipos de marés.

As marés de quadratura e de sizígia correspondem respectivamente às marés de menores e maiores amplitudes, em função das fases lunares e ocorrendo em alternância em intervalos de uma semana entre elas. Marés de sizígia, ou marés de águas viva, ocorrem quando o Sol, a Lua e a Terra estão alinhados (lua nova e lua cheia) fazendo com que as forças geradoras das marés do Sol e da Lua sejam aditivas e resultem em preamares mais elevadas e baixa-mares mais reduzidas. As marés de quadratura, ou marés de águas mortas, ocorrem quando o sistema Sol-Lua-Terra formam um ângulo reto (quarto crescente e quarto minguante) e a ação geradora de marés desses astros ocorram perpendicularmente. Nessas condições, tanto as preamares quanto as baixa-mares são pouco acentuadas.

Durante seu ciclo mensal, a lua não apresenta uma orbita uniforme ao longo do equador terrestre, mas um movimento que varia de $28,5^\circ$ a norte do equador até $28,5^\circ$ a sul (GARRISON, 2010). Esse fenômeno é denominado de declinação da Lua e ocorre duas vezes a cada 27,2 dias (ciclo lunar), influenciando diretamente na localização dos bulbos da Terra, fazendo com que durante o período em que a lua encontra-se no plano do equador, com zero de declinação, os bulbos também se alinhem no equador e formem as marés equatoriais. Quando a Lua está em seu ângulo máximo de declinação, ela localiza-se próximo aos trópicos (LAT 23° N e

23°S), fazendo com que se forme um bulbo no hemisfério norte e outro equivalente no hemisfério sul, dando origem às chamadas marés tropicais (WRIGHT, 1999). Durante os períodos de maré tropical, regiões temperadas que antes apresentavam duas marés altas durante um dia lunar, agora apresentarão deformações em suas amplitudes, pois, devido à declinação da Lua, uma de suas marés altas apresentará menor amplitude, podendo inclusive mudar para um padrão de maré diurna, com apenas uma maré alta (WOODROFFE, 2002).

Como a órbita da Lua ao redor do centro de massa é elíptica, durante seu ciclo mensal, a Lua assume posições de maior (Perigeu) ou menor (Apogeu) proximidade da Terra, fazendo com que a amplitude da maré aumente (maré de perigeu) e diminua (maré de apogeu).

A Terra descreve uma órbita também elíptica e torno do Sol, e com uma inclinação de seu eixo de 23,5°. Assim a declinação do Sol varia entre os trópicos de câncer (23,5° N) e de Capricórnio (23,5° S) ao longo do ano solar (STEWART, 2007). Quando o Sol encontra-se em seu equinócio, ou seja, próximo ao plano do equador, haverá um aumento na amplitude das marés, sendo esta ainda mais intensificada durante os períodos de sizígia. Essa maré extrema que ocorre durante os períodos de equinócio é chamada de maré equinocial.

Durante o mês de janeiro a Terra encontra-se em seu ponto mais próximo do Sol (Periélio) o que resulta nas marés de maiores amplitudes do ano, são as marés de primavera, pois é primavera no hemisfério norte. Durante o mês de julho ocorre o inverso. A Terra encontra-se em seu ponto mais afastado do Sol (Afelio), o que reduz ao máximo a influência desse astro sobre as marés e tem lugar as menores marés do ano (TALLEY et al., 2011). Eventos de marés extremas podem acontecer durante a junção de fatores astronômicos que aumentam a amplitude das marés, como por exemplo, marés de sizígia que ocorram durante o período em que a Lua e o Sol estejam mais Próximos da Terra com seus mínimos de declinação (regressão dos nodos), esse evento ocorre a cada 18,6 anos.

5.4.3 Marés de equilíbrio e marés reais

O modelo proposto pela maré de equilíbrio pressupõe um planeta Terra recoberto unicamente pelos oceanos que giraria livre abaixo dos bulbos de maré experimentando duas preamares e duas baixa-mares ao longo do dia.

A Terra, no entanto, possui extensas massas continentais, sobretudo no hemisfério norte. Essas barreiras físicas impedem que os bulbos de marés circunaveguem o globo terrestre, interrompendo os padrões ideais de marés astronômicas. Por ser a maré uma onda de longo período e os oceanos apresentarem uma profundidade média de cerca de 4 km, esta se comporta como onda de água rasa, com sua amplitude variando em função da profundidade local e seu deslocamento sendo retardado pelo atrito de fundo e modificado pelo posicionamento das massas continentais (WOODROFFE, 2002).

A presença dos continentes resulta no seccionamento dos oceanos em várias bacias. As correntes de marés são refletidas constantemente a partir de suas bordas, fazendo com que haja interferência nas ondas de marés posteriores. Essas interações dá origem à circulação anfidrômica e forma os nós e antinós, nos quais as ondas de maré possuem amplitudes mínimas e máximas, respectivamente (WOODROFFE, 2002).

A taxa de rotação da Terra em torno de seu eixo é muito rápida para a inércia das massas d'água para ser superada em tempo hábil para estabelecer um equilíbrio. Assim, um atraso na resposta dos oceanos é inevitável. Ainda bem, senão cada maré alta chegaria na forma de um tsunami.

Movimentos laterais induzidos pelas forças geradoras estão sujeitas a forças de Coriolis. Esta força faz com que as correntes de maré girem em volta dos nós, sendo no sentido anti-horário no hemisfério norte e horário no hemisfério sul. Estes locais são denominados de pontos anfidrômicos, ponto onde as ondas de maré não possuem amplitude. A maré aumenta de amplitude à medida que se distancia dos pontos anfidrômicos e que se aproximam de áreas costeiras mais rasas (TRUJILLO & THURMAN, 2010).

Vários critérios podem ser empregados na classificação das marés como sua periodicidade e amplitude.

Quanto à periodicidade, as marés podem ser classificadas em (1) marés semidiurnas; (2) marés diurnas e (3) marés mistas.

As marés são ditas semidiurnas quando apresentam duas preamares diárias de alturas próximas e que ocorrem a um intervalo de cerca de 12 horas e 25 minutos. As marés diurnas são caracterizadas pela ocorrência de uma única preamar a cada 24h e 50 minutos, sendo mais comuns em áreas semifechadas (golfs e baías) e em regiões de marés de pequena amplitude. Nos ciclos de marés mistas, as marés ocorrem duas vezes por dia, mas com uma grande desigualdade entre as premares, baixa-mares ou ambas. São comuns ao longo da costa oeste americana, Alaska e Hawai.

Quanto a amplitude, a classificação mais utilizada atualmente ainda é a feita por Davies (1964), onde separa os tipos de marés costeiras em micromaré, mesomaré e macromaré. Em 1979, Hayes ampliou este conceito separando a mesomaré e macromaré em inferior e superior (Tab. 1).

Tabela 1. Classificação das marés com base na energia/amplitude.

CLASSIFICAÇÃO	AMPLITUDE
Micromaré	< 1,0 m
Mesomaré Inferior	1,0 a 2,0 m
Mesomaré Superior	2,0 a 3,5 m
Macromaré Inferior	3,5 a 5,0 m
Macromaré	>5,0 m

Fonte: Davies (1964) expandida por Hayes (1979).

5.4.4 Marés oceânicas x Mares costeiras e estuarinas

A penetração da maré em um estuário depende inicialmente de suas características à desembocadura. Ao se propagar estuário acima, a onda da maré é geralmente amortecida e progressivamente distorcida pelas forças do atrito das margens e de fundo e pela vazão fluvial (IPPEN, 1966; GODIN, 1999).

As principais forças intervenientes no processo são as de gravidade (principal agente no escoamento fluvial), as de pressão (devidas aos desníveis na linha d'água gerados pela maré), as de atrito (geradas pela resistência no fundo), as inerciais e finalmente, as provenientes da estratificação da água (pelo encontro de água doce e salgada).

A interação da onda da maré com a geometria do estuário e com o fluxo de água doce resulta em modificações na amplitude da onda de maré e na transferência de energia a partir das constituintes harmônicas fundamentais que formam a maré superficial astronômica para outras frequências harmônicas (PARKER, 1991; GODIN, 1991; FRIEDRICHS & MADSEN, 1992).

A geração de harmônicos mais altos é denominada de assimetria da maré barotrópica, uma vez que distorce a superfície livre e causa correntes dominantes de maré enchente ou vazante, em função das fases relativas entre as constituintes fundamentais da maré e as sobremarés (SPEER & AUBREY, 1985).

A morfologia do estuário, a descarga fluvial e as características das marés determinam o volume de água que é armazenado no sistema (prisma de maré) e o tempo necessário para seu escoamento, e assim o tempo de residência hídrico (WANG et al., 2004), parâmetro importante como ferramenta para previsão da qualidade de suas águas e avaliação da capacidade do sistema estuarino de atuar como corpo receptor de efluentes.

Ventos locais e padrões climáticos podem também afetar as marés. Ventos fortes ao largo podem afastar a água da costa, intensificando a exposição às baixa-marés. Por outro lado, ventos fortes na costa, podem empilhar água sobre a costa, eliminando a exposição a baixa-mares e intensificando as preamares (THURMAN, 1994).

A presença de centros de alta pressão tende a rebaixar o nível do mar e a propiciar dias ensolarados com baixa-mares acentuadas, enquanto que a presença de centro de baixa-pressão contribui para dias nublados, chuvosos e com preamares acentuadas.

Ao se propagar estuário adentro, a onda de maré é geralmente modificada, podendo sofrer distorções, ser amplificada ou amortecida, função de sua interação com a morfobatimetria do sistema, atrito com margens e fundo e também pela interação com o fluxo em sentido contrário resultante da descarga fluvial. Sendo assim, a propagação longitudinal da maré pode ser do tipo amplificada, amortecida ou ideal. Em estuários pouco profundos, a influência fluvial e atrito com o fundo são importantes variáveis para a hidrodinâmica estuarina. Devido à fricção, a velocidade de descarga neste tipo de estuário é superior a de inundação, amortecendo a maré (GODIN, 1991).

5.5 Sólidos em suspensão totais e zona de turbidez máxima

Os sólidos em suspensão totais (SST) na água correspondem à fração fina de sólidos que são carregados pela água, apresentando diâmetro de partícula entre 0,45 μm e 63 μm e sendo composto principalmente por minerais (siltes e argilas) e componentes biogênicos. Abaixo de 0,45 μm o material encontra-se dissolvido na água. O SST tem como características principais, alta flexibilidade e relação área-volume, além de atividade eletrostática na superfície (CHESTER, 2000; WURL, 2009).

Sólidos em suspensão são carregados diariamente para o sistema estuarino, sendo o rio seu principal meio transportador (DAVIS Jr e FRTZGERALD, 2004). Tais sólidos acarretam o aumento da turbidez na coluna d'água, reduzindo a penetração de luz e assim a produção primária e consequentemente a produtividade secundária devido à diminuição do teor de oxigênio dissolvido (KOENING et al., 2002). Altas cargas de SST tendem a tornar as zonas costeiras mais lamosas o que traz prejuízos para o turismo e pesca.

Em seu trajeto até chegar ao estuário, os sedimentos podem sofrer modificações durante o processo de intemperismo, de decomposição física e/ou química. Em caso de decomposição química há o rompimento das ligações químicas do mineral, fazendo com que esses fragmentos estejam disponíveis em suas formas iônicas. Devido a sua carga negativa superficial, as argilas adsorvem tanto a matéria orgânica quanto cátions dispersos na coluna de água (LIBES, 2009); esses

aglomerados mais pesados sofrem deposição por gravidade após adesão no processo denominado de floculação.

Estuários atuam muitas vezes como verdadeiros filtros e ambientes de deposição de sedimento carregados pelos rios, pois através do processo de floculação o material em suspensão deposita-se no fundo, sendo então removido da coluna de água. Em ambientes acumuladores de SST, ou seja, onde o bombeamento da maré é predominante sobre a descarga fluvial, há o processo de assoreamento, causando a diminuição dos picos de cheia, aumento da assimetria de maré e maior mistura vertical (MIRANDA, 2002).

Em estuários, devido à grande dinâmica, a distribuição do SST está diretamente relacionada com a velocidade de corrente e por consequência com a maré (DAVIS Jr e FRTZGERALD, 2004). Ao correlacionar gráficos de maré e velocidade de correntes estuarinos, nota-se que durante os picos de baixa-mar e preamar a velocidade de corrente é nula, enquanto os maiores valores de velocidade de correntes, superficial e de fundo, são encontrados aproximadamente nas regiões intermediárias do gráfico de maré (vazante e enchente) (MIRANDA, 2002).

Os períodos de maior concentração de SST são observados nos momentos de maior velocidade de correntes, pois a movimentação evita a deposição dos flocos por gravidade e o atrito com o fundo resuspende o sedimento de fundo, fazendo-o voltar à coluna de água. O fundo sempre vai ter maior concentração de material particulado sólido do que a superfície, pois está mais próximo da fonte. Na baixa-mar e preamar, o material em suspensão irá sedimentar e não será possível ver claramente a predominância no fundo, ficando toda a coluna de água aproximadamente igual. Durante a enchente haverá uma concentração menor de SST do que durante a vazante, pois durante a enchente a influência marítima será maior, trazendo menos material em suspensão do que o rio (DAVIS Jr e FRTZGERALD, 2004).

A zona de turbidez máxima corresponde à região do estuário onde normalmente se encontra concentrações mais elevadas de SST. Sua localização

depende da energia das marés, morfologia do fundo estuarino e grau de estratificação do mesmo. Em estuários parcialmente estratificados, o cenário mais favorável para a formação dessas armadilhas de sedimentos é na convergência do fluxo junto ao fundo próximo ao limite de intrusão salina (UNCLES, 2002). Um dos motivos para essa maior aglomeração sedimentar é a mudança de pH, que na água doce é ácido, e no lado oceânico, levemente alcalino, pois devido a atividades redox, aumenta a reatividade do SST. Contudo, estudos recentes identificam outros mecanismos de acumulação, sendo essas zonas encontradas também em outros pontos estuarinos.

A maré está intrinsecamente relacionada ao acúmulo de material nos estuários. Quando os períodos de enchente e vazante em um estuário são distintos a maré é denominada como assimétrica. Essa assimetria pode ser predominante de enchente ou de vazante. Quando o período de vazante é superior ao de enchente, o estuário acaba por ser exportador de sedimentos para a zona costeira, enquanto que quando ocorre o inverso, ou seja, o período de enchente é superior ao período de vazante o estuário atua como sumidouro (acumulador) de sedimentos (DYER, 1995).

6 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia encontra-se compartimentada em tópicos, que descrevem a área de estudo e as estações amostrais, a confecção de base cartográfica, bem como os procedimentos técnicos para o levantamento morfobatimétrico e para o levantamento e tratamento/análise dos dados meteorológicos, hidrológicos e hidrodinâmicos.

Os trabalhos de coleta de dados foram conduzidos de forma a abranger os períodos chuvoso e de estiagem e a representarem os vários estágios de ciclos de marés de sizígia e quadratura em cada um desses períodos, ao longo de um ano.

Para a apresentação da dissertação seguiu-se as normas vigentes, estabelecidas pela Biblioteca Central da Universidade Federal de Pernambuco.

6.1 Área de estudo

O rio Ipojuca nasce nas encostas da serra Pau D'Arco, município de Arcoverde, a uma altitude de cerca de 900m (CONDEPE/FIDEM, 2005). Apresenta curso alongado de cerca de 250 km, sem afluentes importantes, desaguando no Oceano Atlântico, no limite sul do território do Complexo Industrial Portuário de Suape (CIPS).

A bacia de drenagem do rio Ipojuca (25L, 283321m E–714561m E; 9097055m N–9040835m N) ocupa uma área de 3.435,34 km² distribuída por vinte e cinco municípios da região Centro-Leste do Estado de Pernambuco, doze deles com suas sedes na bacia. A bacia do Ipojuca corresponde à Unidade de Planejamento Hídrico UP3 do Plano Estadual de Recursos Hídricos, PERH/PE, experimentando dois tipos climas e abrigando distintos biomas ao longo de sua extensão. Sua porção oeste compreende o início do sertão e atravessa todo o agreste, apresentado vegetação de caatinga até o início da zona da mata. Já sua porção leste, compreendendo a zona da mata e o litoral, apresenta coberturas de mata atlântica (PERNAMBUCO, 2010a).

O clima ao longo da bacia hidrográfica do rio Ipojuca varia de tropical quente e seco, do tipo Aw, com um período chuvoso de fevereiro a junho (chuvas de verão/outono) em sua porção mais oeste (trechos superior e parte do médio) a quente e úmido (Zona da Mata) em sua porção este (trecho inferior) no qual se insere a região estuarina do rio Ipojuca. Neste trecho, o clima é tropical quente-úmido, do tipo As' segundo o sistema de classificação climática Köppen (ANDRADE e LINS, 2001) e o regime pluviométrico varia de 1500 a 2.500 mm.ano⁻¹ com duas estações bem definidas: uma chuvosa, de março a agosto, com precipitação média mensal de 250 mm; e outra seca de setembro a fevereiro, com precipitação média mensal de 70 mm.

A pluviosidade varia tanto longitudinalmente quanto sazonalmente. No litoral de Pernambuco os principais sistemas que influenciam o clima são as frentes frias de maio a agosto (máximo em julho), as ondas de leste observadas nos ventos alísios do mesmo período e a brisas marítimas presentes durante todo o ano e intensificadas no inverno. Diferentemente da porção leste, no agreste e sertão o que determina o período de chuvas é a movimentação da zona de convergência intertropical (ZCIT), provocando chuvas no agreste pernambucano durante os meses de fevereiro a julho, onde se localiza a maior parte da bacia do Ipojuca, e nos meses de fevereiro a julho no sertão (PERNAMBUCO, 2010.b). A maior parte das chuvas é observada na sua porção inserida na zona da mata e litorânea. Segundo Salgueiro (2006), no litoral a média anual é cerca de 2000 mm e a zona da mata apresenta valores superiores a 1000 mm anuais, enquanto que no agreste a precipitação anual é inferior a 600 mm.

A temperatura do ar anual média na área da bacia do rio Ipojuca varia entre 20,46°C e 26,14°C (PERNAMBUCO, 2010b). A área litorânea caracteriza-se por apresentar pequena variação térmica, com temperaturas médias anuais variando entre 25°C a 30°C. As temperaturas mais elevadas são normalmente registradas durante os meses de primavera e verão (outubro a fevereiro) e as menores durante o inverno (junho a agosto), com média de 23°C (MANSO et al., 2006).

A maior parte da área da bacia hidrográfica do rio Ipojuca é representada por rochas cristalinas e cristalofilianas do pré-Cambriano, com domínio da unidade lito-estratigráfica Complexo Migmatítico-Granitóide - pCmi, em que granitos e granodioritos são predominantes sobre os migmatitos, sendo estes do tipo estromático, nebulítico e epibolítico (PERNAMBUCO, 2010b).

A bacia do Ipojuca é cortada pelo Lineamento Pernambuco, uma extensa falha transcorrente dextrogira com direção leste-oeste e que separa os gnaisses para o sul e os granitos dominantes ao norte, prolongando-se para oeste até áreas do município de Arcoverde (CONDEPE/FIDEM, 2005). As cotas variam ao longo da bacia, o primeiro setor correspondendo ao médio/baixo curso do rio, variando entre 40 e 150m até o município de Escada e entre 150 e 500m entre Escada e Chã Grande, já seu segundo setor inicia-se em Gravatá, onde há o primeiro contato com o Planalto da Borborema, com cotas superiores a 500m (PERNAMBUCO, 2010a). O planalto acaba por impedir que os ventos de leste influenciem no clima do agreste e sertão, fazendo com que dependam quase que exclusivamente da movimentação da ZCIT.

A grande maioria dos municípios cortados pelo rio Ipojuca não dispõe de sistema de coleta e tratamento de esgoto sanitário adequado, comprometendo grandemente a qualidade de suas águas. O rio recebe ainda efluentes de indústrias açucareira e fertilizantes e agrotóxicos carregados pelas chuvas das plantações de cana-de-açúcar e de outras lavouras e no seu trecho inferior, efluentes de indústrias instaladas no CIPS. Esta situação é agravada pelo fato de as trocas de suas águas com as águas marinhas serem reduzidas. A situação não é pior, graças ao papel depurador dos manguezais remanescentes na área (NEUMANN-LEITÃO, 1994).

Para o desenvolvimento dos trabalhos de campo, foram estabelecidas sete estações, sendo uma estação costeira S0, cerca de 1 km a jusante da desembocadura do Ipojuca, representativa do forçante marinho e seis distribuídas ao longo do estuário do rio Ipojuca (S1 a S6), com a estação S6, localizada cerca de 13,75 km a montante da desembocadura do rio Ipojuca, estabelecida de forma a representar apenas o fluxo fluvial do rio Ipojuca, sem influência das marés.

As estações S1, S2, S3, S5 e S6 seguem a calha natural do rio, enquanto que a estação S4 está localizada em um estreito canal artificial. Foram também estabelecidas 15 estações intermediárias (Estações R_{ij}) empregadas para o refinamento dos dados e delimitação dos limites das marés salinas e dinâmica. As coordenadas geográficas dessas estações principais são sumarizadas na Tabela 2 e sua localização de todas as estações, indicada na figura 6.

Tabela 2. Coordenadas UTM (25L) e distâncias a partir da desembocadura das estações permanentes S1 a S6 na área de estudo.

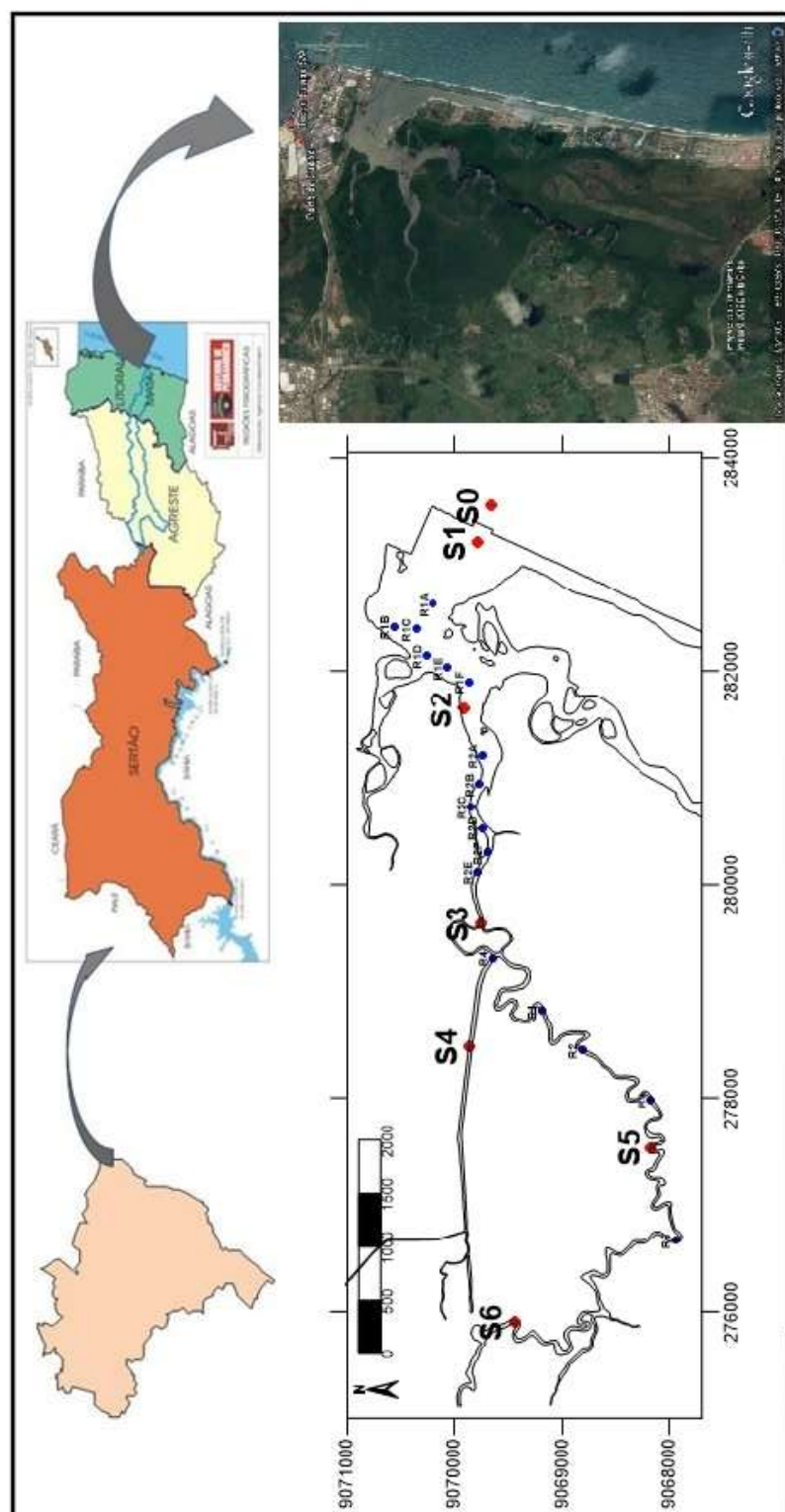
ESTAÇÃO	UTM E	UTM N	Distância (Km)
S0	283772	9069528	-
S1	283214	9069779	0,14
S2	281641	9069908	2,28
S3	279637	9069750	4,45
S4	278482	9069852	5,96
S5	277535	9068167	9,40
S6	275906	9069443	13,75

Fonte: O autor.

6.2 Base cartográfica

Visando apoiar os trabalhos de campo e a apresentação dos resultados, uma base cartográfica foi inicialmente confeccionada a partir de imagens de satélites obtidos das plataformas ESRI (Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, e GIS User Community) e Google Earth. Caminhamentos ao longo da linha de costa e margens do curso principal do Ipojuca com um GPS foram adicionalmente efetuados em alguns trechos para permitir sua complementação/atualização.

Figura 6. Vista geral da área de estudo, bacia de drenagem do rio Ipojuca e localização das estações amostrais S0 a S6 e estações de refinamento R_{ij} .



Fonte: Imagem GOOGLE EARTH; Mapa de Pernambuco CONDEPE/FIDEM (2005).

6.3 Condicionantes meteorológicas

Foram obtidos e compilados séries históricas e dados disponíveis para o período de estudo, da intensidade e direção dos ventos, da temperatura do ar e da precipitação pluviométrica para a estação meteorológica do Porto de Suape, Ipojuca (25 L, 282924 m E; 9071919 m N) junto a Agencia Pernambucana de Águas e Clima, APAC. Esta estação meteorológica foi selecionada por sua proximidade e representatividade da área de estudo. Adicionalmente, para a caracterização climática de longo período, foi utilizado uma série de dados (1961-2017) para estação meteorológica do Curado (25 L, 285097 m E; 9109662 m N) obtida junto ao BDMET-INMET.

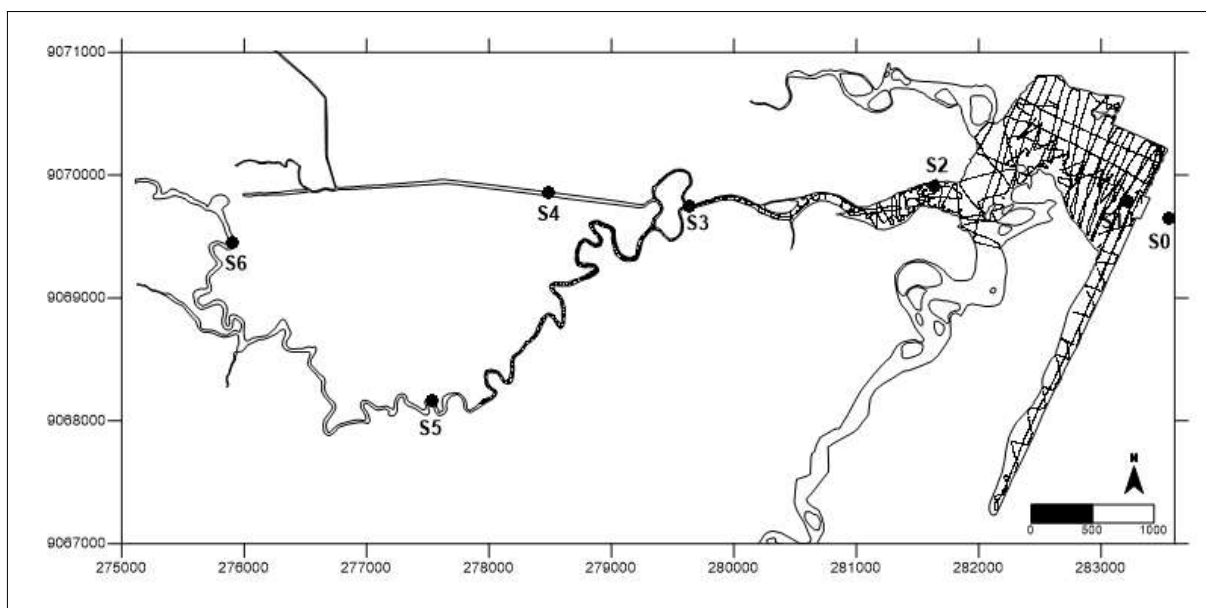
Os dados obtidos foram compilados e analisados para permitir uma caracterizar das condicionantes meteorológicas locais, bem como identificar sazonalidade do regime das chuvas e subsidiar interpretação dos resultados obtidos.

6.4 Levantamento morfobatimétrico

Um levantamento morfobatimétrico da área de estudo foi realizado com uso de uma sonda ecobatimétrica GARMIN GPSMAP 525s operando com transdutor de dupla frequência 50kHz (19°) e 200kHz (6°) para uma melhor performance em água salgada. Esse levantamento foi realizado em outubro/2016 e complementado em abril/2017. Em ambos os levantamentos empregou-se uma malha amostral espaçada de 10-20m entre linhas de sondagem (Figura 7), totalizando 23.789 pontos de sondagem, referenciados ao Datum WGS 84 e projetados no Sistema de Coordenadas UTM zona 25 L.

Durante os levantamentos, sensores de pressão foram instalados ao longo da área de estudo, para permitir a obtenção de registros da variação do nível das águas pelas marés durante as sondagens e assim, a correção das sondagens desta variação. Todos os registros foram posteriormente reduzidos ao NR da DHN para o Porto de Suape. Os dados obtidos foram então interpolados pelo método de Kriging utilizando-se o Software Surfer15 da Golden Software, permitindo a elaboração de uma carta batimétrica para a área de estudo.

Figura 7. Malha de sondagem do levantamento batimétrico do estuário do rio Ipojuca.



Fonte: O autor.

6.5 Caracterização e propagação das marés

Visando caracterizar as marés no estuário do rio Ipojuca, um sensor de pressão Hobo U20 (resolução = 0,21 cm) foi instalado ao longo do sistema, de modo a permitir a obtenção de registros da altura da coluna d'água a intervalos de 30 minutos por períodos de cerca de 15 dias de duração. O sensor foi posicionado às estações S3 e S5 de forma a caracterizar as oscilações de maré durante os períodos chuvoso e de estiagem nos regimes de maré de sizígia e quadratura com o objetivo de delimitar a penetração da maré dinâmica. Durante o período de estiagem, registros adicionais foram obtidos nas estações S0 e S1 para permitir avaliar o sinal da maré na entrada do sistema comparativamente àquele na área costeira.

Todos os registros foram obtidos relativos a níveis conhecidos e de forma a possibilitar a redução dos mesmos ao NR da DHN para o Porto de Suape. Os dados reduzidos foram então empregados na caracterização das marés ao longo do estuário e na avaliação do limite da oscilação de nível, alteração de sua fase e/ou amplitude, duração dos ciclos de enchente e vazante durante sua propagação no estuário, relativa às características das marés na costa.

6.6 Estrutura termohalina e regime salino

Para a caracterização da distribuição espaço-temporal da salinidade e da temperatura ao longo do estuário do rio Ipojuca, perfis CTD foram obtidos com uso de perfilador CTD Sea-bird Eletronics SBE19Plus operando a 4Hz e dotado de sensores de Condutividade (resolução = 0.00005 S.m^{-1}), Temperatura (resolução = 0.0001°C) e Pressão (resolução = 0.010 m), todos alimentados por uma bomba centrífuga SBE 5T, às estações amostrais S1 a S6 (Figura 6), desde a superfície até o fundo. Estes levantamentos foram realizados nos períodos chuvoso (jun-ago/2017) e de estiagem (dez/2017), de modo a caracterizar os estágios de maré enchente, preamar, vazante e baixa-mar, durante ciclos de marés de sizígia e de quadratura

Visando identificar com maior acuidade os limites de propagação da maré salina, perfis adicionais CTD foram obtidos para cada estágio e regime de maré, durante os períodos chuvoso e de estiagem e espaçados a 100-800 m ao longo do trecho compreendido entre a última das 6 estações amostrais em que a influência salina havia sido identificada e a estação imediatamente a montante desta. Os trechos submetidos ao refinamento variaram em função do estágio e regime de maré e do período sazonal.

Durante o período chuvoso, para os estágios de enchente e baixa-mar foram estabelecidas seis estações de refinamento (SR1A a SR1F) entre as estações amostrais S1 e S2 e para os estágios de preamar e vazante, outras seis estações de refinamento (SR2A a SR2F) entre as estações S2 e S3 (Figura 6).

Os refinamentos durante o período de estiagem foram realizados empregando-se 5 estações de refinamento: uma (SR4) entre a estação S3 e S4; três (SR1-SR3) entre as estações S3 e S5 e a última, cerca de 800m a montante da estação S5 (Fig. 6).

Em laboratório todos dados foram transferidos para PC, sendo em seguida filtrados, reduzidos, editados (eliminação de dados fora d'água, dados faltosos, etc.). O cálculo das propriedades físicas foi realizado utilizando-se os softwares dos próprios equipamentos seguindo especificações TEOS-10 (IOC et al., 2010).

6.7 Regime das correntes e circulação estuarina

Paralelamente a obtenção dos perfis CTD, determinações da intensidade e direção das correntes foram efetuadas, em dois níveis de profundidade (à superfície, e próximo ao fundo) com uso de um correntômetro Sensordata SD30 às estações S1 a S6.

Para a localização do limite de propagação da maré dinâmica, medições adicionais das correntes foram por vezes realizadas, espaçadas de 100-800 m, ao longo do trecho compreendido entre a última das estações amostrais em que foi verificado fluxo para montante e a estação imediatamente a montante desta.

Em laboratório os dados de corrente foram transferidos/digitados para PC, corrigidos da declinação magnética e decompostos em componentes longitudinais e transversais às sessões amostrais. Os resultados foram utilizados na representação do campo das correntes, na forma de plotes vetoriais, onde o ângulo referente ao Norte verdadeiro indica a direção das correntes e o comprimento do vetor indica sua intensidade em cm.s^{-1} . As medições da intensidade e direção das correntes foram também empregadas no cálculo do parâmetro de classificação estuarina (HANSEN & RATTRAY, 1966).

6.8 Sólidos totais suspensos e zona de turbidez máxima

Paralelamente à obtenção dos perfis CTD e realização das medições da intensidade e direção das correntes, amostras de água foram coletadas com uso de uma garrafa Van Dorn horizontal. As amostras foram acondicionadas em garrafas plásticas de 1L e transportadas para laboratório para posterior análise da concentração dos sólidos em suspensão totais (SST). As amostras de água, em um total de 214, foram obtidas à superfície e próximas ao fundo de forma a representarem os estágios de enchente, preamar, vazante e baixa-mar de ciclos de sizígia e quadratura durante os períodos chuvoso e de estiagem.

Amostras adicionais de água foram obtidas a intervalos de 100-800 m para o trecho estuarino apresentando os valores mais elevados de SST e/ou salinidade próxima a 4 para permitir um refinamento da localização dos limites da zona de

turbidez máxima, nesta fase, as amostragens foram realizadas de forma a representarem as camadas superficial e de fundo.

Em laboratório, o volume das amostras foi medido com o uso de uma proveta e as mesmas filtradas a vácuo através de filtros membrana (acetato e nitrato de celulose) com 47 mm de diâmetro e 0,45 µm de porosidade nominal previamente secos e pesados. Após a filtração, as membranas filtrantes foram novamente secas em estufa (60°C) e pesadas em balança analítica. A concentração dos sólidos em suspensão totais foi determinada através da diferença entre os pesos secos dos filtros antes e após o processo de filtração relativo ao volume filtrado, na forma:

$$C = \frac{P_f - P_i}{V} \quad Eq (1)$$

onde, C é a concentração de sólidos totais em suspensão (mg L^{-1});

P_f o peso seco (filtro + material) após a filtração (mg);

P_i o peso seco inicial do filtro (mg);

V o volume filtrado da amostra de água (L).

6.9 Classificação do estuário do rio Ipojuca

Estuários são ambientes em que há grandes mudanças de suas características físico-químicas em um curto espaço de tempo e distâncias, podendo haver diferentes classificações de circulação e estratificação para um mesmo estuário dependendo da localização em que as amostras foram retiradas (HANSEN e RATTRAY, 1966). Para a determinação de cada ponto no diagrama, deve-se considerar a teoria de homogeneidade lateral e condições estacionárias (MIRANDA et al., 2002), ou seja, foi desconsiderado o tempo e utilizado os valores médios do ciclo de maré para determinação das propriedades S_f , S_s , S_0 , U_s e U_f . A partir dessas variáveis foram calculados os coeficientes de circulação e estratificação pelas equações apresentadas no tópico 5.2.4, sendo então plotados no diagrama de Hansen & Rattray (1966).

7 RESULTADOS

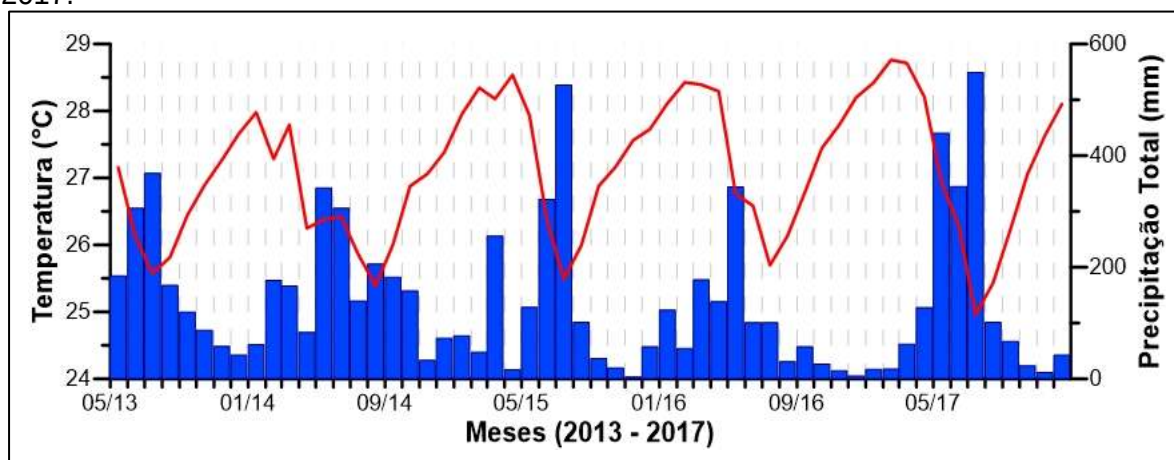
Nas sessões a seguir são apresentados e discutidos os resultados obtidos nas etapas de campo e análises de laboratório, sendo apresentados em tabelas, gráficos e figuras.

Para a discussão dos resultados batimétricos, o estuário Ipojuca será separado em 3 trechos (inferior, médio e superior). O primeiro, com dominância de influência marinha, será representado como a área entre a desembocadura e a estação S2, o segundo será definido como a área entre as estações S2 e S3, enquanto que o último será representado como a área entre a estação S3 e S5.

7.1 Condições meteorológicas

A série histórica da estação meteorológica de Suape (25 L, 283077 m E 9072042 m N) possui dados a partir de maio/2013 (Fig. 8). Os máximos de temperatura média e precipitação mensal ocorreram ambos no ano de 2017, ultrapassando os últimos quatro anos e tendo chegado a 28,76°C em fevereiro e um total de precipitação de 548,40 mm no mês de julho. Ainda em 2017, durante o ano da realização do estudo, foi registrado o menor valor mensal de temperatura (24,96°C), ocorrendo no mês de julho. A menor média mensal de precipitação foi observada em novembro de 2015.

Figura 8. Precipitação pluviométrica (barras azuis) e Temperatura (linha vermelha) média mensal para a estação meteorológica do Porto de Suape, Ipojuca para o período de 2013 a 2017.



Fonte: O autor.

Utilizando uma maior série de dados meteorológicos, visto que a estação do porto de Suape é recente, foram utilizados os dados da estação do Curado (Recife). Análise de séries históricas (1961-2017) para a estação meteorológica do Curado (25 L, 285097 m E; 9109662 m N) indicaram que os maiores valores de temperatura do ar e precipitação médias mensais chegaram a 28,58°C em abril de 1973 e 770,4 mm em fevereiro/98, respectivamente, enquanto que os menores valores foram encontrados na década de 60, com temperatura em 23,10°C em agosto/61 e nenhuma precipitação durante janeiro/62 e outubro/66 (Tabela 3).

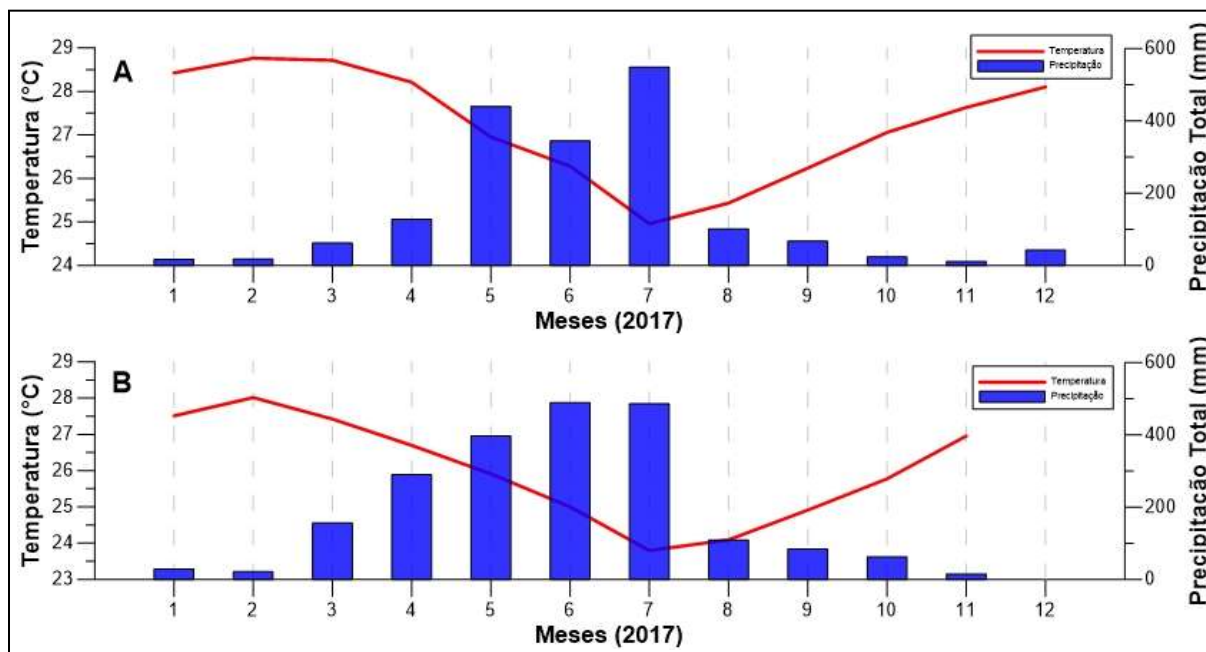
Tabela 3. Máximos, mínimos e média mensal de dados meteorológicos para as estações do Curado (Recife) e Ipojuca (Suape).

HISTÓRICO RECIFE (CURADO) - 1961 a 2017			
	Temperatura Média (C)	Precipitação (mm)	Umidade Média (%)
Máximo	28.58	770.40	90.74
Mínimo	23.10	0.00	66.04
Média	25.71	191.54	78.56
HISTÓRICO IPOJUCA (SUAPE) - 2013 a 2017			
	Temperatura Média (C)	Precipitação (mm)	Umidade Média (%)
Máximo	28.76	548.40	82.67
Mínimo	24.96	3.00	68.00
Média	27.09	138.49	72.84

Fonte: O autor.

O ano de 2017 foi caracterizado como um ano bem definido sazonalmente em ambas as estações meteorológicas, sendo observados períodos de baixa precipitação (16,6 e 17,2 mm em jan-fev) e altas temperaturas, maior dos últimos quatro anos, durante o início do ano (jan – mar), sendo seguido por um período de grande volume de chuvas e baixas temperaturas no período chuvoso, chegando a 548,4 mm durante o mês de julho, e logo após apresentando novamente baixíssimos valores de precipitação (11 mm em novembro) e altas temperaturas durante o período de estiagem em dezembro (Figura 9).

Figura 9. Média de temperatura e precipitação acumulada mensal para a estação meteorológica do Porto de Suape (A) e Curado (B), durante o ano de 2017.



Fonte: O autor.

Os períodos de coleta caracterizaram bem essa sazonalidade, o volume de chuvas no Porto de Suape - e em grande parte da extensão da bacia do Ipojuca – foi elevado e com baixas temperaturas durante as coletas do período chuvoso, como indicado anteriormente, e apresentando baixíssimos valores de precipitação (42,2 mm) e altas temperaturas (28,1°C) durante as coletas de estiagem.

A tabela 4 apresenta informações sobre os dados diários da estação meteorológica de Suape. Os maiores valores de umidade e temperatura foram encontrados nos primeiros meses do ano, sendo o seu maior valor de temperatura (32,1°C) observado no mês de março. O maior valor de precipitação e menor de temperatura foram observados em julho e agosto, respectivamente.

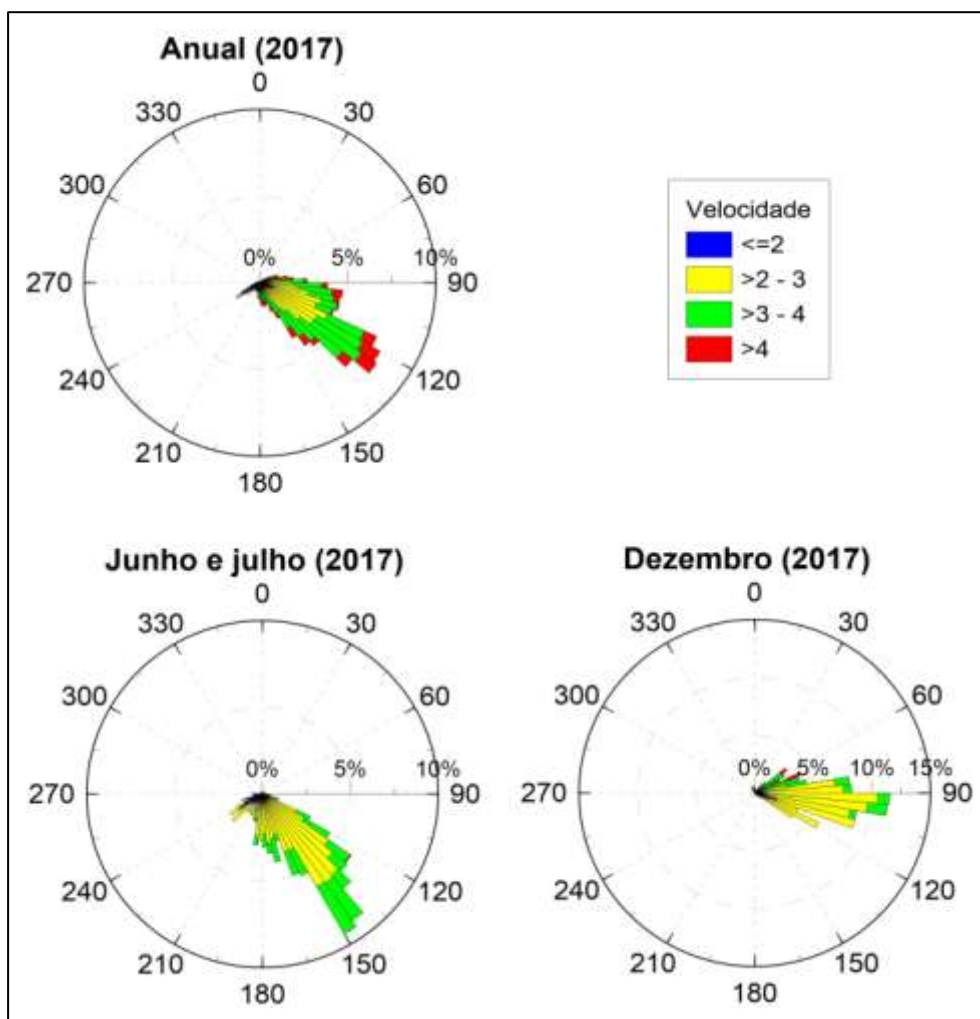
A estação Suape durante o ano de 2017 obteve predominantemente ventos na direção sudeste (SE) 131° e velocidade média de 3,05 m s⁻¹, enquanto que na estação do Curado a direção predominante dos ventos observada foi Nor-Nordeste (NNE) 13°, com velocidade de 3,5 m s⁻¹ durante o ano de 2017. Durante o período chuvoso de amostragem (jun-jul), os ventos predominantes foram de SE (148°), com velocidade de 3,4 m s⁻¹. Durante o período de estiagem, predominaram ventos de E (91°) com velocidade 2,7 m s⁻¹ (Figura 10).

Tabela 4. Máximos mínimos e média diária de dados meteorológicos para a estação de Ipojuca (Suape) durante o ano 2017.

DADOS DIÁRIOS IPOJUCA (SUAPE) – 2017					
	Temperatura Média (C)	Precipitação (mm)	Umidade Média (%)	Temperatura Mínima (C)	Temperatura Máxima (C)
Máximo	32.10	166.20	95.00	31.50	32.80
Mínimo	19.80	0.00	50.00	19.70	20.10
Média	27.23	5.20	71.74	26.75	27.76

Fonte: O autor.

Figura 10. Direção e velocidade do vento predominantes para a estação de Ipojuca (Suape) para todo o ano de 2017 e durante os meses de coletas.



Fonte: O autor.

7.2 Morfobatimetria

Uma carta batimétrica foi elaborada a partir das sondagens reduzidas e corrigidas do efeito das marés, utilizando-se o método kriging linear (raio de busca de 200 m) e sem tração (Drift Type), que segundo Bulhões & Drumond (2012) é o mais indicado para conjunto de dados densos, a mesma é apresentada na figura 11.

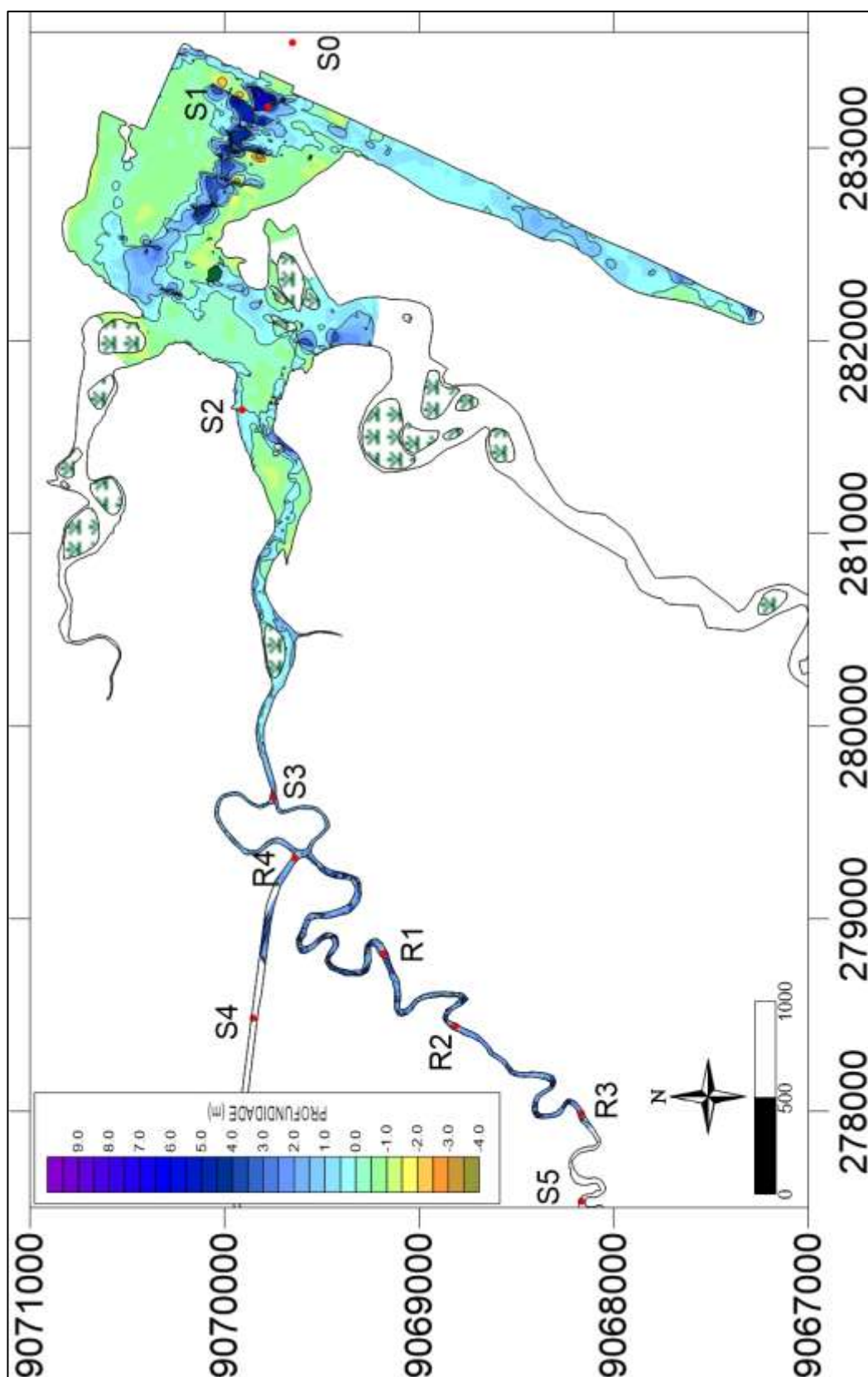
A partir dos dados interpolados, cortes transversais iniciando na desembocadura e a intervalos de 500m foram realizados para permitir um maior detalhamento da configuração do estuário do rio Ipojuca. A localização dos cortes é indicada na figura 12 e os cortes transversais apresentados na figura. 13. O corte transversal da estação S1 representa a calha do sistema próximo a sua desembocadura (140 m a montante do recife principal).

O rio Ipojuca conecta-se com o oceano Atlântico através de um corte de cerca de 150 m e rebaixamento da linha de recife, aberto após a realização do aterro para construção do Porto de Suape, que isolou o rio de sua desembocadura natural, próxima ao cabo de Santo Agostinho.

O trecho do estuário do rio Ipojuca compreendido entre sua desembocadura e a estação S2 apresenta uma calha larga e pouco profunda, formando um funil que se estende para montante por 1,4 km de forma perpendicular à linha de costa, logo após assumindo direção sul até a região de confluência com o rio Merepe. A largura da calha do Ipojuca se reduz bruscamente, passando de 985 m, próximo à estação S1, para uma largura de 420 m na área de confluência com o rio Merepe, com uma largura de calha de 190 m à estação S2 (Figura 12).

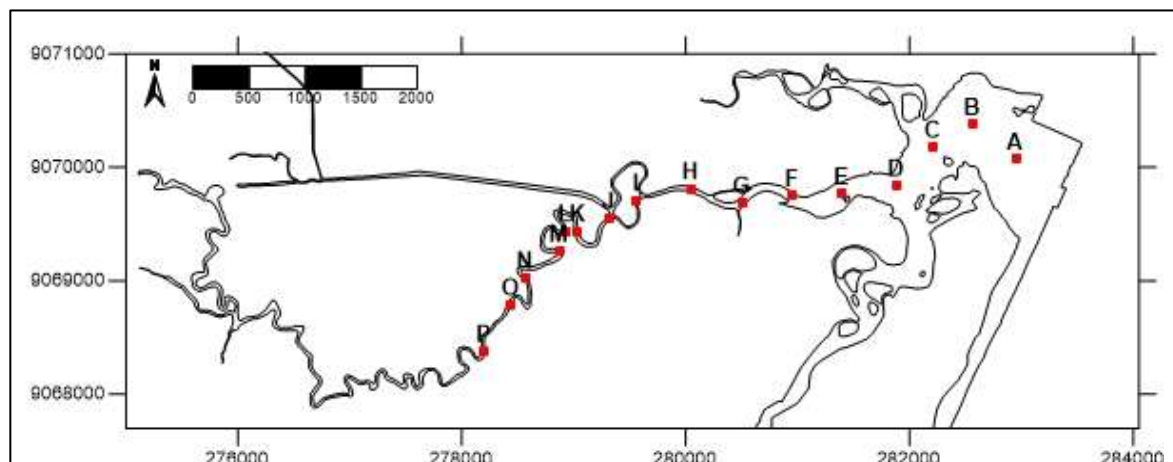
O baixo estuário do rio Ipojuca forma uma espécie de laguna, com profundidade média de 0,5 m e variáveis entre -1,4 e 9,1 m, apresentando um canal central mais profundo e bancos de areia emersos. Adjacente à margem direita próximo à desembocadura, uma estreita faixa entre o continente e o recife, forma a Praia de Muro Alto.

Figura 11. Carta morfobatimétrica do estuário do rio Ipojuca. Cotas referidas ao RN da DHN.



Fonte: O autor.

Figura 12. Localização das sessões transversais a cada 500 metros de distância da desembocadura do estuário do rio Ipojuca.



Fonte: O autor.

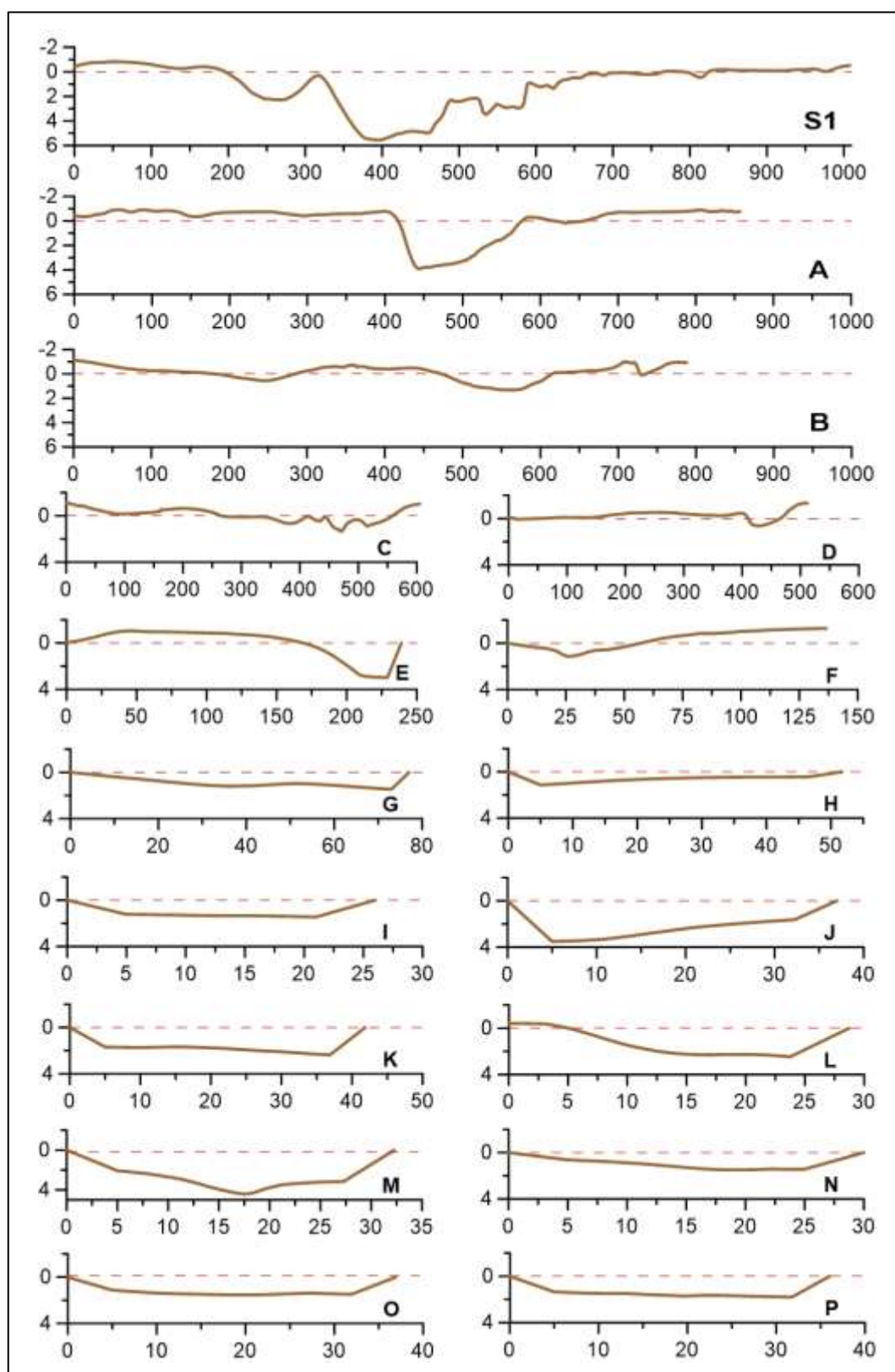
Ao longo do trecho médio do estuário do rio Ipojuca, entre as estações S2 e S3, prevalecem baixas profundidades (-1,2 a 3,3 m; profundidade média = 0,45 m), enquanto que o trecho superior apresenta-se menos raso (-0,3 a 6,3 m; profundidade média = 2,04 m). À estação S2 a calha do rio apresenta um pequeno canal, com profundidade de 0,95 m próximo à margem direita, alternando de margem à medida que se apresentam os meandros. Na estação S3 (4,45 km a montante da desembocadura) o rio Ipojuca a calha do rio tem largura de 33,4 m e profundidade máxima de 3,29 m.

Observando os perfis transversais (Figura 13), verifica-se que à estação S1 e a 500 m da desembocadura (corte A) a calha do rio apresenta, respectivamente, largura de 1008 m e 856,9 m e profundidades de até 4,98 m e 3,9 m no canal principal.

No trecho entre os cortes S1 e B, evidencia-se a presença de um canal central, cuja profundidade e largura vão gradativamente reduzindo para montante, não sendo o mesmo mais evidenciado a partir da região do corte C (1,5 km).

Na sessão D a calha do rio apresenta largura de 511,9 m e profundidade de até 0,629 m no centro de um pequeno canal, próximo à margem direita da calha.

Figura 13. Sessões transversais a cada 500 m a montante da desembocadura do estuário Ipojuca. Sendo as letras de A – P os perfis de 500 a 8.000 m de distância, respectivamente. Cotas referidas ao RN da DHN.



Fonte: O autor.

Para montante do corte D, acima da confluência com o rio Merepe, é possível identificar a presença de um novo canal próximo à margem direita, que continua rio adentro.

À altura do corte E, logo após a estação S2, a calha apresenta-se rasa, com áreas emersas do centro à margem esquerda, com um estreito canal próximo à margem esquerda com profundidades de até 2,98 m.

Nos próximos 4 km, o rio torna-se gradativamente mais raso, até a altura do corte H. Entre os cortes F e I a calha do rio é rasa, com profundidades inferiores a 2 m. Ao longo desse trecho a largura da calha do Ipojuca, sofre nova redução, passando de 240 m a altura do corte E a 26 m a altura do corte I.

Após a estação S3, representada pelo corte transversal J, a calha do rio torna-se menos rasa, com profundidade de 3,5 m próximo à margem esquerda.

Entre os cortes K e P a calha do Ipojuca apresenta-se mais regular, em forma de V e sem assimetria entre as margem, com profundidades média no centro da calha de 2,0 m

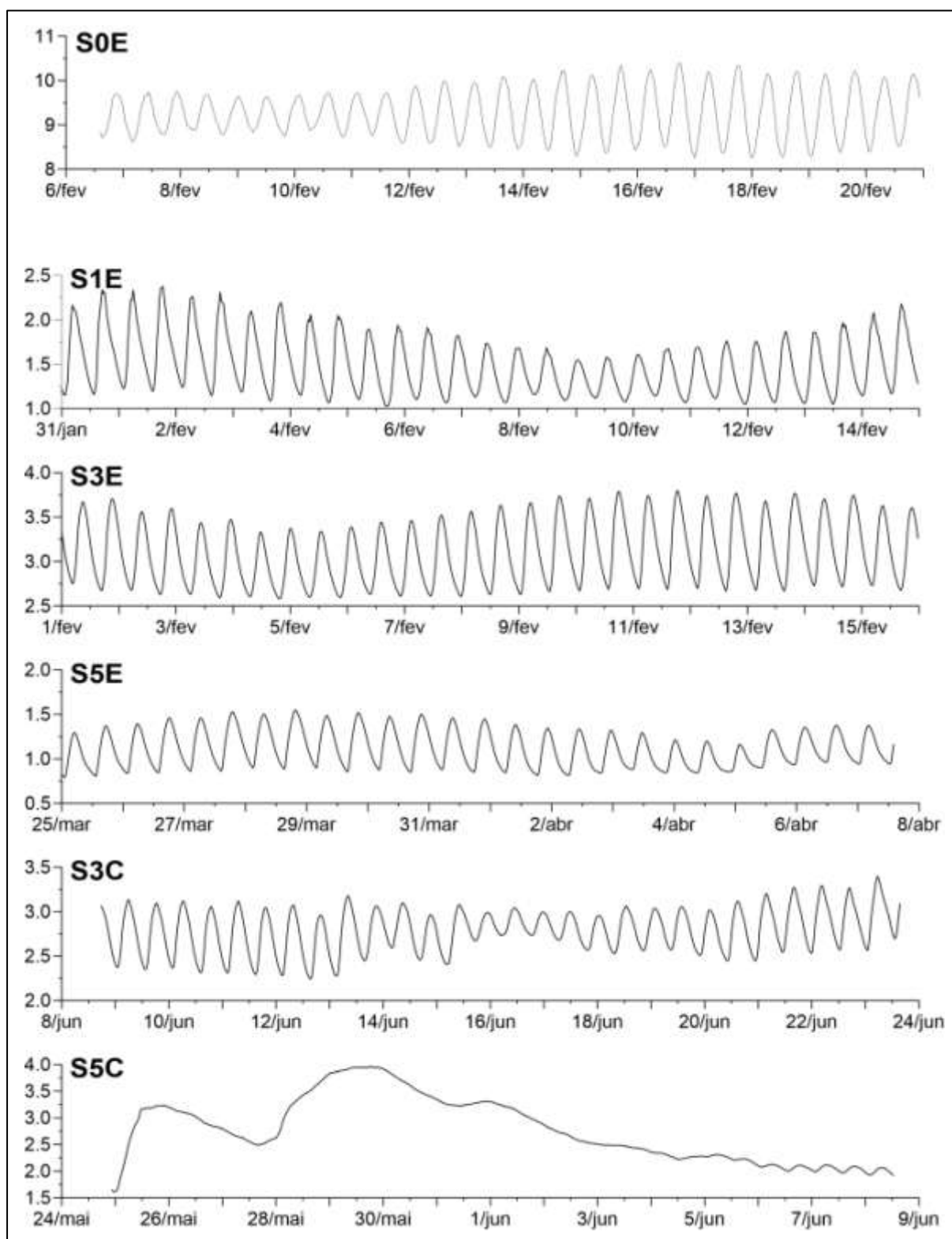
7.3 Propagação e caracterização das marés

Registros da oscilação das marés às estações S0, S1, S3 e S5 obtidos com os sensores de pressão são apresentados na figura 14.. Na figura 15, são apresentados de forma comparativa às previsões DHN para o Porto de Suape.

As marés ao largo (S0), tem caráter semidiurno, com pouca desigualdade diurna, tanto nas baixa-mares quanto preamares. São mesomarés com uma altura média de sizígia de 2,0 m e uma altura média de quadratura de 0,9 m.

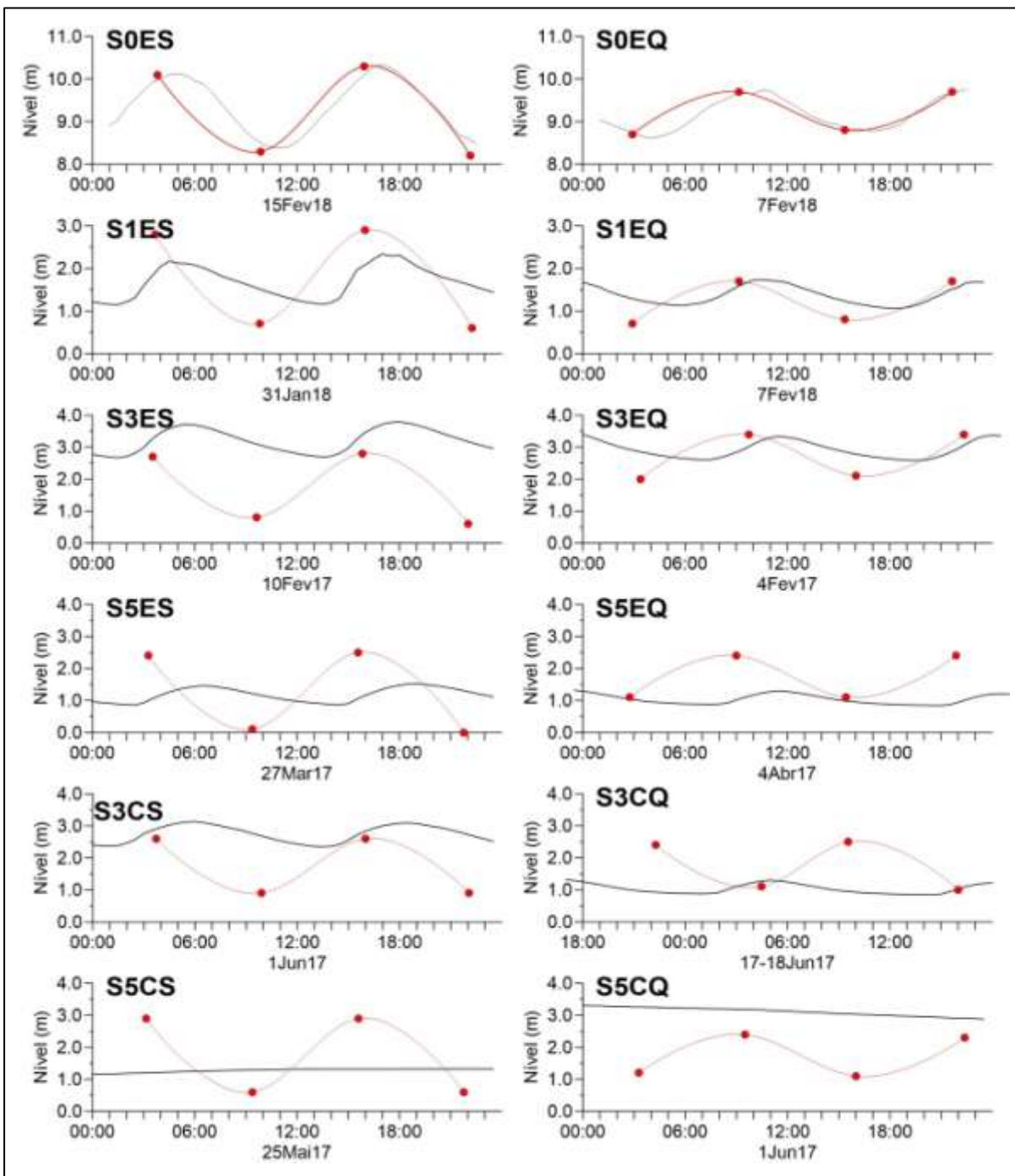
Às estações S1 e S3, as marés tem caráter igualmente semidiurno, mas com assimetrias entre preamar e baixa-mar. Os níveis das baixa-mares de quadratura, sendo ligeiramente (5-10 cm) inferiores aos de sizígia. Os níveis de preamar apresentam modulação clássica, com preamares de quadratura menos acentuadas que as de sizígia.

Figura 14. Oscilação das marés às estações S0 (estação costeira), S1 (desembocadura) e às estações S3 e S5, durante os períodos chuvoso (C) e de estiagem (E).



Fonte: O autor.

Figura 15. Oscilação das marés às estações S0 (estação costeira), S1 (desembocadura) e às estações S3 e S5, durante os períodos chuvoso (C) e de estiagem (E) para os regimes de sizígia (S) e quadratura (Q). A linha vermelha corresponde às previsões da DHN, enquanto que a linha preta corresponde aos dados obtidos *in situ*.



Fonte: O autor.

À estação S5, a amplitude da oscilação da maré mostra-se reduzida de cerca 48% relativa ao sinal próximo à sua desembocadura durante o período de estiagem e estão praticamente ausentes durante o período chuvoso, sobretudo durante os eventos de chuvas intensas e elevada descarga fluvial (Figuras 14 e 15). Durante o período chuvoso, flutuações no nível das águas do rio em resposta à maior descarga fluvial, se faz sentir à estação S3 e principalmente à estação S5.

As previsões da DHN para o Porto de Suape aproximam bem as marés ao largo da desembocadura do rio Ipojuca (estação S0, Figura15). Nas estações S1 e S3, A amplitude das marés é amortizada mais severamente nas sizígias (40-50%) que nas quadraturas (10-15%).

Durante as sizígias no período de estiagem, os ciclos de enchente são mais curtos e os de vazante mais longos com uma assimetria de 1,5 a 2,0h entre eles, observado empiricamente pelo formato das concavidades da linha preta do gráfico. Esse tipo de assimetria, em um estuário aberto, normalmente está associado a maior exportação de sedimentar, repercutindo em águas mais limpas; contudo, como essa assimetria é causada pela constrição da passagem para a costa, esse sinal na verdade indica a dificuldade das águas em deixar o estuário, permitindo com que o sedimento presente nesta decante e assoreie a laguna do baixo estuário e tornando as águas mais turvas.

As diferenças de fase (diferença entre os estágios equivalentes das linhas vermelha e preta) de preamar e baixa-mar de sizígia às estações S1 e S3 são, respectivamente de 1,4 e 1,5 horas e de 4,5 a 5,0 horas. Já nas quadraturas, as amplitudes às estações S1 e S3 são próximas às previstas para o Porto de Suape. com um retardo de cerca de 1h nas preamares e de cerca de 2h nas baixa-mares. À estação S5, a oscilação das marés é de cerca de 0,7m nas sizígia e de cerca de 0,5m nas quadraturas.

7.4 Estrutura termohalina e maré salina

Nas subseções a seguir são apresentados os resultados para a estrutura termohalina e a propagação salina máxima, sendo representandos para os quatro principais estágios da maré.

7.4.1 Estrutura Termohalina

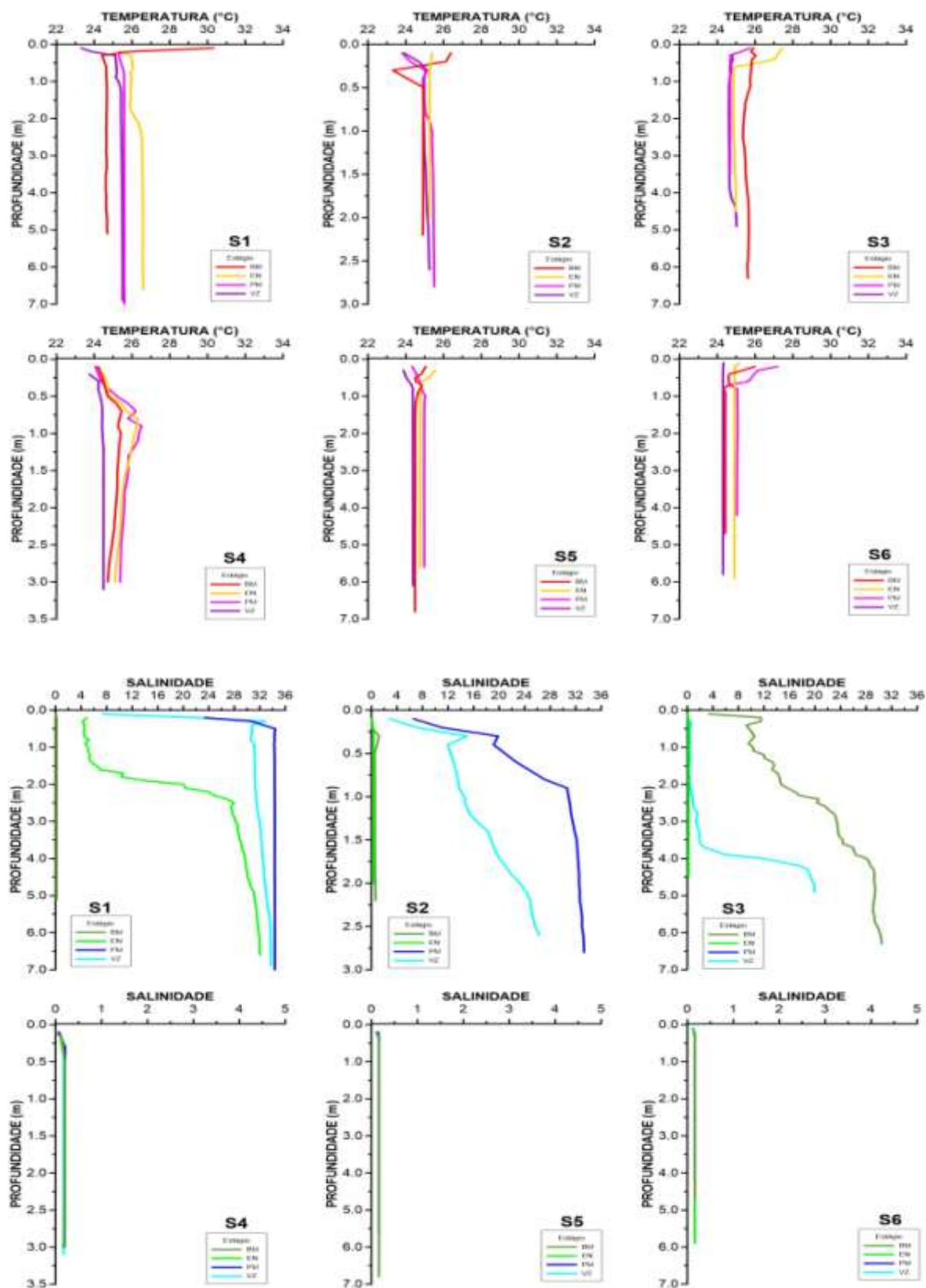
A distribuição vertical da salinidade e temperatura durante os estágios de baixa-mar, enchente, preamar e vazante às estações S1 a S6 são apresentadas nas figuras 16, 17, 18 e 19, respectivamente para os ciclos de sizígia e quadratura durante os períodos chuvoso e de estiagem. Malhas uniformes das distribuições horizontais dos valores de salinidade de fundo foram obtidas interpolando-se esses dados, pelo método *Kriging*, levando em consideração a variação espacial dos dados.

Verticalmente a temperatura, apresentou em geral valores homogêneos ao longo da coluna d'água em todas as amostragens, exceto para a capa mais superficial (primeiro 0,5 m) durante o período chuvoso e no primeiro metro da coluna d'água durante o período de estiagem.

No período chuvoso (Figuras 16 e 17), a temperatura superficial variou entre 24 e 30°C (sizígia) e entre 24 e 26°C (quadratura) nos primeiros 0,5 m à estação S1 ao longo do ciclo das marés. Abaixo desta camada, a variação de temperatura é pequena ($<2^{\circ}\text{C}$) entre os estágios de maré, com valores entre 24 e 26°C e entre 26 e 28°C, respectivamente durante os ciclos de sizígia e de quadratura. Às estações S2 e S3, a temperatura variou respectivamente entre 24 e 26°C e entre 24 e 28°C à superfície. Para profundidades maiores que 0,5m, a temperatura registrada foi em média de 25°C e 26°C, respectivamente em sizígia e quadratura. Às estações S4, S5 e S6, houve maior diferenciação entre os estágios de maré durante o regime de quadratura. No regime de sizígia os valores de temperatura abaixo da leve variação superficial tenderam a valores próximos a 25°C, variando entre 24°C e 26°C. Na quadratura, a variação superficial é mais ampla (23 a 28°C) no primeiro metro da coluna d'água às estações S4 e S5, e variou entre 23 e 27°C à estação S6. Para profundidades superiores a 1 m a temperatura na coluna d'água foi de cerca de 26°C, com pouca flutuação.

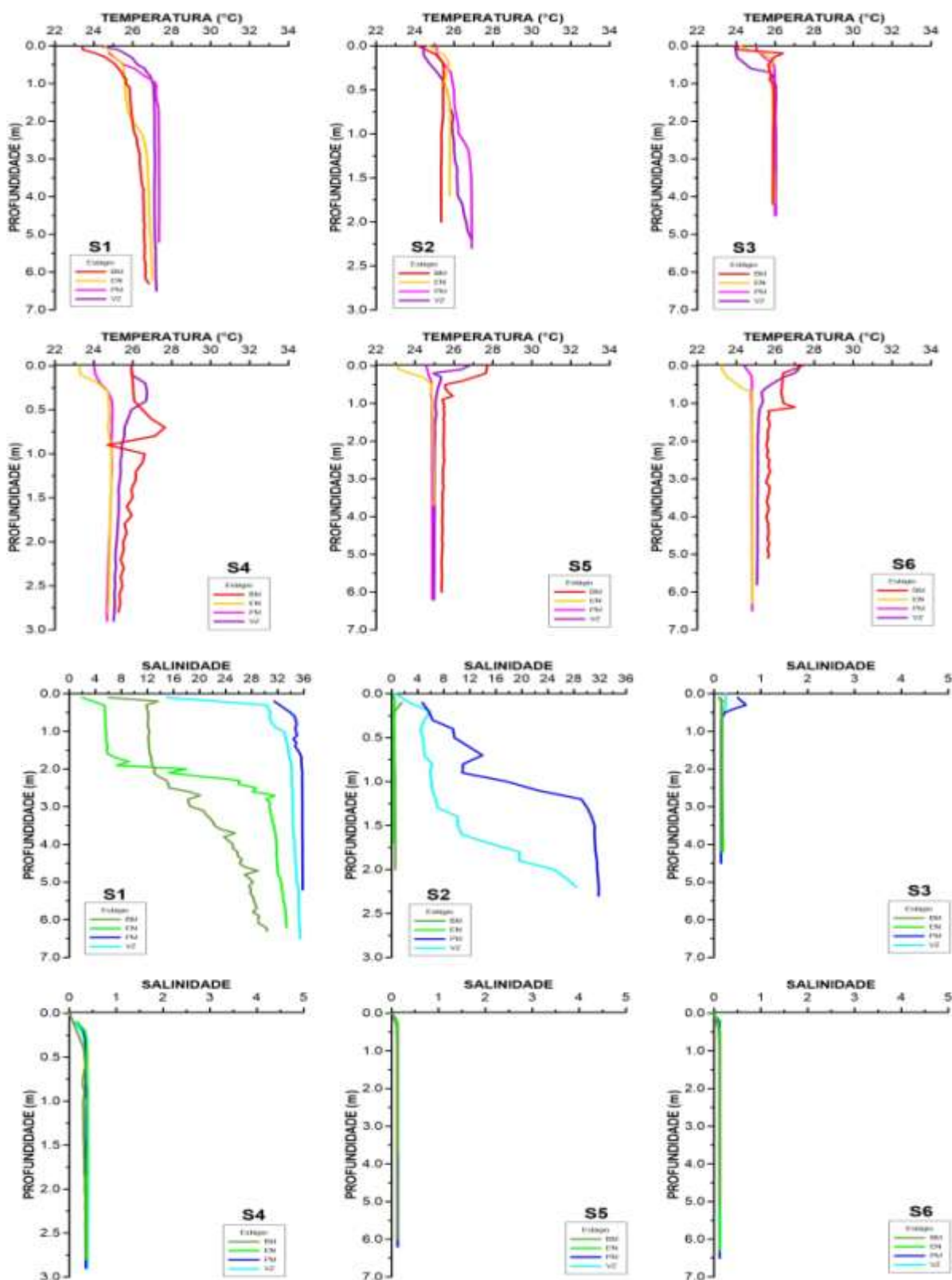
Durante o período de estiagem (Figuras 18 e 19), as temperaturas foram mais elevadas relativas às registradas no período chuvoso, em resposta à maior incidência solar, com pouca variabilidade ao longo do ciclo das marés.

Figura 16. Distribuição vertical da temperatura (painel superior) e salinidades (painel inferior) nas estações S1 a S6 no estuário do rio Ipojuca durante uma sizígia no período chuvoso.



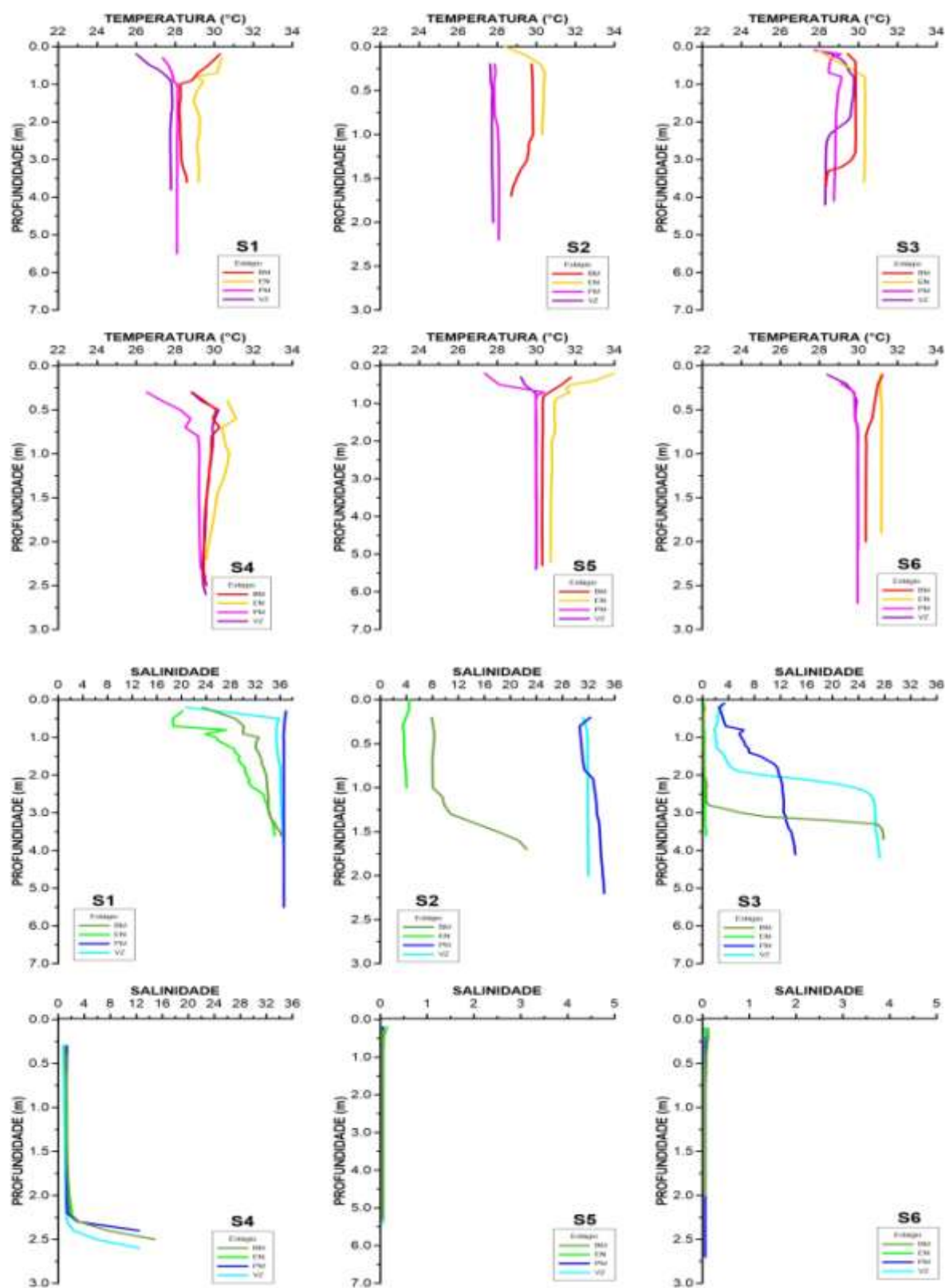
Fonte: O autor.

Figura 17. Distribuição vertical da temperatura (painel superior) e salinidades (painel inferior) nas estações S1 a S6 no estuário do rio Ipojuca durante uma quadratura no período chuvoso.



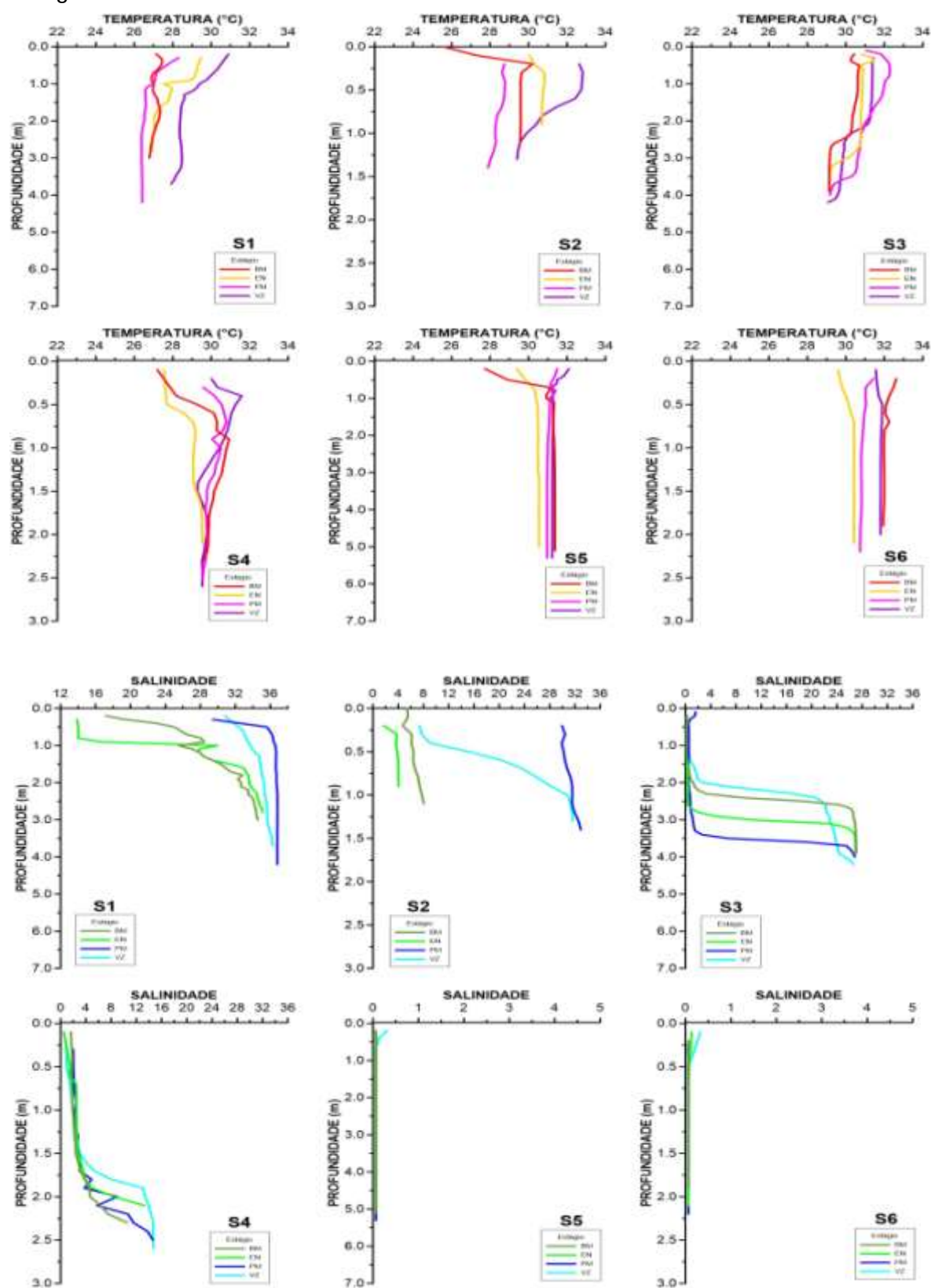
Fonte: O autor.

Figura 18. Distribuição vertical da temperatura (painel superior) e salinidades (painel inferior) nas estações S1 a S6 no estuário do rio Ipojuca durante uma sizígia no período de estiagem.



Fonte: O autor.

Figura 19. Distribuição vertical da temperatura (painel superior) e salinidades (painel inferior) nas estações S1 a S6 no estuário do rio Ipojuca durante uma quadratura no período de estiagem.



Fonte: O autor.

À estação S1 a temperatura no primeiro metro da coluna d'água tanto da sizígia quanto na quadratura variou entre 26 e 31°C, e no restante da coluna entre 28 e 30°C na sizígia e entre 26 e 30°C na quadratura. Ao longo do ciclo de maré a temperatura na coluna d'água em regimes de sizígia e quadratura no período de estiagem às estações S2 e S3 oscilou, respectivamente, entre 28 e 30 e entre 28 a 32. Os perfis de temperatura obtidos às estações S4 e S5 indicam uma temperatura média para a coluna d'água de 30-31 °C com flutuações de 1 a 1,5°C no primeiro metro, ao longo do ciclo das marés. A temperatura à superfície variou de 26 a 32°C e de 28 a 32°C, respectivamente durante a sizígia e quadratura à estação S4, e entre 28 e 34°C e 28 e 32°C, respectivamente durante a sizígia e a quadratura à estação S5. À estação S6, durante ambos os regimes de maré a temperatura ao longo de toda a coluna d'água esteve homogeneamente distribuída variando de 29 a 32°C na quadratura e entre 30 e 32°C na sizígia.

Durante o período chuvoso, o trecho compreendido entre as estações S1 e S2 (quadratura) e entre as estações S1 e S3 (sizígia) apresenta um gradiente salino vertical desde a superfície até o fundo, caracterizado pela inclinação das isohalinas (Figuras 16 e 17). Próximo à superfície a salinidade varia entre 2 e 32 à estação S1 ao longo do ciclo das marés, enquanto que próximo ao fundo a variabilidade é menor (24 a 35). Durante o ciclo de sizígia no período chuvoso, à estação S1, a coluna d'água apresentou salinidade próxima a nula durante a baixa-mar à salinidade típica marinha durante a preamar. À estação S2, os valores de salinidade à superfície variaram de 0,2 e 4,2 durante a quadratura e entre 0,2 e 5,3 durante a sizígia. O trecho ao longo do rio Ipojuca compreendendo as estações S4 a S6 apresentou uma coluna d'água bem misturada, com salinidades sempre inferiores 0,5. À estação S3, a salinidade foi igualmente reduzida durante a quadratura, com uma pequena assinatura de salinidade apenas à superfície durante a preamar, mas com valores variáveis entre 0,2 e 12,1 à superfície e entre 0,2 e 32,2 próximo ao fundo durante a sizígia.

Durante o período de estiagem (Figuras 18 e 19) a salinidade foi em geral mais elevada e o gradiente salino vertical presente no trecho compreendido pelas estações S1 a S3 e S4 mais acentuado (isohalinas mais horizontalizadas) relativo ao

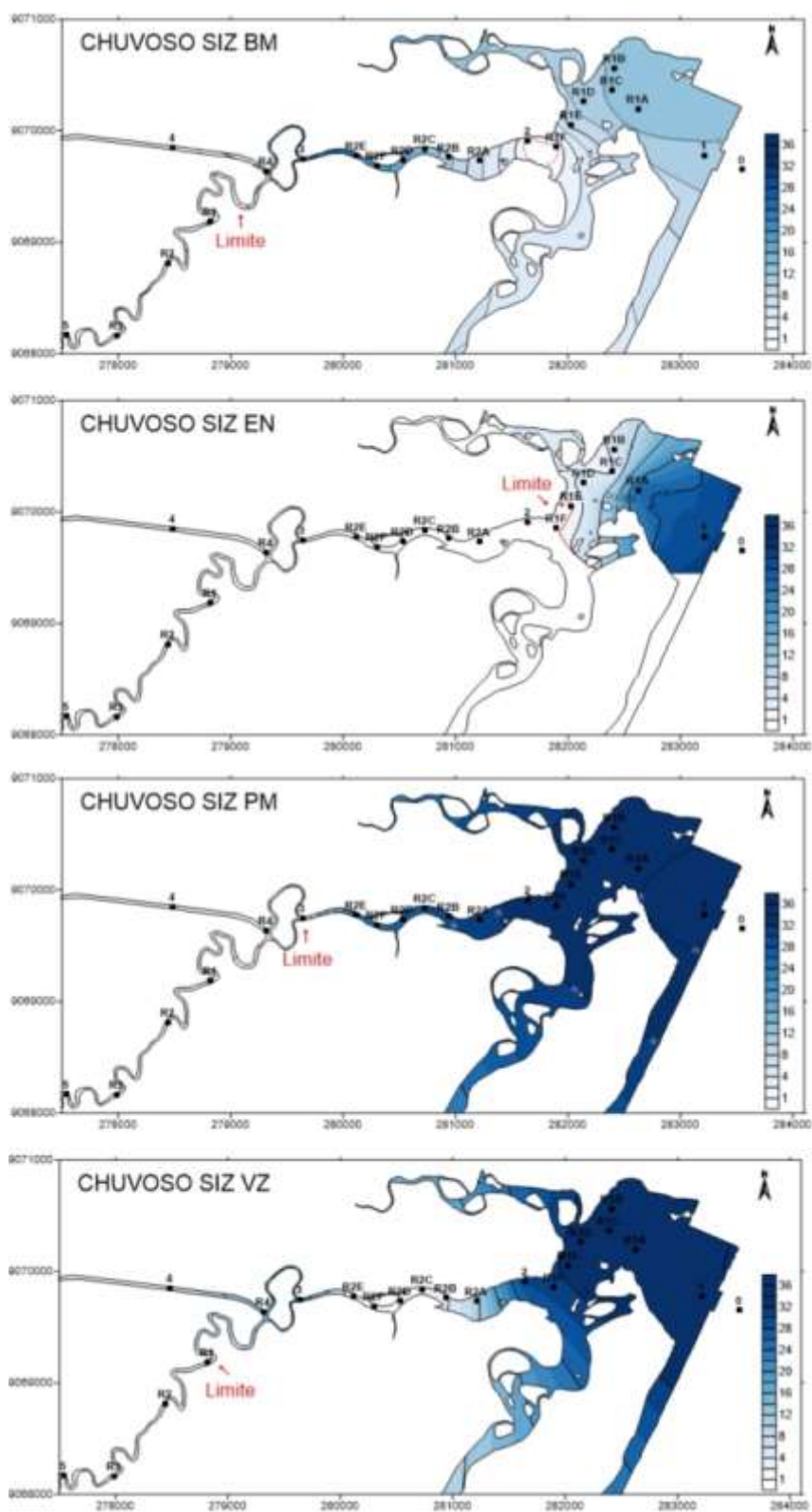
encontrado no período chuvoso. À superfície, a salinidade variou entre 14 e 36 e entre 4 e 30 respectivamente nas estações S1 e S2 durante a quadratura e entre 18 e 36 e entre 4 e 32 durante a sizígia. Próximo ao fundo a salinidade foi pouco variável à estação S1 (32 a 36) tanto na sizígia quanto na quadratura. Na estação S2 a salinidade ao longo da coluna d'água foi mais elevada nos estágios de vazante e preamar (28 a 32) e mais reduzida nos estágios de baixa-mar e enchente, tanto na sizígia quanto na quadratura. Na estação S3, em regime de sizígia e quadratura, a salinidade apresentou-se reduzida para os primeiros 2m de coluna d'água (<12), mas com valores até 28 próximo ao fundo. Na estação S4, no canal artificial, tanto na sizígia quanto na quadratura, a salinidade foi reduzida ao longo de quase toda a coluna d'água (<2), com valores de 2 a 16 para o último metro. Nas estações S5 e S6, a coluna d'água mostrou-se bem misturada, com salinidade sempre inferior a 0,2 na sizígia e quadratura.

7.4.2 Marés Salina

As figuras 20 e 21 representam a distribuição da salinidade de fundo ao longo do rio Ipojuca, respectivamente em ciclos de sizígia e quadratura durante o período chuvoso. As distribuições em ciclos de sizígia e quadratura no período de estiagem são apresentadas, respectivamente, nas figuras 22 e 23. Estas figuras foram elaboradas a partir dos perfis CTD obtidos nas estações amostrais S1 a S6 e daqueles obtidas nas estações de refinamento (R_{ij}), de forma a permitir identificar com maior acuidade a localização do limite máximo de penetração da maré salina.

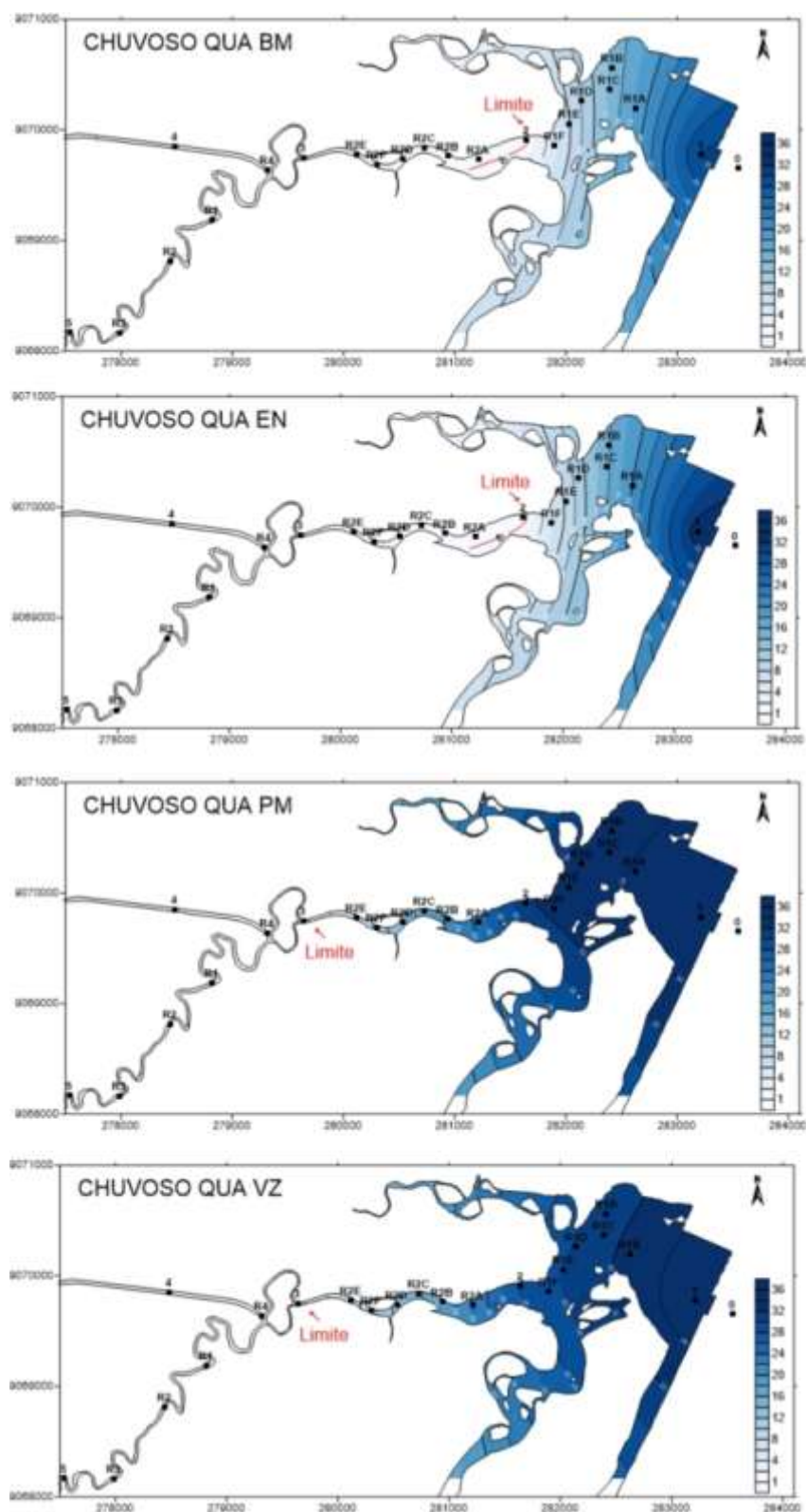
Durante o ciclo de sizígia no período chuvoso (Fig. 20) os menores valores de salinidade foram observados no estágio de baixa-mar e as maiores salinidades durante o estágio de preamar. Na baixa-mar as salinidades são reduzidas mesmo às estações próximas à desembocadura (S1 e S2), com valores de fundo entre 0,2 e 14,0 com salinidades próximas à zero à estação R1E. Próximo à estação S3, a salinidade torna a aumentar, alcançando valores de 30,5. No estágio de enchente, as águas mais salinas estão restritas a região da desembocadura (0,3 a 32,0) e início do baixo estuário, com salinidades muito reduzidas na região de

Figura 20. Limites de penetração da maré salina, próximo ao fundo, ao longo do estuário do rio Ipojuca durante os estágios de baixa-mar (BM), enchente (EM), preamar (PM) e vazante (VZ) em regime de sizígia no período chuvoso.



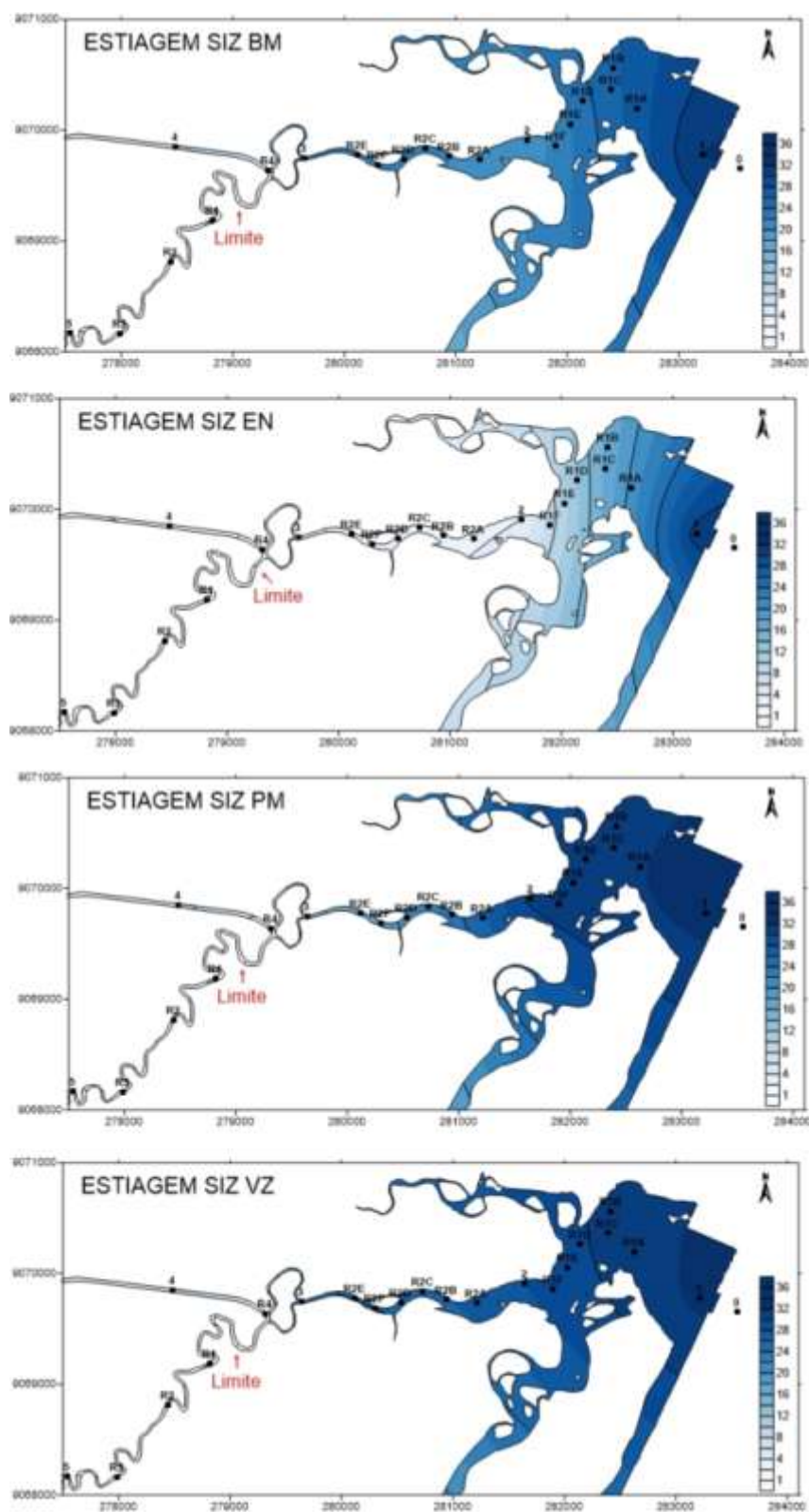
Fonte: O autor.

Figura 21. Limites de penetração da maré salina, próximo ao fundo, ao longo do estuário do rio Ipojuca durante os estágios de baixa-mar (BM), enchente (EM), preamar (PM) e vazante (VZ) em regime de quadratura no período chuvoso.



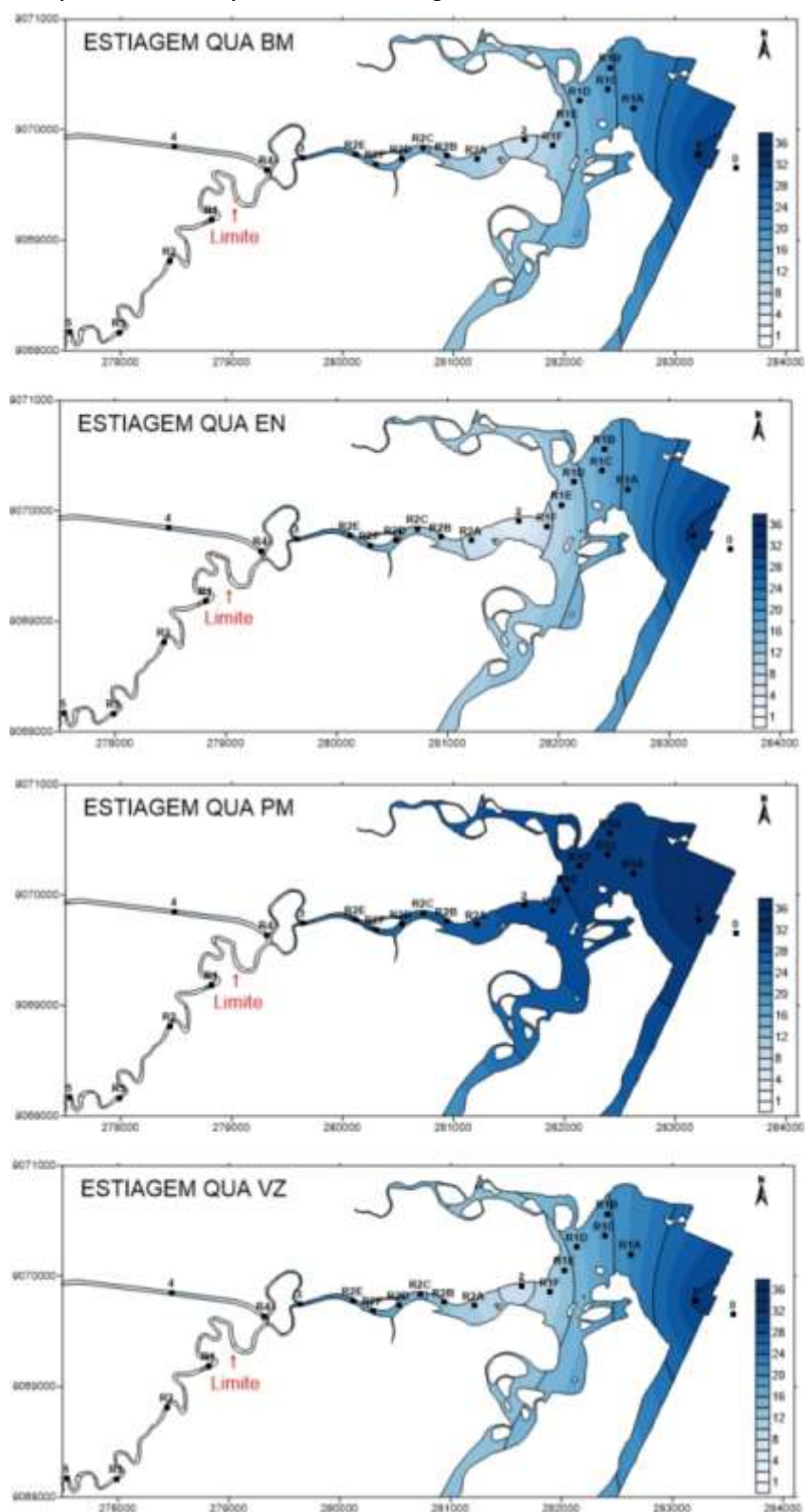
Fonte: O autor.

Figura 22. Limites de penetração da maré salina, próximo ao fundo, ao longo do estuário do rio Ipojuca durante os estágios de baixa-mar (BM), enchente (EM), preamar (PM) e vazante (VZ) em regime de sizígia no período de estiagem.



Fonte: O autor.

Figura 23. Limites de penetração da maré salina, próximo ao fundo, ao longo do estuário do rio Ipojuca durante os estágios de baixa-mar (BM), enchente (EM), preamar (PM) e vazante (VZ) em regime de quadratura no período de estiagem.



Fonte: O autor.

confluência do rio Merepe e para montante. Já no estágio de vazante, observou-se um padrão de distribuição semelhante ao encontrado durante a preamar, com salinidades um pouco menores para montante da estação S2. Na sizígia chuvosa, a maré salina alcança até a estação R1E, 0,2 km para jusante da estação S2 na enchente. Na baixa-mar a região no entorno da estação S2 apresenta salinidades próximas a zero, com o trecho para montante voltando a apresentar salinidades crescentes até a estação S3 e até 0,6 km para montante desta. No estágio de preamar até a estação S3. A maior intrusão salina ocorrendo durante a vazante na quadratura chuvosa quando alcança até a estação R1, 2,2 km a montante até a estação S3.

Ainda no período chuvoso, durante o ciclo de quadratura (Figura 21), nos estágios de baixa-mar e enchente, as águas salinas alcançam até a estação S2, com um forte gradiente horizontal de salinidade entre esta estação e a desembocadura do rio. No estágio de preamar, as águas salinas se distribuem pelo baixo e médio estuário, com valores de 35,8 a 31,8 entre a desembocadura e a estação S2. Padrão semelhante foi verificado para o estágio de vazante, com salinidades ligeiramente mais reduzidas (35,4 a 28,3) entre a desembocadura e a estação S2. Na quadratura chuvosa a intrusão salina alcança até a estação S2 nos estágios de baixa-mar e enchente com seu limite máximo de penetração ocorrendo durante os estágios de preamar e vazante, quando alcança até a estação S3.

Próximo ao fundo, a influencia das águas salinas para o trecho compreendido entre a desembocadura e a estação S3 foi mais acentuada durante os estágios de preamar (36,6 a 14,4) e vazante (36,4 a 27,2), seguido do estágio de baixa-mar (36,1 a 27,8). A menor influencia das águas salinas foi registrada para o período de enchente com salinidades de 35,1 e 4,4 às estações S1 e S2, e salinidades próximas a zero à estação S3 e reaparecendo às estações S4 e R4 (2,1 e 1,3, respectivamente). O limite máximo de penetração da maré salina esteve localizado a cerca de 1 km para montante da estação S3 nos estágios de preamar, vazante e baixa-mar e a cerca de 0,6 km da estação S3 no estágio de enchente (Fig. 21).

No período de estiagem, durante o ciclo e maré de sizígia (Figura 22), o sistema apresentou águas salobras para montante da estação S3, em todos os

estágios de maré. A influencia das águas salinas foi mais acentuada durante os estágios de preamar e vazante, seguido do estágio de baixa-mar, com valores de salinidade de fundo variando de 36,6 a 14,4, 36,4 a 27,2 e 36,1 a 27,8 entre a desembocadura e a estação S3, respectivamente. A menor influencia das águas salinas foi registrada para o período de enchente, possuindo salinidade de fundo entre 35,1 e 4,4 nas estações S1 e S2, sendo quase nulo na estação S3 e reaparecendo nas estações 4 e R4 (2,1 e 1,3, respectivamente). O limite máximo de penetração da maré salina esteve localizado a cerca de 1 km para montante da estação S3 nos estágios de preamar, vazante e baixa-mar e a cerca de 0,6 km da estação S3 no estágio d enchente.

Durante o ciclo de quadratura no período de estiagem (Figura 23) a maior influencia das águas salinas no estuário do Ipojuca foram verificadas no estágio de preamar, com salinidades de fundo de 36,8 a 26,8 ao longo do trecho compreendido entre as estações S1 e S3, seguido dos estágios de baixa-mar e enchente, respectivamente com valores de salinidade entre 34,6 e 27,0, e entre 35,1 e 26,9. A menor influencia das águas salinas ocorreu durante o estágio de enchente, quando foram registradas salinidades variáveis de 0,06 a 35,1 ao longo do sistema. Durante o ciclo de quadratura, o limite de penetração da maré salina esteve localizado entre as estações de refinamento R4 e R1, cerca de 1 km para montante da estação S3.

Em resumo, durante o período chuvoso, a penetração da maré salina ao longo do rio Ipojuca alcançou entre 2,0 e 5,4 km para montante de sua desembocadura na sizígia e entre 2,3 e 4,4 km na quadratura. Já no período de estiagem a excursão salina alcançou áreas mais interiores do rio, se estendendo por 5,3 a 5,7 km para montante da desembocadura na sizígia e por 5,6 a 5,7 km na quadratura. Além da menor penetração e maior variabilidade da excursão da maré salina entre os estágios de maré durante o período chuvoso, relativa àquela no período de estiagem, verifica-se também diferenças entre os estágios de maré em que a excursão das águas salinas atinge seu limite máximo em cada período sazonal. No período chuvoso, a maior incursão das águas salinas ocorre durante a vazante/baixa-mar na sizígia e durante a preamar/vazante na quadratura. No período de estiagem as maiores excursões das águas salinas se deram durante os

estágios de enchente/baixa-mar na quadratura e durante os estágios de preamar/vazante durante a sizígia.

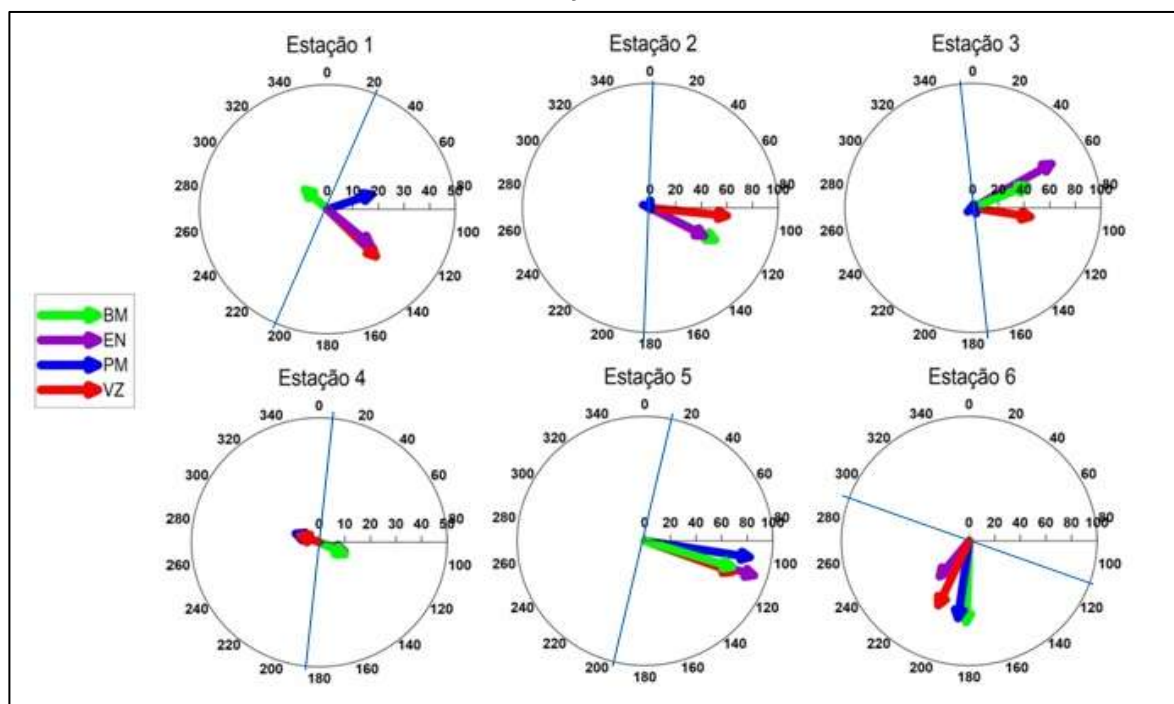
7.5 Circulação estuarina e maré dinâmica

Nas subseções a seguir são apresentados os resultados para o campo das correntes e a propagação dinâmica de modo a representar os quatro principais estágios da maré.

7.5.1 Campo das Correntes

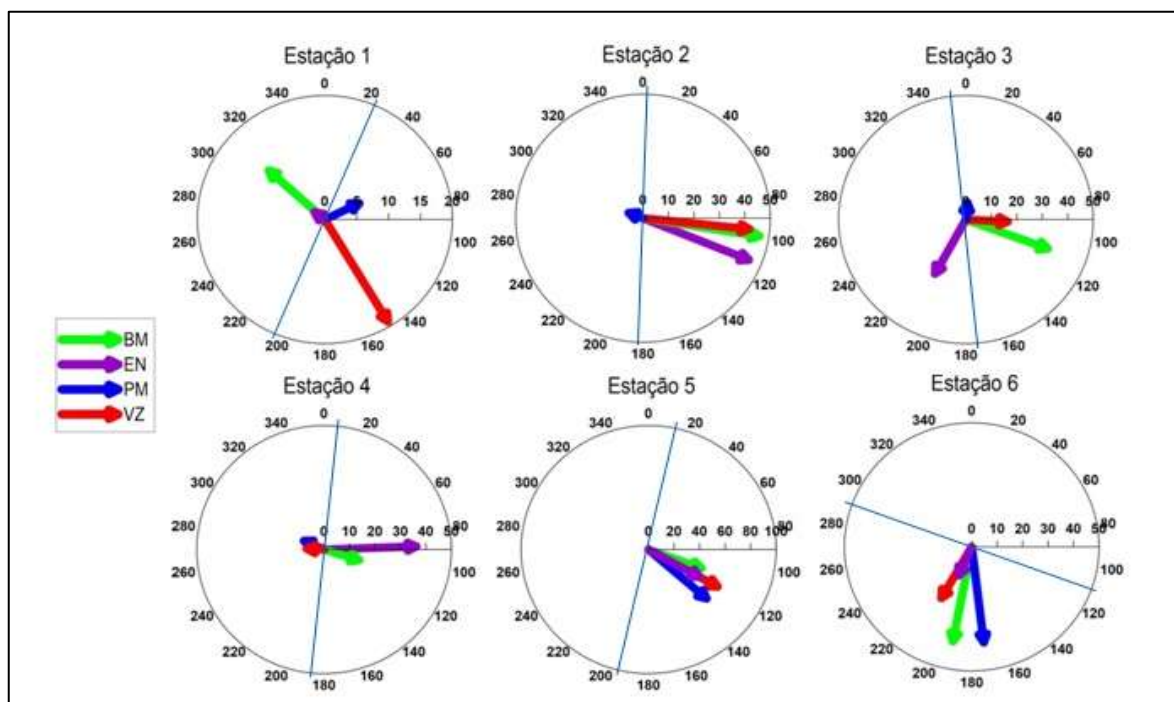
As figuras de 24 a 27 e figuras 28 a 31 representam plots polares das correntes de superfície e de fundo ao longo do estuário do rio Ipojuca, respectivamente durante os períodos chuvoso e de estiagem. Nestas figuras, as setas representam os vetores velocidade das correntes e a linha a orientação da sessão amostral com as correntes à sua direita ou abaixo da mesma, fluindo em direção à costa e à sua esquerda ou acima, fluindo para montante.

Figura 24. Direção e intensidade das correntes superficiais durante a sizígia do período chuvoso. A linha azul corresponde à orientação da sessão amostral.



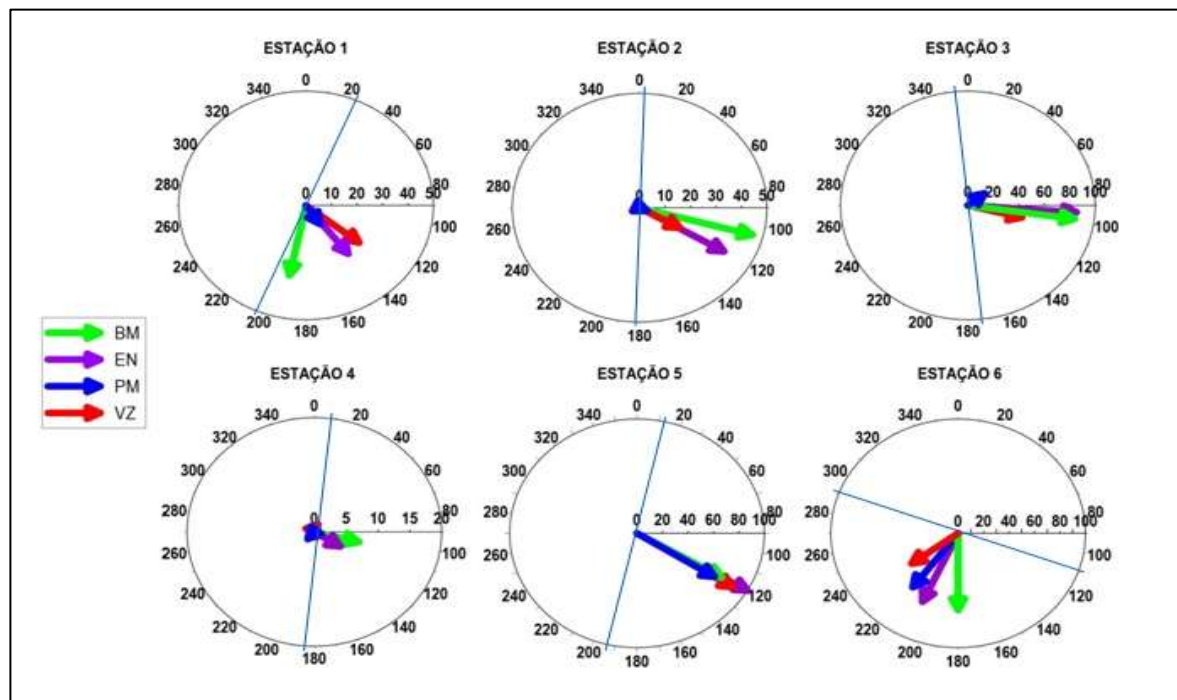
Fonte: O autor.

Figura 25. Direção e intensidade das correntes de fundo durante a sizígia do período chuvoso. A linha azul corresponde à orientação da sessão amostral.



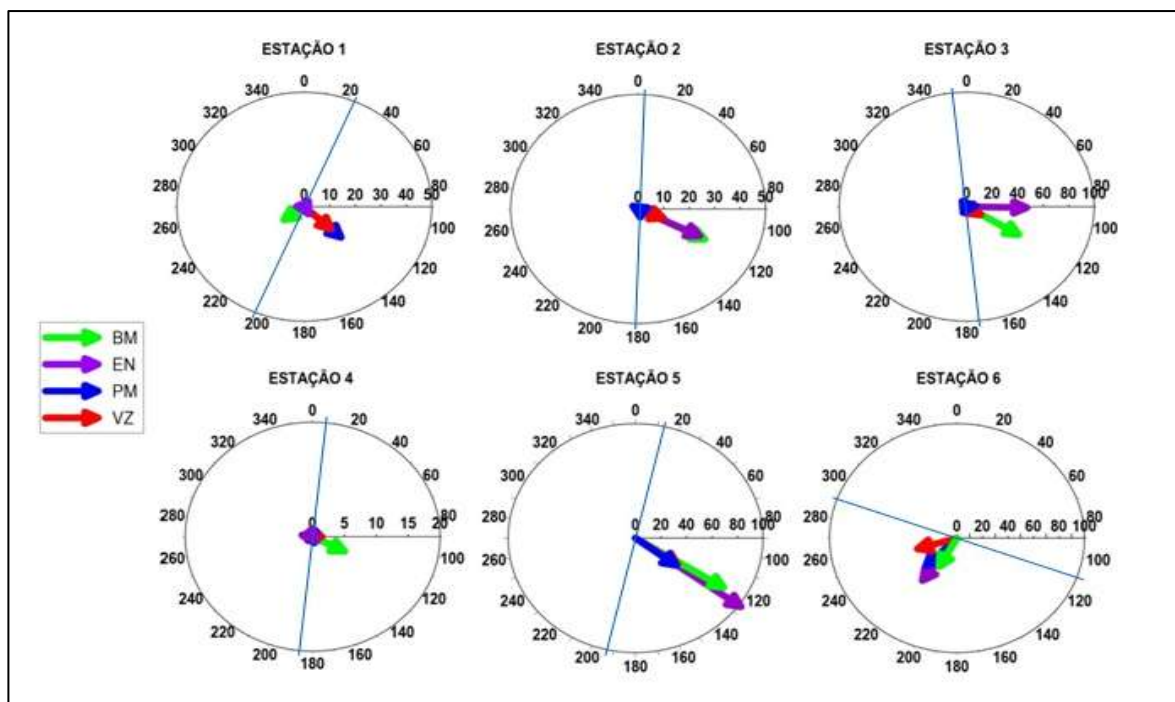
Fonte: O autor.

Figura 26. Direção e intensidade das correntes superficiais durante a quadratura do período chuvoso. A linha azul corresponde à orientação da sessão amostral.



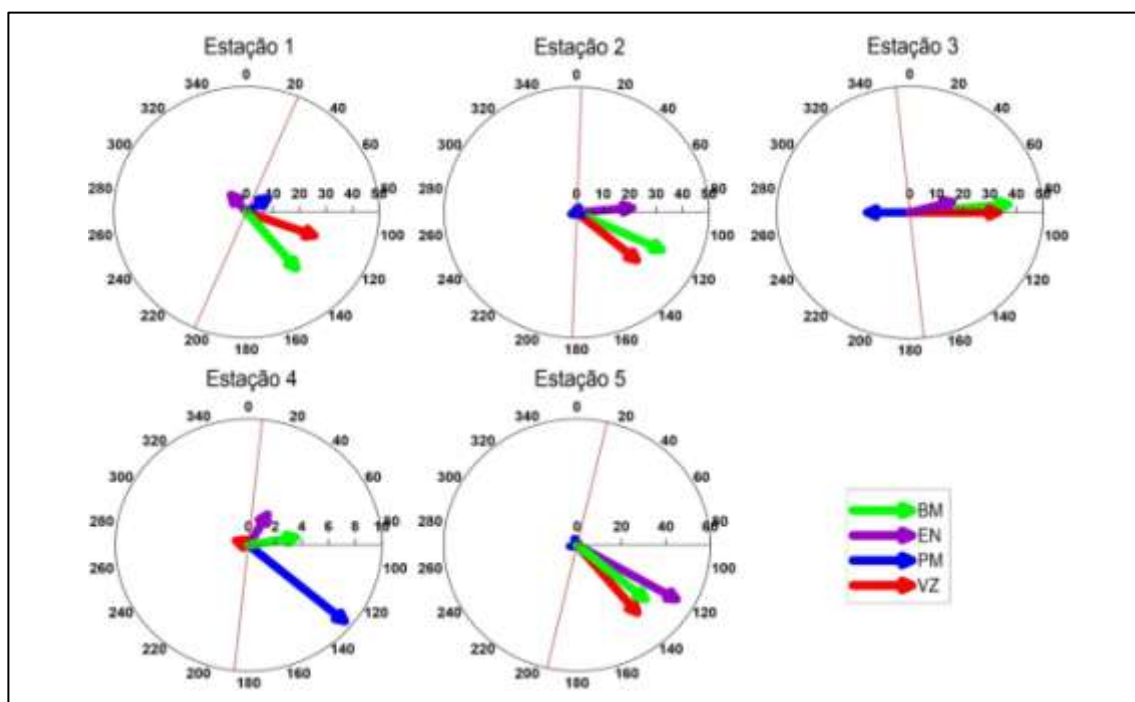
Fonte: O autor.

Figura 27. Direção e intensidade das correntes de fundo durante a quadratura do período chuvoso. A linha azul corresponde à orientação da sessão amostral.



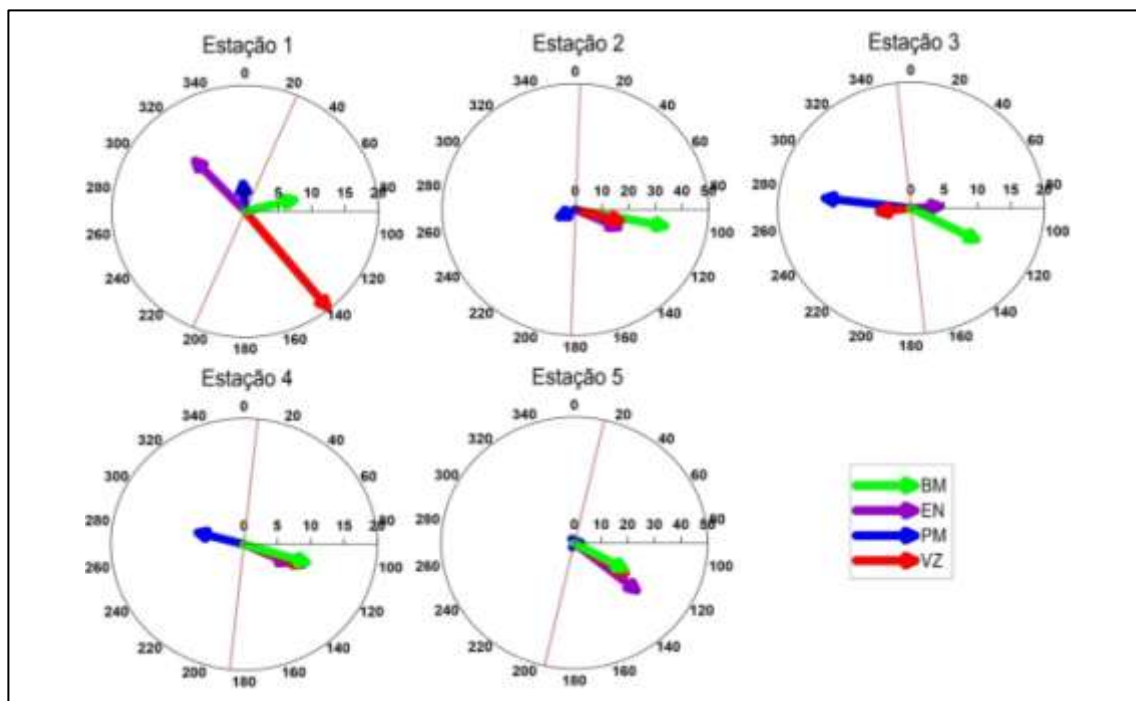
Fonte: O autor.

Figura 28. Direção e intensidade das correntes superficiais durante a sizígia do período de estiagem. A linha vermelha corresponde à orientação da sessão amostral.



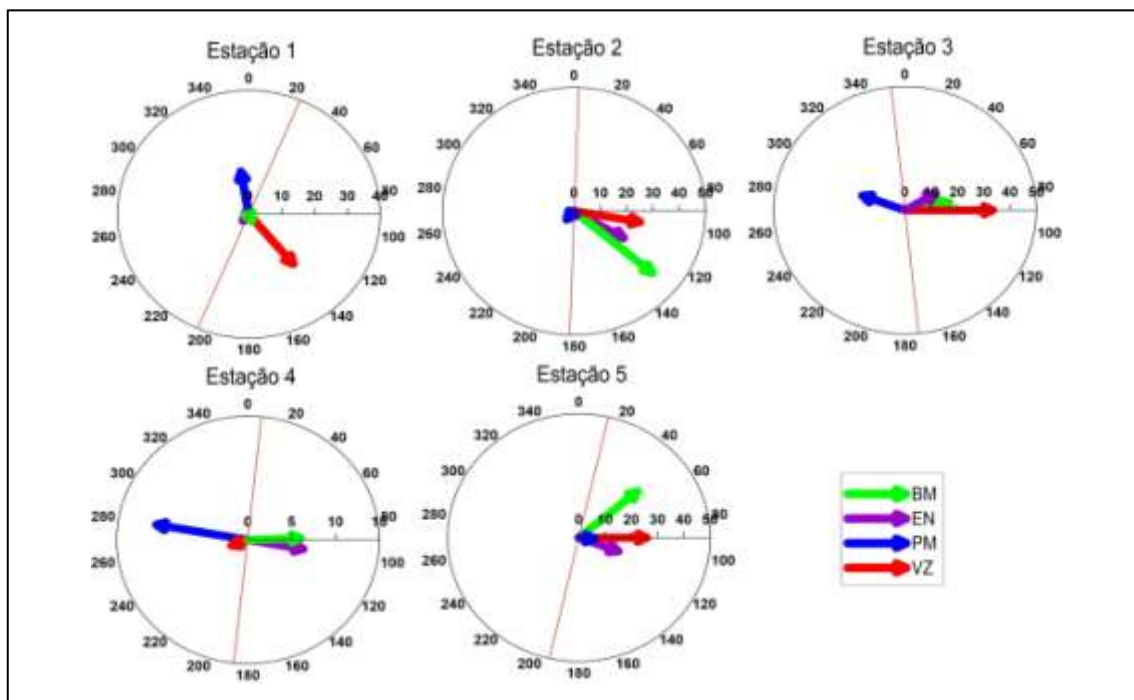
Fonte: O autor.

Figura 29. Direção e intensidade das correntes de fundo durante a sizígia do período de estiagem. A linha vermelha corresponde à orientação da sessão amostral.



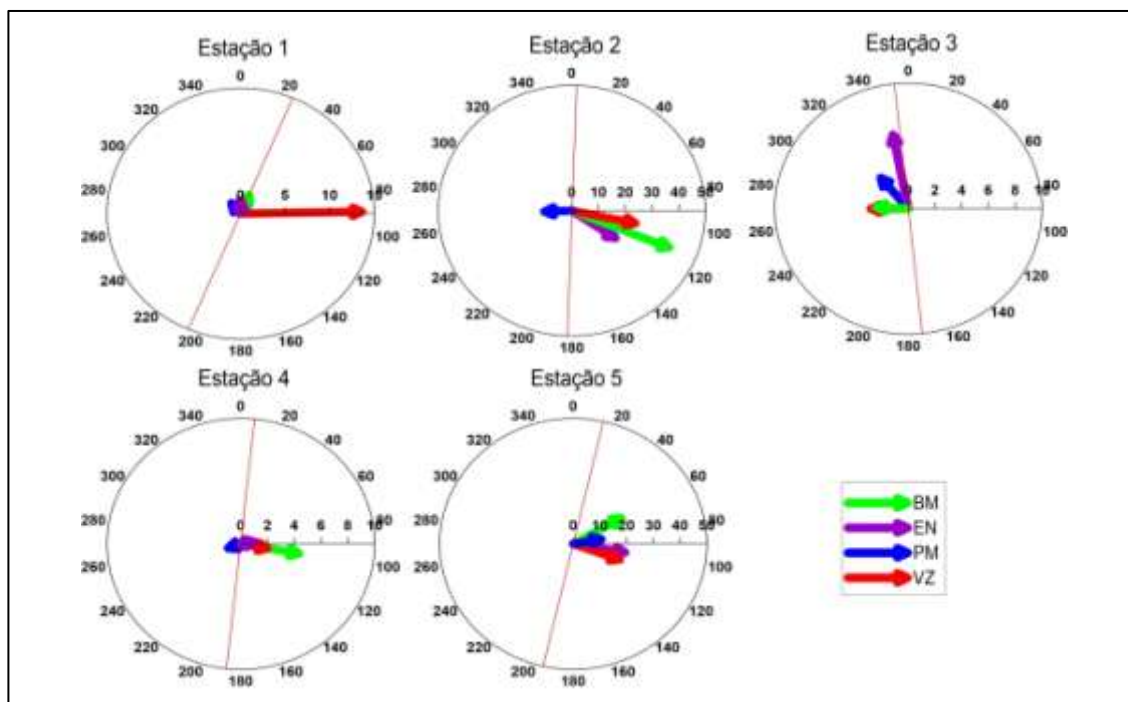
Fonte: O autor.

Figura 30. Direção e intensidade das correntes superficiais durante a quadratura do período de estiagem. A linha vermelha corresponde à orientação da sessão amostral.



Fonte: O autor.

Figura 31. Direção e intensidade das correntes de fundo durante a quadratura do período de estiagem. A linha vermelha corresponde à orientação da sessão amostral.



Fonte: O autor.

Ao longo do perfil vertical, em geral as maiores intensidades de corrente foram registradas para a camada superficial (0 – 1 m), com valores decrescendo com a proximidade do fundo, devido ao atrito com o leito estuarino e a interação com o fluxo contrário das correntes de marés.

Na sizígia do período chuvoso (Figura 24), o fluxo superficial foi predominantemente de descarga com as correntes mais intensas tendo sido registradas à estação S5 (71,4 a 89,6 cm.s^{-1}). Fluxos superficiais para montante foram de baixa intensidade ($< 11,8 \text{ cm.s}^{-1}$) apenas registrados na baixa-mar à estação S1, na preamar às estações S2 a S4 e na vazante à estação S4. O fluxo de fundo (Figura 25), apresentou comportamento análogo ao de superfície, com excursão para montante restrita a alguns estágios de maré e não ultrapassando a estação S3 durante a baixa-mar.

Na quadratura do período chuvoso (Figuras 26 e 27) igualmente se observou o predomínio de uma circulação de descarga com os fluxos à superfície e próximo ao fundo direcionados para jusante. À superfície as correntes mais intensas foram

registradas à estação S5 (71,8 a 100,2 cm.s^{-1}) e à estação S3 (16,8 a 85,4 cm.s^{-1}). Próximo ao fundo a intensidade das correntes foi mais reduzida, variando em geral entre 1 e 47,4 cm.s^{-1} , exceto à estação S5 onde foram registradas as correntes de fundo mais intensas (39,6 a 102,4 cm.s^{-1}).

Durante o período de estiagem (Figuras 28 a 31) as intensidades de correntes registradas foram menos intensas ($<50 \text{ cm.s}^{-1}$) que as observadas durante o período chuvoso. O sistema tendeu a apresentar modo de circulação gravitacional com predominância de fluxo de águas menos salinas à superfície para jusante e um fluxo próximo ao fundo de águas com maiores salinidades para montante nos estágios de preamar e enchente. Na capa superficial (Figura 28), às estações S1 e S2, em regime de sizígia, as correntes apresentaram, respectivamente, intensidades de 9 a 29,2 cm.s^{-1} e de 2 a 35,4 cm.s^{-1} . À estação S3, as correntes para jusante (EN, BM e VZ) apresentaram intensidade de 16,4 a 37 cm.s^{-1} e intensidade de 16 cm.s^{-1} (PM) para montante. Próximo ao fundo (Figura 29), ainda em sizígia, as correntes para jusante variaram entre 2,4 e 34,2 cm.s^{-1} e as para montante entre 4,4 e 13 cm.s^{-1} e limitados ao estágio de preamar, exceto à estação S1, quando correntes de 11 cm.s^{-1} foi registrada durante o estágio de enchente.

As correntes superficiais na quadratura de estiagem (Figura 30) apresentaram direção para montante e intensidade variável de 4,4 a 17,2 cm.s^{-1} em quase toda a extensão do estuário no estágio de preamar, exceto à estação S5 que apresentou fluxo para jusante. Próximo à desembocadura (estação S1) as correntes foram de baixa magnitude nos estágios de baixa-mar e enchente, com intensidade de 21 cm.s^{-1} na vazante direcionado para a costa e de 16 cm.s^{-1} na preamar direcionado para montante. Às estações S2 e S3, com exceção do estágio de preamar, as correntes apresentaram direção para jusante e intensidades variáveis de 13,4 a 38,8 cm.s^{-1} . À estação S5 as correntes se apresentaram com direção para jusante e com valores variando de 6,0 a 29,2 cm.s^{-1} .

Ainda na quadratura de estiagem, as correntes de fundo foram de baixa magnitude ($<20 \text{ cm.s}^{-1}$). À estação S1 a velocidade das correntes em estágios de baixa-mar, vazante e preamar foram próximas de zero, enquanto que na vazante apresentou intensidades de 14 cm.s^{-1} em direção à costa. À estação S2 as correntes

de fundo apresentam o mesmo padrão das correntes de superfície, com intensidades variáveis de 11,0 a 40,0 cm.s^{-1} . À estação S3 a velocidade das correntes variou de 2,4 e 6,0 cm.s^{-1} , com direção sempre para montante. À estação S5 a direção das correntes foi sempre para jusante, com intensidade de 11,0 a 20,2 cm.s^{-1} .

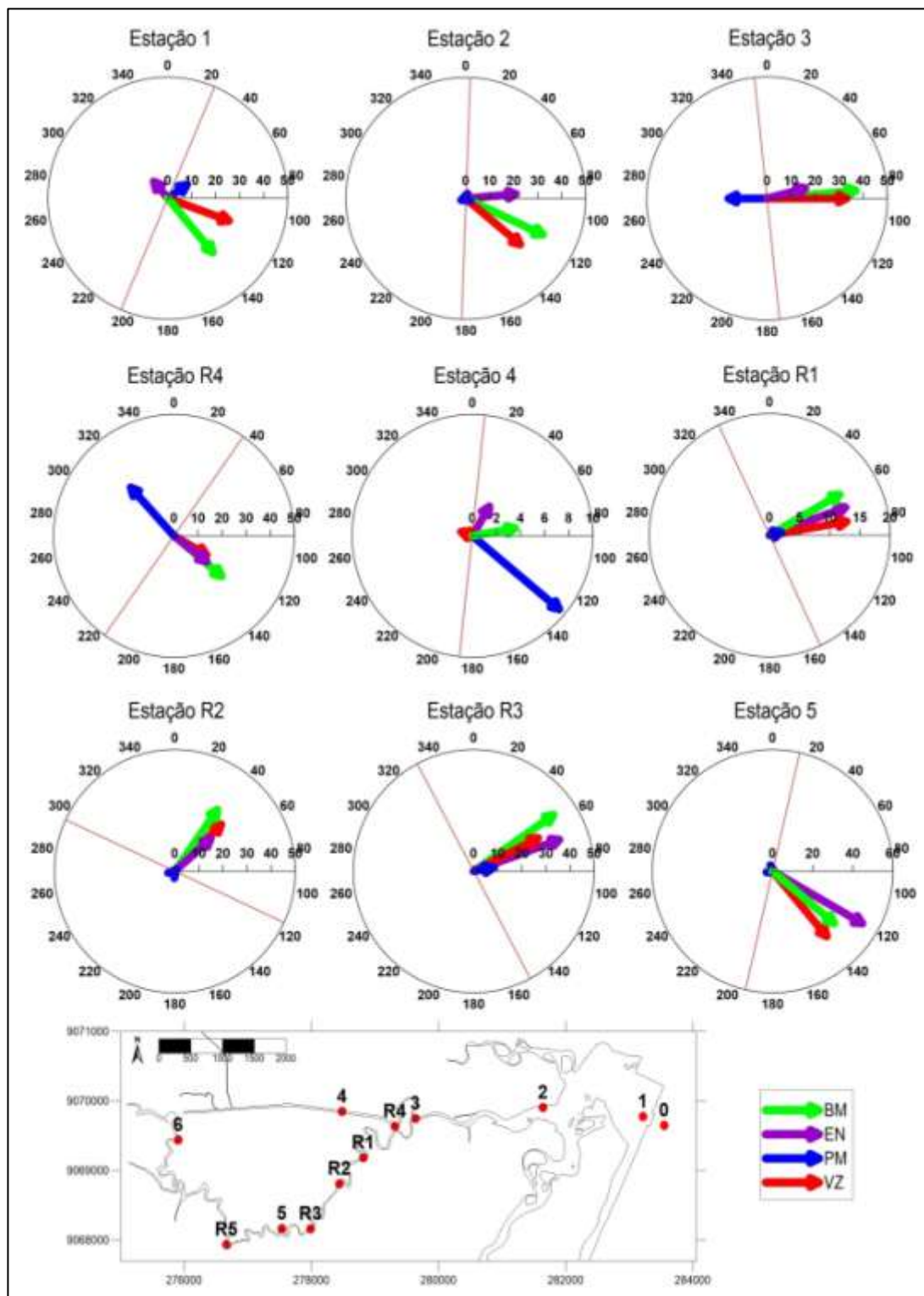
7.5.2 Limite da Maré Dinâmica

A identificação dos limites da maré dinâmica durante o período chuvoso teve por base as medições das correntes nas 6 estações fixas (S1 a S6) enquanto que para o período de estiagem, empregou-se adicionalmente, medições de correntes realizadas entre as estações fixas S3 e S5.

As figuras 32 e 33 e figuras 34 e 35, representam as corrente de superfície e de fundo ao longo do rio Ipojuca, respectivamente em ciclos de sizígia e quadratura durante o período de estiagem.

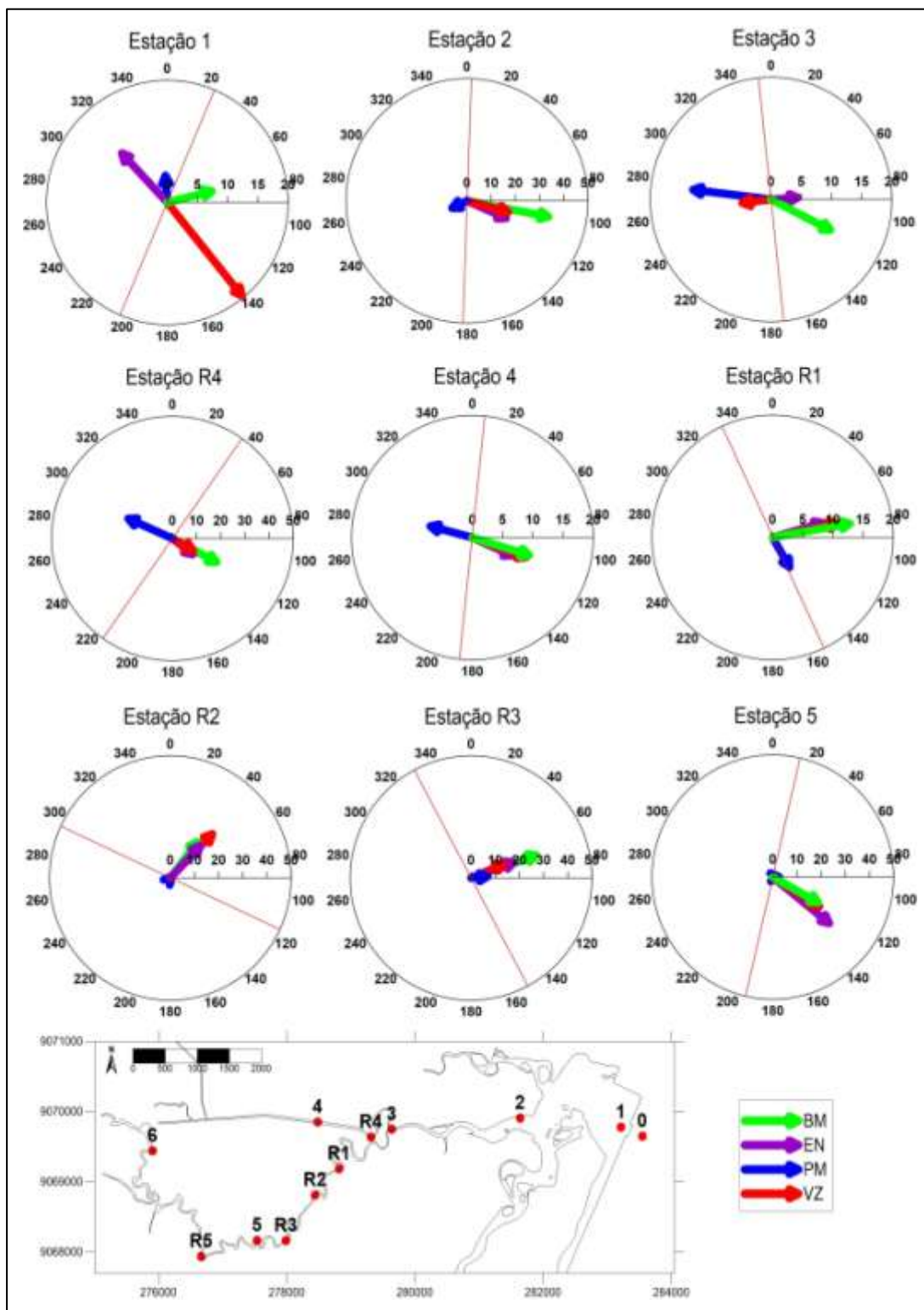
O limite da maré dinâmica corresponde a região superior do estuário, onde o fluxo é unidirecional e para jusante, sem reversão de correntes. Observando-se o curso natural do estuário, o limite da maré dinâmica na época chuvosa foi máximo durante preamar de sizígia, estando localizado entre as estações S3 e S5, e apresentando velocidades e direção das correntes de fundo 6,8 cm s^{-1} ; 5° e 60,2 cm s^{-1} ; 131°, respectivamente. A estação S3 apresentou velocidade quase que nula na superfície, invertendo o fluxo de 12° para 325° a meia água e voltando a 5° próximo ao fundo. As correntes para montante de maior intensidade (25 cm s^{-1} ; 209°). foram observadas nesta mesma estação, próximo ao fundo, durante o estágio de enchente na sizígia. Durante o período chuvoso, as correntes de maré alcançam a estação S4 apenas nos estágios de preamar e vazante. Durante a maré de quadratura chuvosa a limite da maré dinâmica deu-se entre as estações S2 e S3, ultrapassando a segunda estação apenas durante preamar e baixa-mar, tendo diminuição da velocidade de fluxo durante a vazante.

Figura 32. Direção e intensidade das correntes superficiais durante a sizígia do período de estiagem. A linha vermelha corresponde à orientação da sessão amostral.



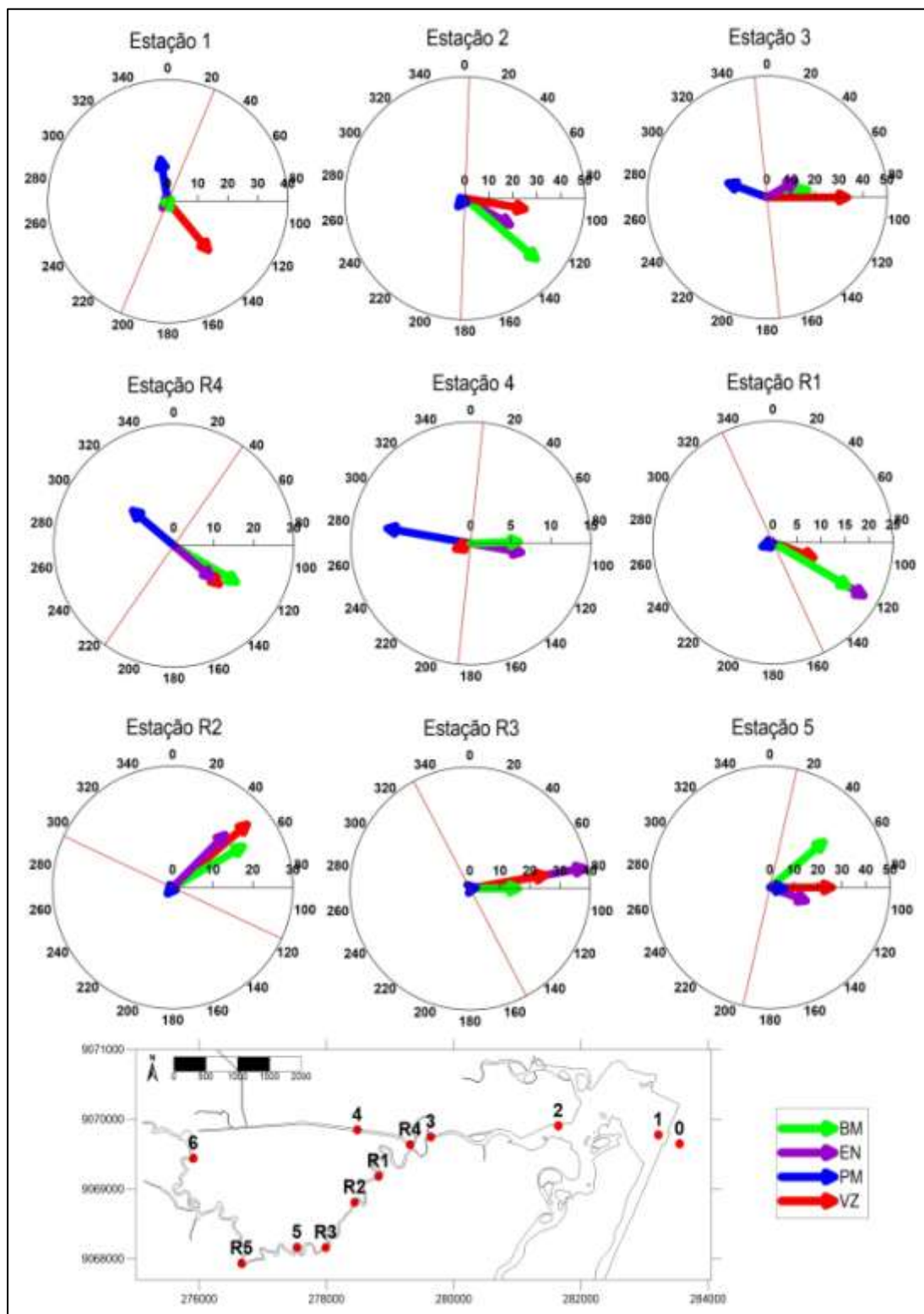
Fonte: O autor.

Figura 33. Direção e intensidade das correntes de fundo durante a sizígia do período de estiagem. A linha vermelha corresponde à orientação da sessão amostral.



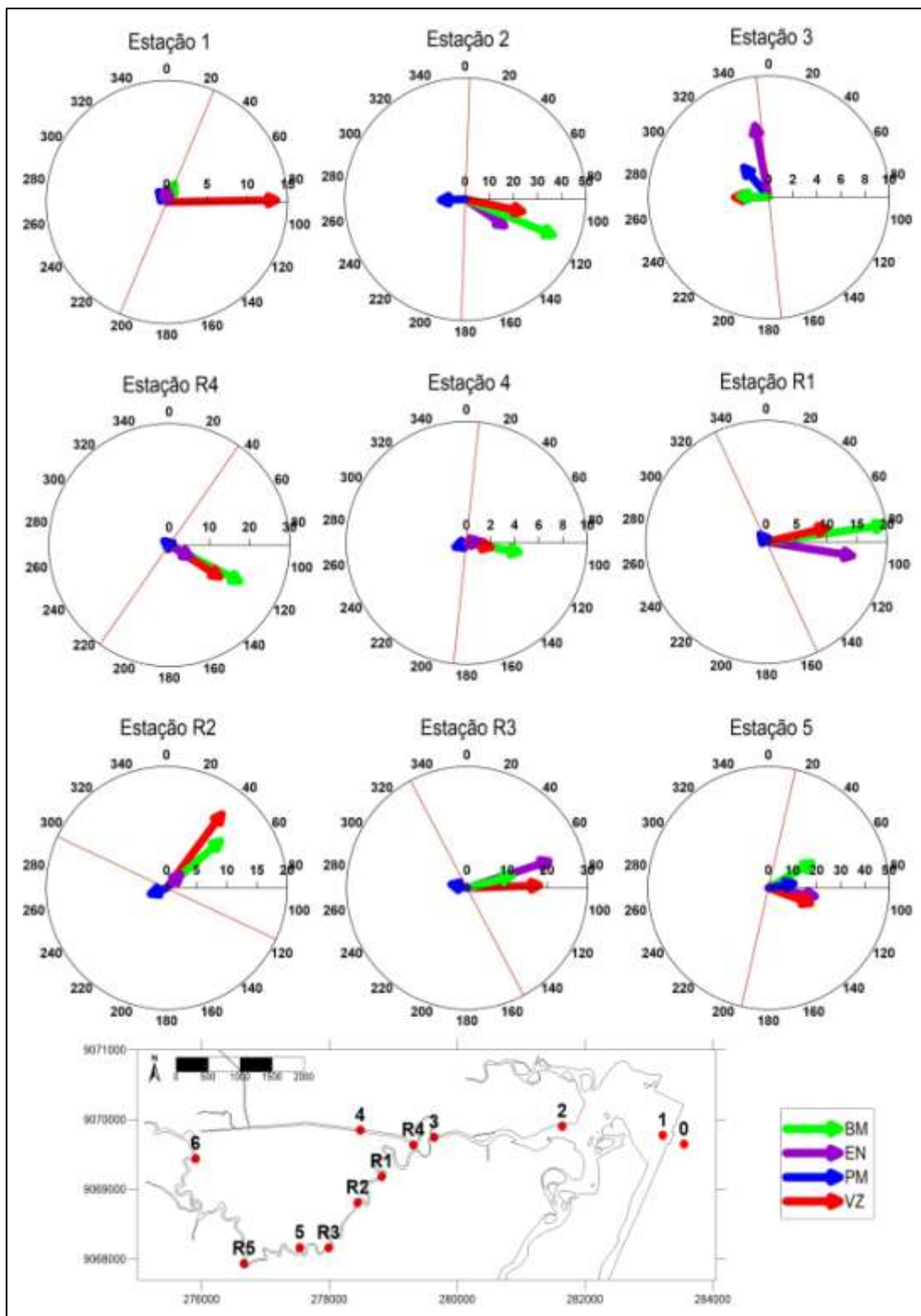
Fonte: O autor.

Figura 34. Direção e intensidade das correntes superficiais durante a quadratura do período de estiagem. A linha vermelha corresponde à orientação da sessão amostral.



Fonte: O autor.

Figura 35. Direção e intensidade das correntes de fundo durante a quadratura do período de estiagem. A linha vermelha corresponde à orientação da sessão amostral.



Fonte: O autor.

O limite da maré dinâmica corresponde a região superior do estuário, onde o fluxo é unidirecional e para jusante, sem reversão de correntes. Observando-se o curso natural do estuário, o limite da maré dinâmica na época chuvosa foi máximo durante preamar de sizígia, estando localizado entre as estações S3 e S5, e apresentando velocidades e direção das correntes de fundo $6,8 \text{ cm s}^{-1}$; 5° e $60,2 \text{ cm s}^{-1}$; 131° , respectivamente. A estação S3 apresentou velocidade quase que nula na superfície, invertendo o fluxo de 12° para 325° a meia água e voltando a 5° próximo ao fundo. As correntes para montante de maior intensidade (25 cm s^{-1} ; 209°). foram observadas nesta mesma estação, próximo ao fundo, durante o estágio de enchente na sizígia. Durante o período chuvoso, as correntes de maré alcançam a estação S4 apenas nos estágios de preamar e vazante. Durante a maré de quadratura chuvosa a limite da maré dinâmica deu-se entre as estações S2 e S3, ultrapassando a segunda estação apenas durante preamar e baixa-mar, tendo diminuição da velocidade de fluxo durante a vazante.

No período de estiagem a maré dinâmica alcança até próximo à estação S5 na preamar com velocidades e direções de $1,0 \text{ cm s}^{-1}$ e 290° e de $2,4 \text{ cm s}^{-1}$ e 86° a superfície e próximo ao fundo, respectivamente. O limite da maré dinâmica para os demais estágios de maré ocorreu mais para jusante da estação R1. Já no estágio de vazante, alcançou a estação S4 no canal artificial, onde foram registradas correntes de 1 cm s^{-1} ; 290° à superfície e de $9,4 \text{ cm s}^{-1}$; 110° no fundo (Fig. 34 a 37).

Durante o período de estiagem (Figs. 30 a 33), tanto durante a maré de sizígia quanto de quadratura, houve sinal de influência de corrente dinâmica próximo à estação S5 no estágio de preamar, visto que em todos os gráficos pode-se observar que esta estação encontra-se quase em estágio de estofa, além de os gráficos de superfície estar praticamente em sua totalidade em descarga. Nos gráficos de correntes de fundo, observa-se que durante a sizígia o fluxo rio a dentro durante a preamar e vazante é intenso na estação S3. Em todos os gráficos abaixo os fluxos fluviais na estação S5 são fortes para os outros 3 estágios de maré.

7.6 Sólidos suspensos totais e zona de turbidez máxima

Nas subseções a seguir são apresentados os resultados para a concentração

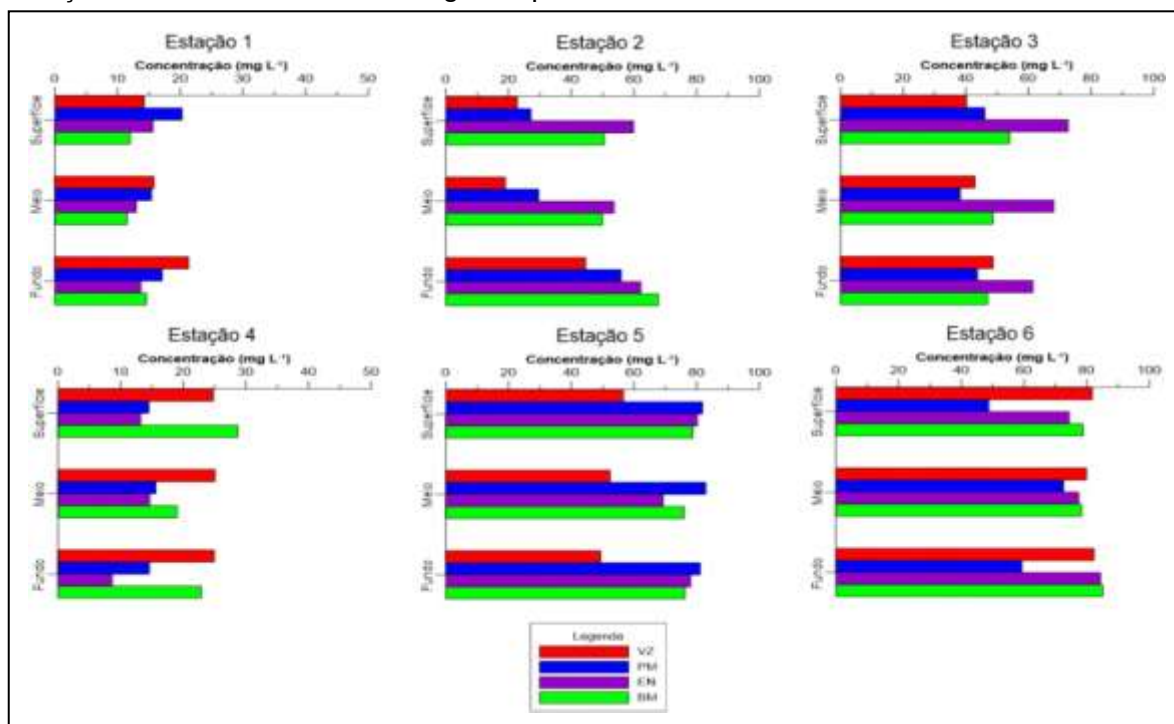
e sólidos suspensos totais e localização da zona de turbidez máxima para os quatro principais estágios da maré.

7.6.1 Sólidos Suspensos Totais

A concentração de sólidos suspensos totais (SST) às estações S1 a S6 para as camadas superficial e de fundo nos estágios de vazante, baixa-mar, enchente e preamar, em ciclos de maré de sizígia e de quadratura são apresentados nas figuras 36 e 37 e nas figuras 38 e 39, respectivamente durante os períodos chuvoso e de estiagem.

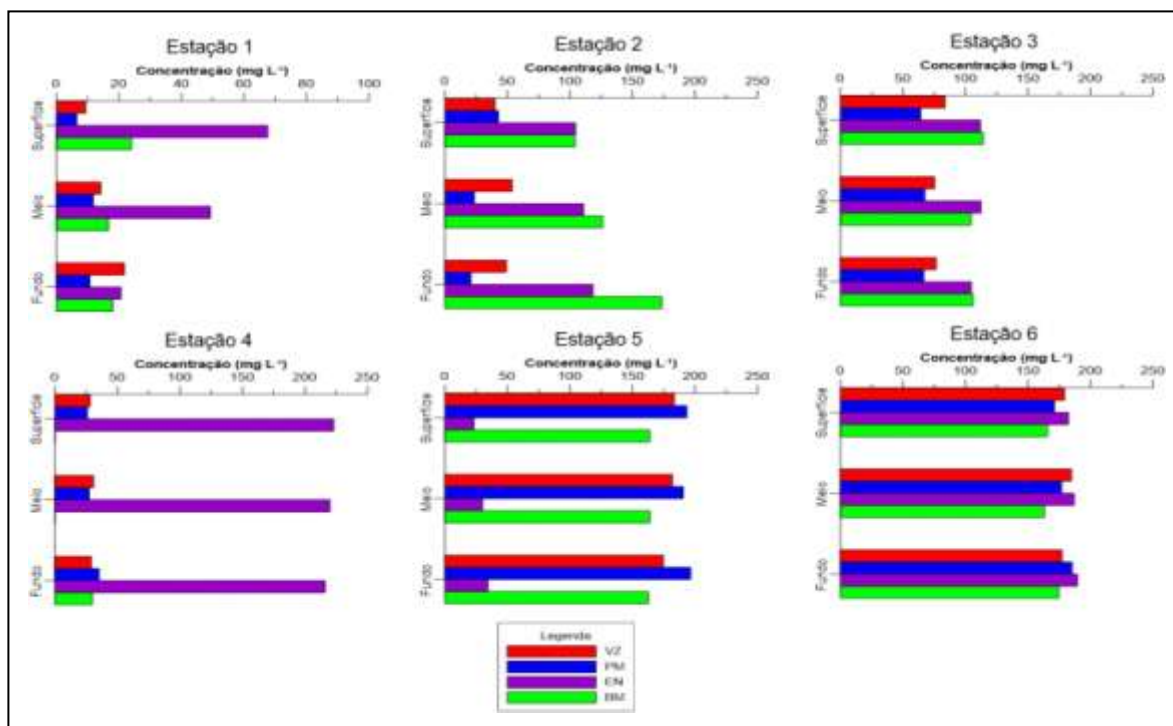
Durante o período chuvoso (figuras 36 e 37), em regime de sizígia as concentrações de SST variaram de 12,0 a 20,3 mg L⁻¹, 22,7 a 67,7 mg L⁻¹, 40,2 a 72,6 mg L⁻¹, 8,6 a 28,7 mg L⁻¹, 49,4 a 81,9 mg L⁻¹ e de 48,7 a 85,1 mg L⁻¹ para respectivamente as estações de S1 a S6; enquanto que durante o regime de quadratura as concentrações variaram de 6,5 a 67,6 mg L⁻¹, 20,8 a 173,4 mg L⁻¹, 64,2 a 114,2 mg L⁻¹, 25,9 a 222,9 mg L⁻¹, 23,1 a 196,5 mg L⁻¹ e de 165,6 a 189,6 mg L⁻¹ para respectivamente as estações de S1 a S6.

Figura 36. Concentração de sólidos suspensos totais para superfície, meio e fundo das estações amostrais durante a sizígia do período chuvoso.



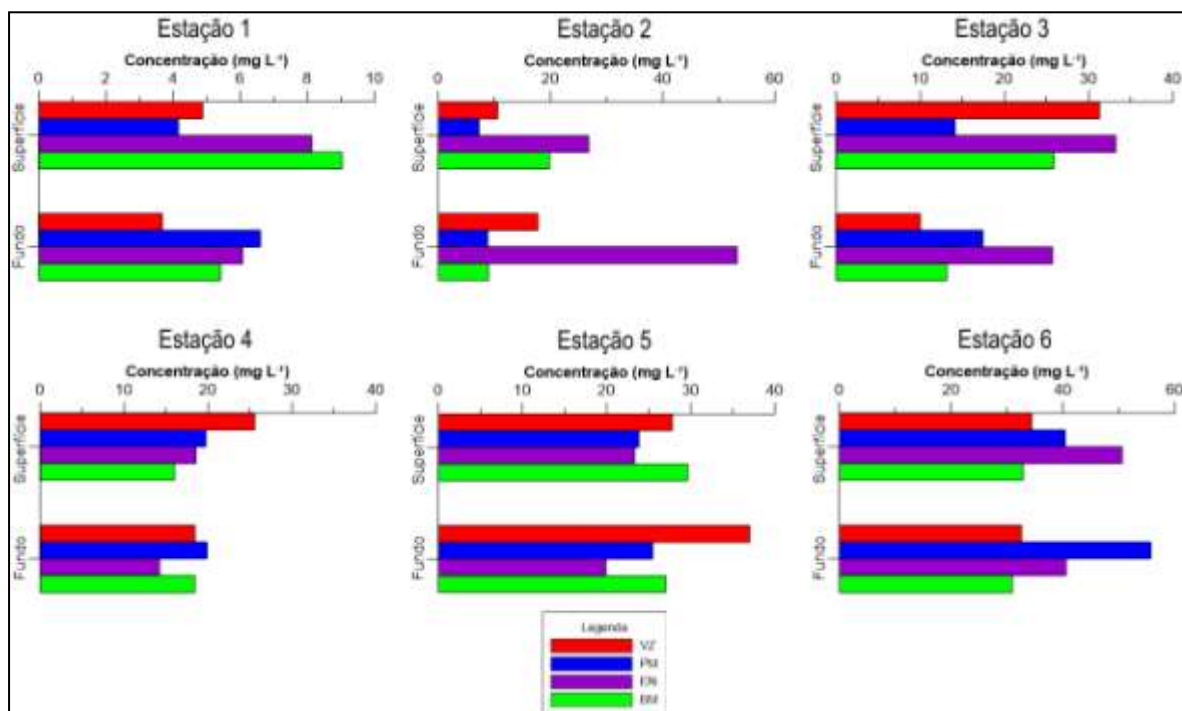
Fonte: O autor.

Figura 37. Concentração de sólidos suspensos totais para superfície, meio e fundo das estações amostrais durante a quadratura do período chuvoso.



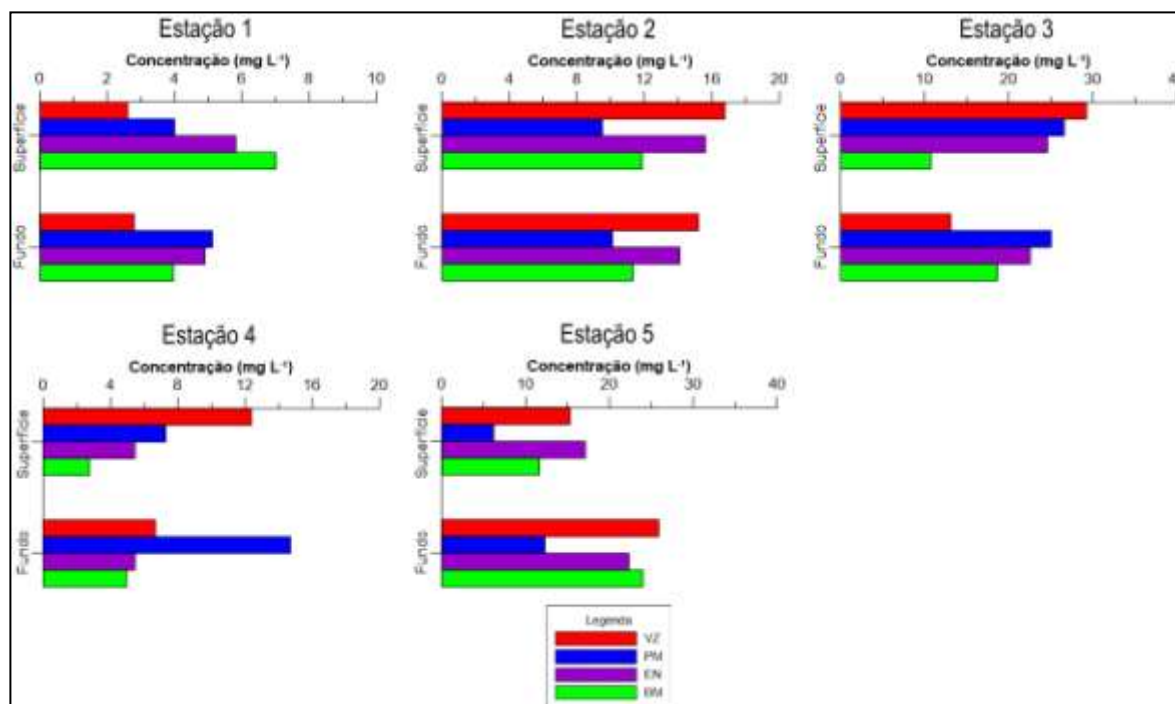
Fonte: O autor.

Figura 38. Concentração de sólidos suspensos totais para superfície e fundo das estações amostrais durante a sizígia do período de estiagem.



Fonte: O autor.

Figura 39. Concentração de sólidos suspensos totais para superfície e fundo das estações amostrais durante a quadratura do período estiagem.



Fonte: O autor.

A concentração de SST variou ao longo do ciclo de maré, sendo as maiores concentrações, em geral, observadas durante o estágio de enchente e baixa-mar. A estação mais próxima à desembocadura do rio apresentou as menores concentrações de SST, correspondendo a menos da metade do observado nas demais, com concentrações crescentes em direção a montante, por vezes extrapolando a área de estudo, como no caso da quadratura do período chuvoso (Figura 37). Durante a quadratura foram observados mais que o dobro dos valores de concentrações observados durante a sizígia.

À estação S1, as maiores concentrações foram observadas durante os estágios de vazante e preamar em regime de sizígia e de preamar em regime de quadratura (até $67,6 \text{ mg L}^{-1}$ à superfície). Às estações S2 e S3, nos dois regimes de maré as maiores concentrações foram encontrados nos estágios de enchente e baixa-mar, apresentando quase o triplo da concentração observada na desembocadura. A estação S4 correspondente, no canal artificial, apresentou comportamento distinto do canal principal, pois possui fonte diferenciada de SST, apresentando um pico de SST durante a enchente de quadratura quando

comparado com todo o ciclo (222,9 mg L⁻¹). As estações S5 e S6 apresentaram os maiores concentrações gerais do estuário, havendo maior variação entre os estágios apenas durante a quadratura da estação S5, que durante o estágio de enchente apresentou baixas concentrações de SST (8,6 e 28,7 mg L⁻¹) à superfície e no fundo, respectivamente.

Durante o período de estiagem (Figuras 38 e 39), no regime de sizígia as concentrações de SST variaram de 4,2 a 9,0 mg L⁻¹, 7,2 a 53,3 mg L⁻¹, 10,0 a 33,2 mg L⁻¹, 14,2 a 25,6 mg L⁻¹, 19,9 a 37,0 mg L⁻¹ e de 32,5 a 55,7 mg L⁻¹ para respectivamente as estações de S1 a S6; enquanto que durante o regime de quadratura as concentrações variaram de 2,6 a 7,0 mg L⁻¹, 9,5 a 16,8 mg L⁻¹, 10,8 a 29,2 mg L⁻¹, 2,8 a 14,7 mg L⁻¹ e de 6,2 a 25,9 mg L⁻¹ para respectivamente as estações de S1 a S5.

As concentrações encontradas durante o período de estiagem foram muito inferiores ao observado no período chuvoso, atingindo valor máximo de 55,7 mg L⁻¹ na amostragem de fundo do estágio de preamar da última estação (S6) de sizígia, correspondendo a menos que um quarto da maior concentração, da calha principal, observada no período chuvoso (S6 - 189,6 mg L⁻¹).

As maiores concentrações no baixo estuário, S1 e S2, foram observadas de enchente e preamar em ambos os regimes de maré, sizígia e quadratura, e ocorrendo seu pico durante a enchente da estação S2, com concentração de 53,28 mg L⁻¹ ao fundo. Às estações S3 e S5 do regime de sizígia possuíam valores de concentrações semelhantes entre si, ocorrendo as maiores concentrações de SST durante vazante e enchente da estação S3 e Vazante da estação S5. A estação S4 apresentou menores concentrações de SST que a calha principal próxima a ela (S3 – S5). Altos valores de concentrações também foram observados na estação S6, advindas do fluxo fluvial, sendo os maiores valores advindos do mesmo período de tempo da preamar e enchente.

7.6.2 Zona de Turbidez Máxima (ZTM)

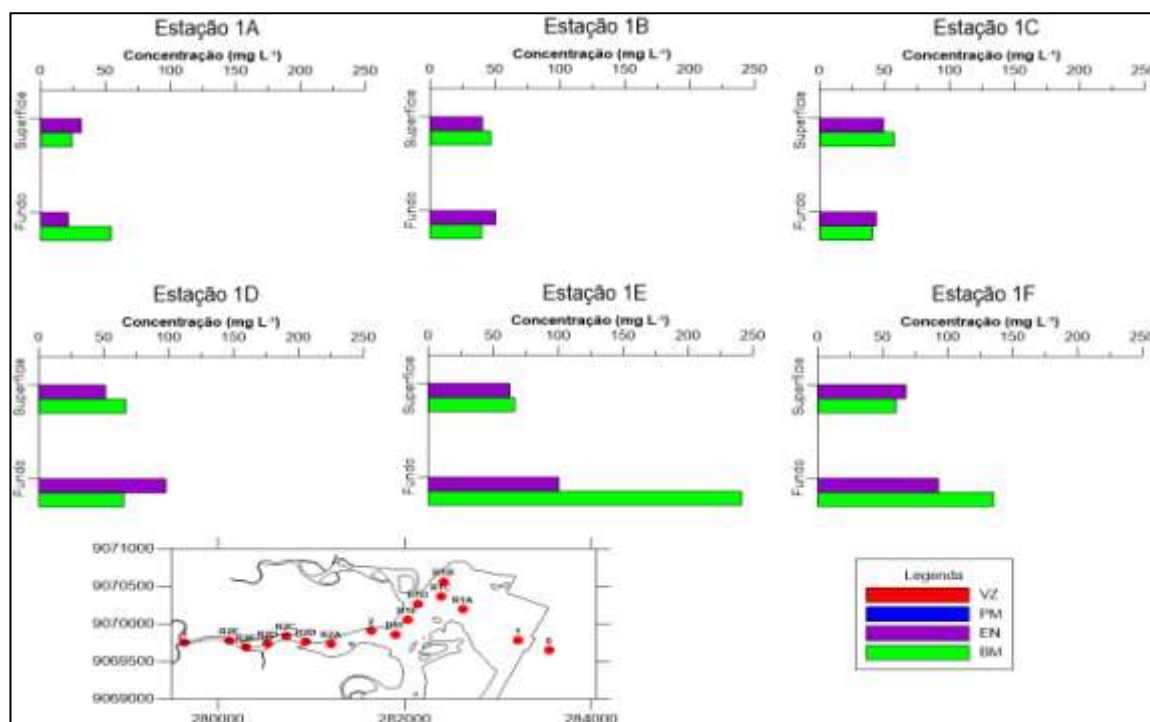
A distribuição das concentrações de SST ao longo do rio Ipojuca durante os

refinamentos é apresentada nas figuras 40 e 41 para o período chuvoso e nas figuras 42 e 43 para o período de estiagem.

Os pontos de refinamento da concentração de SST foram realizados de forma paralela com as amostragens de salinidade, de forma a estar associada à área inicial da zona de mistura e possuindo assim o mesmo padrão amostral. Durante a época chuvosa de sizígia, o refinamento foi realizado de forma distinta entre os estágios de maré. Foram realizados 6 amostragens entre as estações S2 e S3 para os estágios de vazante e preamar, enquanto foram realizados 6 pontos amostrais de refinamento entre as estações S1 e S2 durante a enchente e baixa-mar. Como durante as amostragens do período de estiagem todas as amostragens ultrapassaram o limite da estação S3 em todos os regimes de marés, foram amostrados 4 pontos amostrais de refinamento entre as estações S3 e S5.

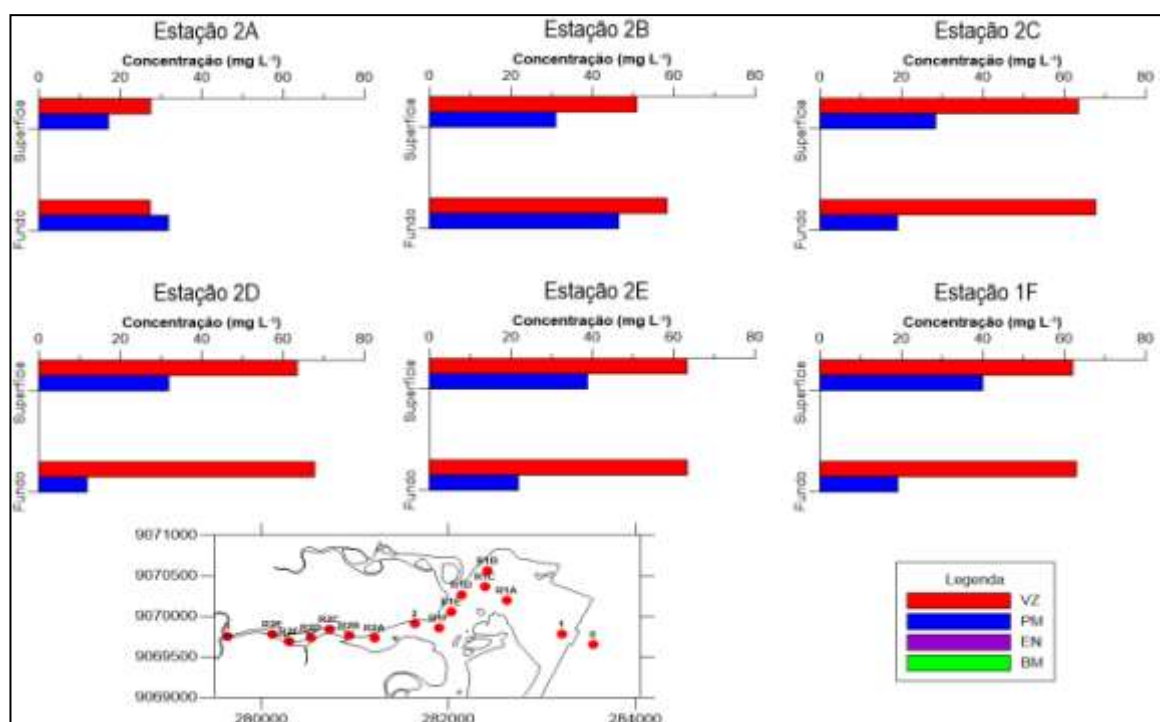
As concentrações de SST do período chuvoso durante a enchente e baixa-mar apresentou valores em torno de 25 mg L^{-1} na primeira estação de refinamento (1A) e de $50,0 \text{ mg L}^{-1}$ entre as estações de refinamento 1B e 1C, aumentando de concentrações gradativamente até chegar a 92,9 e 135,4 na amostragem de fundo da estação 1E. À estação 1F a concentração é mantida na superfície, mas decresce ao fundo. Durante os estágios de vazante e baixa-mar as concentrações à estação 2A são abaixo de $32,0 \text{ mg L}^{-1}$, praticamente sobrando de valor na estação seguinte (2B) em ambos os estágios. Às estações 2C e 2D há a diminuição durante a preamar, enquanto que as concentrações de SST no estágio de vazante aumentam em torno de 25%. As concentrações em preamar de SST entre as estações de 2C a 2F são quase idênticas, em torno de $60,0 \text{ mg L}^{-1}$. Às estações 2E e 2F as concentrações no estágio de preamar tornam a aumentar, estando ambos em volta de $40,0 \text{ mg L}^{-1}$ na superfície e $20,0 \text{ mg L}^{-1}$ junto ao fundo.

Figura 40. Concentração de sólidos suspensos totais para superfície e fundo das estações de refinamento durante a sizígia do período chuvoso.



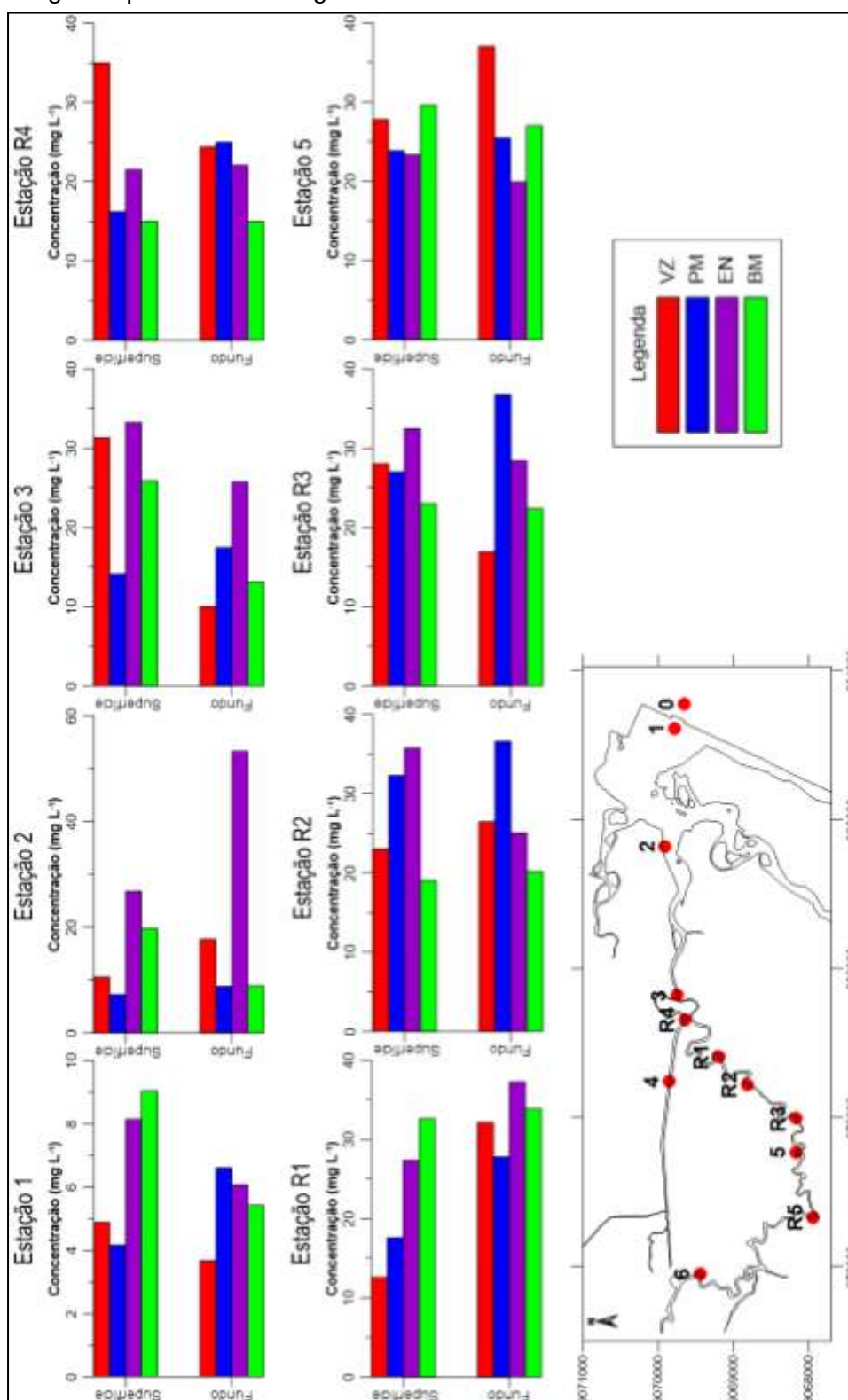
Fonte: O autor.

Figura 41. Concentração de sólidos suspensos totais para superfície e fundo das estações de refinamento durante a sizígia do período chuvoso.



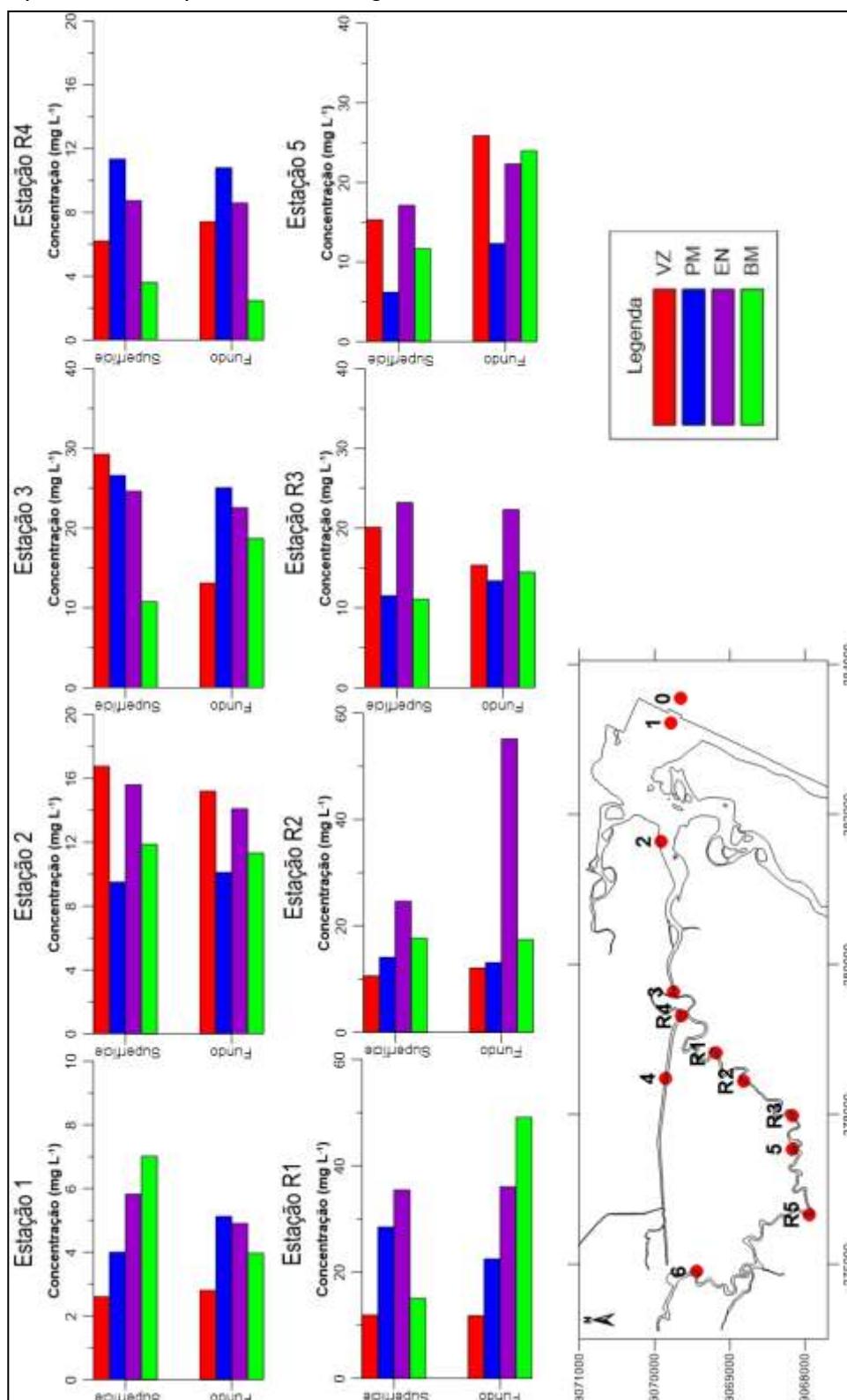
Fonte: O autor.

Figura 42. Concentração de sólidos suspensos totais SST (mg.L^{-1}) para as camadas superficiais e de fundo às estações amostrais S1, S2, S3 e S5 e de refinamento R1-RR3, durante a sizígia do período de estiagem.



Fonte: O autor.

Figura 43. Concentração de sólidos suspensos totais SST (mg.L^{-1}) para as camadas superficiais e de fundo às estações amostrais S1, S2, S3 e S5 e de refinamento R1-RR3, durante a quadratura do período de estiagem.



Fonte: O autor.

Durante o período chuvoso (Figuras 40 e 41) há grande diferença entre a localização da zona de turbidez máxima (ZTM) de cada estágio da maré. Durante a baixa-mar a zona de turbidez máxima é encontrada na estação de refinamento R1E, no qual a concentração de sólidos em suspensão chegam a valores de $241,2 \text{ mg L}^{-1}$ no fundo e $66,3 \text{ mg L}^{-1}$ na superfície. Na enchente, a concentração máxima também encontra-se na estação R1E e tendo valores semelhantes nas estações R1D e R1F, possuindo valores de $100,5 \text{ mg L}^{-1}$, $97,9 \text{ mg L}^{-1}$ e $92,9 \text{ mg L}^{-1}$ na superfície, respectivamente. No fundo, os maiores valores foram encontrados nas estações R1F ($92,9 \text{ mg L}^{-1}$) e SR1E ($67,8 \text{ mg L}^{-1}$). Durante a preamar o máximo valor sólidos em suspensão no fundo foi obtido na estação R2B ($46,4 \text{ mg L}^{-1}$), sendo seguido de baixos valores até chegar à estação S3, onde a concentração voltou a aumentar; enquanto que na superfície a concentração obteve valores semelhantes entre os pontos R2F, R2E e S3. Os pontos do refinamento e da estação S3 possuem profundidades semelhantes, contudo a estação S3 localiza-se em uma área mais estreita e com dois aportes sedimentares, o que contribuiu para o aumento do sedimento superficial. Por último, durante a vazante, a zona de máxima concentração foi obtida na estação R2D, com $63,4 \text{ mg L}^{-1}$ e $63,7 \text{ mg L}^{-1}$ na superfície e fundo, respectivamente.

Durante a maré de quadratura do período chuvoso o estuário sofre muito mais influência fluvial, visto que a maré possui menor amplitude e não consegue adentrar muito o rio. As concentrações de SST praticamente duplicaram e aumentaram na medida em que adentrava o estuário, confirmando que a grande quantidade de sólidos na coluna d'água está sendo fortemente regulada pela descarga do rio e mascarando a zona de turbidez máxima. Desta forma, a ZTM da maré em regime de quadratura foi estimada pela localização de salinidades em torno de 4.

No período de estiagem (Figuras 42 e 43), as concentrações de refinamento dos SST durante o regime de maré de sizígia foram maiores do que as encontradas durante a quadratura. À estação R4, localizada logo ao início do canal artificial as concentrações variaram entre $15,0$ e $35,0 \text{ mg L}^{-1}$, enquanto que na quadratura as concentrações variaram apenas entre $2,0$ e $11,0 \text{ mg L}^{-1}$, sendo os menores valores de concentrações encontradas durante a baixa-mar em ambos os casos. À estação

R1 houve aumento para o dobro da concentração para os estágios de baixa-mar e preamar, enquanto que para os demais houve diminuição. As estações R2 e R3 durante a sizígia variaram entre 17,0 e 37,0 mg L⁻¹, sendo as maiores concentrações observadas durante os estágios de preamar e enchente, enquanto que durante a quadratura, com exceção do estágio de enchente, as concentrações variaram entre 10,6 e 20,0 mg L⁻¹, sendo as concentrações durante o estágio de enchente superiores a 20,0 mg L⁻¹, atingindo a marca de 55,1 mg L⁻¹ junto ao fundo da estação R2.

No período de estiagem a concentração de SST foi inferior ao observado anteriormente (período chuvoso) e a distância de migração da ZTM entre os estágios de maré variaram entre os ciclos lunares. Durante a sizígia a ZTM variou de entre as estações S2 e S3 à estação R1-R2. Na quadratura a ZTM foi observada em quase sua totalidade na estação S3, sendo encontrada na estação R1 apenas durante a baixa-mar.

Na sizígia do período de estiagem, o estágio de preamar foi quando a ZTM mais adentrou o rio, estando localizada na estação R2 com 32,3 mg L⁻¹ e 36,6 mg L⁻¹ de concentração para a superfície e fundo, respectivamente. Na baixa-mar e vazante, a zona de turbidez máxima foi localizada R1 e R4-R1, respectivamente. Na superfície, a maior concentração de SST na vazante foi localizado na estação R4 (34,8 mg L⁻¹), contudo a concentração de fundo neste ponto é de apenas 24,4 mg L⁻¹, aumentando para 31,1 mg L⁻¹ na concentração de fundo da estação R1. No estágio de enchente, a maior concentração de SST é encontrado no valor de fundo da estação S2, chegando a 53,3 mg L⁻¹; entretanto o maior valor superficial foi na estação S3, aumentando de 26,8 mg L⁻¹ para 35,2 mg L⁻¹.

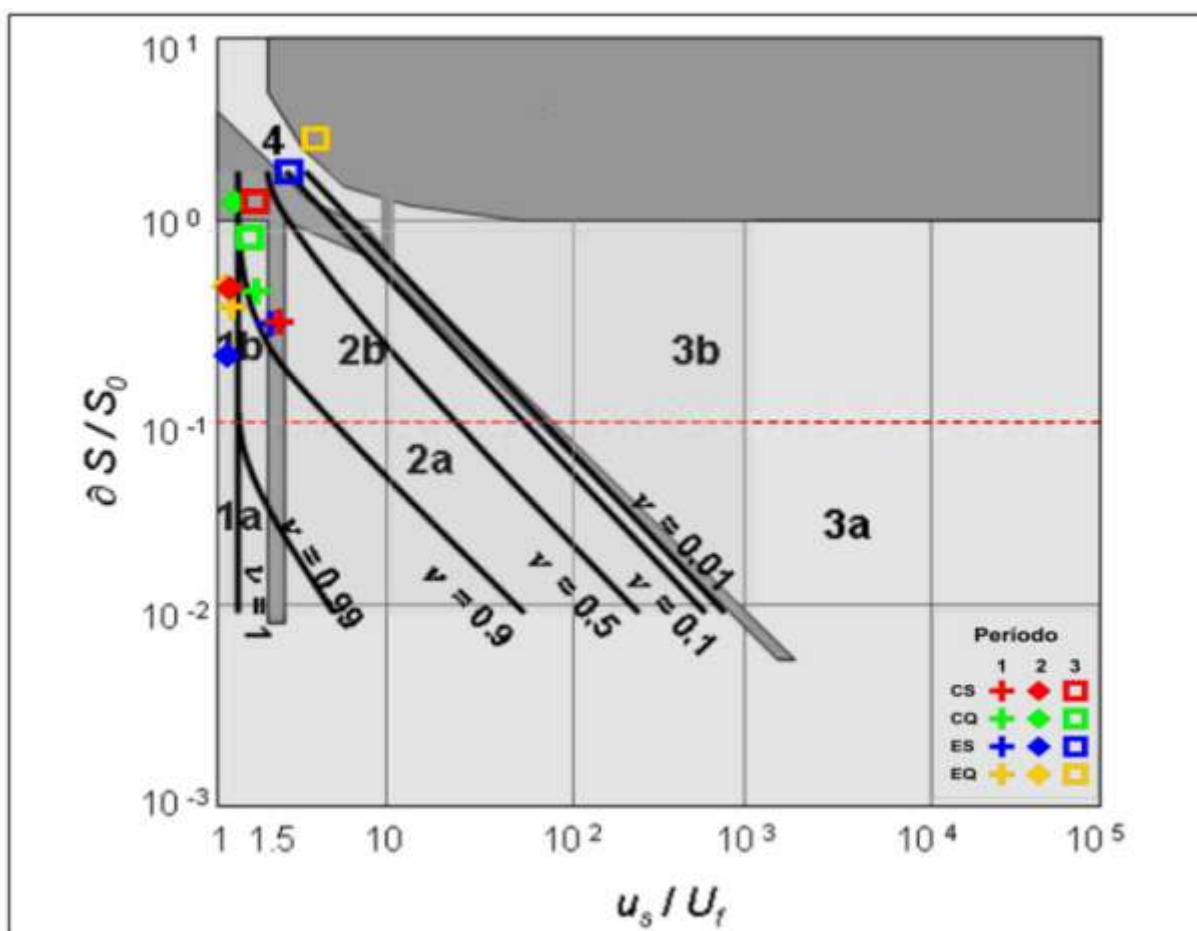
Durante a quadratura do período de estiagem a zona de turbidez máxima da enchente, preamar e vazante foram observados na estação S3, com valores de concentração de SST de superfície e fundo 24,3 mg L⁻¹, 22,6 mg L⁻¹, 26,6 mg L⁻¹, 25,0 mg L⁻¹, 29,2 mg L⁻¹ e 13,1 mg L⁻¹, respectivamente. Na baixa-mar a ZTM foi observada na estação R1, com concentrações de SST de 15,0 mg L⁻¹ e 49,1 mg L⁻¹ para superfície e fundo, respectivamente.

7.7 Classificação estuarina

O estuário do rio Ipojuca, foi classificado aplicando-se o sistema proposto por Hansen e Rattray (1966). Este consiste de um diagrama conectando dois parâmetros adimensionais que representam o grau de circulação e de estratificação nos estuários, integrados ao longo do ciclo das marés.

Os valores dos parâmetros de circulação e estratificação às estações S1, S2 e S3, foram computados em função dos períodos sazonais (chuvoso e estiagem) e dos regimes de maré (sizígia ou quadratura) e plotados no referido diagrama (Figura 44).

Figura 44. Diagrama de Hansen & Rattray para o estuário do rio Ipojuca às estações S1 a S3, durante ciclos de sizígia e quadratura nos períodos chuvoso e de estiagem.



Fonte: O autor.

De forma geral, o estuário do rio Ipojuca foi classificado como do tipo 1b para a região do baixo estuário (estações S1 e S2) tanto no período chuvoso quanto no de estiagem. A posição no diagrama reflete um baixo estuário (S1-S2) lateralmente homogêneo, no qual o transporte salino é dominado por processos difusivos ($v > 0,9$) e que apresenta estratificação moderada recebendo entradas razoáveis de água doce, sobretudo no período chuvoso, tendendo a sistemas parcialmente estratificados com baixas entradas de água doce durante o período de estiagem.

Já o trecho do médio estuário (S3) sob maior influência da descarga fluvial, foi classificado como tipo 1b durante o período chuvoso e como do tipo 4 durante o período de estiagem. Ambientes de classificação tipo 4, ou cunha salina, tem como característica a presença de forte estratificação e transporte gerado por processos advectivos fluviais e gravitacionais ($v < 0,1$).

8 DISCUSSÃO

O presente estudo foi conduzido em 2017, um ano de marcada sazonalidade, com as coletas representativas dos períodos chuvoso e de estiagem, em meses bem característicos de cada período. A precipitação acumulada de 2017 embora encontra-se na média pernambucana, totalizando 1800,2 mm, apresentou distribuição anual distinta relativa as médias históricas para a área. Observando os dados da série meteorológica do porto de Suape, tem-se que enquanto a precipitação histórica nos meses de maio a julho representasse menos do que 50% do total anual, durante o ano de estudo (2017) a precipitação ocorrida nesses meses correspondeu a 74% do total anual observado, ou seja um período chuvoso acima da média. Em maio, o volume de precipitação em 24h na cidade de Ipojuca, chegou a 195 mm o equivalente ao esperado para 21 dias, de acordo com a APAC. Já para o período de estiagem, o volume de precipitação nos meses de novembro e dezembro ocorridos em 2017 (53,2mm), ficou abaixo da média histórica de 71,4mm.

Na região tropical, as flutuações na temperatura do ar são normalmente pequenas. Isto se reflete na baixa variação de temperatura das águas superficiais. Assim, as flutuações em temperatura na camada de superfície da coluna d'água ao longo do ciclo da maré, refletem em parte a variação na intensidade de insolação ao longo do dia e do comportamento dos ventos. Segundo Manso et al. (2006), os ventos alísios e as brisas marinhas exercem influência nos ambientes costeiros, diminuindo ou aumentando os efeitos da insolação sobre os perfis térmicos. Informa ainda que a direção e velocidade dos ventos no litoral pernambucano é, em 90% dos casos, observado no setor E-SE com médias de velocidade entre 3 e 5 m s⁻¹, corroborando com a encontrada na estação meteorológica de Suape (média 135,4°; 3,05 m s⁻¹).

A oscilação as marés foi heterogênea ao longo das estações amostrais. À medida que adentra o estuário, a curva da oscilação da maré é amortecida devido às forças contrárias ao movimento, fazendo com que a amplitude diminua e perca força cada vez mais. Devido à perda da força da maré, o avanço desta é retardado, causando maiores diferenças de fase em relação ao registro de maré dos sensores à jusante da desembocadura (S0), principalmente durante o regime de maré de

sizígia. Entre os regimes de marés (sizígia e quadratura) houve diferenças entre o comportamento da maré. Durante a sizígia o estágio de vazante é muito superior ao da enchente, enquanto que durante a quadratura essa assimetria é mais sutil (1h nas preamares e 2h nas baixa-mares).

A temperatura é influenciada principalmente pela incidência solar, sendo também influenciada pela velocidade das correntes e ciclo das marés, ocorrendo menores ou maiores valores de temperatura dependendo da insolação local durante as medições, encontrando seu pico próximo ao meio dia. Devido à grande cobertura de nuvens, durante o período chuvoso os perfis de temperatura não variam muito ao longo do dia, estando quase que sobrepostos. Há a formação de uma pequena termoclina durante a quadratura, pois há menor influência da maré, estando limitada à porção inferior da coluna d'água, as menores temperaturas fluviais estarão presentes na coluna superficial.

Em geral, os valores de temperatura foram homogêneos na coluna d'água, havendo leve distanciamento entre os perfis de alguns estágios do ciclo de maré durante a época de estiagem, em que devido à grande incidência solar ($28,1^{\circ}\text{C}$) e baixa velocidade dos ventos ($2,7 \text{ m s}^{-1}$), enquanto que no período chuvoso a temperatura média do ar foi de $24,4^{\circ}\text{C}$ e de $26,28^{\circ}\text{C}$, respectivamente para os meses de junho e julho.

A estrutura salina em um estuário responde a diversos fatores, dentre os quais, a descarga fluvial, as correntes de maré, o gradiente de densidade resultante, os ventos e a batimetria do sistema. Sendo também condicionada pela intensidade das correntes nos distintos estágios de maré e pelas marés residuais. Os fatores mais importantes são os aportes de água doce e da penetração da água marinha pelas marés (SAVENIJE, 2012; SHAHA, 2011), sendo as forças que governam a hidrodinâmica e os processos advectivos, dispersivos e de difusão turbulenta que misturam a água doce com a água do mar nos estuários condicionando o transporte e a distribuição das concentrações de propriedades nesses sistemas bem como o tempo de residência das águas estuarinas e suas trocas com as áreas costeiras (PARKER, 1991; BONETTI FILHO & MIRANDA, 1997; MIRANDA et al., 2002). Durante o período chuvoso e nos estágios de vazante e baixa-mar, o estuário

tenderia a apresentar salinidades mais reduzidas, em função da maior influência fluvial e menor influência das águas marinhas adentrando o mesmo. Por outro lado as maiores salinidades seriam esperadas durante períodos de estiagem e nos estágios de preamar e enchente.

A descarga de água que chega a um estuário é originada da bacia de drenagem a qual o rio pertence, e sua taxa depende das condições climáticas, da morfologia da bacia e das características do solo, da cobertura vegetal, da evapotranspiração na região de captação, e da ocupação antropogênica (MIRANDA et al., 2002). Depende também de interferências nesta drenagem pela captação de água através de barragens, canais ou a fio d'água.

Os ventos, por sua vez, podem causar circulação vertical dependendo do formato e profundidade do estuário, estuários rasos e com grande área de atrito, como lagoas costeiras, podem ser fortemente influenciadas pelos ventos, podendo causar correntes que influenciam na mistura e processos de dispersão. Em estuários aluviais, esse tipo de forçante não influencia muito, sendo mais influenciado pela descarga dos rios e força da maré.

Durante o período chuvoso, a presença de águas salinas ficou restrita ao baixo estuário, entre as estações S1 e S2, alcançando a estação S3 apenas em alguns estágios do ciclo das marés. Já no período de estiagem, a salinidade foi em geral mais elevada, com presença de águas salinas no baixo e médio estuário.

No estuário do rio Ipojuca, relativo aos estágios de maré para as previsões da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) para o Porto de Suape, durante o período chuvoso as maiores excursões das águas salinas foram registradas nos estágios de preamar e vazante da quadratura (salinidades de 31,8 e 28,4 na camada de fundo à estação S3, respectivamente) e durante os estágios de vazante e baixa-mar na sizígia (salinidades de 30,5 e 19,9 na camada de fundo à estação S3, respectivamente), indicando uma permanência mais longa das águas salinas no interior do sistema, havendo a diminuição de salinidade apenas durante a enchente.

As diferenças de fase observadas parecem estar relacionadas à condição de

barra estrangulada, que dificulta as trocas com a área costeira e entrada das águas marinhas e a drenagem de águas mais próximas ao fundo e a alta descarga fluvial no período chuvoso. Apenas no período de estiagem a influencia das águas marinhas alcançou a estação S3, durante o estágio de vazante, tendo alcançado apenas 700m para montante da estação S1 durante a quadratura do período chuvoso.

No período de estiagem essa diferença é menos pronunciada no trecho entre as estações S1 e S2, estando mais evidente à estação S3. A influencia das águas salinas ultrapassa a estação S3 em todos os estágios da maré tanto em regime de quadratura quanto de sizígia. Contudo, durante a quadratura, quando a intrusão salina é menor, as salinidades apresentaram-se mais reduzidas.

Durante o período de estiagem a penetração das águas marinhas alcançou sempre a região da estação S3, independentemente do estágio do ciclo das marés, ao passo que durante o período chuvoso a extensão dessa excursão esteve fortemente condicionada ao ciclo das marés, alcançando maiores extensões durante os estágios de baixa-mar e enchente na quadratura e durante os estágios de vazante e baixa-mar na sizígia.

Observando as figuras de distribuição salina de fundo, observam-se bolsões água menos salinas, algumas vezes chegando próximo à salinidade 1, sendo seguidas de altos valores. Esses casos podem ser observados nas figuras 20 e 23, em que durante a sizígia do período chuvoso pode-se observar bolsões próximos à estação S2 e durante a quadratura do período de estiagem observa-se sua presença na região intermediária do estuário. Esses bolsões são ocasionados pela diferença de fase observada entre as estações de coleta. Foi utilizado um tempo padrão de maré para cada estágio obtido junto à DHN, contudo a maré real não se desenvolveu desta mesma forma em toda extensão do estuário.

Enquanto, por exemplo, durante a baixa-mar de sizígia do período chuvoso (Figura 20) no baixo estuário a salinidade era correspondente a esse mesmo estágio, em seu trecho superior a salinidade presente nos dados corresponde ainda ao resíduo deixado durante o estágio de vazante pretérito. Esse tipo de resultados é

muito comum em estuários com uma grande diferença de fase no ciclo de maré, como o observado por Van Rijin (2010) no estuário de Scheldt.

A distribuição da salinidade e turbidez e suas flutuações influenciam a distribuição da biota nos estuários, sendo indispensável em qualquer pesquisa de gestão estuarina o entendimento de seu comportamento e distribuição para subsidiar as tomadas de decisões (BARLETTA et al. 2003; BARLETTA & BLABER, 2007; PAIVA et al., 2008; JUNIOR et al., 2017). Por ser um ambiente com mínimo contato com o oceano, sua região inferior sofre constante deposição sedimentar, contribuindo para a pouca profundidade do sistema. A variação de salinidade é mais intensa longitudinalmente em estuários rasos, como é o caso do estuário do rio Ipojuca.

O limite de penetração da maré salina em um sistema estuarino varia ao longo do ciclo de maré e em função de seu regime das mesmas. Em regime de maré de sizígia, a variabilidade na distancia de excursão da maré salina é geralmente mais acentuada devido a sua maior amplitude de oscilação de nível, resultando tanto em uma excursão máxima rio a cima quanto em uma excussão mínima mais próxima à desembocadura do estuário. Já em regime de quadratura, quando a diferença de nível entre preamar e baixa-mar é menor, os limites de excussão da maré salina ao longo do estuário mostram-se menos variável (Figura 45).

A distribuição de sal no estuário variou de acordo com a sazonalidade e estágio de maré. Outros trabalhos nas proximidades como o de Cordeiro (2017), em que estudou o complexo estuarino-portuário de Suape, foram obtidos resultados semelhantes aos dados da estação do baixo estuário (S1). Os valores de salinidade exibiram variações sazonais e de maré significativa, variando entre 19,75 a 37,20 de salinidade para os anos de 2015 e 2016, sendo os maiores valores observados durante a preamar do período de estiagem, visto que o complexo tem contato direto com o mar. Neste mesmo estudo, a concentração de sólidos em suspensão totais variou significativamente apenas em relação ao ciclo de maré.

Observando também dados de salinidade obtidos pela CPRH (Agência Estadual de Meio Ambiente) para os anos de 2011 a 2017 para a estação IP97,

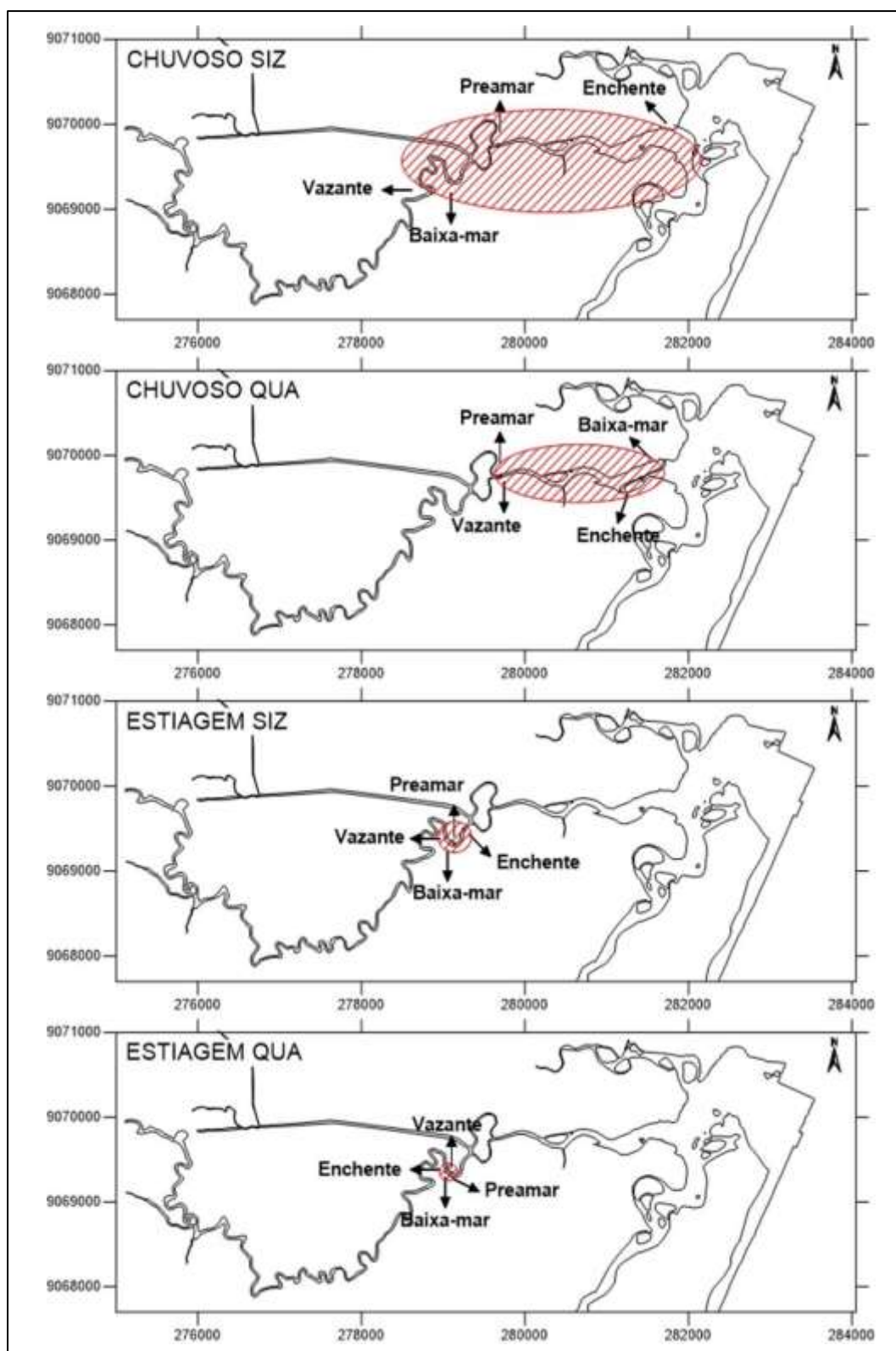
localizada na laguna do baixo estuário, foram obtidos valores de salinidade que variaram entre 19 e 37 (média = 31), corroborando os valores observados durante as coletas deste projeto.

De forma semelhante à maré salina, o limite da maré dinâmica variou ao longo do ciclo de maré, contudo não houve muita modificação em relação ao seu regime (sizígia e quadratura). Em ambos os regimes do período chuvoso, a excursão do limite dinâmico variou de 2,7 Km até 9,4 Km de distância da desembocadura, com a única diferença que o limite é encontrado no médio estuário apenas durante os estágios de enchente e enchente/baixa-mar da sizígia e quadratura, respectivamente. Durante o período de estiagem a variação da maré dinâmica foi igual em ambos os regimes, estando a área de excursão inserida entre 5,5 e 9 Km de distância da desembocadura do rio. (Figura 46).

Como durante o período chuvoso houve grandes volumes de água fluvial devido às chuvas, muitos sedimentos foram carregados para dentro do estuário juntamente com essa água. No regime de quadratura, em que a influência marinha é mais fraca, não foi possível localizar a zona de turbidez máxima, pois esta foi mascarada pelo grande volume de material em suspensão do rio. Neste caso, a ZTM durante a quadratura do período chuvoso foi estimada pela localização do valor de salinidade 4 no sistema. Já na sizígia, essas zonas foram bem identificadas. A ZTM durante a baixa-mar e enchente foi localizada no baixo estuário, próximo à estação S2, equivalendo aos pontos R1E e R1F do refinamento, fazendo sentido pela menor influência da maré durante a enchente e por ser a confluência de dois rios. Durante a vazante e preamar, a ZTM localizou-se na região do estuário médio, sendo a localização mais interna presente durante a vazante (estação R2D).

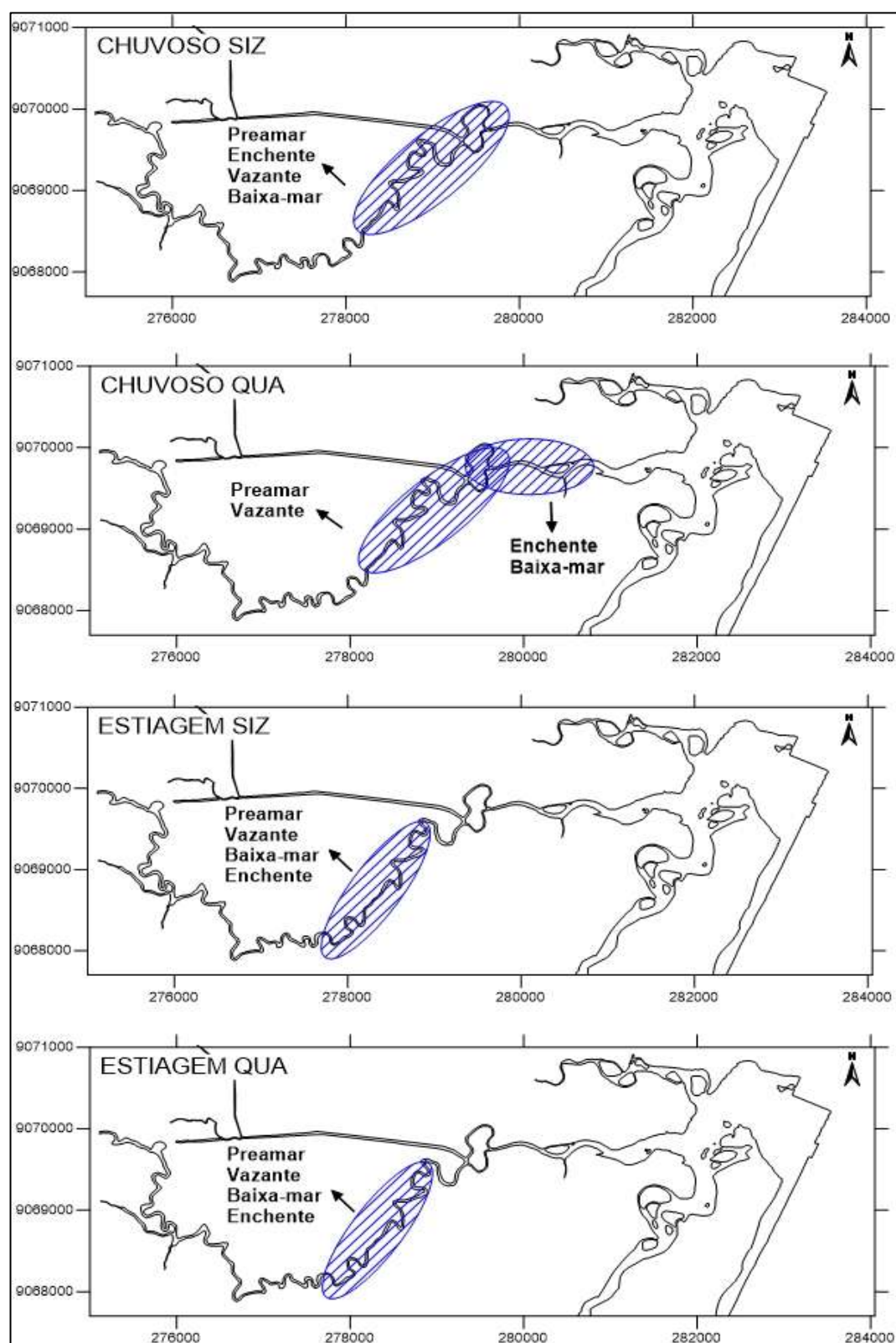
O período de estiagem por sua vez obteve a localização das ZTM de forma distinta entre os diferentes regimes. Durante a sizígia, a ZTM do estágio de enchente abrangeu quase toda a região do estuário médio, enquanto que durante os demais estágios foi localizada no alto estuário, sendo a ZTM mais interna durante a preamar. Durante a quadratura não houve grandes mudanças entre as localizações da ZTM, estando quase todas localizadas na estação S3. A ZTM foi mais interna durante o estágio de baixa-mar, à 6,5 Km da desembocadura (Figura 47).

Figura 45. Limites da maré salina ao longo do estuário do rio Ipojuca. Cada estágio da maré apresentou um limite distinto, sendo a área hachurada correspondente à área de variação do limite salino.



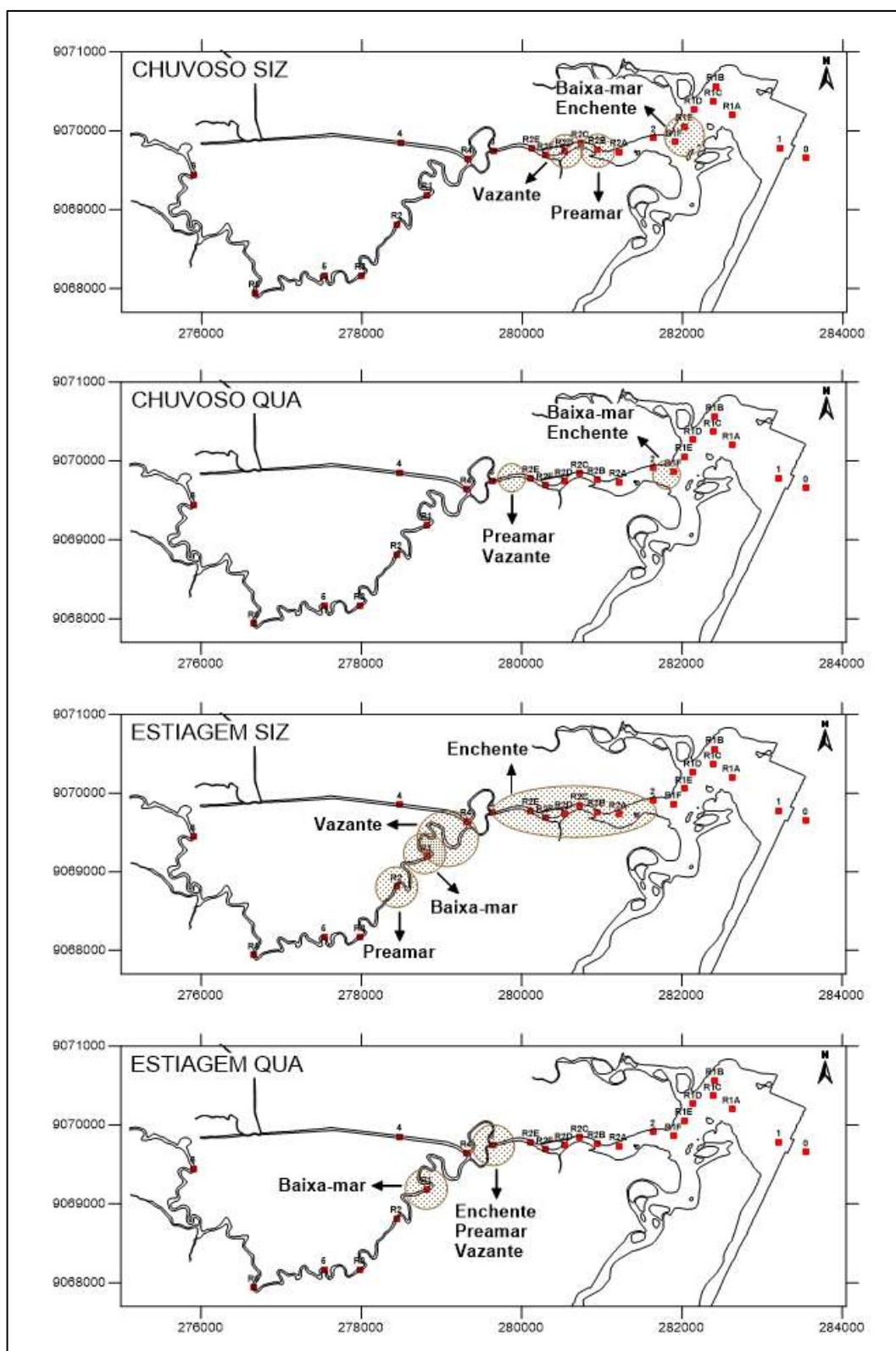
Fonte: O autor.

Figura 46. Limites da maré dinâmica ao longo do estuário do rio Ipojuca para os períodos chuvoso e de estiagem, em regime de sizígia e quadratura. Região hachurada corresponde à área de variação do limite salino.



Fonte: O autor.

Figura 47. Localização da zona de turbidez máxima no estuário do rio Ipojuca (áreas hachuradas) para os períodos chuvoso e de estiagem, em regime de sizígia e quadratura e para os estágios de enchente, preamar, vazante e baixa-mar.



Os dados de correntômetro mostraram-se semelhantes ao observado nos sensores de pressão, estando a propagação limite das marés entre os trechos das estações S3 e S5. Os sensores de pressão constataram que durante o período chuvoso o sinal das marés é praticamente nulo, enquanto que no período de estiagem é possível encontrar leve oscilação, constatando ser o limite final para a influência da maré. Em geral, a amplitude das marés é amortizada mais severamente nas sizígias, chegando a amortecer metade do sinal original.

Segundo o critério e classificação estuarina de Hansen & Rattray, um estuário é classificado como tipo 1 quando apresenta dominância de transporte salino a partir de processos de difusão e homogeneidade lateral, podendo se apresentar pouco (tipo 1a) ou moderadamente/fortemente estratificado (Tipo 1b).

O estuário do Ipojuca foi classificado como tipo 1b para a região do baixo estuário (estações S1 e S2) durante todos os períodos amostrados. Apresentando maior e menor grau de estratificação durante a quadratura de verão e a sizígia chuvosa, respectivamente.

Análises anteriores para o rio Ipojuca realizadas por Lins (2002) classificaram o baixo estuário do rio Ipojuca como do tipo 1a, e como tipo 1b apenas durante a quadratura do período chuvoso. Essa diferença em comportamento evidencia a forte dependência do sistema ao regime de chuvas, com o sistema apresentando estratificação mais moderada, como ocorrido em 2000, ou migrando para o tipo 1b sob regime de elevada precipitação e descarga fluvial, como ocorrido em 2017.

A mudança na classificação pode refletir também a mudança morfológica do sistema, uma vez que a geomorfologia do ambiente estuarino tem implicações para sua dinâmica. Atualmente o estuário possui um canal profundo central quase retilíneo e bancos arenosos, enquanto que à época dos levantamentos de Lins (2002) o canal principal apresentava-se mais raso e sinuoso com caminhamento próximo à margem esquerda, contornando um extenso banco central que foi posteriormente dragado, formando o canal central e mais profundo atual.

Observando os parâmetros empregados na classificação do estuário do rio Ipojuca, tem-se que o parâmetro de estratificação às estações S1 e S2 no período chuvoso apresentou mesma magnitude tanto em regime de quadratura quanto de sizígia, estando os maiores valores para a enchente e baixa-mar na estação S1 e vazante e preamar na estação S2. Diferentemente, a estação S3 apresentou diferença de 1 estágio de maré entre as comparações das duas marés, sendo os maiores e menores valores da sizígia nos estágios de vazante e enchente enquanto que na quadratura esses valores são encontrados nos estágios de preamar e baixa-mar, respectivamente. O período de estiagem apresentou um padrão bem definido durante ambas as marés (sizígia e quadratura). Em geral, a estação S1 apresentou características do tipo 1b e altos valores de v . A estação S2 foi a mais dispersa das 3 estações abordadas, contudo todos os valores foram observados como Tipo 1, estando pouco estratificado apenas nos estágios de preamar e vazante da sizígia e preamar da quadratura. A estação S3 foi a com maior grau de estratificação, estando todos os valores próximos ou no quadrante do tipo 4 (cunha salina).

9 CONCLUSÕES

Por se tratar de um estuário tropical, a temperatura foi praticamente homogênea ao longo da coluna de água, contudo houve diferença entre os limites de marés.

O estuário mostrou-se defasado em fase e amortecido em amplitude em relação ao registro de maré dos sensores à jusante da desembocadura (S0), sendo esse amortecimento mais intenso durante a sizígia. Houve diferença entre o retardo das marés em relação ao regime de sizígia ou quadratura, onde durante o primeiro há o encurtamento do estágio de enchente e aumento da vazante, enquanto que durante a quadratura há apenas um retardo de 1h nas preamares e 2h nas baixamares.

A excursão da maré salina ao longo do rio Ipojuca variou entre 2,0 e 5,7 km para montante de sua desembocadura, sendo fortemente influenciada pelo regime das chuvas na região bem como pela condição estrangulada de sua desembocadura. Igualmente, o regime salino dentro do sistema, mostrou forte sazonalidade com baixas salinidades em eventos de intensa precipitação a salinidades elevadas, próximas àquela as águas costeiras, sob condições de estiagem prolongada. O regime salino em sistemas estuarinos condicionam a flora e fauna local e assim a delimitação da influência máxima marinha nos mesmos e o conhecimento de sua variabilidade e distribuição, constituem valioso subsídio para ações voltadas a proteção e recuperação desses sistemas.

Foram observados bolsões de água doce em meio à distribuição salina nos estágios de maré. A maior salinidade observada logo após os bolsões corresponde provavelmente à maré residual do estágio anterior, visto que o estuário apresentou grade diferença de fase em alguns regimes de maré (chuvoso-sizígia e estiagem-quadratura). Como neste estudo foi objetivado os limites máximos de marés, não foi necessário a correção desta variável. Contudo, para futuros estudos no estuário é sugerido que haja estudos dessa mudança de fase em nível mais aprofundado para uma melhor caracterização sazonal.

A excursão da maré dinâmica variou entre 2,7 e 9,4 Km para a montante de sua desembocadura, não havendo grandes mudanças de sua área entre os regimes de sizígia e quadratura, sendo relevante apenas a diferença entre o regime de chuvas. A área de excursão foi maior durante o período chuvoso. Durante o período de estiagem os limites da maré dinâmica e salina foram localizadas após a terceira estação para todos os estágios de maré.

A zona de turbidez máxima variou de variada entre os períodos e regimes de maré, em alguns casos estando inseridas dentro da zona de influência marinha e outras vezes após o limite salino, mas sempre inserida na influência dinâmica da maré. Durante o período chuvoso a ZTM foi localizada no médio e início do baixo estuário, enquanto que no período chuvoso a ZTM localiza-se no alto e médio estuário durante a sizígia e alto estuário e início do médio estuário durante a quadratura.

O estuário do rio Ipojuca foi classificado como do subtipo 1b segundo o sistema de classificação de Hansen e Rattray, indicando que suas águas apresentam estratificação moderada a forte e que o processo dominante de penetração salina é derivada dos movimentos advectivos da maré.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, G.O.; LINS, R.C.O. Clima do Nordeste. **Revista de Geografia**. DCG/UFPE – NAPA, Recife, v.17, n.1, p.3-32, 2001.
- BARBIER, E.B.; HACKER, S.D.; KENNEDY, C.J.; KOCH, E. W.; STIER, A.D.; SILLIMAN, B.R. The Value of Estuarine and Coastal Ecosystem Services. **Ecological Monographs**, v.81, n.2, p.169–193, 2011.
- BARLETTA, M.; BLABER, S.J.M. Comparision of fish assemblage and guilds in tropical habitats of the Embley (Indo-West Pacific) and Caeté (Western Atlantic) estuaries. **Bulletin of Marine Science**, v.80, p.647–680, 2007.
- BARLETTA, M.; BARLETTA-BERGAN, A.; SAINT-PAUL, U.; HUBOLD, G. (2003). Seasonal changes in density, biomass, and diversity of estuarine fishes in tidal mangrove creeks of the lower Caeté Estuary (northern Brazilian coast, east Amazon). **Marine Ecology Progress Series**, v.256, p.217-228. Disponível em: <<https://doi.org/10.3354/meps256217>> Acesso em: 15 jan 2018.
- BONETTI FILHO, J.; MIRANDA, L.B. Estimativa da descarga de água doce no sistema estuarino-lagunar de Cananéia-Iguape. **Revista Brasileira de Oceanografia**, v.45, n.1/2, p.89-94, 1997.
- BURCHARD, H.; HETLAND, R.D.; SCHULZ, E.; SCHUTTELAARS, H.M. Drivers of Residual Estuarine Circulation in Tidally Energetic Estuaries: Straight and Irrotational Channels with Parabolic Cross Section. **Journal of Physical Oceanography**, v.41, p.548–570, 2011, Disponível em: <<https://doi.org/10.1175/2010JPO4453.1>> Acesso em: 23 fev 2018.
- BULHÕES, E.; DRUMOND, M.K. Análises e Testes de Métodos de Interpolação para Dados Batimétricos e Granulométricos: Estudo de Caso em Armação dos Búzios, Rio de Janeiro, Brasil. **Cadernos de Estudos Geoambientais**, v.3, n.1, p.5-31, 2012.
- CAMERON, W.N.; PRITCHARD, D.W. Estuaries. In: Goldberg, E.; McCave, I.N.; O'BRIEN, J.J.; STEELE, J.H. eds. **The Sea**. New York, John Wiley & Sons, 1993. p.306-324.
- CHESTER, R. **Marine Geochemistry**. 2 ed., Blackwell Science, Oxford, 2000, 506p.
- CIRM - Comissão Interministerial Para os Recursos do Mar. In: III Plano Básico de desenvolvimento Científico e Tecnológico. I Plano Setorial para os Recursos do Mar (1982-1985), Brasília, 1981. 105p.
- CONDEPE/FIDEM, AGÊNCIA ESTADUAL DE PLANEJAMENTO E PESQUISAS DE PERNAMBUCO. Bacia hidrográfica do Rio Ipojuca. Recife, 2005. 64p. (Série Bacias Hidrográficas de Pernambuco n.1). Disponível em: <http://www.condepefidem.pe.gov.br/c/document_library/get_file?p_l_id=78673&folderId=141869&name=DLFE-12005.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2015

CORDEIRO, I.A. Condições ambientais da área do complexo estuarino - portuário de Suape (Pernambuco, Brasil): biomassa fitoplanctônica e parâmetros hidrológicos. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

DAVIES, J.L.A. Morphogenic Approach to World Shorelines. **Zeitschrift für Geomorphology**, v.8, p.27-42, 1964.

DAVIS, Jr., R.A.; FITZGERALD, D.M. **Beaches and Coasts**, Blackwell Science. Oxford, 2004. 419p.

DEVINE, M. Some features of the dynamic structure of a deep estuary. Estuarine Coastal and Shelf Science. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**. V.16, p.271-289, 1983. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0272-7714\(83\)90145-2](https://doi.org/10.1016/0272-7714(83)90145-2)> Acesso em: 20 maio 2018.

DYER, K.R. Sediment Transport Processes in Estuaries, In: PERILLO, G.M.E. (Ed). **Geomorphology and sedimentology of estuaries**. Developments in sedimentology (53): Elsevier, 1995. p.423-449.

FAIRBRIDGE, R.W. The estuary: its definition and geodynamic cycle, In: OLAUSSON, E.; CATO, I. (Eds.) **Chemistry and Biogeochemistry of Estuaries**. New York: John Wiley and Sons, 1980. p.1-35.

FRENCH, P.W. **Coastal and Estuarine Management**. London; New York: Routledge, 1997. 251p.

FRIEDRICH, C.T.; MADSEN, O.S. Nonlinear Diffusion of the Tidal Signal in Frictionally Dominated Embayments. **Journal of Geophysical Research**, v.97, p.5637-5650, 1992.

GARRISON, T. **Fundamentos de Oceanografia**. São Paulo: Cengage Learning, 2010. 426p.

GEYER, W.R.; MACCREADY, P. The estuarine circulation. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v.46, n.1, p.175-97, 2014.

GODIN G. Frictional effects in river tides. In: PARKER B. B. (Ed.). **Tidal hydrodynamics**. New York: John Wiley & Sons, 1991. 379-401p.

GODIN, G. The Propagation of Tides up Rivers with Special Considerations on the Upper Saint-Lawrence River. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v.48, p.307-324, 1999.

HANSEN, D.V.; RATTRAY, M. (1966). New dimensions in estuarine classification. **Limnology & Oceanography**. v.11, p.319-326, 1966.

HAYES, M.O. Barrier Island Morphology as a Function of Tidal and Wave Regime. In: Leatherman, S.P. (ed). **Barrier Islands from the Gulf of St. Lawrence to the Gulf of Mexico**, New York: Academic Press, 1979. p.1-29.

IBGE. Indicadores de desenvolvimento sustentável: Sistema IBGE de recuperação automática (SIDRA). 2015. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/ids/tabelas>>. Acesso em: 14 maio.2015.

IOC; SCOR; IAPSO. **The international thermodynamic equation of seawater – 2010: Calculation and use of thermodynamic properties**. Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides 56, UNESCO, 2010. 196 p.

IPPEN, A.T. **Estuary and Coastline Hydrodynamics**. New York: McGraw-Hill, 1966. 744p

JUNIOR, M.G.S.; CASTRO, A.C.L.; SAINT-PAUL, U. Comparative Analysis of Distribution of Intertidal Fish Assemblages in Different Estuarine Systems on Northern Coast of Brazil. **Journal of Sustainable Development**, v.10, n.2, p.26-30, 2017. ISSN 1913-9063 E-ISSN 1913-9071

KJERFVE, B. Estuarine geomorphology and physical oceanography. In: DAY Jr., J.W.; HALL, C.A.S; KEMP, M.W.; YÁÑEZ-ARANCIBIA, A. (Eds.). **Estuarine Ecology**. New York: Wiley-Interscience, John Wiley and Sons, 1989. p. 47-78.

KOENING, M.L.; ESKINAZI-LEÇA, E.; NEUMANN-LEITÃO, S.E., MACÊDO, S.J. Impactos da Construção do Porto de Suape Sobre a Comunidade fitoplanctônica no Estuário do Rio Ipojuca. **Acta Botânica Brasileira**. v.16, n.4, p.407-420, 2002.

LEE, J.; WEBB, B.M.; DZWONKOWSKI, B.; PARK, K.; VALLE-LEVINSON, A. Bathymetric influences on tidal currents at the entrance to a highly stratified, shallow estuary. **Continental Shelf Research**, v.58, p.1-11, 2013. ISSN 0278-4343, Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.csr.2013.03.002>> Acesso em: 18 jul. 2018.

LERCZAK, J.A.; GEYER, W.R. Modeling the Lateral Circulation in Straight, Stratified Estuaries. **Journal of Geophysical Research**, v.34, p.1410–1428, 2004. Disponível em: <[https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2004\)034<1410:MTLCIS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2004)034<1410:MTLCIS>2.0.CO;2)> Acesso em: 10 abr 2018.

LIBES, S.M. **An Introduction to Marine Biogeochemistry**, 2 ed. Elsevier, Academic Press, 2009. 909 p.

LINS, A.M. Hidrologia e hidrodinâmica do baixo estuário do rio Ipojuca, PE. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2002.

MANSO, V.A.V.; COUTINHO, P.N.; GUERRA, N.C.; SOARES JUNIOR, C.F.A. Pernambuco. In: MUEHE, D. (org.), Erosão e progradação do litoral brasileiro. Ministério do Meio Ambiente (MMA) e Programa de Geologia e Geofísica Marinha (PGGM), Brasília, DF, Brasil, 2006. p. 179-196. ISBN: 8577380289. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/sqa_sigercom/publicacao/78_publicacao121220_08084856.pdf> Acesso em: 26 jun 2016.

MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. **Princípios de Oceanografia Física de Estuários**. São Paulo: EDUSP, 2002. 424p.

MORAES, A.C.R. **Contribuições para a gestão da zona costeira do Brasil: elementos para uma Geografia do Litoral Brasileiro**. São Paulo, Annablume, 2007. 232p.

NEUMANN-LEITÃO, S. Impactos antrópicos na comunidade zooplanctônica estuarina. Porto de Suape – PE – Brasil. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Departamento de Hidráulica, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 1994. 273p.

PAIVA, A.C.G.; CHAVES, P.T.C.; ARAÚJO, M.E. Estrutura e Organização Trófica da Ictiofauna de Águas Rasas em Um Estuário Tropical. **Revista Brasileira de Zoologia**. v.25, n.4, p.647-661, 2008.

PARKER, B.B. The relative importance of the various nonlinear mechanisms in a wide range of tidal interactions (Review). In: Parker, B. B. (Ed.). **Tidal hydrodynamics**. New York: John Wiley & Sons, 1991. p.237-268.

PERILLO, G.M.E. **Geomorphology and sedimentology of estuaries**. Amsterdam, Elsevier, 1996. p.17-46.

PERNAMBUCO. Secretaria de Recursos Hídricos. Plano hidroambiental da bacia hidrográfica do rio Ipojuca: Tomo I - Diagnóstico hidroambiental - Volume02/03. Projetos Técnicos. Recife, 2010a.189p

PERNAMBUCO. Secretaria de Recursos Hídricos. Plano hidroambiental da bacia hidrográfica do rio Ipojuca: Tomo I - Diagnóstico hidroambiental - Volume01/03. Projetos Técnicos. Recife, 2010b. 339p.

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. What is an estuary: physical viewpoint, In: LAUFF, G.H. (Ed.), **Estuaries**, American Association for the Advancement of Science, Washington DC, 1967. p.3-5.

SALGUEIRO, J.H.P.B. Avaliação de rede pluviométrica e análise de variabilidade espacial da precipitação: estudo de caso na bacia do Rio Ipojuca em Pernambuco. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005. 139p.

SAVENIJE, H.H.G. **Salinity and Tides in Alluvial Estuaries**, 2 ed. Revisada, 2012. 163p.

SHAHA, D.C.; CHO, Y.-K.; KWAK, M.-T.; KUNDU, S.R.; JUNG, K.D. Spatial variation of the longitudinal dispersion coefficient in an estuary. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**. v.15, p.3679–3688, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.5194/hess-15-3679-2011>>. Acesso em 08 jan 2017.

SILVA, M.C. Estuários - Critérios para a classificação ambiental. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Lisboa, Potugal, v.5, n.1, p.25-35, 2000.

SPEER, P.E.; AUBREY, D.G. A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems: Observations. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v.21, p.207-224, 1985.

STEWART, R. H. **Introduction to Physical Oceanography**. College Station: Texas A&M University, 2007. 317p.

TALLEY, L.D.; PICKARD, G.L.; EMERY, W.J.; SWIFT, J.H. **Descriptive Physical Oceanography: An Introduction**, 6 ed., Boston: Elsevier, 2011. 560p.

TRUJILLO, A.P.; THURMAN, H. V. **Essentials of Oceanography**. New Jersey: Prentice Hall, 2010. 551p.

UNCLES, R.J. Estuarine physical processes research: Some recent studies and progress. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**. v.55, p.829–856, 2002.

UNEP – United Nations Environment Programme. **Marine and Coastal Ecosystems and Human Well-being: A Synthesis Report Based on the Findings of the Millennium Ecosystem Assessment**. Nairobi: Unep, 2006. 76p. Disponível em: <<https://www.millenniumassessment.org/en/Articlee27e.html?id=76>>. Acesso em: 12 jun 2017.

VALLE-LEVINSON, A. Definition and classification of estuaries, In: VALLE-LEVINSON, A. (Ed.) **Contemporary Issues in Estuarine Physics**, Cambridge: Cambridge University Press, 2010. p.1-11.

VAN RIJN, L.C. **Tidal phenomena in the Scheldt Estuary**. Report 1202016-000, Deltares, 2010. 99p.

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

WHITFIELD, A.K.; ELLIOTT, M. Ecosystem and Biotic Classifications of Estuaries and Coasts. In: WOLANSKI, E.; MCLUSKY, D.S. (Eds). **Treatise on Estuarine & Coastal Science**, Waltham: Academic Press, 2011. cap. 1.07. p.99-124.

WOODROFFE, C.D. **Coasts: form, process and evolution**. New York: Cambridge University Press, 2002. 623p.

WRIGHT, J.; COLLING, A.; PARK, D. **Waves, Tides and Shallow Water Processes**, 2 ed., Oxford: Butterworth-Heinemann, 1999. 227p.

WURL, O. **Practical Guidelines for the Analysis of Seawater**. CRC Press, 2009. 401p.