



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**APLICAÇÃO DA MODELAGEM HIDRODINÂMICA NA
CIRCULAÇÃO DO ESTUÁRIO DO RIO MARACANÃ (NE DO
PARÁ)**

Dissertação apresentada por:

LEANDRO PATRICK FERREIRA BARBOSA

**BELÉM
2008**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação(CIP)
Biblioteca Geól. Rdº Montenegro G. de Montalvão

- A238a Barbosa, Leandro Patrick Ferreira
Aplicação da modelagem hidrodinâmica na circulação do
estuário do rio Maracanã (NE do Pará) / Leandro Patrick
Ferreira Barbosa – 2008
148 f. : il.
Dissertação (Mestrado em Geologia) – Programa de Pós-
Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de
Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.
Orientador; Maâmar El-Robrini.
1. Circulação estuarina. 2. Modelagem hidrodinâmica. 3.
Estuário do rio Maracanã-Pa. I. Universidade Federal do Pará.
II. El-Robrini, Maâmar, Orient. III. Título.

CDD 20. ed.:551.47098115



Universidade Federal do Pará
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica

**APLICAÇÃO DA MODELAGEM HIDRODINÂMICA
(SISBAHIA) NA CIRCULAÇÃO DO ESTUÁRIO DO RIO
MARACANÃ (NE – PARÁ)**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR

LEANDRO PATRICK FERREIRA BARBOSA

Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em
Ciências na Área de GEOLOGIA.

Data de Aprovação: **16/10/2007**

Comitê de Dissertação:



MAÂMAR EL-ROBRINI (Orientador-UFPA)



JOÃO BAPTISTA DE CARVALHO (UNIVALI)



PAULO CÉSAR COLONNA ROSMAN (UFRRJ)

Belém

*Dedico esta dissertação aos meus pais
Orlando Barbosa e Eliete Ferreira Barbosa,
e aos meus irmãos Leonardo, Luciano, Luiz
Paulo e meu sobrinho Gabriel pelo
apoio e carinho que me oferecem.*

AGRADECIMENTOS

Um trabalho pioneiro sempre gera muitas críticas e enfrentam-se muitos obstáculos, porém com muito apoio, força de vontade e motivação é possível conseguir este objetivo. Por isso, gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a algumas instituições e pessoas que direta ou indiretamente tiveram contribuição na conclusão deste:

Primeiramente a Deus, que me permitiu chegar até este momento me dando tranquilidade e perseverança para vencer as dificuldades;

Aos meus Pais, Orlando e Eliete Barbosa, que sempre estiveram do meu lado em todos os momentos da minha vida me dando apoio para seguir em frente;

Aos meus irmãos Leonardo, Luciano e Luiz Paulo, por estarem comigo em todos os momentos de descontração que sempre tivemos e o meu sobrinho Gabriel, esse “anjo” que veio com o intuito de alegrar a minha vida.

À Universidade Federal do Pará, através do Instituto de Geociências, do Laboratório de Modelagem e do Grupo de Estudos Marinhos Costeiros (GEMC).

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo incentivo financeiro na forma de bolsa de estudo, auxiliando desta forma o desenvolvimento técnico/científico.

Ao meu orientador o Prof. Dr. Maamar El-Robrini (UFPA), pela oportunidade de trabalharmos juntos novamente, pela amizade, incentivo e discussões científicas relacionadas à realização do trabalho.

Ao Prof. Ph.D. Paulo César Rosman (COPPE/UFRJ), pela atenção dedicada e oportunidade de aprendizagem sobre o Programa SisBAHIA, na época em que estive no Rio de Janeiro.

Ao Prof. Dr. João Luiz Baptista (UNIVALI/SC), pelo empréstimo dos equipamentos (correntógrafo e marégrafos), sem os quais não seria possível a realização de uma etapa de campo, além disso pelo acolhimento em sua casa e a oportunidade de continuação do meu processo de aprendizagem à respeito do assunto tratado na dissertação, na época em que estive em Itajaí-SC. Também, ao Prof. Leandro Franklin (UNIVALI/SC), por todo auxílio relacionado à realização deste trabalho.

Ao Técnico Alberto Leandro (UFPA), pela ajuda na etapa de realização e processamento da batimetria; Além de, Gheisa Oliveira e Paula Pagliarini que também ajudaram no processamento das planilhas de batimetria; Também a Lúcia Imbiriba (Biblioteca setorial do IG), que ajudou muito durante o processo de formatação da dissertação.

À Adriana Bordalo, pela preocupação, incentivo e carinho dedicados a mim;

Ao meu amigo Marcelo Abreu, que foi parceiro nestas viagens pelo Brasil, nas etapas de campo e nas discussões relacionadas à modelagem;

Além deste, outros amigos fazem parte desta história, os amigos do laboratório de modelagem dos quais partilhei momentos inesquecíveis, especialmente eles: Marcelo Abreu, Ismail Bastos, Charles Carvalho, Paulo Pontes, Gheisa Oliveira, Juliana Guerreiro.

Por fim, agradeço a todos que participaram desta dissertação de mestrado de forma direta ou indireta.

*“Algo só é impossível
até que alguém duvide e
acabe provando o
contrário”.(Albert
Einstein)*

RESUMO

O litoral do NE do Pará apresenta uma configuração recortada e um grande número de sistemas estuarinos, bastante ativos com amplitudes de maré entre 5-7m. Nesta região, está inserido o estuário do rio Maracanã - estuário de planície costeira e do tipo bem misturado - com uma extensão de 101 Km a partir do igarapé do Tubo até a ilha do Cumaru. O perfil deste é tipicamente meandrante, de baixa declividade que permite escoamento superficial, e possibilita um padrão de drenagem com grande quantidade de cursos d'água em várias direções e uma ordem de vazão de 10^3 a 10^4 m³ s⁻¹. Este estuário sofre a influência do regime de macro-marés (>4m), de natureza semi-diurna, com influência de ventos (média de 6 m/s) e correntes de maré (média de 69,53 cm/s). O clima é do tipo Am (Tropical Úmido), que é caracterizado por ser quente e úmido (Clima Equatorial Amazônico), com temperatura entre 25°C e 28°C e pluviosidade de 2.500 mm/ano a 3.000 mm/ano, e dois períodos distintos, um seco (de junho a novembro) e outro chuvoso (dezembro a maio). O trabalho teve como objetivo a aplicação da modelagem hidrodinâmica na circulação do estuário do rio Maracanã (NE do Pará), utilizando como ferramenta a modelagem (Programa de Modelagem SisBAHIA – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental), com base na interpretação dos dados coletados em campo e trabalhos experimentais realizados em laboratório. Os procedimentos metodológicos consistiram em três etapas básicas: levantamento bibliográfico, trabalhos de campo e de laboratório. No campo, foram realizados: (1) um levantamento ecobatimétrico de semi-detelhe, empregando-se uma Ecossonda DGPS/PLOTTER/SONAR FURUNO GP-1850 F, onde foram feitos transectos ecobatimétricos transversais e longitudinais no estuário, durante a maré cheia; (2) medição de correntes de maré, para obtenção de medidas de intensidade e direção das correntes em um ponto (00° 45,187' S e 47° 26,712' W), durante um período de amostragem contínuo de 8 dias (preamar e baixamar) (04/02/07 à 11/02/07), abrangendo a sizígia. Para tal, foi utilizado um Correntógrafo Falmouth Scientific 2D-ACM; (3) o monitoramento vertical da maré foi baseado nos Marégrafos Orphirmedes

da marca OTT-Hidrometrie, que registraram o nível d'água simultaneamente, próximo à foz e na parte interna do estuário, durante um período de 8 dias contínuos a cada 20 minutos. No laboratório: (1) o processamento dos dados ecobatimétricos em ambiente Excel para correção em relação ao nível de maré. Ainda, o Surfer foi utilizado para digitalização dos dados de entrada para o modelo hidrodinâmico do Programa Sisbahia; (2) as séries temporais de Corrente e nível de maré foram submetidas a rotinas de processamento de dados elaboradas em ambiente Excel (3) Para vazão foi realizada uma estimativa baseada em método simples e racional. Os dados processados foram submetidos em seguida a análises: (1) Na implementação do modelo, foram reunidos todos os dados coletados na área de estudo e esses dados foram fornecidos ao modelo dentro de um domínio pré-definido; (2) Para calibração do modelo foram realizados ajustes na tentativa de fusão dos dados coletados em campo e o modelo; (3) a validação do modelo, que foi a precisão dos resultados computacionais do modelo em relação aos seus propósitos, e do sistema natural que o mesmo representa, a fim de reproduzir os fenômenos reais. Em seguida, colocou-se o modelo pra “rodar”, isto é, o modelo passa a gerar cenários de maré vazante, enchente, quadratura e sizígia. Com isso, puderam-se descrever os padrões da circulação estuarina do rio Maracanã e compreender os aspectos de sua complexa hidrodinâmica. Desta maneira, obtiveram-se, mapas caracterizando padrões de correntes médias na vertical, ao longo de um ciclo de maré de sizígia e de quadratura (,meia maré vazante, meia maré enchente, estofa de preamar e estofa de baixamar). Observou-se que durante as marés de sizígia, as velocidades são maiores se comparadas com as marés de quadratura. A geometria do estuário é responsável pela restrição da penetração das águas costeiras e contribui para elevação da maré no interior do mesmo. Os resultados gerados pelo modelo não foram iguais aos medidos em campo, em virtude da complexidade da área e da quantidade de dados adquiridos.

PALAVRAS- CHAVE: Circulação estuarina. Modelagem hidrodinâmica. Estuário do rio Maracanã.

ABSTRACT

The coastline of NE Pará presents a configuration cut and a large number of estuarine systems, very active with amplitudes of tide between 5-7m. In this region, is inserted the estuary of the river Maracanã - estuary of coastal plain and the type and mixed - with a length of 101 Km from igarapé the tube to the island of Cumaru. The profile of this is typically meandrante, low slope that allows runoff, and allows a pattern of drainage with large amount of water in several directions and an order of flow of 10^3 to $10^4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. This estuary likely a result of the system of macro-tides ($> 4\text{m}$), the semi-diurnal nature, with winds of influence (average of 6 m / s) and the tidal currents (mean of 69.53 cm / s). The climate is the type Am (Tropical Wet), which is characterized by being warm and humid (Climate Equatorial Amazon), with temperature between 25° C and 28° C and rainfall of $2,500 \text{ mm / year}$ to $3,000 \text{ mm / year}$, and two distinct periods, a dry (June to November) and another rainy season (December to May). The work was aimed at the implementation of the hydrodynamic modeling the movement of the estuary of the river Maracanã (NE Pará), using as a modeling tool (Program Design SisBAHIA - Base Hidrodinâmica Environmental System), based on interpretation of the data collected in the field and experimental studies conducted in the laboratory. The methodological procedures consisted of three basic steps: bibliographical survey, work of field and laboratory. In the field, were performed: (1) a survey of semi-ecobatimétrico detail, employing is a Ecossonda DGPS / PLOTTER / SONAR FURUNO GP-1850 F, which were made transects ecobatimétricos cross-sectional and longitudinal in the estuary during the flood tide, (2) measurement of currents, tidal, to obtain measures of intensity and direction of currents in a point ($00^\circ 45'18'' \text{ S}$ and $47^\circ 26'12'' \text{ W}$), over a period of continuous sampling of 8 days (preamar e) (baixamar 04/02/07 to 11/02/07), covering sizígia. To this end, it was used a Correntógrafo Falmouth Scientific 2D-ACM, (3) the monitoring of the vertical tide was based Marégrafos Orphimedes Brand OTT-Hidrometrie, which recorded the water level at the same time, near the mouth and the inner part of the estuary, for a period of 8 days continuous every 20 minutes. In the laboratory: (1) the data processing environment ecobatimétricos in Excel for correction in relation to the level of tide. Still, the Surfer was used for scanning the data input for

the hydrodynamic model of the Program Sisbahia, (2) time series of the level of current and tide were subjected to routine data processing environment developed in Excel (3) For flow was conducted an estimate based on simple and rational. The data were then processed for analysis: (1) In implementation of the model, were gathered all the data collected in the study area and these data were supplied to the model within a pre-defined area, (2) For calibration of the model Adjustments were made in an attempt to merger of the data collected in the field and model, (3) the validation of the model, which was the accuracy of the results of the computational model in relation to its purposes, and the natural system that it represents, in order to reproduce the actual phenomena. Then put up the model pra "run", that is, the model will generate scenarios of ebb tide, flooding, and squaring sizígia. With this, could itself describe the patterns of movement of estuarine river Maracanã and understand the aspects of their complex hydrodynamics. Thus, it is obtained, maps featuring patterns of current averages upright over a cycle of the tide sizígia and quadrature (half ebb tide, half flood tide, estofa of preamar and estofa of baixamar). It was observed that during the tides of sizígia, the speeds are higher if compared with the tides, squaring. The geometry of the estuary is responsible for restricting the penetration of coastal waters and help to raise the tide inside of it. The results generated by the model were not equal to those measured in the field, because of the complexity of the area and the amount of data acquired.

Key-words: Estuary circulation. Hydrodynamic modeling. Estuary of the Maracanã River.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Classificação evolutiva de um estuário, pois este é desenvolvido durante uma transgressão e desaparece quando começa uma regressão e/ou um progradação	30
Figura 2: Diagrama esquemático das zonas de rio, mistura e costeira de um sistema estuarino hipotético, onde S equivale à salinidade e Q_f à descarga de água doce	34
Figura 3: Morfologia geral de um estuário e de uma distribuição de diversos fatores dos sedimentos: salinidade, processos dos sedimentares, fácies e energia	35
Figura 4: Delimitação e funções de um sistema estuarino. Características geomorfológicas e processos nas zonas de rio, de mistura e costeira	37
Figura 5: O esquema mostra um estuário dominado por ondas, na parte superior a distribuição de energia, no meio a morfologia e na parte inferior, fácies em seção longitudinal	39
Figura 6: O esquema mostra um estuário dominado por marés, na parte superior a distribuição de energia, no meio a morfologia e na parte inferior, fácies em seção longitudinal	40
Figura 7: Tipos fisiográficos de estuários	44
Figura 8: Esquema de um estuário altamente estratificado	46
Figura 9: Estratificação de um estuário tipo cunha salina em condições de alta (a) e baixa (b) descarga fluvial	47
Figura 10: Esquema simplificado de um estuário bem misturado	48
Figura 11: Esquema de um estuário parcialmente estratificado	49
Figura 12: Estrutura vertical da salinidade, a classificação do estuário depende da diferença da salinidade entre a superfície e o fundo	52

Figura 13: Representação esquemática da circulação da água e do gradiente de salinidade do estuário altamente estratificado. (a) mostra no perfil longitudinal a circulação da água. As setas horizontais mostram o fluxo residual; seawards na superfície devido à mistura e o fluxo do rio, e landwards no fundo devido a mistura vertical através da relação da água do rio e água do mar. As linhas representam o gradiente de salinidade no (b) O perfil Salinidade-profundidade com o destaque da haloclina (c) O perfil de velocidade-profundidade mostrando o fluxo residual.53

Figura 14: Representação esquemática da circulação da água, e do gradiente de salinidade em um estuário parcialmente misturado. (a) Seção longitudinal que mostra a circulação da água e o gradiente de salinidade. A linha sub-horizontal tracejada está a uma profundidade em que não está nenhum fluxo residual horizontal, isto é, seawards ou landwards (b) O Perfil de Salinidade-profundidade ao longo da linha vertical tracejada. (c) Diferença de Salinidade entre a superfície e o fundo ao longo do estuário indo do rio em direção ao mar. (d) a linha tracejada mostra o Perfil da Velocidade-profundidade54

Figura 15: Representação esquemática da circulação da água, da salinidade e turbulência da maré no estuário bem misturado. As elipses representam a turbulência da maré, note que a salinidade é uniforme da superfície ao fundo e também vai aumentando do rio em direção ao mar55

Figura 16: Localização dos 26 estuários com mais de 100 km² identificados na costa brasileira.....59

Figura 17: Mapa de Localização do estuário de Maracanã.....64

Figura 18: Distribuição da precipitação total e temperatura média da região Nordeste do Pará para o ano de 2003.....65

Figura 19: Climatologia de precipitação acumulada no ano (mm) realizada durante o período de 1961 a 1990.67

Figura 20: Mapa de drenagem da bacia hidrográfica do rio Maracanã.71

Figura 21: Esquema mostrando as correntes atuantes na costa do Estado do Pará.....72

Figura 22: Vegetação da Bacia Hidrográfica do Rio Maracanã.....74

Figura 23: Manguezais nas margens do estuário do rio Maracanã, durante a baixamar.....	75
Figura 24: Contexto Geomorfológico da planície costeira de Maracanã.....	80
Figura 25: Mapa geomorfológico do município de Maracanã.....	82
Figura 26: Coluna estratigráfica da região Nordeste do Pará.....	85
Figura 27: Mapa Tectônico do nordeste do Estado do Pará	86
Figura 28: Sistemas de falhas (Neotectônica) apresentando as falhas direcionais (indicando o movimento relativo); falhas normais e inversas ou de cavalgamentos linhas denteadas.....	87
Figura 29: Diagrama do processo de modelagem em recursos hídricos	89
Figura 30: A EcoSSonda DGPS/PLOTTER/SONAR, com visor colorido FURUNO GP-1850 F e o nottitebook.	97
Figura 31: A EcoSSonda, o Sensor de recepção dos dados e o DGPS.....	97
Figura 32: Régua de maré presa em um “curral” de pesca, onde as medidas foram obtidas a cada 20 minutos.....	98
Figura 33: Localização do Correntógrafo	99
Figura 34: O Correntógrafo Falmouth 2D.....	99
Figura 35: O Barco ancorado para a medição de corrente.	100
Figura 36: Pedaco de madeira atravessado sobre a proa do barco.....	100
Figura 37: Equipamento preso com um peso de 80 Kg no fundo.....	101
Figura 38: Localização dos Marégrafos.	102
Figura 39: Marégrafos Orphirmedes da marca OTT-Hidrometrie.....	102
Figura 40: Tubo sendo fechado para evitar contato com a água.	103
Figura 41: O tubo medidor de nível sendo preso ao equipamento.....	103
Figura 42: Tubo sendo fixado ao pedaco de madeira.	104

Figura 43: O Marégrafo funcionando, nesta figura, ilustra a dificuldade da coleta de dados na área.	104
Figura 44: O domínio definido para a modelagem.	108
Figura 45: Domínio modelado do Estuário de Maracanã, indicando a malha de discretização em elementos finitos e a batimetria atual com nível de referência a 3 m acima do nível médio do mar. Os eixos representam distâncias em UTM (Universal Transverse Mercator).	109
Figura 46: Curva de maré típica na região de Salinópolis geradas a partir das constantes harmônicas desta área, ao longo de 30 dias, sendo estas condições adotadas na modelagem do Estuário de Maracanã. O período gerado com auxílio do SisBAHIA foi do 1 a 28 de Fevereiro de 2007.	112
Figura 47: Localização e valores de elevação máximo, mínimo e médio registrados. .	113
Figura 48: Relação entre as constantes harmônicas e o marégrafo 1 (Localidade Jacaia).	114
Figura 49: Relação entre as constantes harmônicas e o marégrafo 2 (Localidade Curuçzinho).	114
Figura 50: Direção do canal principal NE-SW do Estuário do rio Maracanã.	115
Figura 51: A velocidade da corrente absoluta em relação à elevação do Marégrafo ..	116
Figura 52: Mapa mostrando a localização das estações com valores de vazão (na cor azul).	119
Figura 53: A localização das estações definidas no processo de modelagem.	121
Figura 54: Comparação de níveis de maré nas estações braço direito (posição do marégrafo 1) e Foz (posição do marégrafo 2). Nota-se o aumento das marés na região da estação braço direito em relação à estação foz.	122
Figura 55: Instante de estofa de preamar de quadratura onde se observa que, a profundidade mínima de 4,50 m, verificada através do padrão de cor azul	123

Figura 56: O padrão de correntes gerado na simulação 1 referente ao instante em que foi atingida a velocidade na Estação Frente da Cidade (ponto róseo) Os vetores correspondem às velocidades e suas magnitudes são verificadas através do padrão de cores.....126

Figura 57: Detalhamento mostrando a localização (através de setas) das velocidades muito pequenas ou nulas nas margens ao longo do estuário.....127

Figura 58: O padrão de correntes gerado no Cenário 2 (Estofa de baixamar), em destaque na figura (o quadrado) representa a parte do estuário com as menores velocidades de correntes neste cenário.....128

Figura 59: O padrão de correntes gerado no cenário 3 (Meia Maré enchente), em destaque na figura (o círculo) representa a parte do estuário com as maiores velocidades de correntes.....129

Figura 60 : O padrão de correntes gerado no cenário 4 (Estofa de Preamar), as menores velocidades se encontram próximas as margens na desembocadura., com velocidades variando de 0 a 0,13 m/s ao longo do estuário.....130

Figura 61: O padrão de correntes gerado na simulação 5 referente ao instante em que foi atingida a velocidade na Estação Frente da Cidade (ponto róseo) Os vetores correspondem às velocidades e suas magnitudes são verificadas através do padrão de cores.....132

Figura 62: Detalhamento do padrão de correntes no cenário 6 (estofa de baixamar)..133

Figura 63: Detalhamento do padrão de correntes no cenário 7 (meia maré enchente), mostrando na maior parte do estuário velocidades variando de 0 a 0,32 m/s.....134

Figura 64 : Velocidade da corrente na estofa de preamar durante uma maré de quadratura.....135

Figura 65: Instante de estofa de preamar de sizígia onde se observa que, a profundidade mínima de 5,60 m, verificada através do padrão de cor azul.....136

Figura 66: Instante de estofa de preamar de quadratura onde se observa que, a profundidade mínima de 4,50 m, verificada através do padrão de cor azul.....137

QUADRO

Quadro 1: Significado dos termos das equações governantes do módulo 2DH.....94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Localização dos equipamentos.	102
Tabela 2: Tabela mensal com precipitações totais (mm/ mês) e vazões (m^3/s) estimadas para o ano de 2003, respectivamente.....	105
Tabela 3: Constantes harmônicas referentes à estação maregráfica de Salinópolis-PA.....	111
Tabela 4: Valores recomendados para a rugosidade equivalente de fundo..	117
Tabela 5: Valores recomendados para a rugosidade equivalente do fundo.....	117
Tabela 6: Valores de vazões médias.	118

LISTA DE SIGLAS

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

COPPE – Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia

COPPETEC - Fundação Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos

CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

CTTMAR – Centro de Ciências Tecnológicas da Terra e do Mar

DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação

FEMAR - Fundação para os Estudos do Mar

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IG – Instituto de Geociências

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

PA – Estado do Pará

PPGG – Programa de Pós Graduação em Geologia e Geoquímica

UFPA – Universidade Federal do Pará

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

UNIVALI – Universidade do Vale do Itajaí

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	24
2. OBJETIVOS.....	26
2.1 GERAL	26
2.2 ESPECÍFICOS	26
3. O AMBIENTE ESTUARINO	27
3.1 GÊNESE	28
3.1.1 Estuários de Planícies Costeiras	31
3.1.2 Fjordes	31
3.1.3 Estuários Construídos por Barra	32
3.2 DEFINIÇÃO	32
3.3 PROCESSOS COSTEIROS E ESTUARINOS	36
3.4 SEDIMENTAÇÃO ESTUARINA	38
3.5 CLASSIFICAÇÃO.....	38
3.5.1 Classificação Quanto aos Processos Físicos Dominantes	38
3.5.1.1 Estuários dominados por ondas	38
3.5.1.2 Estuários dominados por maré.....	39
3.5.2 Classificação Quanto a Geomorfologia.....	41
3.5.2.1 Planície Costeira	41
3.5.2.2 Fjordes	41
3.5.2.3 “Rias”	42
3.5.2.4 Construídos por Barra	42
3.5.2.5 Deltas	43
3.5.3 Classificação dos Estuários pela Circulação das Águas	45

3.5.3.1 Estuário tipo Cunha Salina	45
3.5.3.2 Estuário tipo Bem Misturado	47
3.5.3.3 Estuário tipo Parcialmente Misturado.....	48
3.6 PARÂMETROS QUE ATUAM NA CIRCULAÇÃO ESTUARINA	50
3.6.1 Salinidade	50
3.6.2 Densidade	55
3.6.3 Temperatura	56
3.6.4 pH	57
3.7 ESTUÁRIOS BRASILEIROS.....	58
3.7.1 Localização dos Estuários Brasileiros	58
3.7.2 Diferenças no Padrão de Preenchimento Sedimentar dos Estuários	60
3.7.3 Hidrodinâmica Estuarina	60
3.7.4 Estuários do Nordeste do Pará	61
4. CARACTERIZAÇÃO REGIONAL E DA ÁREA DE ESTUDO	63
4.1 LOCALIZAÇÃO E ACESSO	63
4.2 CONDIÇÕES CLIMÁTICAS E METEOROLÓGICAS	65
4.2.1 Tipo Climático	65
4.2.2 Precipitação	66
4.2.3 Ventos	68
4.3 CONDIÇÕES OCEANOGRÁFICAS	69
4.3.1 Hidrografia do rio Maracanã	69
4.3.2 Marés	72
4.3.3 Correntes de Marés Associadas	72
4.4 COBERTURA REGIONAL	73
4.5 SOLOS	75

4.5.1 Solos com horizonte B latossólico	75
4.5.1.1 Latossolo amarelo.....	75
4.5.2 Solos com horizonte B textural não-hidromórficos	76
4.5.2.1 Podzólicos vermelho-amarelos	76
4.5.3 Solos Halomórficos.....	76
4.5.3.1 Solos indiscriminados de Mangue	76
4.5.4 Solos Hidromórficos Gleizados	77
4.5.4.1 Gleissolos (glei pouco húmicos).....	77
4.5.4.2 Areias quartzosas.....	77
4.6 GEOMORFOLOGIA COSTEIRA.....	77
4.6.1 Litoral de “Rias”	78
4.6.2 Planalto Costeiro	78
4.6.3 Planície Costeira	79
4.6.4 Planície Estuarina	81
4.6.5 Planície Aluvial	81
4.6.6 Estuário do rio Maracanã.....	81
4.7 ESTRATIGRAFIA REGIONAL	83
4.7.1 Formação Pirabas	83
4.7.2 Sedimentos do Grupo Barreiras	84
4.7.3 Sedimentos Pós-Barreiras.....	84
4.7.4 Sedimentos Recentes	85
4.8 ASPECTOS ESTRUTURAIS.....	86
4.8.1 Configuração Geral	86
4.8.2 Neotectônica.....	87

5. PRINCÍPIOS DA MODELAGEM COMPUTACIONAL	88
5.1 O PROCESSO DA MODELAGEM EM RECURSOS HÍDRICOS	88
5.2 IMPORTÂNCIA DA UTILIZAÇÃO DE MODELOS.....	89
5.3 PRINCÍPIOS DA MODELAGEM ESTUARINA	90
5.3.1 Modelos de Circulação Hidrodinâmica.....	90
5.3.2 Classificação dos Modelos Hidrodinâmicos.....	91
5.3.2.1 Modelos tridimensionais	91
5.3.2.2 Modelos bidimensionais	91
5.3.2.3 Modelo unidimensional (1D).....	91
5.3.3 Sistema de Modelos Adotados.....	92
5.3.3.1 Modelo Hidrodinâmico:.....	92
5.4 RESUMO DAS EQUAÇÕES GOVERNANTES DO MÓDULO 2DH DO MODELO HIDRODINÂMICO	93
6. METODOLOGIA	95
6.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	95
6.2 TREINAMENTO	95
6.3 CAMPANHAS OCEANOGRÁFICAS.....	96
6.3.1 Levantamentos Ecobatimétricos.....	96
6.3.2 Medição de Correntes de maré.....	98
6.3.3 Monitoramento da maré.....	101
6.3.4 Vazão	104
6.4 LABORATÓRIO	106
6.4.1 Processamento de Dados	106
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	107
7.1 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO	107
7.1.1 Definição do Domínio de Modelagem.....	107

7.1.2 Levantamento Batimétrico	109
7.1.3 Características da Malha Adotada	110
7.1.4 Dados de Marés	110
7.1.4.1 Marés geradas a partir de constantes harmônicas.....	110
7.1.4.2 Elevação de Nível d' água medido no campo	112
7.1.4.3 Relação entre Marés geradas pelas Constantes Harmônicas e Dados Medidos no campo.....	113
7.1.5 Dados de direção e velocidade das Correntes	114
7.1. 6 Determinação do tipo de sedimento de fundo.....	116
7.1.7 Vazão	118
7.1.8 Dados de Vento	119
7.2 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO	120
7.3 CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA NO ESTUÁRIO DO RIO MARACANÃ	121
7.3.1 Simulações Hidrodinâmicas.....	122
7.3.1.1 Maré de Sizígia.....	124
7.3.1.2 Maré de Quadratura.....	131.
8. CONCLUSÕES.....	138
REFERÊNCIAS.....	139

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas estuarinos vêm sendo estudados no mundo inteiro, ocorrendo com maior presença em regiões temperadas e subtropicais, que tem associação com diversas condições hidrodinâmicas e climáticas (ventos, ondas, correntes, marés,...), alguns dos mais conhecidos são: Svern River, na Inglaterra (ALLEN, 1990), Gironde Estuary, na França (ALLEN; POSAMENTIER, 1993), entre outros. Contudo, em regiões tropicais úmidas os estuários são margeados por grandes áreas de manguezais, como é o caso da área litorânea paraense.

O litoral paraense apresenta uma configuração bastante recortada, por este motivo possui um grande número de sistemas estuarinos. Segundo Souza Filho; El-Robrini (2000), a zona costeira do estado do Pará é caracterizada por reentrâncias formadas por baías e estuários, e pelas proeminências, com zonas marinhas, porém, sujeitas à influência estuarina. As proeminências litorâneas são conhecidas como as “pontas”, e são constituídas por manguezais, com praias arenosas nas extremidades. Estas pontas são cristas de praia flexa-barreira (*barrier-spit beach ridges*), que margeiam os sedimentos siltico-argilosos dos mangues, elevam sensivelmente a topografia costeira, prolongam as formas e os contornos das linhas de manguezais mar adentro, sendo truncadas pelos canais fluviais e limitadas pelas desembocaduras estuarinas. Neste contexto, está inserido o estuário do rio Maracanã, que é um sistema fortemente influenciado por macro-marés, onde ocorrem domínios geomorfológicos como: Planície Costeira, Planície Estuarina e Planície Aluvial.

A utilização da modelagem computacional aplicada em estudo de circulação hidrodinâmica no Brasil vem sendo cada vez mais utilizada, podendo destacar-se, os trabalhos Xavier (2002) sobre a circulação hidrodinâmica na Baía de Todos os Santos (BA); o de Sampaio (2003) que realizou o estudo da circulação hidrodinâmica e trocas de massas d'água da Baía de Guanabara (RJ), já Souza (2006) realizou a modelagem numérica da circulação de correntes de maré da Baía de Marajó e Rio Pará (PA). Na região Norte, alguns estudos em estuários já foram realizados como o Projeto MADAM, entre outros, porém a aplicação da modelagem computacional em estudos de circulação hidrodinâmica ainda não foi muito explorada, daí partiu-se a idéia de realizar este trabalho.

A necessidade da aplicação de modelos para estudos, projetos e auxílio à gestão de recursos hídricos é indiscutível, devido à complexidade do ambiente em corpos de água naturais, como em estuários. Modelos são ferramentas integradoras, sem as quais dificilmente se consegue uma visão dinâmica de processos nestes complexos sistemas ambientais.

Com a existência de poucos trabalhos desenvolvidos em regiões estuarinas, seria fundamental aplicar a modelagem computacional na circulação estuarina do Rio Maracanã (PA), com auxílio de modelos hidrodinâmicos, para fornecer subsídios importantes para a eficácia do gerenciamento adequado da zona costeira, sobretudo em relação às interpretações futuras de programas de monitoramento, conservação e proteção das regiões estuarinas no Nordeste do Pará. Além disso, a região norte possui um regime de macro-marés ainda pouco estudado no meio científico, também esta contribuição é fundamental para o aperfeiçoamento dos modelos computacionais. Em função disso, escolheu-se como objetivo principal a Aplicação da Modelagem Hidrodinâmica na Circulação do Estuário do Rio Maracanã (NE do Pará), utilizando como ferramenta o Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (SisBAHIA).

2. OBJETIVOS

2.1 GERAL

- Conhecer a circulação do estuário do Rio Maracanã, utilizando como ferramenta o Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (SisBAHIA).

2.2 ESPECÍFICOS

- Determinar a magnitude das correntes e a variação da maré durante o período amostrado;
- Determinar alguns transectos ecobatimétricos na área de estudo para se ter uma contribuição da morfologia do estuário;
- Simular cenários de circulação hidrodinâmica no estuário do rio Maracanã nas marés de sizígia e quadratura.

3. O AMBIENTE ESTUARINO

A palavra estuário é derivada do adjetivo latino *aestuarium*, cujo significado é maré ou onda abrupta de grande altura, fazendo referência a um ambiente altamente dinâmico, com mudanças constantes em resposta a forçantes naturais. Esse termo é utilizado para indicar o encontro do rio com o mar, caracterizando uma foz litorânea. Portanto, trata-se de um ecossistema de transição entre o oceano e o continente; a complexidade e a vulnerabilidade à influência do homem são características comuns a todos os estuários. Em condições naturais, os estuários são biologicamente mais produtivos do que os rios e o oceano adjacente, por apresentarem altas concentrações de nutrientes que estimulam a produção primária (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002).

O ambiente estuarino é caracterizado pela forma do corpo d'água, conexão livre com o mar aberto e grau de mistura de água salina (SILVA, 1998). Os estuários apresentam muitas funções vitais (KETCHUM, 1983) como: o habitat natural de aves, mamíferos e peixes, desova e criação de comunidades biológicas e, rota migratória de peixes de valor comercial.

Para os estuários conhecidos na literatura vários conceitos são propostos, isso mostra a diversidade do perfil dos pesquisadores dedicados à investigação desses ambientes. Com relação às ciências geológicas, o conceito mais utilizado é aquele proposto por Dalrymple; Zaitlin; Boyd. (1992) o qual considera que o estuário é a porção distal do vale afogado por uma transgressão onde fácies marinhas e fluviais são espacialmente distribuídas por processos associados à vazão dos rios, às correntes de maré e às ondas (LESSA, 2005).

Neste contexto, pode ser dizer que um estuário está associado à presença de um espaço de acomodação à retaguarda da linha praial (voltada para o mar aberto). O completo preenchimento deste espaço indica, assim, o desaparecimento do estuário. Quando tal fato ocorre, sedimentos fluviais passam a serem disponibilizados em grande volume para a antepraia. A manutenção do espaço de acomodação em costas transgressivas ocorre quando a taxa de elevação do nível relativo do mar excede a taxa de sedimentação (agração do leito). Em costas com nível de mar estável, o tempo de

vida de um estuário é determinado pela razão entre a sua profundidade e a taxa de sedimentação. Já em costas regressivas, o tempo de vida de um estuário é diminuído, pois à taxa de sedimentação soma-se a taxa de descida do nível do mar.

Os movimentos nesses ambientes são gerados por oscilações do nível do mar, pela descarga de água doce, pelo gradiente de pressão devido à influência da salinidade, pela circulação da plataforma continental e pelo vento agindo diretamente sobre a superfície livre (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002.).

Os estuários são encontrados ao redor do globo em qualquer condição de clima e maré, sendo mais bem desenvolvidos nas planícies costeiras das médias latitudes, ao largo de plataformas continentais extensas que atualmente estão submergindo sob a elevação relativa do nível do mar. Esta elevação relativa teve início há 15.000 anos A.P., quando o nível do mar situava-se em média a 120 m abaixo do seu nível atual (MIRANDA op. cit.).

Esta rapidez na elevação do nível do mar influenciou na formação dos estuários atuais, uma vez que a inundação dos vales dos rios ocorreu mais rapidamente do que a sedimentação. Logo, a existência de ambientes estuarinos é função do balanço entre as flutuações do nível do mar e o volume de sedimentos carreados pelos rios. O preenchimento é uma ação contrária a submergência, por exemplo, quando a taxa de elevação do nível do mar é maior que a taxa de preenchimento, os estuários são bem desenvolvidos. Em geral, depósitos sedimentares estuarinos antigos fazem parte de uma série de eventos transgressivos (MIRANDA op. cit.).

3.1 GÊNESE

Segundo Schubel (1971) e Silva (1998), os estuários podem ter formação a partir de: (i) Sistemas drenados de vale, onde ocupam costas cuja morfologia foi delineada por erosão fluvial, onde os rios desenvolvem um padrão dentrítico ou entrelaçado ("*rias*"); (ii) Fjords, formados por geleiras continentais pré-existentes; (iii) Ilhas barreiras, onde ocorrem associados à costa onde se dá o desenvolvimento de ilhas barreiras e (iv) Produzidos por processos tectônicos.

Na maioria dos casos, a formação de estuários se dá em regiões relativamente estreitas de transição entre o mar e as massas de terra continentais. Estes são ambientes de época geológica muito recente (próximo de cinco mil anos), formados por alterações seculares do nível do mar de natureza eustática (variação do volume de água dos oceanos) ou isostática (variações do nível da crosta terrestre), bem como por processos de origens tectônicas. Com relação as suas localizações, formas e extensões dependem do nível do mar, da topografia do litoral e dos rios, sendo alteradas por processos erosivos, deposicionais de sedimentos (Figura 1) e, mais recentemente, como consequência da exploração e exploração das bacias de drenagem (MIRANDA op. cit).

O efeito da descarga fluvial, constantemente adicionada pelo rio, além de gerar um componente da circulação estuarina que naturalmente se desloca para fora do estuário (vazante), ao diluir a água do mar produz diferenças de densidade ao longo do estuário, gerando movimentos estuário acima (enchente) forçados pelo gradiente de pressão.

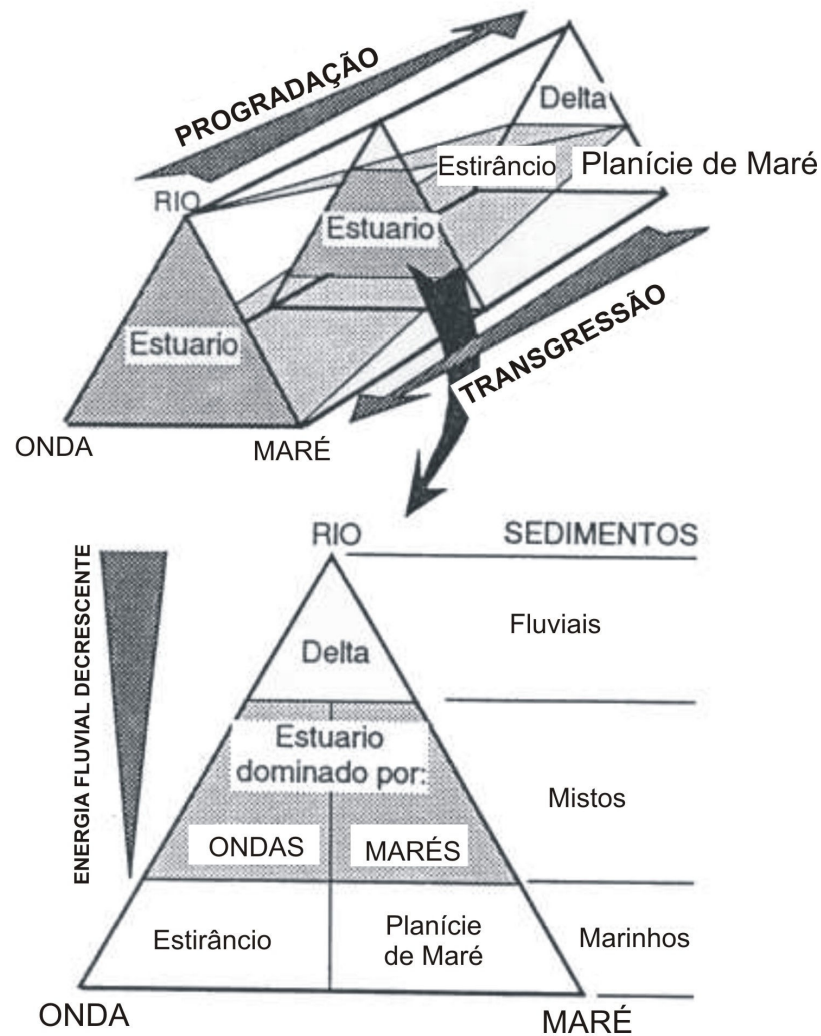


Figura 1: Classificação evolutiva de um estuário, pois este é desenvolvido durante uma transgressão e desaparece quando começa uma regressão e/ou um progradação (DALRYMPLE, ZAITLIN; BOYD, 1992).

A interação das várias propriedades e processos descarga (ou vazão) do rio, correntes de maré, gradiente de pressão, advecção turbulenta – produz, dentro da delimitação geomorfológica da bacia estuarina, a distribuição de salinidade que é característica de cada estuário (OFFICER, 1983).

De acordo com a gênese, os estuários podem ser:

3.1.1 Estuários de Planícies Costeiras

Formaram-se durante a transgressão do mar (Holoceno), que inundou os baixos vales dos rios. Esses estuários são relativamente rasos, raramente excedendo 30m de profundidade. A área da seção transversal em geral aumenta estuário abaixo, às vezes de forma exponencial, e a configuração geométrica da seção transversal tem a forma de V. A razão largura/profundidade, em geral, é grande, embora ela esteja na dependência do tipo de rocha em que o vale do rio foi escavado. Devido ao processo recente de sedimentação, o fundo é preenchido com lama e sedimentos finos na sua parte superior, que se tornam mais grossos em direção à entrada (MIRANDA, CASTRO; KJERFVE., 2002).

3.1.2 Fjordes

Foram formados em regiões que durante o Pleistoceno estavam cobertas com calotas de gelo, devido à intensa escavação glacial na planície costeira ou próxima à plataforma continental. A pressão dessas calotas sobre os blocos continentais e os efeitos erosivos durante o descongelamento afundaram os vales dos rios primitivos e deixaram um alto fundo rochoso na entrada, denominado de soleira. Por ser muito profundo, e com as trocas com o oceano adjacente limitadas pela soleira, a água da descarga fluvial e a circulação ficam confinadas numa camada muito rasa e que no seu movimento estuário abaixo recebe pelo processo de *entranhamento* uma quantidade razoável de água do mar da camada profunda. A camada de água mais profunda é quase isohalina e o transporte fluvial na primavera e no verão é dominante sobre o prisma de maré. A profundidade da camada superior é praticamente constante e o transporte de volume aumenta estuário abaixo (MIRANDA, CASTRO; KJERFVE., 2002).

A profundidade da camada acima da haloclina é muito próxima à da soleira e, em condições de grande descarga da água doce, essa camada é quase homogênea; o entranhamento acentua-se, gerando uma haloclina com gradiente vertical de salinidade moderado. Entretanto, com o decréscimo da descarga fluvial, a camada superficial

torna-se mais estratificada nas proximidades da foz e o máximo gradiente vertical de salinidade estende-se até a superfície. Como são estuários profundos, a temperatura decresce com a profundidade e, por ocasião da entrada de água de degelo, podem ocorrer inversões (aumentos com a profundidade) de temperatura em camadas sub-superficiais da coluna d'água (MIRANDA op cit.).

3.1.3 Estuários Construídos por Barra

Este tipo de estuário possui formação com a inundação de vales de rios durante a transgressão marinha, mas a sedimentação recente ocasionou a formação de barras na foz. Portanto, esses ambientes estão associados a regiões costeiras que podem sofrer processos erosivos com facilidade, produzindo grandes quantidades de sedimento que são retrabalhados pelas ondas e transportados por correntes litorâneas (MIRANDA op cit.).

3.2 DEFINIÇÃO

Um estuário pode ser definido de várias maneiras, Entretanto, essas definições devem abranger as características, os processos essenciais, bem como o contexto no qual o estuário está inserido, permitindo a aplicação de critérios adequados de classificação (DYER, 1997). Para oceanógrafos, engenheiros, geógrafos e ecologistas, o termo estuário é utilizado para indicar a região interior de um ambiente costeiro, onde ocorre o encontro das águas fluviais com as do mar, estendendo-se rio acima até o limite da influência da maré. Alguns pesquisadores também incluem a plataforma continental interna, como parte integrante do sistema estuarino (MIRANDA op cit.).

Do ponto de vista físico, a definição de estuário deve admitir certas semelhanças básicas na distribuição da salinidade e da densidade, bem como no modelo de circulação e nos processos de mistura; deve também salientar a importância das fronteiras que controlam a distribuição das propriedades, a movimentação e mistura das águas (PRITCHARD, 1971).

Levando em consideração estas características, define-se estuário como uma massa de água costeira semi-fechada, que tem uma ligação livre com o mar aberto e dentro da qual ocorre uma diluição mensurável de água salgada com água doce, proveniente da drenagem terrestre.

Uma das definições mais comumente utilizadas na oceanografia é a definição clássica de Pritchard (1955): “Estuário é um corpo de água costeiro semi-fechado com interligação livre com o oceano adjacente, no interior do qual a água do mar é diluída pela água doce originada da descarga continental”. Essa definição em seu enunciado mostra que a circulação, os processos de mistura e a estratificação no estuário dependem principalmente de sua geometria, da descarga de água doce, da intensidade da maré, da salinidade, da circulação da região costeira adjacente e do vento atuando sobre a superfície livre (PRITCHARD, 1967; MIRANDA; CASTRO; KJERFVE., 2002).

Segundo a definição de Dionne¹ (1963) apud Miranda op cit., um estuário contemplando explicitamente três setores ou zonas ao longo dos estuários: “Estuário é uma reentrância do mar, que atinge o vale de um rio até o limite de influência da maré, sendo geralmente subdividido em três setores: a) estuário inferior ou marinho, com ligação livre com o oceano aberto; b) estuário médio, sujeito a intensas misturas da água do mar com a fluvial; c) um estuário superior ou fluvial, caracterizado por água doce, mas sujeito a influência da maré”.

Já Kjerfve (1990) definiu um estuário, ou mais adequadamente um sistema estuarino, como: “o sistema estuarino sendo um ambiente costeiro com conexão restrita com o oceano adjacente à qual permanece aberta pelo menos intermitentemente. Esse ambiente pode ser subdividido em três zonas distintas”:

- Zona de Maré do Rio (ZR): corresponde à parte fluvial com salinidade inferior a1, mas ainda sujeita à influência da maré;
- Zona de Mistura (ZM): onde ocorre a mistura da água doce proveniente da drenagem continental com a água da região costeira adjacente;

¹ DIONNE, J.C. “Towards a more Adequate Definition of the St. Lawrence Estuary”. *Z. Geomorphology*, n. 7, p. 36-44. 1963.

- Zona Costeira (ZC): corresponde à região costeira adjacente, delimitada pela pluma de maré vazante. A extensão dessa 'frente' estuarina delimita a 'Camada Limite Costeira'(CLC) " (Figura 2).

Os limites entre essas diferentes "zonas" definidas acima são dinâmicos e sua posição pode variar sazonalmente ou em períodos de tempo menores, de acordo com a intensidade e a variabilidade das diferentes forçantes: descarga de água doce, maré, vento e circulação da região costeira adjacente (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE., 2002).

Essas forçantes somadas às influências exercidas pela geometria e variação de salinidade do sistema condicionam os principais processos de circulação (gravitacional, residual e gerada pelo vento) e mistura (entranhamento e difusão turbulenta) na zona de mistura (KJERFVE, 1990).

Geralmente um desses padrões de circulação é predominante num sistema estuarino, entretanto dois ou três tipos podem ser observados simultaneamente ou sazonalmente num mesmo sistema (KJERFVE, 1990).

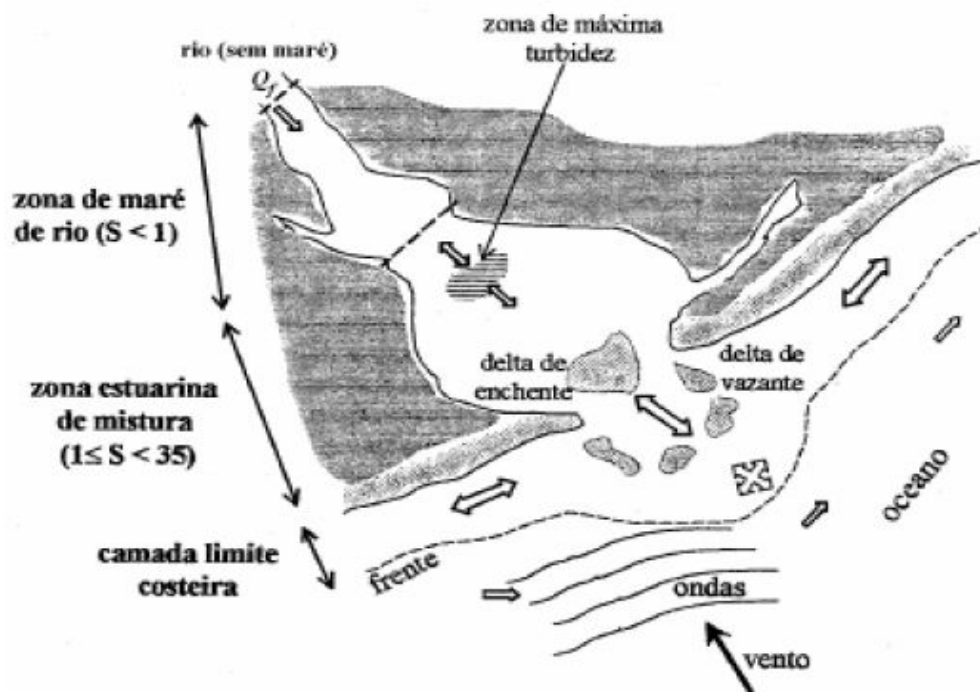


Figura 2: Diagrama esquemático das zonas de rio, mistura e costeira de um sistema estuarino hipotético, onde S equivale à salinidade e Q_f à descarga de água doce (KJERFVE, 1990).

Já segundo outros autores (ALLEN, 1990; DALRYMPLE; ZAITLIN; BOYD 1992), por sua posição, o estuário é caracterizado pelas variações de salinidade que influenciam na fauna e na densidade da água, e pela interação dos processos fluviais e marinhos. Conseqüentemente, em todos os estuários, distingue-se (Figura 3): (1) uma parte externa (jusante) dominada pelas correntes de ondas ou de marés, que induzem um maior transporte de sedimento em suspensão, (2) uma parte central com energia mínima, porque as influências fluviais e marinhas se equilibram, onde os sedimentos finos são depositados, e (3) uma parte interna (montante) dominada pela energia do rio, que induz uma sedimentação grossa com transporte de sedimento de fundo (LOS ESTUÁRIOS, 2007).

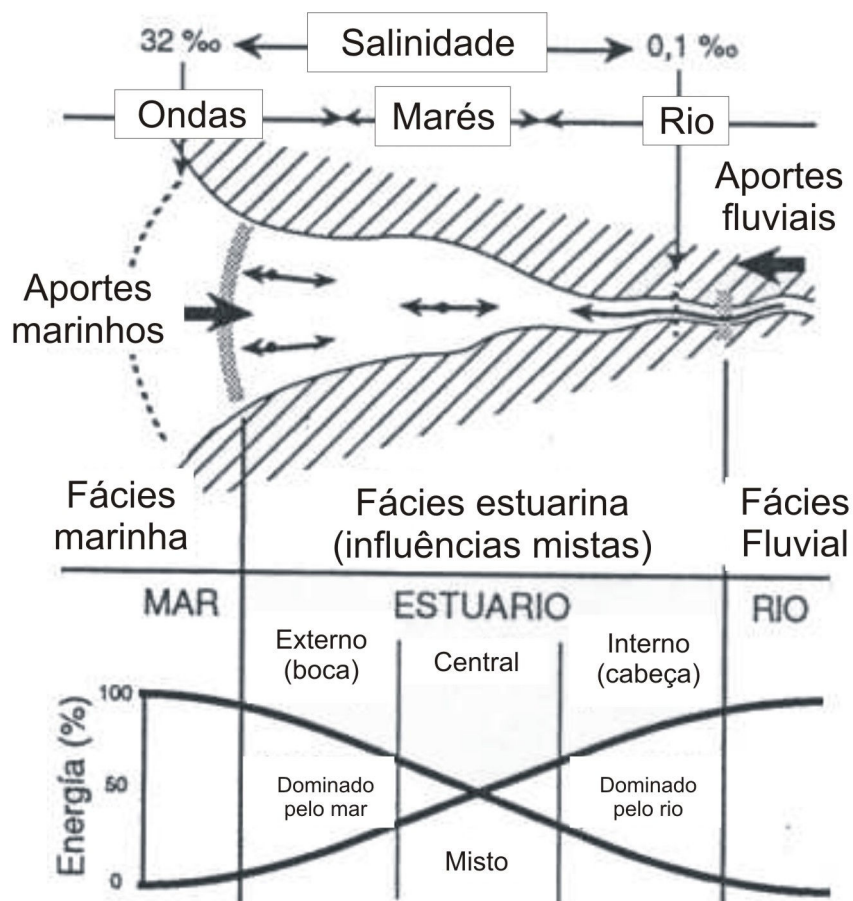


Figura 3: Morfologia geral de um estuário e de uma distribuição de diversos fatores dos sedimentos: salinidade, processos dos sedimentares, fácies e energia (LOS ESTUÁRIOS, 2007).

De acordo com Perillo (1995)² apud Los Estuarios (2007), definiu o estuário enfatizando sua natureza ecológica: “Estuário é um corpo de água costeiro semi-fechado, estendendo-se até o limite efetivo da influência da maré. Dentro dele a água do mar, ou de qualquer outro corpo costeiro salino de água entrando por uma ou mais conexões com o oceano aberto, é diluída significativamente com a água fluvial proveniente da drenagem continental, podendo sustentar espécies biológicas eurihalinas durante uma parte ou por todo o seu ciclo de vida”.

3.3 PROCESSOS COSTEIROS E ESTUARINOS

Miranda et al. (2002), mostram um resumo de processos costeiros e estuarinos que influenciam a dinâmica desses ambientes marinhos. Na zona de rio os movimentos são unidirecionais (rio abaixo ou acima) e a água dessa zona é integralmente de origem fluvial. Na transição entre a zona de rio e a zona de mistura existe uma região onde a velocidade resultante de movimentos convergentes é praticamente nula. A concentração de sedimentos em suspensão de origem fluvial e marinha é alta na zona de máxima turbidez. Devido aos processos de sedimentação, materiais de origem mineral e orgânica acumulam-se sobre o fundo submarino, podendo ocasionar a médio e longo prazo obstáculos para a navegação. Esse processo, gerado pelo transporte de sedimentos e circulação estuarina, promove o aprisionamento dos mesmos no interior do estuário, impedindo ou retardando a sua saída para a zona costeira (Figura 4). A localização dessa zona de turbidez varia de acordo com vários fatores, entre eles a intensidade da descarga fluvial e a altura da maré.

A ocorrência de recifes na zona costeira ao longo do litoral do Nordeste do Brasil pode representar um obstáculo para as trocas de água entre o estuário e a região costeira. O transporte litorâneo gerado pela arrebentação das ondas pode acumular sedimentos na entrada de estuários e lagunas costeiras, inibindo as trocas entre as zonas de mistura e costeira. O efeito oposto desse transporte, ou seja, o processo

² PERILLO, G.M.E.. “Definition and Geomorfologic Classification of Estuaries”. In: PERILLO, G.M.;E; PICOLLO, M.C. & PINO-QUIVIRA (eds). *Geomorfology and Sedimentology of Estuaries*. Berlin, Springer-Verlag, 1995. p. 17-49 (Environmental Science).

erosivo, também pode ocorrer na entrada de estuários, alterando suas características geomorfológicas. Os componentes mais energéticos das correntes na zona costeira são gerados pelo vento e maré; as correntes de maré têm, em geral, como principal componente de alta frequência àquela orientada ortogonalmente ao litoral.

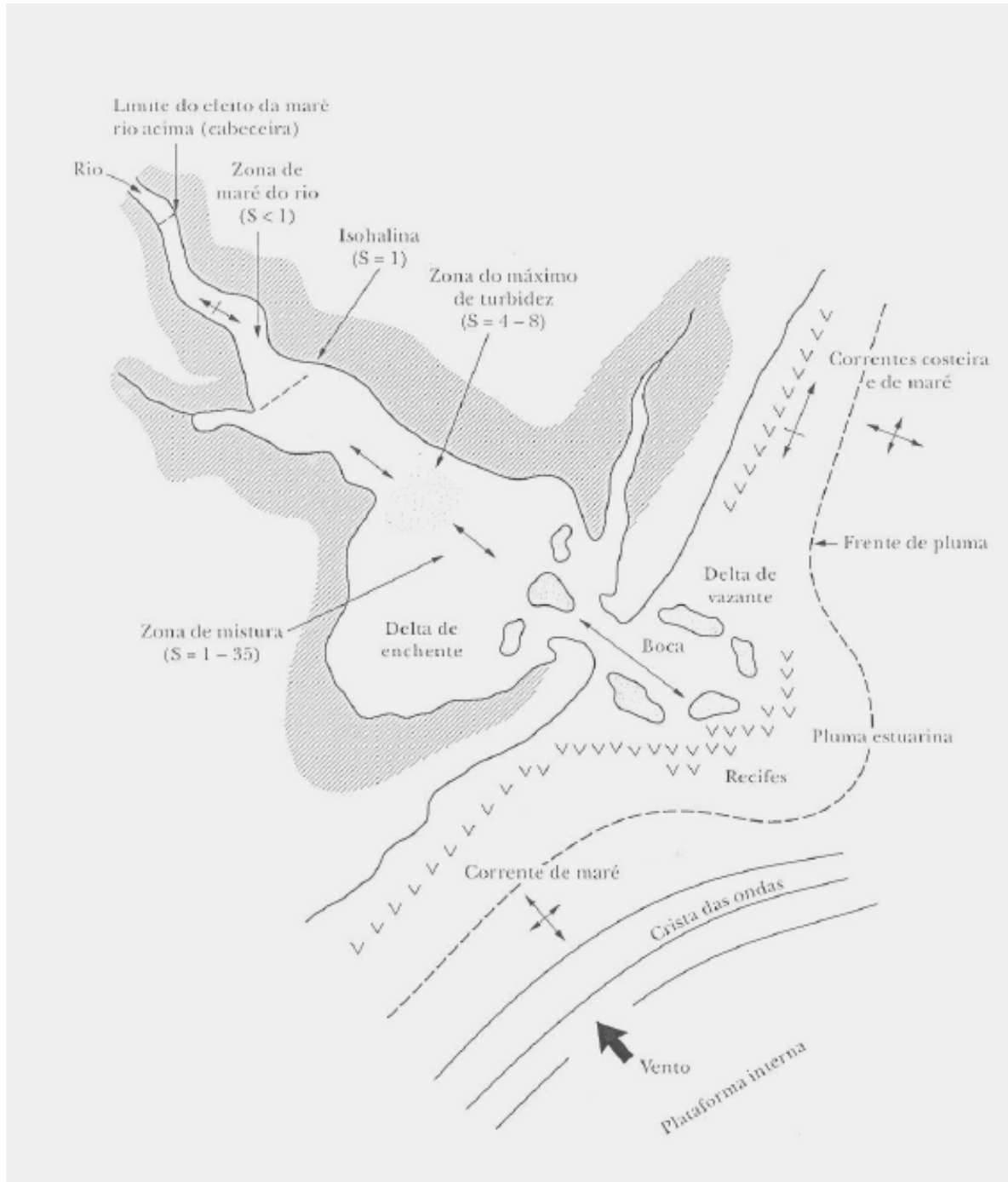


Figura 4: Delimitação e funções de um sistema estuarino. Características geomorfológicas e processos nas zonas de rio, de mistura e costeira (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE., 2002).

3.4 SEDIMENTAÇÃO ESTUARINA

Os sedimentos que desembocam nos estuários são variados, oriundos da bacia de drenagem, da plataforma continental, e da atmosfera, da erosão estuarina e de atividades biológicas. Estes sedimentos que transitam ou se depositam em um estuário podem ter origem continental ou marinha. Geralmente, há um fornecimento simultâneo destas fontes, somando ainda, a contribuição da deriva litorânea (SUGUIO, 2003).

Os processos estuarinos promovem a acumulação de sedimentos, que lentamente causam a colmatação dos estuários. Com a formação de baixios, em geral, areno-lamosos, as correntes de maré e as ondas tornam-se menos efetiva na redistribuição dos sedimentos.

O estudo atual da sedimentação estuarina requer o conhecimento das condições físico-químicas e atividades antrópicas. O fator físico-químico, principalmente as diferenças de pH entre o ambiente fluvial e o estuarino, induzem a floculação de frações argilosas, onde este fenômeno é mais efetivo em regiões de clima temperado e menos atuantes em regiões tropicais (SUGUIO, 2003).

3.5 CLASSIFICAÇÃO

Conforme Miranda; Castro; Kjerfve (2002), os estuários foram classificados quanto aos processos físicos dominantes, geomorfologia e quanto à estratificação da salinidade.

3.5.1 Classificação Quanto aos Processos Físicos Dominantes

3.5.1.1 Estuários dominados por ondas

Apresentam-se divididos em três zonas bem definidas: (i) um corpo marinho composto por depósitos de ilha barreira, leque de lavagem, canal de maré e delta de maré; (ii) uma bacia central onde se depositam os sedimentos finamente granulados e;

(iii) um delta de cabeceira de baía que está submetido à influência da maré e/ou da água salina (Figura 5).

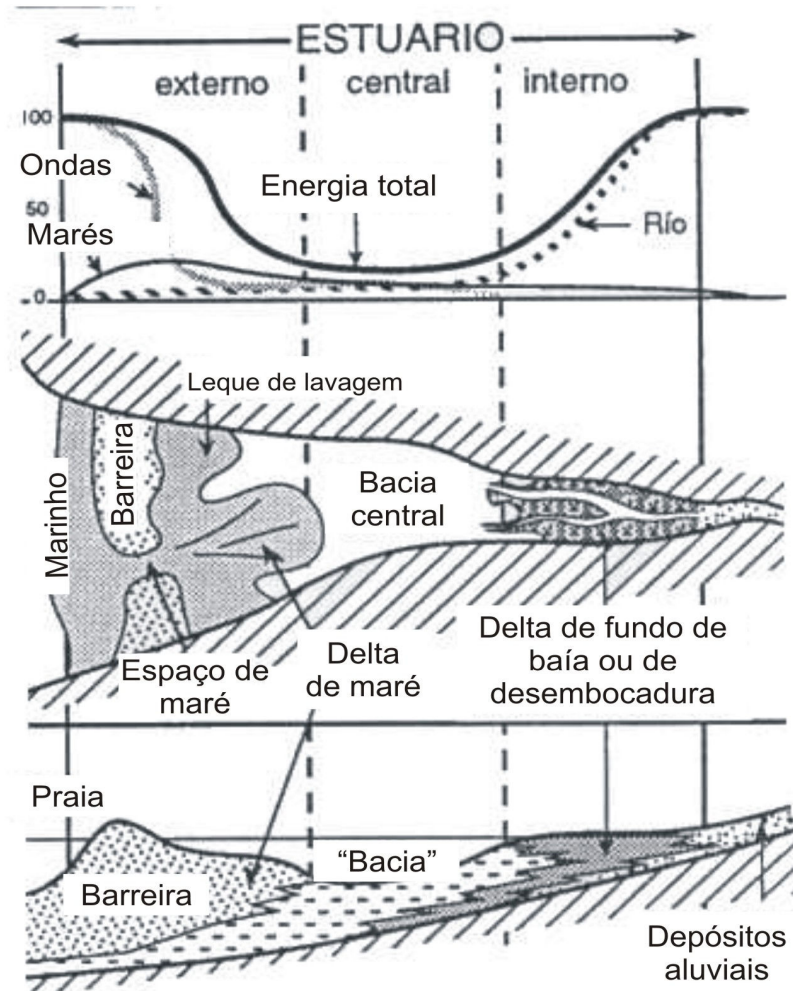


Figura 5: O esquema mostra um estuário dominado por ondas, na parte superior a distribuição de energia, no meio a morfologia e na parte inferior, fácies em seção longitudinal (LOS ESTUARIOS, 2007).

3.5.1.2 Estuários dominados por maré

Neste ambiente, na porção marinha, desenvolvem-se barras arenosas alongadas conforme a direção das correntes marinhas e amplas planícies de maré arenosas, que possuem um canal de baixa sinuosidade, sendo seguidas por uma zona de meandros apertados e, finalmente, uma zona interior dominada por processos fluviais (Figura 6).

Os estuários dominados por maré recebem sedimentos provenientes dos rios, na cabeceira do estuário e da plataforma adjacente. A energia das correntes de maré excede a energia das ondas na foz, onde barras de areia alongadas se desenvolvem e dissipam a energia das ondas, variando o decréscimo da energia estuário acima. Além disso, a forma afunilada da foz proporciona que a maré de enchente seja progressivamente contida estuário adentro, chegando a zero no limite de maré, enquanto que a energia fluvial decresce em direção ao mar (SILVA, 1998).

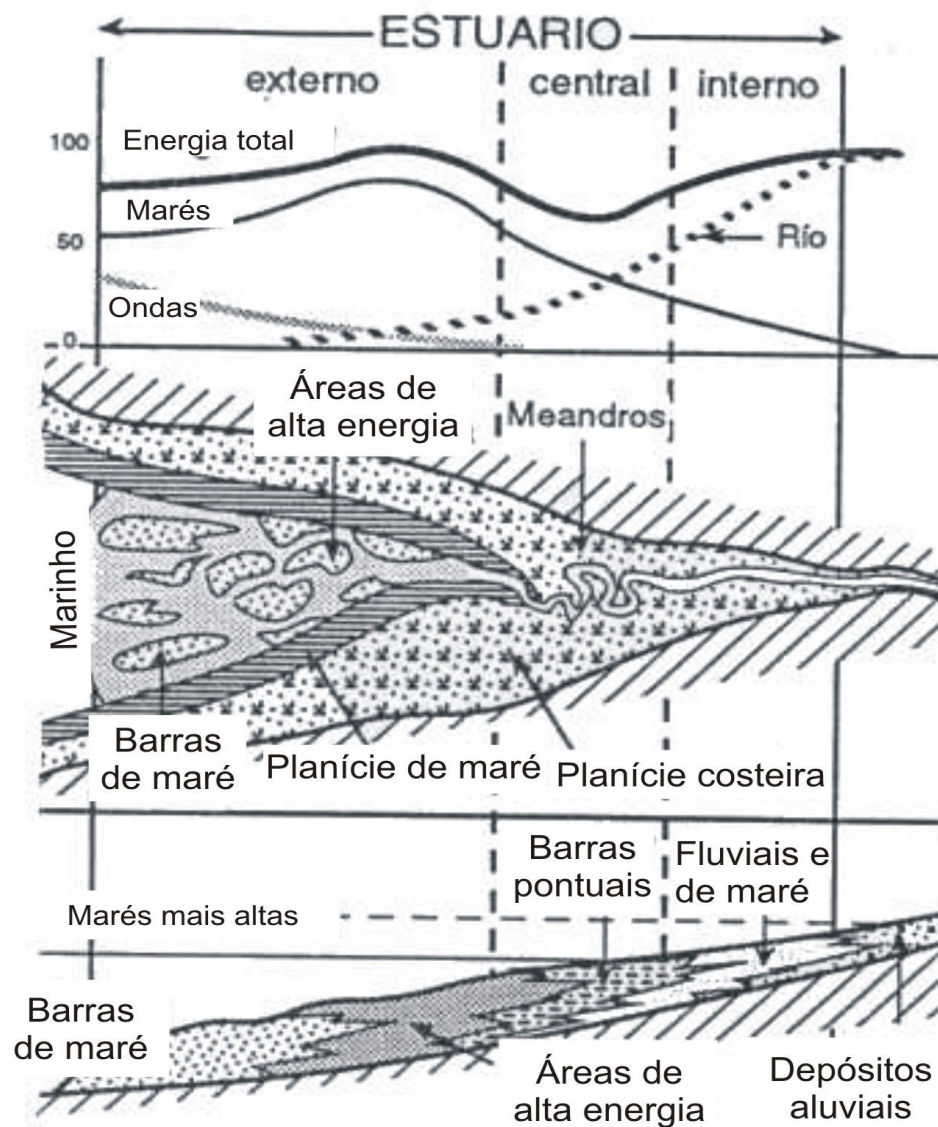


Figura 6: O esquema mostra um estuário dominado por marés, na parte superior a distribuição de energia, no meio a morfologia e na parte inferior, fácies em seção longitudinal (LOS ESTUARIOS, 2007).

3.5.2 Classificação Quanto a Geomorfologia

Os estuários podem ser classificados pela sua geomorfologia como, planície costeira, “fiordes”, rias, construídos por barras e deltas (PRITCHARD, 1952³ apud MIRANDA; CASTRO; KJERFVE., 2002).

3.5.2.1 Planície Costeira

A Planície Costeira localiza-se em regiões tropicais e subtropicais, sendo comuns na costa leste da América do Norte, também é encontrada no Brasil, podendo-se citar os estuários dos rios São Francisco, das Contas e Potengi nos litorais leste e nordeste brasileiro. Como a razão largura/profundidade é grande, a razão de fluxo depende da intensidade da descarga fluvial e da altura da maré. Além disso, o transporte de sedimentos em suspensão é grande nos estuários alimentados por rios muito meandantes (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE., 2002).

3.5.2.2 Fjordes

Estes são ambientes localizados em latitude altas e comuns no Alasca, na Noruega, no Chile e na Nova Zelândia. As soleiras restringem fortemente as trocas de água com o oceano adjacente. Essa limitação pode ocasionar condições anóxicas e adversas para as comunidades biológicas nas camadas profundas no verão, pois nessa época do ano a estabilidade vertical da coluna de água é mais intensa. As condições mais favoráveis para a flora e a fauna podem ser restabelecidas no outono e no inverno, com a renovação de água por processos convectivos profundos. Como exemplo de fiordes profundos e extremamente longos, podem-se citar os fiordes Oslo e Hardanger na Noruega, com profundidades de até 120m (MIRANDA op. cit.).

³ PRITCHARD, D. W., Salinity distribution and circulation in the Chesapeake Bay estuarine system. *Journal of Marine Research*, v. 11, p. 106-123. 1952.

Os fiordes, devido ao fato de serem sistemas profundos, apresentam a razão largura/profundidade relativamente pequena, quando comparada àquela dos estuários de planície costeira, e têm seção transversal aproximadamente retangular. A gênese justifica o fato de fiordes apresentarem em geral fundo rochoso e com processos de sedimentação recente, ocorrendo principalmente na foz dos rios. A descarga fluvial em geral é pequena, quando comparada ao volume total do sistema, mas pode ser grande em relação ao prisma de maré. Nos meses de inverno a descarga fluvial nos fiordes é muito pequena ou ausente (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE., 2002).

3.5.2.3 “Rias”

Os estuários do tipo “rias” são representados pelos vales fluviais afogados durante a última transgressão marinha, porém em relevos altos. O rio foi inundado com a elevação do nível do mar, formando assim esse estuário típico de regiões montanhosas de alta latitude, em particular na Galicia (Espanha). Geralmente a “ria” apresenta uma morfologia irregular com tributários que drenam grande parte da região adjacente. A forma geométrica pode ser de um canal recortando regiões montanhosas ou com morfologia afunilada e aumento da profundidade em direção ao mar (MIRANDA op. cit.).

3.5.2.4 Construídos por Barra

Esses sistemas possuem profundidades não superiores a 20-30 m, e podem apresentar canais e lagunas extensas no seu interior. O rio ou sistema de rios que alimentam esse estuário, além de apresentarem descarga variável de acordo com a estação do ano, pode transportar grande concentração de sedimentos em suspensão, ocasionando alterações sazonais na geometria da entrada (barra). Existem também sistemas em que, durante as épocas de enchente, a barra pode ser erodida completamente, restabelecendo-se novamente quando cessa o período de chuvas mais intensas. Esse grupo de estuário geralmente formou-se em regiões tropicais, sendo referido na literatura pela terminologia estuarino-lagunar, como o da região de Cananéia-Iguape (MIRANDA op. cit.).

Segundo Silva (1998), esses estuários apresentam um pequeno prisma de maré, com pouca entrada de água doce, se comparado a outro tipo estuarino, sendo característico de áreas costeiras microtidais. São parcialmente estratificados a bem misturados, dependendo da magnitude da variação sazonal na entrada da água doce. Nesse tipo de estuário, devido a sua baixa profundidade, os ventos desempenham um importante papel no processo de mistura das águas.

3.5.2.5 Deltas

Os deltas podem ser classificados como: delta estuarino ou delta de enchente, e como delta de vazante ou simplesmente delta. O delta estuarino ou delta de enchente são estuários característicos de regiões de macro ou hipermaré, com ação moderada ou grande de ondas e com transporte fluvial de alta concentração de sedimentos em suspensão, o processo de sedimentação recente favoreceu o crescimento de ilhas na parte interior do estuário. No litoral norte brasileiro, temos como destaque, o delta tropical do rio Amazonas, com geometria afunilada.

Por outro lado, nas mesmas condições da concentração de sedimentos, mais em regiões de micromaré, com ação de ondas de energia moderada, a sedimentação tem lugar na plataforma continental interna, formando bancos de areia e ilhas, dando origem ao delta de vazante ou simplesmente delta, dentre os quais pode-se citar o delta do rio Mississippi, no golfo do México. Os deltas de enchente e de vazante são dominados por maré e descarga fluvial, respectivamente. De acordo com a classificação morfológica de Fairbridge (1980)⁴ apud Miranda op. cit., encontram-se os esquemas dos estuários citados (Figura 7) .

⁴ FAIRBRIDGE, R. W., The estuary: its definition and geodynamic cycle. In: OLAUSSON, E., AND CATO, I. (EDS.), *Chemistry and biogeochemistry of estuaries*. p. 1-36. 1980.

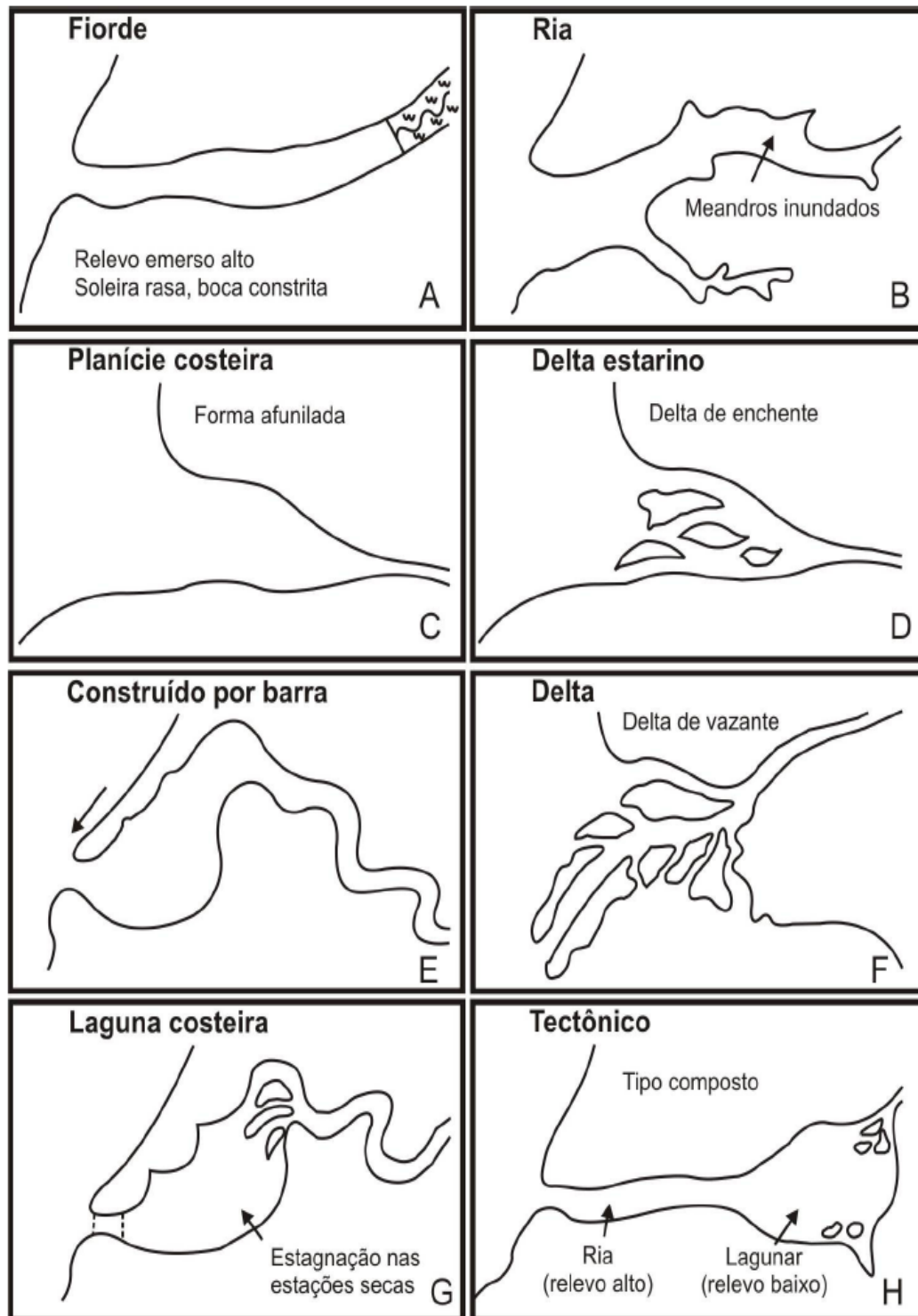


Figura 7: Tipos fisiográficos de estuários, adaptado de Fairbridge (1980) apud Miranda; Castro; Kjerfve (2002).

3.5.3 Classificação dos Estuários pela Circulação das Águas

Este sendo um ambiente de transição localizado entre o continente e o oceano, e sofrendo a influência da descarga fluvial, ondas, marés e também dos ventos podem ser classificados através da circulação de suas águas. Todos os tipos geomorfológicos de estuários podem apresentar os diversos tipos de circulação das águas (CUNHA, 2005).

O ambiente estuarino pode ser subdividido em três zonas, com base na interação entre o prisma de maré e a descarga fluvial, fatores responsáveis pela circulação e padrão de sedimentação, que são: Zona Estuarina Fluvial (região onde a salinidade das águas é sempre menor que 1 psu, mas os efeitos da maré ainda são observados); Zona Estuarina (região que apresenta uma variação de salinidade entre 1 a 35 psu e onde a zona de turbidez máxima pode ser observada, normalmente na região de salinidade entre 4 a 10 psu); e Zona Estuarina Costeira (localizada na região costeira adjacente onde a salinidade observada coincide com a salinidade oceânica).

Pela circulação das águas os estuários podem ser classificados como: estuário tipo cunha salina, tipo bem misturado e parcialmente misturado.

3.5.3.1 Estuário tipo Cunha Salina

As características referentes a este estuário foram analisadas por vários pesquisadores, dentre os trabalhos pioneiros pode-se citar Farmer; Morgan (1953); Sanders; Maximon; Morgan. (1953). Neste estuário, as massas de água da camada superior são quase isohalinas com salinidade muito baixa, e o movimento do estuário abaixo tem velocidade muito maior do que o movimento do estuário acima na cunha salina. As massas de águas da cunha salina, no entanto, apresentam-se quase homogêneas e com salinidade muito próxima à da região adjacente, gerando um acentuado gradiente vertical de salinidade (haloclina) na interface entre essas camadas. O processo físico que determina a continuidade do movimento é o *entranhamento*, gerando movimentos verticais ascendentes muito lentos e com transporte de água do mar para a camada superior muito pequena (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE.,2002).

Segundo Amaral (2003), no estuário de cunha salina (Figura 8) a salinidade das águas de superfície é bem menor que a salinidade das águas do fundo, apresentando uma diferença acentuada no perfil vertical de salinidade. Não há mistura de águas doce e salgada. A cunha salina não se movimenta. A grande maioria dos sedimentos trazida pelos rios é levada para a região oceânica na camada de água superior e pouca sedimentação ocorre dentro do corpo estuarino. Para que este tipo de estratificação ocorra, é necessário que as velocidades e a energia sejam baixas.

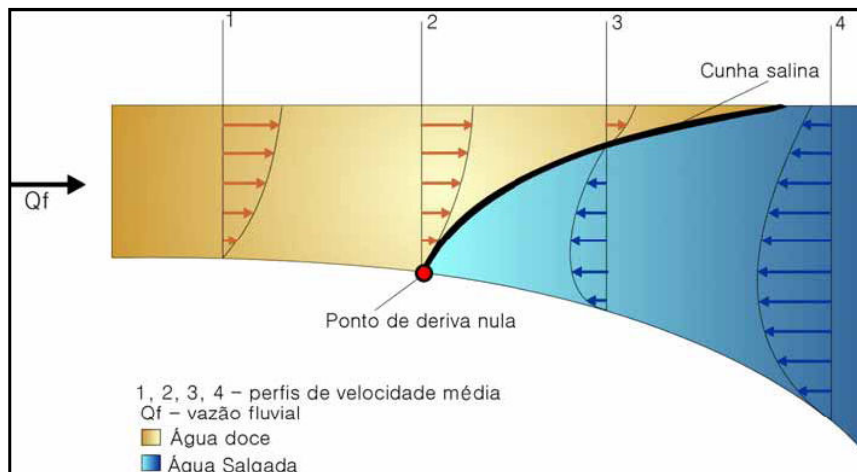


Figura 8: Esquema de um estuário altamente estratificado (AMARAL, 2003).

Esses estuários são característicos de regiões de micromaré e grande descarga fluvial, de tal modo que a velocidade da massa de água da camada acima da haloclina é praticamente igual à velocidade gerada por essa descarga. A passagem sul do delta do rio Mississippi (EUA) é um estuário do tipo cunha salina e satisfaz a condição de quase estacionaridade durante os ciclos de maré (WRIGHT, 1970⁵ apud MIRANDA; CASTRO; KJERFVE.,2002). Encontram-se também, estuários do tipo cunha salina em regiões de mesomaré, como o do rio Fraser (Vancouver, Canadá), no qual a distância de penetração da cunha salina varia consideravelmente ao longo do estuário durante o ciclo de maré, movendo-se em direção ao equilíbrio em resposta às variações do nível do mar. Com relação ao perfil vertical da salinidade, que é altamente estratificada nas

⁵ WRIGHT, L.D.. Circulation, Effluente Diffusion and sediment Transport, Mouth of South Pass, Mississippi River Delta. Baton rouge, Louisiana state University Press. 1970 .56 f.

estofas de enchente e vazante, evolui para a condição fracamente estratificada durante a vazante e a massa de água mais salina fica confinada nas proximidades do fundo (MIRANDA op. cit.).

Quando o estuário é dominado pelo rio, ou seja, a influência fluvial é mais forte que a influência de maré (Figura 9), neste tipo de estuário a salinidade das águas de superfície é bem menor que a salinidade das águas do fundo, apresentando uma diferença acentuada no perfil vertical de salinidade. A grande maioria dos sedimentos trazida pelos rios é levada para a região oceânica na camada de água superior e pouca sedimentação ocorre dentro do corpo estuarino (CUNHA, 2005).

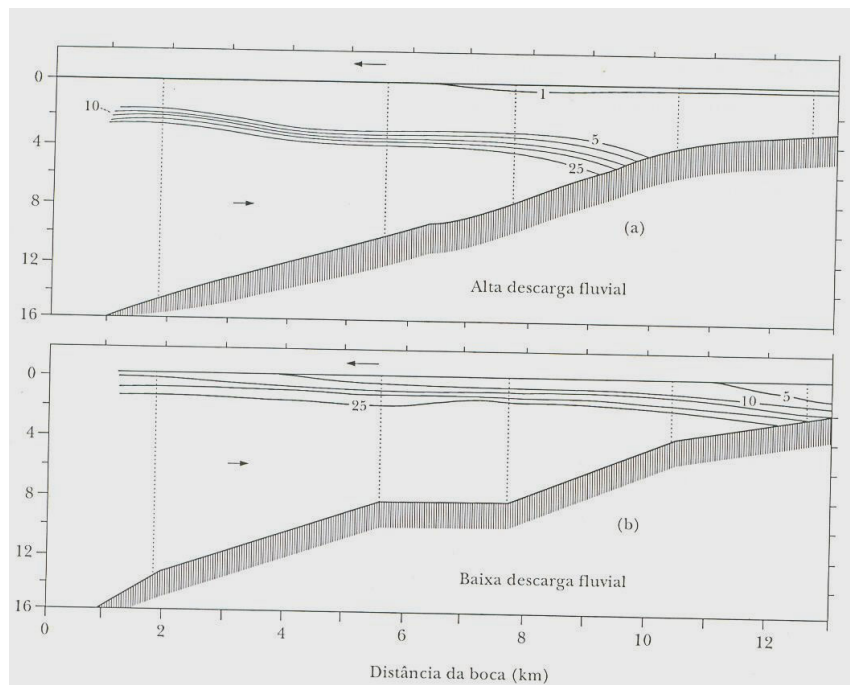


Figura 9: Estratificação de um estuário tipo cunha salina em condições de alta (a) e baixa (b) descarga fluvial (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE.,2002).

3.5.3.2 Estuário tipo Bem Misturado

Esse estuário é característico de regiões com pequena descarga fluvial, sendo que os seus movimentos e processos de mistura são dominados pela maré. O gradiente vertical de salinidade (densidade) é praticamente desprezível, ou seja, a salinidade das

águas superficiais é igual à salinidade das águas do fundo, e a condição de estacionaridade pressupõe que a descarga fluvial e a maré permaneçam constantes e não variem de um ciclo de maré a outro (Figura 10). Segundo Cunha (2005), nesse estuário a salinidade da água só varia lateralmente, sendo mais alta na região oceânica e mais baixa em direção ao continente, por exemplo, tem-se Delaware Bay (EUA). Na prática, essa condição é simulada por valores médios durante ciclos completos de maré e o movimento resultante é unidirecional e com sentido estuário abaixo (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE.,2002).

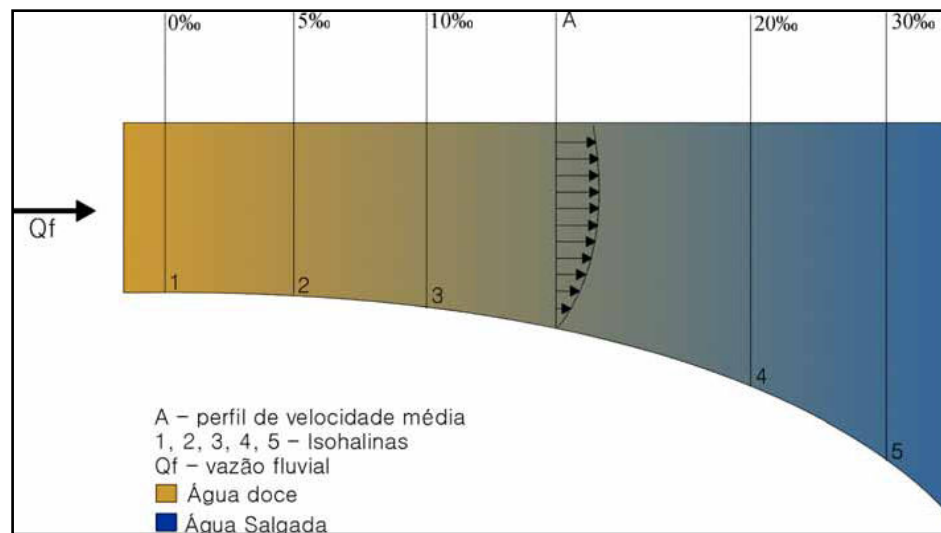


Figura 10: Esquema simplificado de um estuário bem misturado (AMARAL, 2003).

3.5.3.3 Estuário tipo Parcialmente Misturado

Este tipo de estuário ocorre quando as influências fluviais e de maré são comparáveis, o estuário é classificado como parcialmente estratificado ou parcialmente misturado (Figura 11). Neste estuário, o aumento de salinidade se dá de maneira gradativa tanto na escala vertical quanto na horizontal. Exemplos são os diversos estuários situados na costa leste dos Estados Unidos, o estuário do Rio Tamar, na Inglaterra.

Os Estuários de cunha salina e parcialmente estratificados podem apresentar uma feição sedimentar muito distinta, denominada de zona de turbidez máxima. Nesta região

é observada uma concentração de sedimentos em suspensão que pode ser cerca de 100 vezes superior às regiões à montante e à jusante. A zona de turbidez máxima pode ser encontrada em estuários de variados tamanhos e formas e submetidos a distintos tipos de marés, como em estuários de meso-maré como Winyah Bay e Rio Hudson, localizados na costa leste dos Estados Unidos, e macro-maré como o Rio Columbia, na costa oeste dos Estados Unidos e o rio Gironde, França. Na zona de turbidez máxima, um grande volume de sedimento em suspensão pode ficar retido dentro do corpo estuarino e passar por várias etapas antes da deposição final (CUNHA, 2005).

É importante dizer que como a circulação das águas de um estuário depende diretamente das condições hidrodinâmicas reinantes, por exemplo, um estuário parcialmente misturado pode se tornar em um estuário bem estratificado ou de cunha salina. Esta seria uma consequência direta da mudança sazonal da descarga fluvial, numa época de grande precipitação. Além disso, um mesmo estuário pode apresentar dois tipos diversos de estratificação das suas águas simultaneamente. Por exemplo, a Baía de Guanabara possui águas bem misturadas na sua entrada enquanto que na região da ponte Rio-Niterói, as águas são classificadas como parcialmente misturadas (CUNHA, 2005).

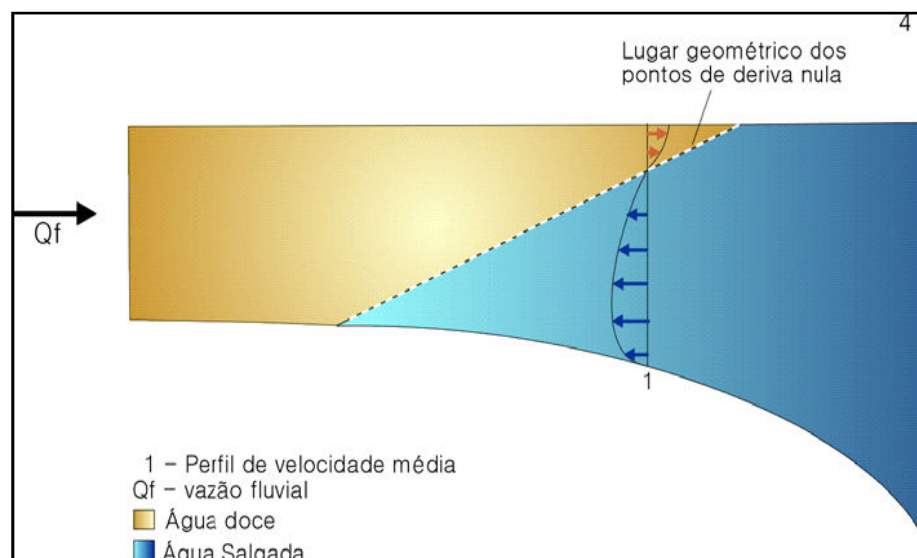


Figura 11: Esquema de um estuário parcialmente estratificado (AMARAL, 2003).

3.6 PARÂMETROS QUE ATUAM NA CIRCULAÇÃO ESTUARINA

Os principais parâmetros que interferem na circulação estuarina são: salinidade, densidade, e, em menor proporção, a temperatura e o pH.

3.6.1 Salinidade

A salinidade é uma propriedade física que representa a medida da concentração dos sais dissolvidos ionicamente na água, ou seja, é razão da massa dos sais (m) pela massa de água que os contém (M). Além de sua importância para a caracterização ecológica do estuário, essa propriedade, tal como a temperatura, está intimamente relacionada ao cálculo da densidade da massa de água estuarina. No estuário, a salinidade apresenta grandes variações no espaço e no tempo, principalmente devido aos processos advectivo e difusivo, além da descarga fluvial; as trocas de massa do corpo de água estuarino com a atmosfera (precipitação-evaporação), em geral não desempenham um papel muito importante sobre a variação dessa propriedade (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE.,2002).

A salinidade no ambiente estuarino apresenta-se geralmente de maneira irregular, devido as grandes flutuações diárias de entrada e saída de água oceânica e continental que este ambiente está submetido. O padrão de distribuição esperado para a salinidade no ambiente estuarino são valores elevados na preamar e mais baixos na baixa-mar, devido à perda de águas salinas do oceano, fazendo com que a área fique com um maior aporte de águas fluviais. Isso ocorre porque, durante a preamar, há uma penetração de águas marinhas no estuário, em sentido oposto ao fluxo do rio, efeito este denominado de “maré salina” (ESCHRIQUE, 2001).

Segundo Pinheiro (1987), os principais fatores que interagem na penetração da maré salina são as oscilações das marés, a morfologia do estuário, a vazão de água doce fluvial, a evaporação e a precipitação pluviométrica na bacia estuarina.

A diluição da água do mar pela descarga fluvial ocasiona variações de baixa frequência do gradiente longitudinal de salinidade, que por sua vez vai contribuir para a estrutura dinâmica do estuário.

A descarga fluvial, além de diluir a água do mar gerando gradiente longitudinal de salinidade, é responsável por mais componente de baixa frequência do movimento da massa de água estuarina. Eliminando-se o movimento de natureza barotrópico gerado pela maré, o movimento resultante de baixa frequência, impulsionado pelo gradiente longitudinal de salinidade (estuário acima) e pela descarga de água doce (estuário abaixo), é bidirecional em duas camadas. Esse movimento é denominado de circulação gravitacional, corrente de gravidade ou ainda circulação estuarina clássica.

De acordo com Feitosa (1988), a salinidade é um fator preponderante na distribuição dos organismos aquáticos, constituindo-se em uma barreira ecológica para determinadas das espécies. A importância deste parâmetro no ambiente estuarino, está relacionada a sua ação direta nos processos fisiológicos dos animais aquáticos, como, por exemplo, a taxa de metabolismo e o ciclo reprodutivo.

Nas regiões estuarinas, de acordo com Moura (1991), as condições locais de chuva, evaporação, drenagem terrestre e o grau de mistura entre água fluvial e costeira, influenciam a amplitude e o gradiente salino. Grande parte da energia que determina a intensidade da mistura das diferentes massas de água nos estuários é gerada pelas correntes de maré, que atuam em conjunto com outros fatores como, a correnteza e vazão do rio e a ação dos ventos (MOREIRA, 1994).

A salinidade das águas interiores apresenta grande amplitude de valores, podendo variar desde valores menores do que 0,5 (água doce), passando por diferentes graus de salobridade (oligohalina e mesohalina) até valores maiores do que 35 (águas hipersalinas). Portanto, águas estuarinas podem apresentar não muito frequentemente salinidade superior à água do mar, no entanto, com composição iônica diferenciada (ESTEVES, 1988).

Segundo Esteves (1988), as grandes diferenças entre valores de salinidade nos ecossistemas aquáticos são resultantes de vários fatores; dentre estes se destacam: (a) A intensidade diferenciada de intemperização e composição das rochas e solos da bacia de drenagem; (b) O grau de influência e composição das águas subterrâneas; (c) A precipitação atmosférica; (d) O grau de influência marinha - através do lençol freático, aerosol marinho ("spray marinho"), etc; (e) Balanço entre a evaporação e a precipitação.

Para classificar os estuários, alguns autores (PRITCHARD, 1955; entre outros), classificaram estes usando a distribuição da salinidade em relação à profundidade como critérios (Figura 12), que são: altamente estratificados (Figura 13), parcialmente misturados (Figura 14) ou bem misturados (Figura 15).

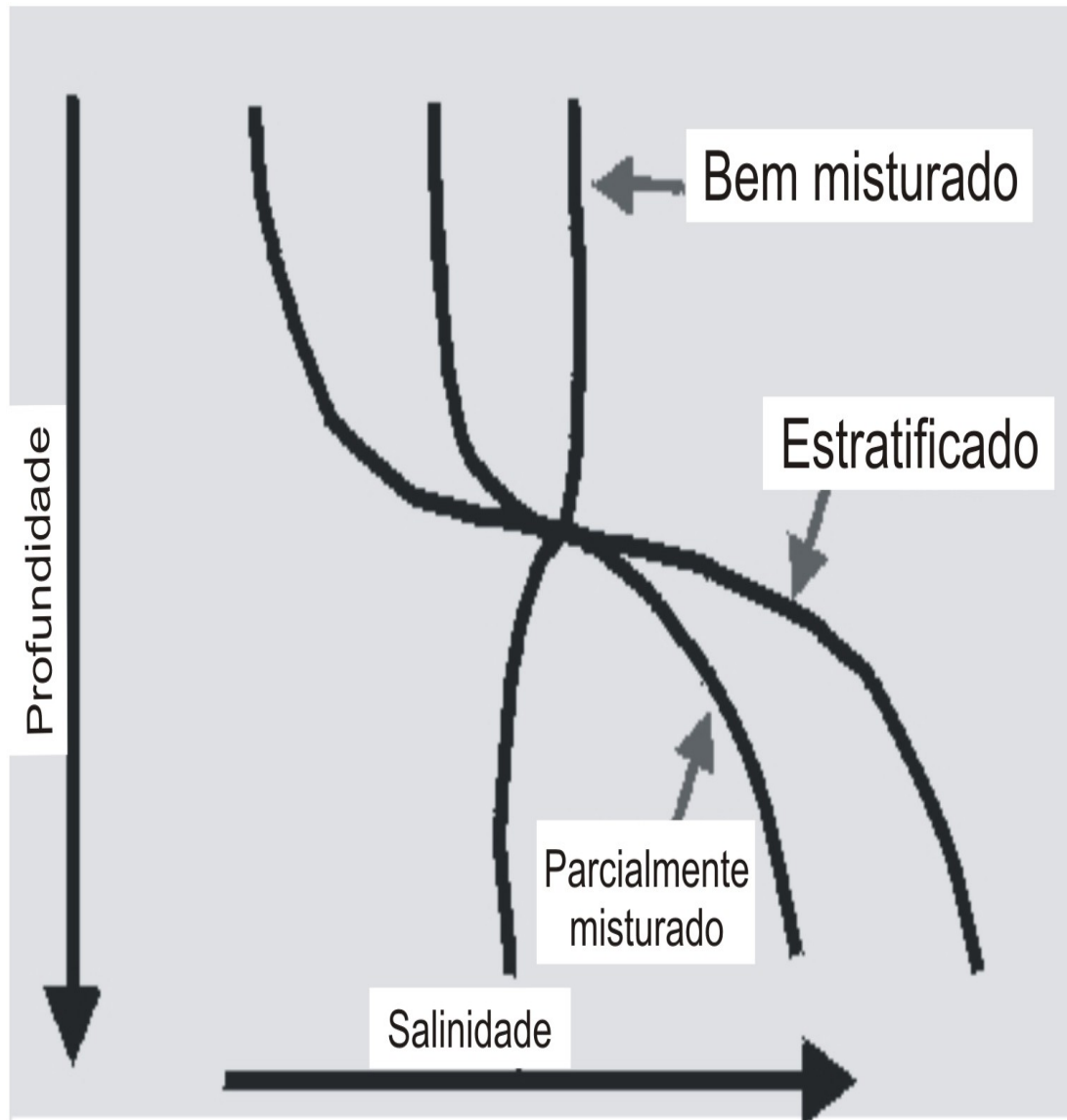


Figura 12: Estrutura vertical da salinidade, a classificação do estuário depende da diferença da salinidade entre a superfície e o fundo (CLASSIFICATION..., 2007).

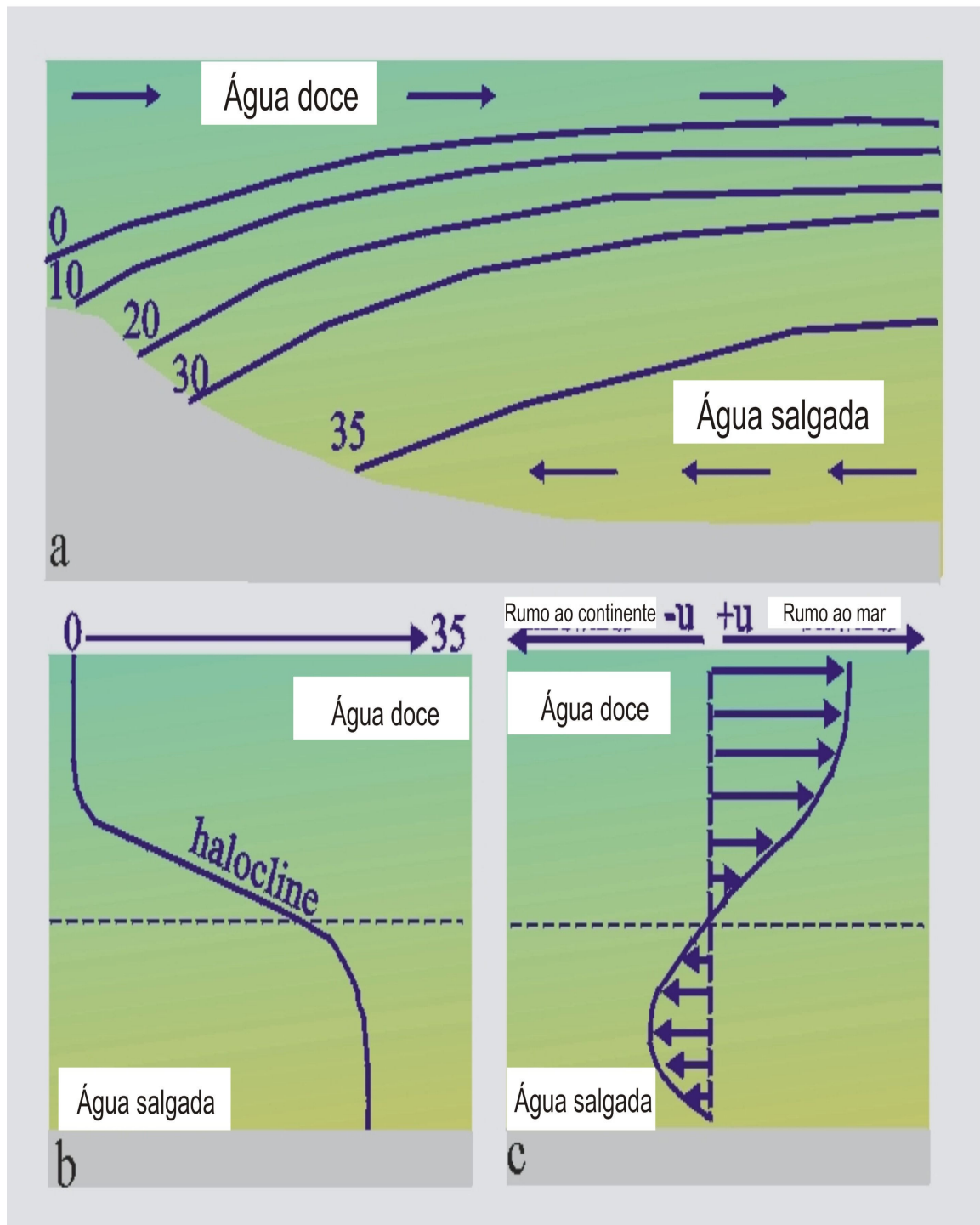


Figura 13: Representação esquemática da circulação da água e do gradiente de salinidade do estuário altamente estratificado. (a) mostra no perfil longitudinal a circulação da água. As setas horizontais mostram o fluxo residual; seawards na superfície devido à mistura e o fluxo do rio, e landwards no fundo devido a mistura vertical através da relação da água do rio e água do mar. As linhas representam o gradiente de salinidade no (b) O perfil Salinidade-profundidade com o destaque da haloclina (c) O perfil de velocidade-profundidade mostrando o fluxo residual (CLASSIFICATION..., 2007).

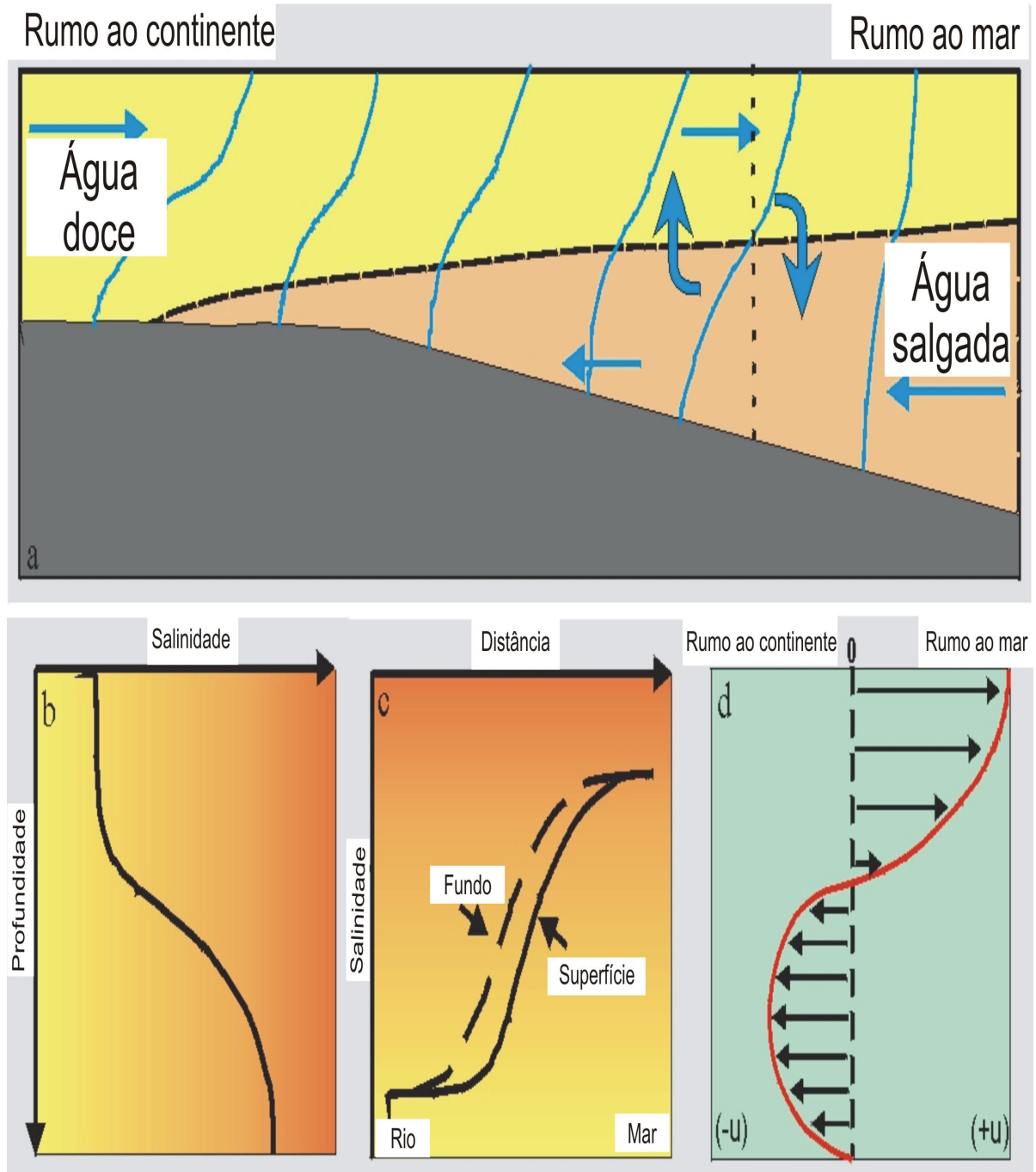


Figura 14: Representação esquemática da circulação da água, e do gradiente de salinidade em um estuário parcialmente misturado. (a) Seção longitudinal que mostra a circulação da água e o gradiente de salinidade. A linha sub-horizontal tracejada está a uma profundidade em que não está nenhum fluxo residual horizontal, isto é, seawards ou landwards (b) O Perfil de Salinidade-profundidade ao longo da linha vertical tracejada. (c) Diferença de Salinidade entre a superfície e o fundo ao longo do estuário indo do rio em direção ao mar. (d) a linha tracejada mostra o Perfil da Velocidade-profundidade (CLASSIFICATION ..., 2007).

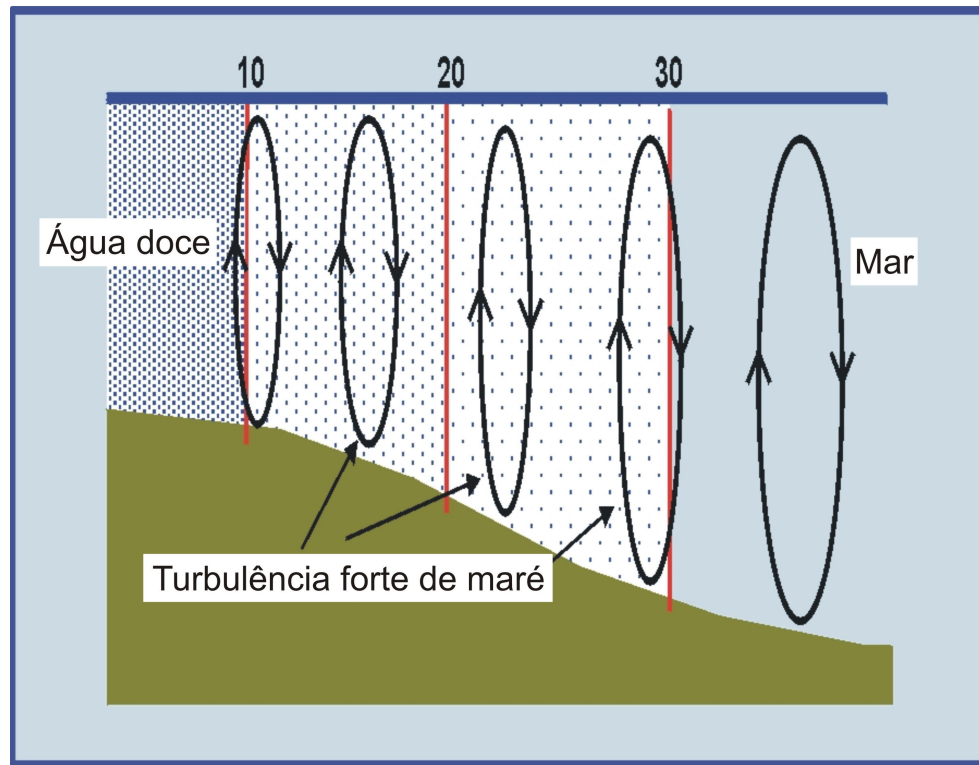


Figura 15: Representação esquemática da circulação da água, da salinidade e turbulência da maré no estuário bem misturado. As elipses representam a turbulência da maré, note que a salinidade é uniforme da superfície ao fundo e também vai aumentando do rio em direção ao mar (CLASSIFICATION..., 2007).

3.6.2 Densidade

Por definição, tem-se que a densidade de uma substância é a relação entre a massa e o volume que ele ocupa. A 4°C, a água tem a densidade considerada padrão $d=1000 \text{ g/cm}^3$ (ESTEVES, 1988).

Os principais fatores que influenciam a densidade da água são: salinidade, temperatura e pressão. A salinidade pode ter grande influência sobre a estratificação dos corpos d'água, visto que a densidade da água aumenta com a elevação da concentração de sais. Com relação à temperatura, a água tem comportamento diferente dos outros líquidos, pois sua densidade não aumenta progressivamente com o abaixamento da temperatura, mas alcança seu máximo valor a aproximadamente 4°C ($1000 \text{ g/dm}^3 = 1$); abaixo desta temperatura sofre uma queda lenta para, em seguida, cair bruscamente. A pressão tem efeito indireto sobre a densidade da água, uma vez

que para cada 10 atm (= 100m de profundidade) de pressão, ocorre abaixamento de 0,1° C (ESTEVES, op. cit.).

A mistura de águas doces e salgadas no estuário provoca a distribuição da densidade que preside aos modelos característicos de estuários. A densidade da água natural sobe com o aumento do conteúdo salino. Tipicamente, a densidade de um estuário aumenta de forma mais ou menos regular, com a salinidade, da cabeceira para o mar, e aumenta também com relação à profundidade. Logo, as águas fluviais são menos densas que as águas oceânicas (PRITCHARD, 1981).

3.6.3 Temperatura

A temperatura estuarina nas regiões tropicais apresenta um valor elevado e grande estabilidade durante o ciclo sazonal, uma vez que depende do período e grau de insolação, variação meteorológica e da profundidade do estuário, sendo estas condicionadas por períodos de maior ou menor nebulosidade (FLORES MONTES, 1996). Porém, Segundo Santos (2000), a variação de temperatura no ambiente estuarino é mais elevada que nas águas costeiras e oceânicas, principalmente quando o estuário é pouco profundo e grande parte do substrato fica exposto.

Para Moura (1991), as oscilações da temperatura intervêm na viscosidade da água e influi na sedimentação das partículas. Entretanto, as trocas de calor com a atmosfera nas regiões tropicais se processam de forma lenta e as oscilações de temperatura são de pequena amplitude em relação às águas estuarinas, tendo a temperatura um comportamento estável para o trópico.

A temperatura da água constitui um fator controlador para a vida e para os processos químicos que se realizam no ambiente estuarino. É responsável, ainda, pela determinação dos padrões que controlam as taxas de metabolismo e crescimento do fitoplâncton, que representa a base de toda a cadeia ecológica ligada aos estuários (PINHEIRO, 1987).

Associada ao vento, a temperatura atua como agente determinante dos padrões de circulação estuarina, influenciando ainda na velocidade das reações químicas, na solubilidade e disponibilidade de gases do corpo d'água (PINHEIRO, op. cit.).

Segundo Pinheiro (1987) o calor oriundo da insolação é mais bem dissipado em estuários nos momentos de baixa-mar quando a lâmina d'água é menor.

3.6.4 pH

Segundo Millero (1986), o pH do ambiente aquático prevê o estado de equilíbrio ácido-base, a especiação dos metais, e os processos biológicos e cinéticos. Este se encontra intimamente relacionado com o complexo de dióxido de carbono, que se combina quimicamente com a água para formar H_2CO_3 , o qual por sua vez, reage para formar carbonatos e bicarbonatos. Estes compostos agem como tampão, fazendo com que o pH varie entre 5,5 e 8 no meio ambiente estuarino.

O pH pode ser considerado como uma das variáveis ambientais mais importantes, ao mesmo tempo em que, uma das mais difíceis de interpretar. Esta complexidade na interpretação dos valores de pH se deve ao grande número de fatores que podem influenciá-lo. Na maioria das águas estuarinas o pH é influenciado pela concentração de íons H^+ originados da dissolução do ácido carbônico, que gera valores baixos de pH, e das reações de íons carbonato e bicarbonato com a molécula de água, que elevam os valores de pH para a faixa alcalina (ESTEVES, 1988).

O potencial de hidrogênio iônico nas águas estuarinas se constitui num dos fatores ecológicos que age como controlador das atividades respiratórias dos animais e plantas e regulador dos principais processos metabólicos nos seres vivos (PINHEIRO, 1987). Ainda Segundo este autor, sobressaem-se dois fatores controladores das variações do pH nas águas do estuário Guajará: o regime sazonal e os ciclos de marés. A análise das variações de pH das águas guajarinas durante o ciclo das marés mostra que ocorrem oscilações importantes, de baixo período, dentro de uma faixa de ordem de até 1,5. Ao que tudo indica, estas variações são conseqüências dos processos de mistura das águas relacionados à dinâmica estuarina e dependem das oscilações da maré dinâmica. É provável, ainda, que estas variações bruscas de pH estejam ligadas à interferência de águas poluídas provenientes da cidade de Belém (águas pluviais e de esgoto).

A entrada do CO_2 do ar em águas pouco tamponadas tende a baixar o pH, tanto mais quanto maior seja a pressão parcial de CO_2 . Simultaneamente atuam na água substâncias orgânicas com caráter ácido, especialmente as substâncias húmicas. Em consequência disso, encontram-se entre as águas amazônicas os valores mais altos de concentração de íons H^+ , as maiores concentrações de substâncias orgânicas e a cor mais escura (MENEZES, 1999). Assim, os valores de pH são baixos, o que é um indício da ausência de tampões na água, permitindo que tanto o gás carbônico livre como os ácidos fracos de complexos húmicos ou similares atuem sem restrições sobre o grau de acidez (MENEZES, 1999).

3.7 ESTUÁRIOS BRASILEIROS

A costa brasileira mostra uma grande evidência de progradação da linha de costa e preenchimento dos vales fluviais por ter sido submetida a uma regressão da ordem de 3,5 m nos últimos 6000 anos. Alguns dos grandes “deltas” brasileiros mostram evidências geomorfológicas da presença de estuários na retaguarda das barreiras arenosas, como por exemplo, aqueles associados aos rios Paraíba do Sul, Doce e Jequitinhonha (LESSA, 2005). Evidências de estuários extintos são encontradas também em rios desprovidos de formas deltaicas em sua embocadura, como o rio Itajaí-Açu em Santa Catarina (CARUSO JUNIOR, 1993).

Deste modo, estuários clássicos de planície costeira no Brasil, associados às desembocaduras fluviais, são encontrados na costa paraense. Apesar da descida do nível marinho e do estabelecimento de largo processo progradacional costeiro, ainda existem grandes estuários no Brasil, nos quais se situa a maioria dos portos marítimos nacionais.

3.7.1 Localização dos Estuários Brasileiros

De acordo com Lessa (2005), uma investigação preliminar na costa brasileira utilizando imagens de satélite com escalas variando entre 1:25.000 e 1:50.000, permitiu avaliar a distribuição espacial dos estuários com área superior a 100 km^2 . Foram

identificados um total de 27 estuários, sendo 25 na região Norte, 11 na região Nordeste, 4 na região Sudeste e 4 na região Sul (Lagoa dos Patos inclusa) (Figura 16).

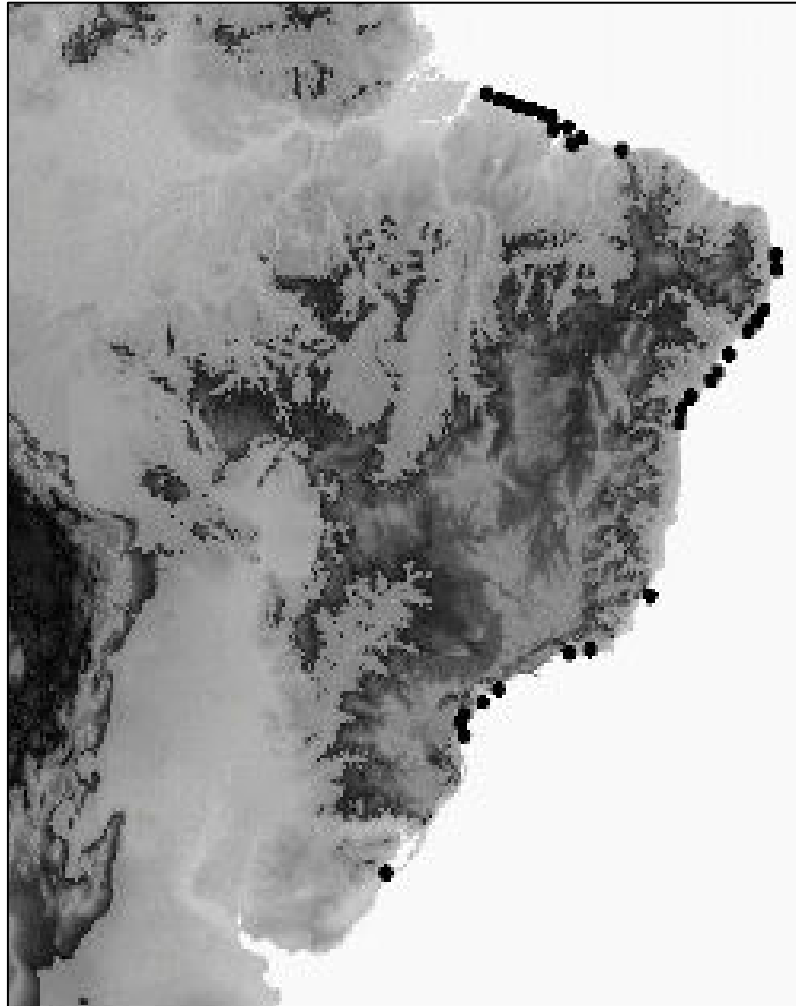


Figura 16: Localização dos 26 estuários com mais de 100 km² identificados na costa brasileira (LESSA, 2005).

A existência de grandes estuários na costa brasileira parece estar condicionada, além de uma relativamente pequena descarga sedimentar, a locais em subsidência associados à falhamentos. Poucos estudos foram realizados com o objetivo de avaliar a existência de movimentos verticais recentes nos estuários, mas é fato de que todos estão associados a grandes estruturas morfotectônicas. As poucas evidências de subsidência das regiões estuarinas são fornecidas pelos trabalhos de Martin et al. (1986) e Carvalho (2000) para a Baía de Todos os Santos, onde um rebaixamento de

até 3 m é sugerido nos últimos 5000 anos. A subsidência estaria associada a blocos dentro do graben do Recôncavo. Souza-Filho et al.. (2005) sugerem que o nível relativo do mar não tenha ultrapassado o nível atual durante o Holoceno. A subsidência de um graben costeiro que se estende até o Maranhão estaria assim associado à presença dos inúmeros estuários da costa paraense. Com isso, sugere-se que todos os grandes estuários brasileiros estejam associados a blocos sofrendo, em maior ou menor grau, processos de subsidência, e que este tenha sido seja o fator mais importante para a sua preservação.

3.7.2 Diferenças no Padrão de Preenchimento Sedimentar dos Estuários

As informações sobre a distribuição espacial das fácies sedimentares superficiais e sub-superficiais nos estuários brasileiros são poucas. Com as informações disponíveis na literatura (LESSA; MEYERS; MARRONE, 1998, LESSA et al., 2000, KJERFVE et al., 1997) observa-se que as baías de Paranaguá, Guanabara e Todos os Santos apresentam areias marinhas junto á embocadura e uma fácies lamosa capeando uma significativa área em suas metades internas. No caso das baías de Paranaguá e Todos os Santos, foram ainda mapeados deltas fluviais de cabeceira, e ainda no caso da Baía de Todos os Santos uma fácies carbonática autóctone no seu corpo central. Dados geológicos de subsuperfície permitem sugerir um padrão similar, e comum a outros estuários no mundo, de evolução sedimentar: sedimentos arenosos marinhos associados à última transgressão estão sendo recobertos por lama estuarina, que alcança espessura superior a 10 m.

3.7.3 Hidrodinâmica Estuarina

Conforme Lessa (2005), os registros maregráficos mostram a presença de muitos estuários hipsincrônicos, onde ocorre a amplificação da altura de maré no interior do estuário. Porém, dados existentes na literatura e a observação de deltas de maré vazante nas imagens de satélite permitem sugerir que a maior parte dos estuários apresenta fluxos de maré vazante mais fortes do que os de maré enchente. Essa

particularidade da circulação sugere uma pequena contribuição de sedimentos marinhos na sedimentação dos estuários. A existência de forte corrente de maré vazante causa erosões localizadas e a formação de janelas estratigráficas, com a exumação de depósitos sedimentares mais antigos. A identificação destes depósitos é importante em trabalhos que investigam tendências de dispersão de sedimentos e a ecologia submarina.

3.7.4 Estuários do Nordeste do Pará

O litoral paraense estende-se por cerca de 600 km exibindo numerosos ecossistemas. A ocorrência desses ecossistemas na costa brasileira, em geral, é principalmente dependente da morfologia costeira, das condições climáticas locais e dos processos hidrodinâmicos. Essa diversidade tem levado vários grupos de pesquisa a realizar programas costeiros institucionais, alguns em cooperação internacional, sobre o conhecimento científico da margem continental brasileira. Tais programas têm intensificado aspectos oceanográficos físicos, químicos, biológicos e geológicos, e têm sido realizados desde a década de 60 até a atualidade (COSTA, 2004).

O programa AMASSEDs, desenvolvido nas décadas de 80 e 90, constituiu-se um estudo multidisciplinar, envolvendo universidades brasileiras e norte-americanas, e investigando processos oceanográficos (geológicos, físicos, químicos, biológicos) ocorrentes no sistema de dispersão do rio Amazonas, notadamente na plataforma continental. Considera-se que, em geral, os principais agentes que regem os mecanismos de circulação das águas nos oceanos e na atmosfera próxima são os movimentos de rotação e translação do planeta e os aportes de energia solar, responsáveis pelos regimes meteorológicos (envolvendo, principalmente, temperatura, precipitação pluviométrica, evaporação, ventos), ondas, correntes litorâneas (CHESTER, 1990; DEGENS; KEMPE; RICHEY., 1991).

Os estuários que abrangem à mesorregião do nordeste paraense (compreende o setor da Costa Atlântica do Salgado paraense), englobando os municípios de Viseu, Augusto Corrêa, Bragança, Tracuateua, Salinópolis, São João de Pirabas, Primavera, Santarém Novo, Maracanã, Marapanim, Magalhães Barata, São Caetano de Odivelas,

Vigia, Curuçá, São João da Ponta, Quatipuru e Colares (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2006).

A dinâmica costeira condiciona diretamente a construção geomorfológica da linha de costa. Deste modo, a costa norte é batida por ondas geradas por ventos alísios de NE, predominantemente. Por outro lado, no que se refere ao regime de marés, a costa norte brasileira apresenta o fenômeno das macromarés (alturas acima de 4m); alguns pesquisadores registraram alturas ainda mais elevadas até um máximo de 12m (BEARDSLEY et al., 1995). Essas marés exercem um papel importante na gênese da cobertura de sedimentos móveis e na configuração geomorfológica do litoral (BRASIL MINISTÉRIO DA MARINHA, 1972).

A linha de costa da região nordeste do Pará é extremamente recortada, caracterizada por uma sucessão de estuários pouco profundos, separados por pontas arenosas (restingas) e/ou lamosas (litoral de rias).(MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE op. cit.).

Uma das características marcantes, no que diz respeito à circulação das águas costeiras, é a manifestação de diferentes salinidades. A apreciável descarga hídrica do rio Amazonas para o oceano Atlântico manifesta-se tanto no período de “vazante” (menos chuvoso ou estiagem), quanto no de “enchente” (período mais chuvoso). Nesse período, a vazão registrada é da ordem de $2 - 2,5 \times 10^5 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, enquanto na estiagem é de $1 - 1,25 \times 10^5 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (GEYER et al., 1996). Há, em consequência, forte influência nessas águas costeiras, produzindo sensíveis variações de salinidade (DIÉGUES, 1972; NITTROUER; DEMASTER, 1986; GEYER et al., 1996).

Diégues (1972) mostra o deslocamento de massas de água, sob influência da Corrente das Guianas (também conhecida como Corrente Norte Brasileira), registrando valores de salinidade desde 12‰ (às proximidades da foz do rio Amazonas) até 36‰ (mais ao largo da costa). Por outro lado, durante o período de “vazante”, as águas oceânicas penetram no continente adentro, pela calha do rio Amazonas (DIÉGUES, 1972), fato esse também registrado por diversos outros pesquisadores (GIBBS, 1967; NITTROUER; DEMASTER, 1986)

4. CARACTERIZAÇÃO REGIONAL E DA ÁREA DE ESTUDO

4.1 LOCALIZAÇÃO E ACESSO

O município de Maracanã localiza-se a nordeste do Estado do Pará (Figura 17), inserido na zona do Salgado, com uma área que abrange aproximadamente 895 Km². Possui limite ao norte com o Oceano Atlântico, a leste com os municípios de Salinópolis e Santarém novo, ao Sul com o município de Igarapé-Açu e a oeste com os municípios de Magalhães Barata e Marapanim (LEITE; FILHO; JUNIOR., 1992).

O acesso terrestre é feito partindo-se de Belém, utilizando-se a BR-316 até o município de Castanhal, onde se passa a utilizar a PA-127 até a sede do município. O acesso fluvial é feito através de barco ou lancha, pela baía do Marajó, chegando-se pelo litoral até a baía de Maracanã (LEITE op cit.).

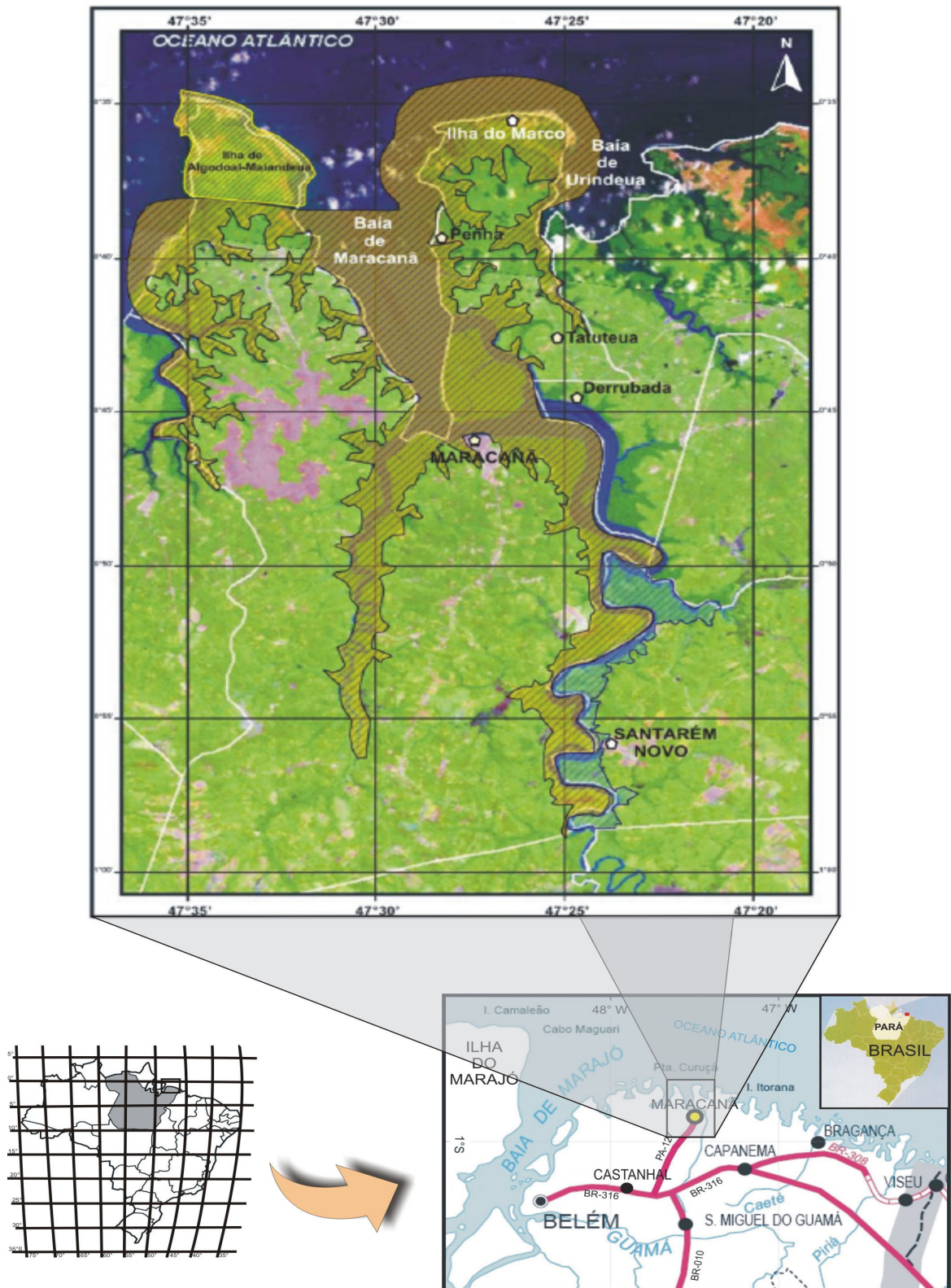


Figura 17: Mapa de Localização do estuário de Maracanã.

4.2 CONDIÇÕES CLIMÁTICAS E METEOROLÓGICAS

4.2.1 Tipo Climático

O clima na região nordeste do Pará é do tipo Am (Tropical Úmido), que é caracterizado por ser quente e úmido (Clima Equatorial Amazônico). Apresenta um período seco (de junho a novembro) e outro chuvoso (dezembro a maio), sendo esse período chuvoso caracterizado por uma estação chuvosa bem acentuada (Figura 18), onde a precipitação pluviométrica gira em torno de 2500 mm a 3000 mm por ano (MARTORANO et al., 1993).

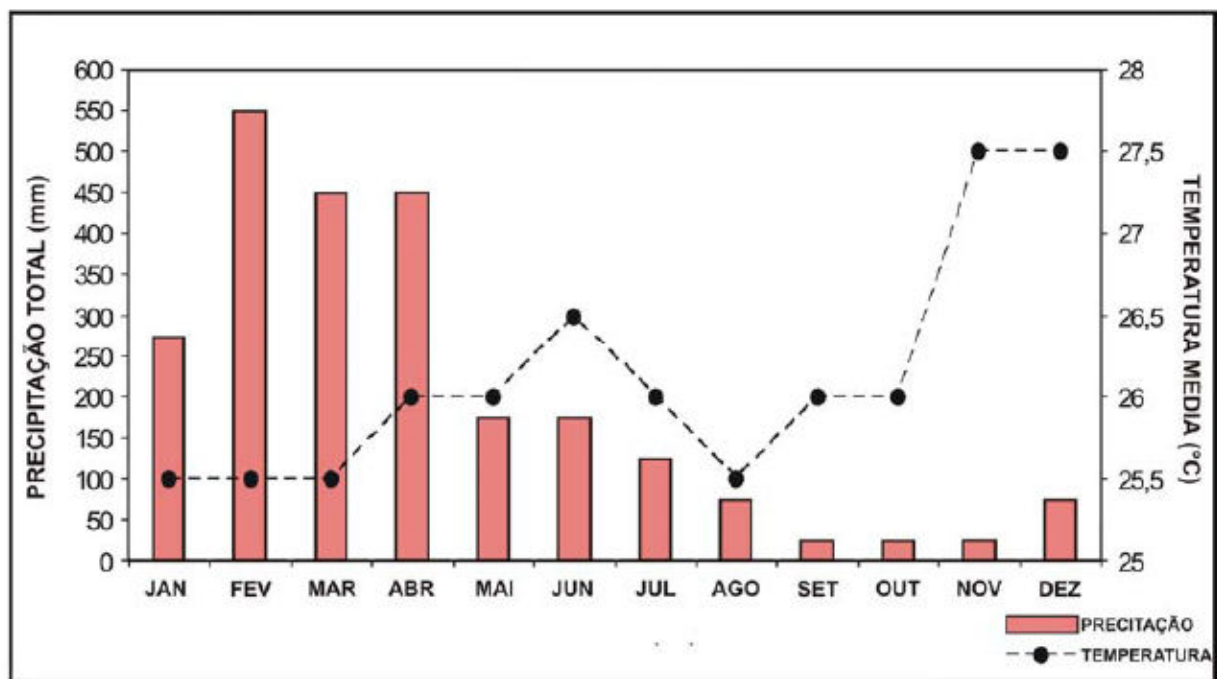


Figura 18: Distribuição da precipitação total e temperatura média da região Nordeste do Pará para o ano de 2003 (INPE; CPTEC 2003⁶ apud COSTA, 2004).

⁶ INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE) /CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS (CPTEC). *Distribuição da precipitação total e temperatura média da região Nordeste do Pará 2003*. Disponível em: <<http://www.inpe.org.br/cptec>>. Acesso em: janeiro de 2003.

Conforme Martins; Luz (2004), na região do Litoral Norte da Amazônia Brasileira (LNAB), área que se estende do Oiapoque ao Delta do Parnaíba, o clima é quente em função da proximidade com o Equador, esta região não apresenta grandes diferenças de temperatura no decorrer do ano e a temperatura média anual, varia entre 24° e 26°C. No litoral, as temperaturas médias anuais variam entre 26°C e 27°C. Além disso, este clima é também úmido em função da floresta Amazônica, que transporta bastante umidade. A Umidade Relativa Média Anual do Ar varia em torno de 80% a 90%, indicando assim, uma alta taxa de umidade na região.

4.2.2 Precipitação

A Região Norte possui um regime pluviométrico muito diversificado, com total pluviométrico anual mais notável, no litoral do Amapá, na foz do Rio Amazonas e no setor ocidental da região, onde a precipitação excede 3000mm (DUKE ENERGY, 2007).

Nesta região são encontrados três centros de precipitação abundante (Figura 19). O primeiro localizado no noroeste da Amazônia, com chuvas acima de 3000mm/ano. A existência deste centro é associada à condensação do ar úmido trazido pelos ventos de leste da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que são elevados quando o escoamento sobe os Andes (Nobre, 1983). O segundo centro, é localizado na parte central da Amazônia, em torno de 5S, com precipitação de 2500mm/ano, e o terceiro, na parte leste da base Amazônica, próximo a Belém, com precipitação de 2800mm/ano (DUKE ENERGY, 2007).

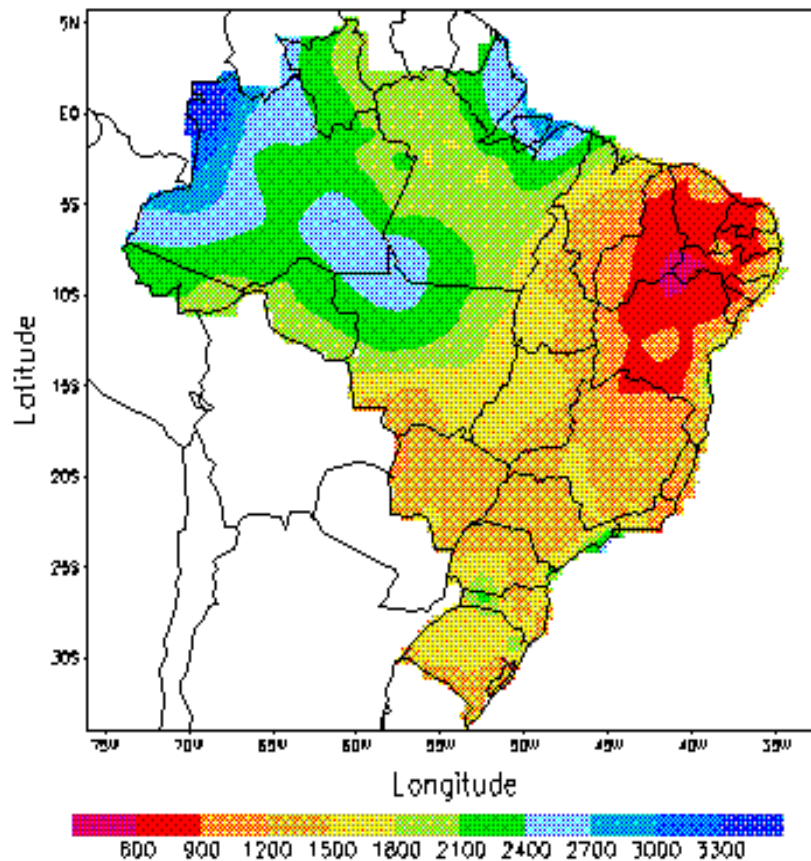


Figura 19: Climatologia de precipitação acumulada no ano (mm) realizada durante o período de 1961 a 1990 (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 1992).

A estação chuvosa da Região Norte (dezembro, janeiro e fevereiro) muda progressivamente de janeiro, fevereiro, março, no sul da Amazônia, para abril, maio e junho, no noroeste da base Amazônica. Essa variação parece estar relacionada com a posição da ZCIT, pois os núcleos de precipitações migram da parte central do país, no verão austral, para o setor noroeste da América do Sul no inverno austral, acompanhando a migração anual da convecção profunda. O centro de máximo secundário costeiro, observado na parte leste da bacia Amazônica, próximo a Belém, deve-se possivelmente às linhas de instabilidade que se formam ao longo da costa, forçadas pela circulação da brisa marítima. A floresta tropical mantém a umidade elevada em baixos níveis, que é possivelmente reciclada pela atividade convectiva. Outros fatores, como a penetração de sistemas frontais, o deslocamento da Alta

Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e a Alta da Bolívia influenciam as chuvas na região.

4.2.3 Ventos

A flutuação dos ventos ocorre em escala de dias, semanas e também sazonalmente, fluindo em direção NE, influenciando na circulação das águas da Plataforma Continental do Amazonas em direção à costa, atingindo velocidades de 10 m/s, já que durante junho a novembro, fluindo com menor intensidade, quase que paralelamente à costa (CANDELA et al., 1990).

O regime de ventos atuantes na região amazônica são os alísios de NE, que cruzam a plataforma continental do Amazonas em direção à oeste com velocidades de 5 a 10 m/s, o qual gera “trends” de ondas incidentes, que associado à morfologia de fundo, gera correntes de deriva litorânea para noroeste. Os ventos alísios atuam continuamente, durante o ano todo, com máximo de dezembro a março, quando se somam aos alísios de SE. Estes são responsáveis pelo transporte de sedimentos da plataforma continental interna em direção à costa (GEYER et al., 1991). Algumas medidas pontuais realizadas por Guerreiro (no prelo) contribuíram para dar informações de velocidade de vento na região do estuário de maracanã, que constatou uma velocidade variando de 4 a 7 m/s e uma velocidade média de 6 m/s predominantemente na direção NE, nos dias 03 e 04 de fevereiro de 2007.

4.3 CONDIÇÕES OCEANOGRÁFICAS

4.3.1 Hidrografia do rio Maracanã

De acordo com Costa (2004), a bacia do rio Maracanã está inserida na região costa Atlântica-Nordeste e tem como principal rio, o Maracanã, com uma extensão de 101 Km a partir do igarapé do Tubo até a ilha do Cumaru. Com relação ao perfil, é tipicamente meandrante, de baixa declividade que permite escoamento superficial, que possibilita um padrão de drenagem com grande quantidade de cursos d'água em várias direções. Possuindo uma ordem de vazão de aproximadamente 10^3 a 10^4 m³ s⁻¹.

Segundo Costa (2004), as nascentes do rio Maracanã estão localizadas às proximidades do município de Santa Maria do Pará destacando-se o igarapé do Tubo, o rio Jeju, o rio Taciateua e o rio Maracanã (porto Caju) com profundidade de 4m (período chuvoso) e largura de 30 a 60m. Nas nascentes as "rias fluviais", ou interiores, apresentam notável desproporção entre suas larguras e extensões em relação às "rias marinhas". As águas são de coloração castanho-avermelhadas ou castanho-amareladas que, segundo Sioli (1967), são rios de "água preta" que apresentam essa coloração devido a forte dissolução de substâncias húmicas coloidais que provêm do manto de matéria orgânica em decomposição, fornecida pela vegetação florestal (COSTA, 2004).

Em direção ao litoral, o rio Maracanã passa por uma área de transição, nos arredores de Nova Timboteua (porto Livramento), com profundidades de 4 a 8m (no período chuvoso) e largura de 250 a 350m, além da presença dos igarapés Mirim, Pau Amarelo, Tamanduá e o rio Peixe-Boi, um dos seus principais afluentes com cerca de 71 km de extensão, localizado no município de Velha Timboteua. Já nas áreas estuarinas, observou-se nitidamente o seu alargamento em Santarém Novo da ordem de 400 a 600m e profundidade de 4 a 17m (na maré máxima) com seu curso em direção à costa desaguardo por fim na baía de Maracanã.

Ocorre na bacia a bacia hidrográfica do rio Maracanã (INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO SOCIAL DO PARÁ, 1993):

- (a) rio Taciateua: afluente do rio Maracanã; tem como afluente o igarapé Galho Grande; limita-se com os municípios de Bonito, Santa Maria, Nova Timboteua e Igarapé-Açu;
- (b) rio Peixe-Boi: no limite com o município de mesmo nome; banha excelentes terras para agricultura e pecuária, além do município de Nova Timboteua; navegável somente por pequenas embarcações;
- (c) igarapé Mato Grosso: afluente da margem esquerda do rio Maracanã; serve como parte dos limites com os municípios de Maracanã, Nova Timboteua, Igarapé-Açu, Santarém Novo e Peixe-Boi;
- (4) rio Chocaréu: afluente da margem direita do Maracanã; situado nos limites com os municípios de Salinópolis e Maracanã;
- (5) rio Maracanã: pequenas e médias embarcações trafegam com boa navegabilidade devido a sua profundidade e largura, tornando-se a via de maior influência para o desenvolvimento da região;
- (6) rio Caripi: possui 18 km de extensão e não é navegável por grandes embarcações devido à pequena profundidade;
- (7) na baía de Maracanã, no oceano Atlântico, encontra-se várias ilhas, tais como Algodual-Maiandeua, ilha do Cumaru e ilha do Marco (Figura 20).

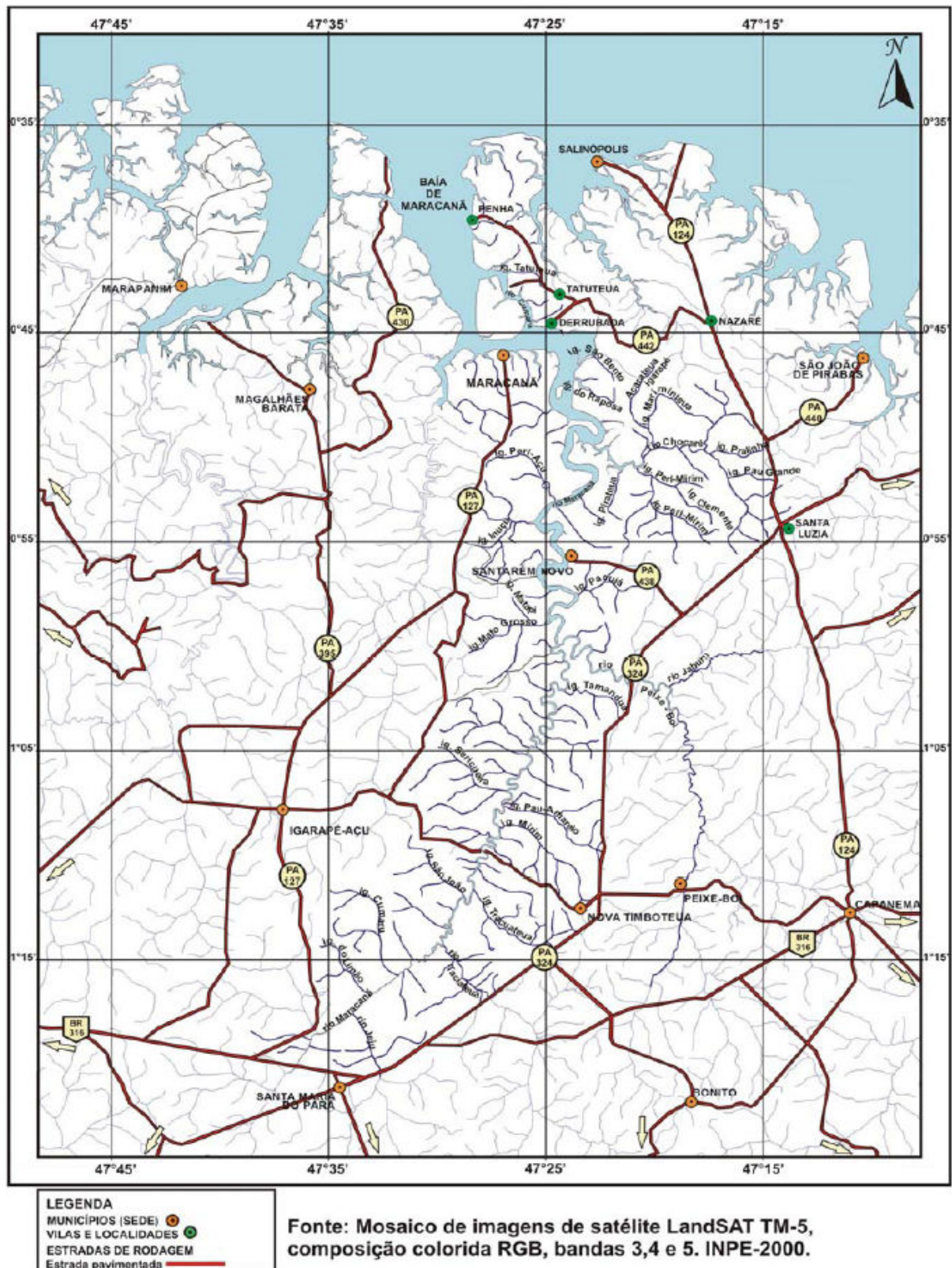


Figura 20: Mapa de drenagem da bacia hidrográfica do rio Maracanã. (COSTA, 2004).

4.3.2 Marés

A região nordeste do Pará é influenciada por um regime de macromarés, de natureza semidiurnas. Nesta área, incluindo o estuário do rio Maracanã, as marés servem de base para o fluxo de nutrientes entre o sistema estuarino e os manguezais, além disso, tem influência direta no transporte e na mistura dos sedimentos. A altura das marés medidas no estuário de maracanã, mostrou em relação a um nível relativo uma altura máxima de 5,69 m, uma mínima de 0,38 m e uma média de 3 ,22 m.

4.3.3 Correntes de Marés Associadas

As correntes (Figura 21) atuantes no nordeste do Pará são aquelas induzidas pela maré, as quais, são produzidas pelo movimento vertical, gerados pelo aumento e a diminuição da altura de maré. Os maiores valores de velocidade de corrente de maré são registrados durante as marés de sizígia (5 horas após a preamar), quando atingem 2,8 nós (1,43 m/s) e nas marés de quadratura a velocidade máxima é de 1,48 nós e a mínima de 1,16 nós (DEPARTAMENTO DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO, 1994). Essas correntes condicionam o transporte de sedimentos no litoral e são responsáveis pela formação de bancos arenosos perpendiculares a linha de costa, que são comuns na área (EL-ROBRINI et al., 1992).

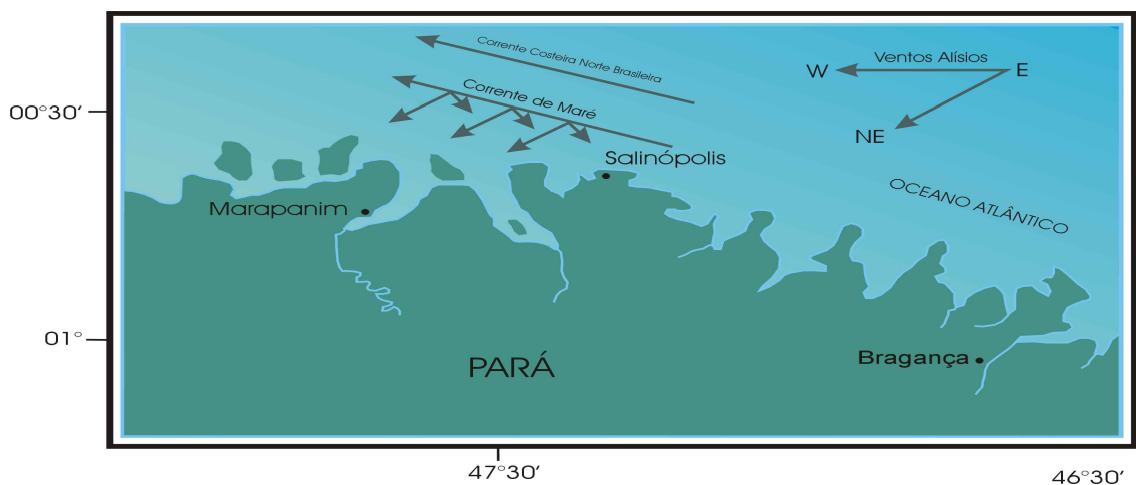


Figura 21: Esquema mostrando as correntes atuantes na costa do Estado do Pará (Modificado de SANTOS, 1996).

4.4 COBERTURA REGIONAL

Os ecossistemas da região nordeste do Pará, onde está localizado o estuário de Maracanã são caracterizados por Floresta Ombrólia densa, vegetação de florestas secundárias ao longo do planalto costeiro e as formações pioneiras, compostas pela vegetação de mangue, campos herbáceos e arbustivos extensivos sobre a planície costeira (MENDES; SILVA; FARIA JUNIOR, 1997).

De acordo com Costa (2004), nas áreas de nascentes, arredores de Santa Maria do Pará destacam-se florestas tipo hiléia remanescentes nas margens do rio Maracanã e florestas secundárias que resultam de desmatamentos que servem para práticas de agropecuária e plantio de espécies agrícolas. Além disso, encontram-se também abundantes palmeiras sendo as espécies mais comuns de *Mauritia flexuosa* (buriti) e *Euterpe sp.* (açaí).

Nas proximidades do rio Maracanã (Figura 22), tem-se a propagação da capoeira sobre a hiléia amazônica que acompanha as margens do rio Maracanã até os arredores de nova Timboteua.

Em áreas estuarinas, predomina a vegetação pioneira com espécies que ocupam os depósitos sedimentares influenciados por processos estuarinos e/ou marinhos (JAPIASSÚ; GÓES-FILHO, 1974). Essa individualidade permite subdividi-la em influência marinha (restinga) e fluvio-marinha (manguezal) presentes nas margens do rio principal, nos arredores de Santarém Novo até a baía de Maracanã, incluindo a vila de Maracanã, vila de derrubada (Porção Leste) e vila da penha a Nordeste da baía, saída para o oceano (COSTA op. cit.).

A restinga está ligada à influência marinha, localizando-se ao longo do litoral e abrangendo as faixas de praias, as dunas e uma sucessão de cordões litorâneos das planícies flúvio-marinhas, aparecendo em condição bem formada na costa paraense entre Salinópolis e Algodoal. Nas áreas baixas, onde o acúmulo de água é permanente, seja pelo efeito das inundações provocadas pelos índices pluviométricos, ou seja, pelo represamento em razão da maré, a composição florística predominante que caracteriza as comunidades é o buriti (*Mauritia flexuosa*) e o açaí (*Euterpe sp.*) comportando-se

como pioneiras que indicam a transição de mangue para a vegetação das áreas continentais (influência fluvial) (COSTA op. cit.).

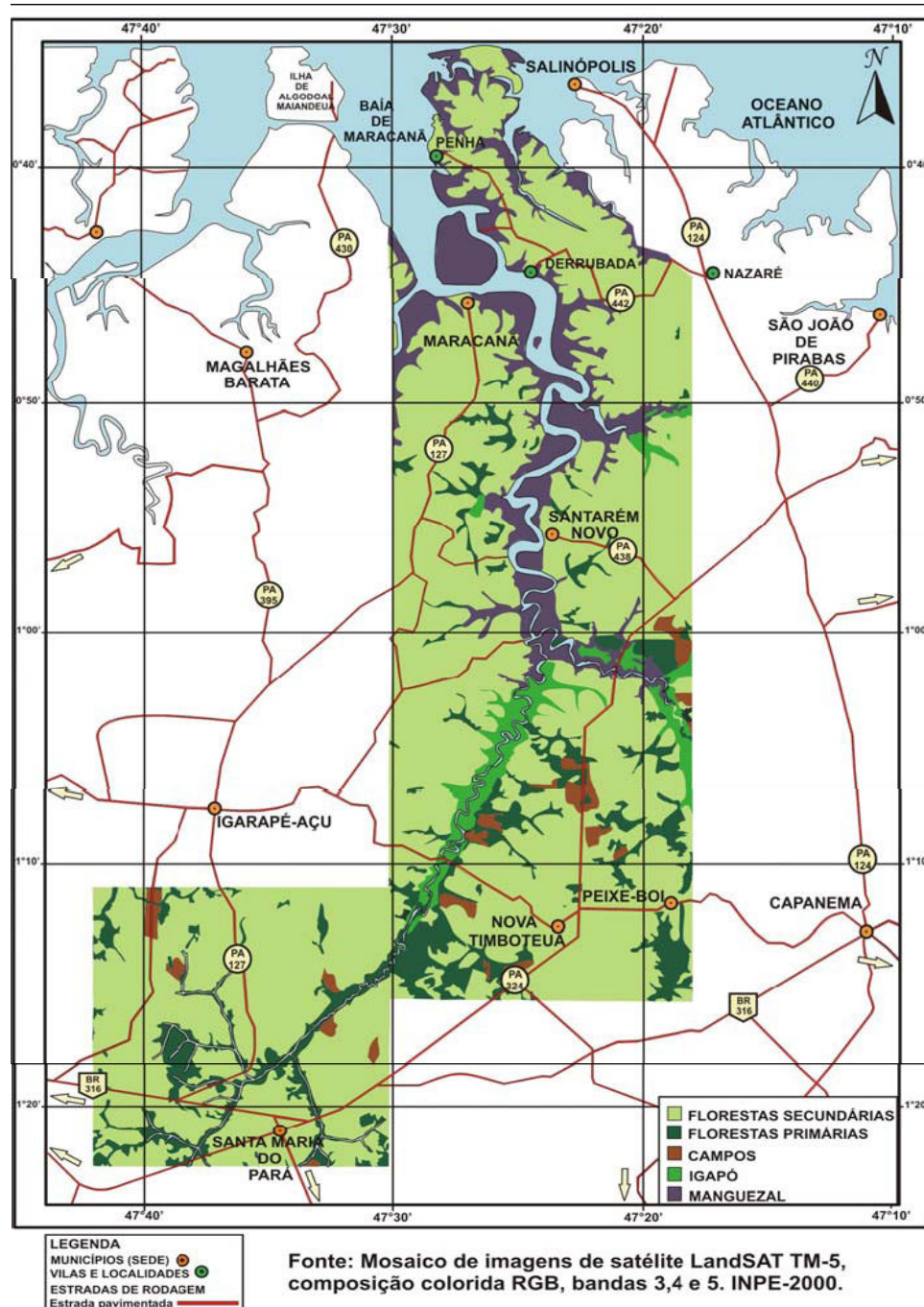


Figura 22: Vegetação da Bacia Hidrográfica do Rio Maracanã. (COSTA, 2004).

Nas proximidades da baía, a dinâmica das marés e a condições de solo ocasionam a formação de espécies de manguezais ao longo do estuário (Figura 23), como mangue vermelho (*Rhizophora mangle*), mangue branco ou tinteiro (*Laguncularia racemosa*) e o mangue preto ou siriúba (*Avicennia germinans*), que possuem necessidades ecológicas distintas e, portanto explicam sua participação e o lugar que ocupam na zonação dessa vegetação (COSTA op. cit.).



Figura 23: Manguezais nas margens do estuário do rio Maracanã, durante a baixamar.

4.5 SOLOS

Segundo Araújo et al. (1973), Leite; Filho; Junior (1992), Silva; Oliveira Junior; Rodrigues (1994): dentre outros, os solos encontrados na região nordeste do Pará são:

4.5.1 Solos com horizonte B latossólico

4.5.1.1 Latossolo amarelo

O Latossolo amarelo possui características físicas boas, friáveis, ácidos (pH 4.2 a 5), com textura argilosa, de coloração vermelho-amarelada. Este tipo de solo possui relação com sedimentos areno-argilosos do Quaternário e Terciário, presentes em topografia que varia de plano a suavemente ondulado, sob capoeira. (Silva *et al.*, 1994 *apud* Costa, 2004). As principais limitações ao uso desses solos advêm de suas propriedades químicas, que são: baixa reserva de nutrientes minerais, elevados teores de alumínio trocável e altas percentagens de saturação com alumínio trocável (SOUZA; OLIVEIRA; COUTINHO., 1991).

4.5.2 Solos com horizonte B textural não-hidromórficos

4.5.2.1 Podzólicos vermelho-amarelos

São ácidos (pH 4,2 a 5,2) de coloração vermelho-amarelado com baixas relações silte/argila, e bastante semelhança com latossolo amarelo. A baixa fertilidade natural é oriunda de baixos valores de soma e saturação de bases, além de elevados valores de saturação com o alumínio, presentes nos sedimentos do cenozóico, encontram-se em áreas com relevo plano a suavemente ondulado, sob vegetação primária e capoeira. Apresentam normalmente argilo-minerais do grupo da caulinita e quartzo, além de baixos valores de Óxidos de ferro;(SILVA; OLIVEIRA JUNIOR; RODRIGUES, 1994).

4.5.3 Solos Halomórficos

4.5.3.1 Solos indiscriminados de Mangue

Estes solos possuem limitações à agricultura devido ao excesso de água e sais solúveis prejudiciais ao desenvolvimento vegetativo (ARAÚJO *et al.*, 1973; SOUZA *op cit.*). A constituição deste solo possui sedimentos do Quaternário, freqüentemente mal drenados, formados por material fino misturado com matéria orgânica oriunda da deposição de detritos e das atividades biológicas que se distribuem nas partes baixas da orla marítima, sob influência das marés e com vegetação de manguezais (SOUZA

op. cit.). Estes solos são encontrados desde o rio Peixe-Boi em Velha Timboteua, nas margens do rio Maracanã em Santarém Novo e na foz do rio Maracanã onde a influência das marés é bem mais pronunciada.

4.5.4 Solos Hidromórficos Gleizados

4.5.4.1 Gleissolos (glei pouco húmicos)

Desenvolvem-se em sedimentos holocênicos e caracterizados por apresentarem pH de 4,5 a 6,3, condições anóxicas evidenciadas pela coloração acinzentada e mal drenados. Localizam-se em planícies aluviais, submetidas a um regime de inundação freqüente (várzea) e sob vegetação típica.

4.5.4.2 Areias quartzosas

Estas areias são de origem holocênica, e ocorrem em áreas baixas na região costeira. As características físicas e químicas são: solos minerais pouco desenvolvidos, conteúdo de argila menor que 15% em profundidades acima de 200 m (SILVA et al., 1994). Possuem baixa fertilidade natural, altos teores de alumínio trocável e baixa retenção de umidade (SOUZA op cit.).

4.6 GEOMORFOLOGIA COSTEIRA

De acordo com Franzinelli (1991), a costa nordeste do Estado do Pará perfaz cerca de 600 Km de extensão e é considerada como sendo uma costa transgressiva dominada pelos regimes de marés. Segundo Palma (1979), esta costa é do tipo estuarina, com a linha de costa notavelmente marcada por ser altamente recortada por amplas reentrâncias (“rias”) e com cobertura interna, caracterizada por um manto de faixas arenosas.

Costa et al. (1991) descreve o relevo do litoral paraense, utilizando os termos: Planície Flúvio-marinha e Planalto Rebaixado da Amazônia (relevo de maior amplitude).

Silva Jr. (1998), descreve outros domínios geomorfológicos tais como: o Planalto Costeiro, a Planície Costeira, a Planície Estuarina e a Planície Aluvial.

4.6.1 Litoral de “Rias”

No litoral paraense, as “rias” são a característica morfológica marcante, de direção NE-SW, formadas pela foz dos rios que deságuam direto no Oceano Atlântico. Esta unidade, de acordo com Barbosa; Pinto (1973), corresponde à faixa de sedimentos recentes associados a uma série de ilhas, bacias e canais, presentes em toda a linha de costa.

Conforme Santos (1996), o “Litoral de Rias” pode-se enquadrar às planícies litorânea e fluvial, formadas sobre sedimentos holocênicos, agrupando praias, dunas, planícies de maré e planícies estuarinas, que são separadas das demais unidades sobrejacentes por descontinuidade erosiva.

As principais características dessas “rias” são vales fluviais, que recortam a costa e são parciais, ou totalmente invadidos pelo mar. Para El-Robrini et al. (1992), as “rias” adentram até 45 km no continente, apresentando larguras, de até 20 km (foz do rio Pará) e profundidades inferiores a 5m. A maioria das “rias” do litoral paraense são canais (vales amplos afogados desde o início do Holoceno), construídos pelo desenvolvimento de bancos de planície de maré, perpendiculares à costa, posicionados atrás das áreas colonizadas por mangues (BARBOSA; PINTO, 1973).

4.6.2 Planalto Costeiro

Segundo Costa et al. (1991), o Planalto Costeiro corresponde à relevos ondulados, com superfície arrasada e plana, não alcançando mais que 60 m de elevação, sendo conhecido como Planalto Rebaixado da Amazônia. Já Silva Jr. (1998) mostra que o Planalto Costeiro apresenta uma superfície plana, formando tabuleiros com vertentes retilíneas e íngremes, com uma superfície suavemente ondulada, e altitudes em torno de 25 m.

Conforme Franzinelli (1992), o Planalto Costeiro é recortado por baías ao oeste da Baía de Pirabas, constituindo assim, falésias ativas, que alcançam o Oceano Atlântico e ao leste da Baía de Pirabas, está recuado, constituindo falésias baixas e inativas.

4.6.3 Planície Costeira

De acordo com Silva (1998), a Planície Costeira corresponde aos depósitos arenosos e argilosos pleistocênicos e holocênicos sendo limitada a sul, pelo planalto costeiro e planície estuarina, e ao norte pelo Oceano Atlântico. Esta Planície é recortada por baías e forma extensas áreas de planície de maré e manguezais (FRANZINELLI, 1992). Conforme Santos (1996), a Planície Costeira pode englobar o canal estuarino, cordões praia-duna, planícies de maré, praias, dunas, pântanos e “*cheniers*”.

Segundo Alves (2001), a planície costeira possui extensas planícies de marés até os cordões duna-praia, dominadas pelos processos oceanográficos. Segundo Souza Filho (1995), ocorrem na planície costeira alguns subambientes, como os manguezais, planícies arenosas, dunas costeiras ativas e inativas, deltas de marés e praias-barreiras.

De acordo com Carvalho (2007), onde os estudos foram restringidos à Planície Costeira de Maracanã, que corresponde à parte superior do estuário do rio Maracanã. Este setor pôde ser dividido em dois grandes domínios geomorfológicos, levando em consideração as características morfológicas, sedimentológicas, topográficas, vegetação típica e processos físicos atuantes. Estas unidades são: Planalto Costeiro e Planície Costeira (Figura 24).

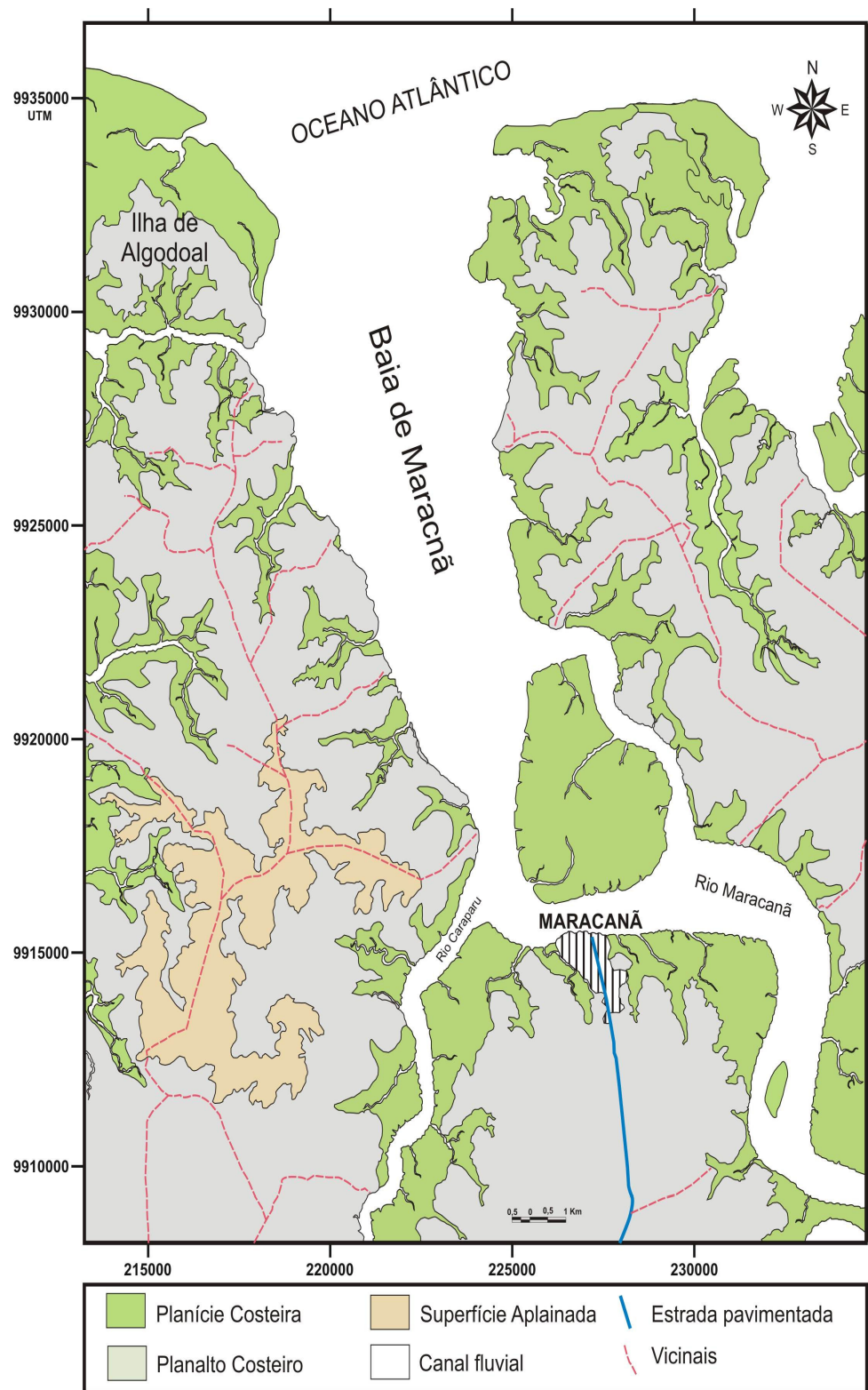


Figura 24: Contexto Geomorfológico da planície costeira de Maracanã (CARVALHO, 2007).

4.6.4 Planície Estuarina

Segundo Silva (1998), a Planície Estuarina é limitada ao norte e ao sul, respectivamente, pela Planície Costeira, onde os processos marinhos dominam e pela Planície Aluvial, no limite superior da maré salina estendendo-se por cerca de 180 Km².

4.6.5 Planície Aluvial

De acordo com Silva (1998), a Planície Aluvial é uma área inundada periodicamente pelo transbordamento dos rios, e está localizada sobre os sedimentos areno-argilosos do Grupo Barreiras, encontrando-se limitada pela Planície Estuarina em uma área de 40 Km².

4.6.6 Estuário do rio Maracanã

Esta região (Figura 25) é uma área composta por domínios de agradação, desenvolvidos principalmente no litoral como as paleodunas, dunas, praias, barras de maré, mangues e várzeas; e pelo domínio de degradação, representado pelo relevo colinoso e a superfície aplainada situados no interior do continente (LEITE; FILHO; JUNIOR, 1992).

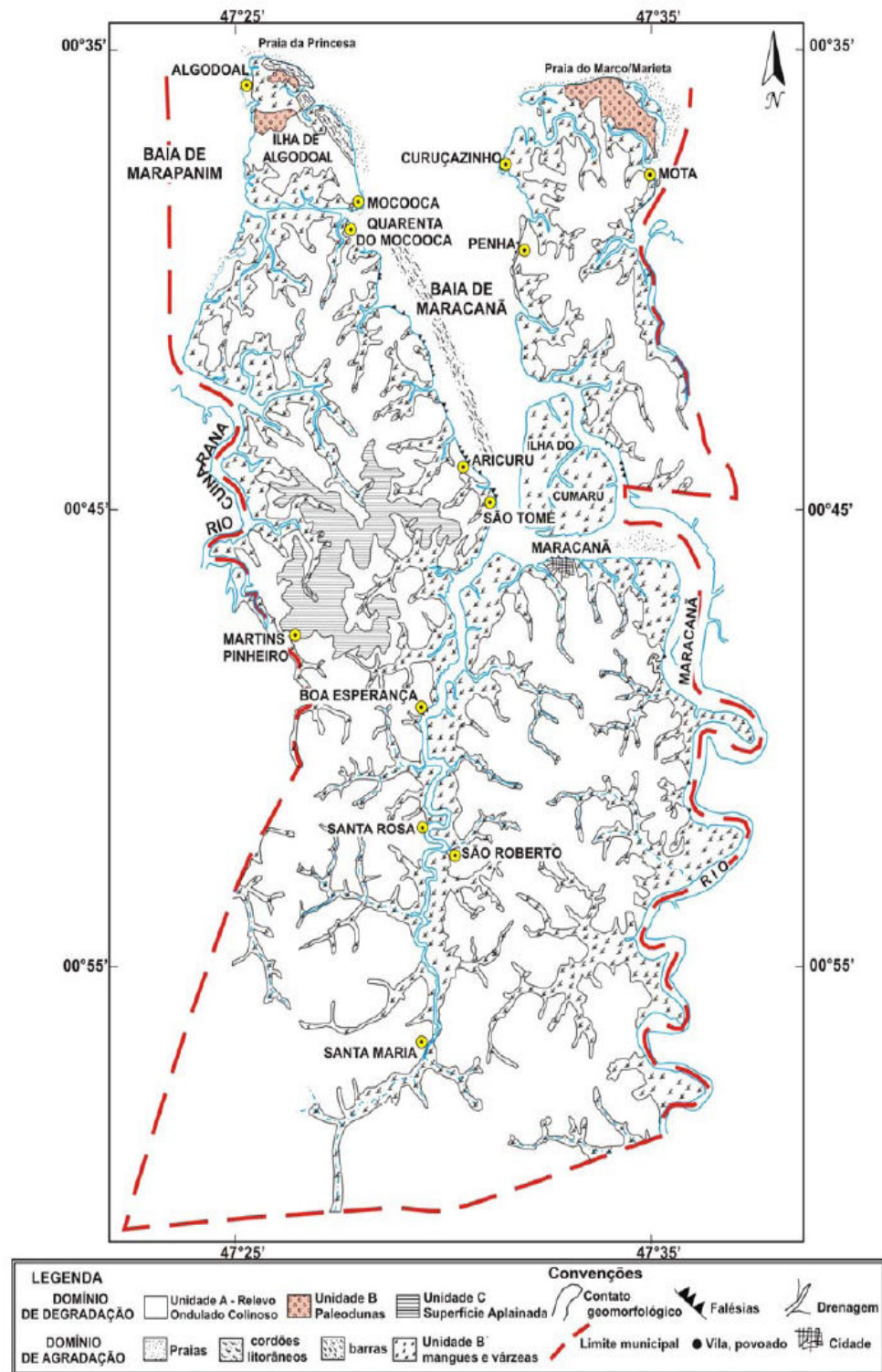


Figura 25: Mapa geomorfológico do município de Maracanã na Escala de 1:250.000 (COSTA, 2004).

4.7 ESTRATIGRAFIA REGIONAL

As unidades litoestratigráficas do nordeste do Estado do Pará incluem rochas ígneas, metamórficas e sedimentares de idade pré-cambrianas ao recente. As unidades litoestratigráficas que ocorrem predominantemente na zona costeira paraense são: (i) Formação Pirabas; (ii) Formação Barreiras (iii) sedimentos Pós-Barreiras e (iv) o Recente.

Rossetti (2001)⁷ apud Carvalho (2007) identifica três seqüências deposicionais, que representam as três primeiras unidades citadas acima, A, B e C (Figura 26).

4.7.1 Formação Pirabas

Conforme Alves (2001), a Formação Pirabas faz parte do quadro geológico da região nordeste do estado do Pará, mas ocorre também nas faixas da costa dos Estados do Maranhão e Piauí. No nordeste do Estado do Pará, apesar da grande extensão em subsuperfície, aflora descontinuamente no litoral (zona do Salgado) e no interior do continente (zona Bragantina). As principais ocorrências do Pirabas na zona Bragantina são nos municípios de Capanema, Peixe-Boi, Nova Timboteua, Bragança, Irituia e na zona do Salgado, nos municípios de Primavera, Marapanim, Maracanã e Salinópolis (COSTA et al., 1977; BEZERRA, 1991).

Segundo Ferreira (1980), esta formação é constituída por calcários marinhos, bioclásticos, dolomicríticos, micríticos e margosos (Mioceno Inferior), que foram depositados em ambiente marinho raso, de águas calmas. Estas rochas são bem expostas no litoral, nos municípios de São João de Pirabas (Ilhas de Fortalezinha e das Minas), Maracanã (Aricuru), Primavera (Japerica), Salinópolis (praias do Maçarico e Atalaia) e ainda, no município de Marapanim (SILVA, 1998).

De acordo com Ferreira; Cunha (1957) a Formação Pirabas é dividida em três fácies distintas dispostas da base para o topo: Fácies Castelo (Inferior), Fácies Capanema (Intermediária) e Fácies Baunilha Grande (Topo).

⁷ ROSSETTI, D. F.,. Late cenozoic sedimentary evolution in northeastern Pará, Brazil, within the context of sea level changes . *Journal of South American Earth Sciences*, 2001. v.14, p.77-89.

Conforme Rossetti (2001), a Formação Pirabas grada lateralmente e verticalmente para argilitos e arenitos com cores variadas que representam a porção inferior da Formação Barreiras. Embora, a sequência aflore em várias falésias costeiras, a espessura desta sequência em média é 15 m alcançando até 48 m nas proximidades da Cidade de Capanema.

4.7.2 Sedimentos do Grupo Barreiras

Conforme Rossetti; truckenbrodt; Góes (1989), os sedimentos do Grupo Barreiras, formam uma cobertura sedimentar terrígena continental. Segundo Arai et al. (1994) estes sedimentos ocorrem sob a forma de falésias ou terraços (Mioceno Inferior). A sua litologia é constituída por argilas coloridas, argila cinza (presença de matéria orgânica) e sedimentos inconsolidados argiloarenosos e areno-argilosos,. Observam-se também, níveis descontínuos de arenito ferruginoso (grês do Pará) em blocos soltos, irregulares e de tamanhos variados (PETRI; FÚLFARO, 1983; ARAI et al., 1988; GÓES et al., 1990; BEZERRA, 1991).

Estes sedimentos se localizam sobre a Formação Pirabas e é sobreposta pelos sedimentos Pós-Barreiras. Esta unidade é representada na forma de inúmeras falésias e relevo colinoso comuns na área (Mioceno Inferior)(ARAI et al., 1994). Os sedimentos do Grupo Barreiras estão sobrepostos às camadas da Formação Pirabas ou em contato direto com Formações mais antigas (ARAI et al., 1988).

As melhores exposições do Grupo Barreiras são encontradas na costa atlântica, onde a ação erosiva do mar deu origem a inúmeras falésias, comuns à faixa costeira de até 36m de altura. Algumas dessas são as falésias de Marapanim, Maracanã, Salinópolis e ilha de Fortaleza (ACKERMANN, 1964; ALMARAZ, 1979; COSTA et. al., 1992).

4.7.3 Sedimentos Pós-Barreiras

Segundo Silva; Loewenstein (1968), este tipo de sedimento apresenta uma coloração amarelada, sobrepostos aos sedimentos do Grupo Barreiras, sendo

constituído por sedimentos areno-argilosos, compostos por grãos de quartzo e frações de silte e argila, com leitos finos de seixos de arenitos ferruginosos.

Os sedimentos Pós-Barreiras são separados do Grupo Barreiras por uma discordância erosiva, apesar de diversos autores atribuírem para estes sedimentos (SÁ, 1969).

4.7.4 Sedimentos Recentes

Segundo Sá (1969), os sedimentos recentes estão relacionados a depósitos fluviais, relacionados com areias, seixos e argilas escuras de coloração cinza-marronzada, estando associados à influência de maré, caracterizando as baixadas atuais de rios, mangue e praias.

Idade		Unidades Litostratigráficas	Seqüências Depositionais
Plioceno - Quaternário		Pós-Barreiras	C
MIOCENO	Superior	Paleossolo laterítico	Sb3
	Médio	Fm. Barreiras Médio/Superior	B
	Inferior	Fm. Barreiras Inferior	A
	Oligoceno Superior	Fm. Pirabas Paleos. Laterítico Bauxítico	Sb1
Cretácio		Grupo Itapecuru	

Figura 26: Coluna estratigráfica da região Nordeste do Pará (CARVALHO, 2007).

4.8.2 Neotectônica

De acordo Costa (1996), o quadro neotectônico no nordeste do Pará, compreende “os conjuntos de estruturas e de seqüências sedimentares, bem como a distribuição dos elementos principais das bacias hidrográficas e dos sistemas de relevo, desenvolvidos do Terciário Superior (Mioceno-Plioceno) e do Pleistoceno Superior ao recente. Assim, reconhecem-se sistemas de falhas transcorrentes dextrais orientadas nas direções E-W, ENE-WSW e NE-SW que geraram extensas áreas transtensivas e transpressivas delineadas através de falhas normais NW-SE e NNW-SSE, e de cavalgamentos e dobras de direções NE-SW e ENE-WSW, respectivamente. Há também vastas áreas formadas por falhas normais orientadas na direção N-S (Figura 28).

Em Maracanã a morfologia consiste de uma faixa litorânea que apresenta uma disposição NE-SW, o que é encontrado em outras porções, adjacentes ao município. O relevo, que compreende a zona costeira (litorânea) sugere que a costa apresenta-se em submersão, similar ao quadro regional proposto por Barbosa; Pinto (1973).

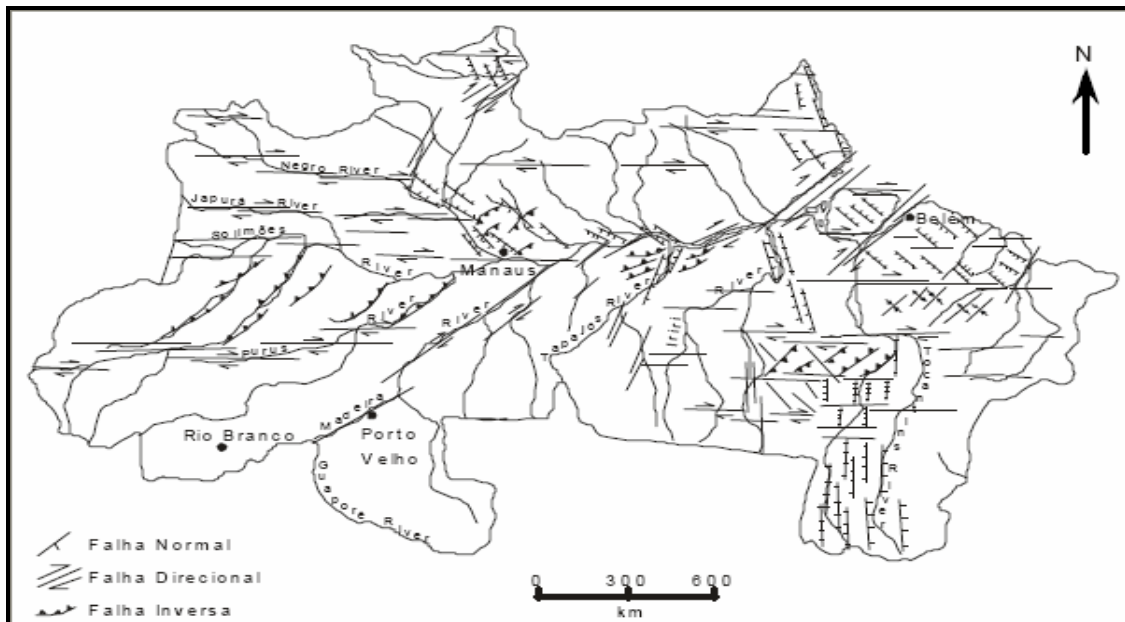


Figura 28: Sistemas de falhas (Neotectônica) apresentando as falhas direcionais (indicando o movimento relativo); falhas normais e inversas ou de cavalgamentos linhas denteadas (CARVALHO, 2007).

5. PRINCÍPIOS DA MODELAGEM COMPUTACIONAL

O presente capítulo contém informações sobre o processo da modelagem, sua importância, princípios da modelagem estuarina e as equações governantes do modelo que foram utilizados neste trabalho.

5.1 O PROCESSO DA MODELAGEM EM RECURSOS HÍDRICOS

A simulação matemática de sistemas de recursos hídricos apresentava muitas dificuldades de cálculo antes dos computadores, o que não permitia seu pleno desenvolvimento. As decisões apoiavam-se, então, em métodos gráficos ou em modelos físicos ou analógicos. A partir da década de 1960, a evolução computacional veio se acelerando e possibilitando avanço das técnicas matemáticas descritivas (simulação) e normativas ou prescritivas (otimização) (AMARAL, 2003).

Os modelos de simulação matemática, em recursos hídricos, têm atualmente aplicação em diversas áreas, como na quantificação dos processos do ciclo hidrológico, na análise da qualidade das águas em rios, reservatórios e nos aquíferos subterrâneos, nos processos hidráulicos do escoamento em rios, mares e subsolo e nos modelos ambientais e meteorológicos. (AMARAL, 2003).

Os modelos de simulação fornecem a resposta de um sistema a um conjunto de informações de entrada, que incluem regras de decisão, permitindo ao usuário examinar as consequências de diversos cenários de um sistema existente ou de um sistema em projeto (op cit.).

O fluxograma abaixo (Figura 29) representa o processo da modelagem:

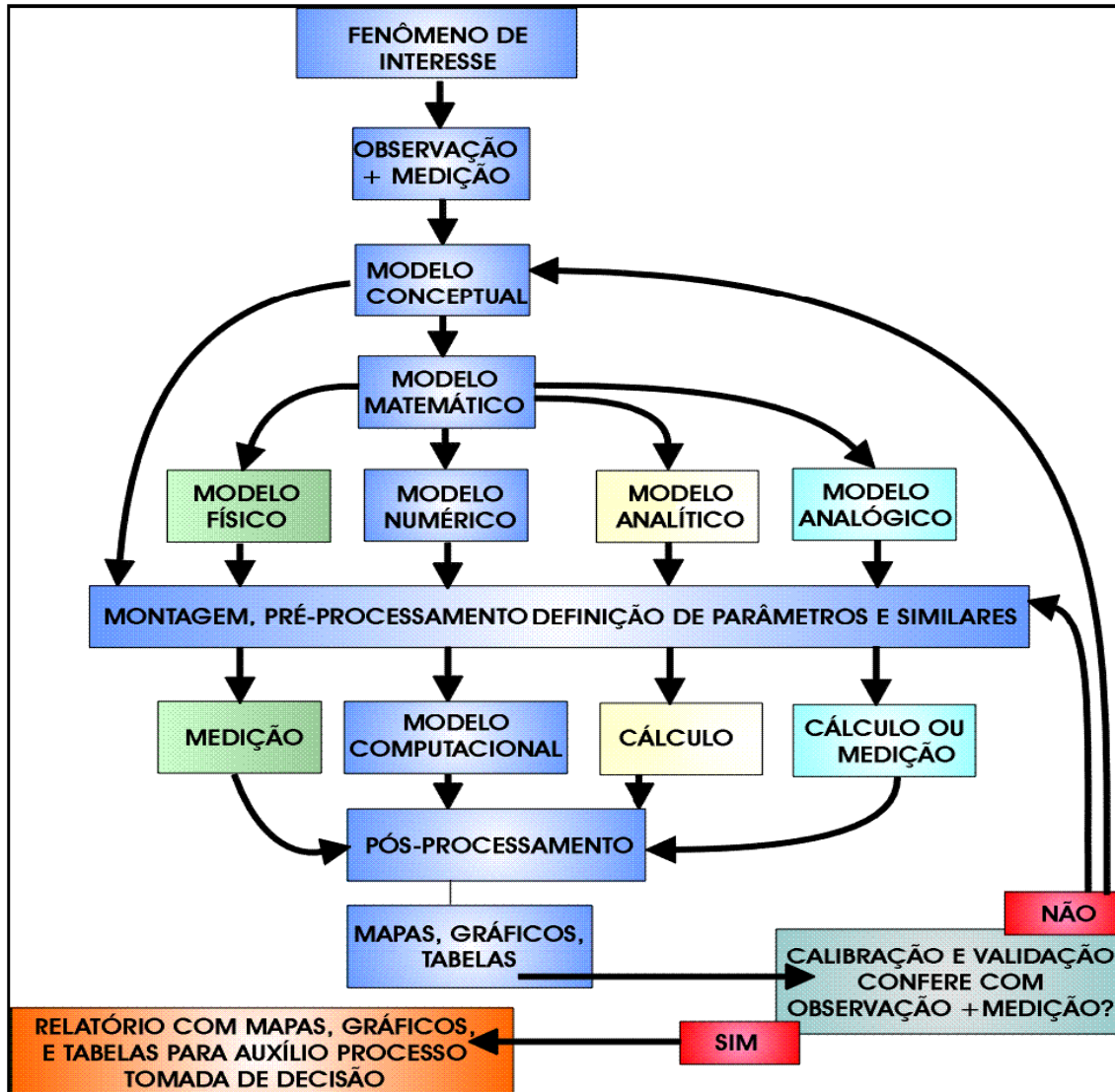


Figura 29: Diagrama do processo de modelagem em recursos hídricos (AMARAL, 2003).

5.2 IMPORTÂNCIA DA UTILIZAÇÃO DE MODELOS

Os modelos são uma representação simplificada do mundo real. Os fenômenos são muitas vezes complexos, o que exige sua simplificação para se iniciar o processo de modelagem. Os modelos devem ser vistos como ferramentas de compreensão dos fenômenos e decisão sobre alterações dos sistemas que se analisam (AMARAL, 2003).

Segundo Rosman (2001), a necessidade da aplicação de modelos para estudos, projetos e auxílio à gestão de recursos hídricos é inquestionável, face à complexidade do ambiente de corpos de água naturais, especialmente em lagos, reservatórios,

estuários e zona costeira adjacente das bacias hidrográficas. Modelos são ferramentas integradoras, sem as quais dificilmente se consegue uma visão dinâmica de processos nestes complexos sistemas ambientais.

A gestão e gerenciamento de corpos d'água naturais necessitam de dados ambientais, os quais, devido ao alto custo para seu levantamento, geralmente são escassos. Através de modelos calibrados, bem capazes de reproduzir valores nos pontos onde se fez medições, podem-se interpolar e extrapolar espacial e temporalmente as informações obtidas nos poucos pontos onde os dados foram medidos para toda a área de interesse, o que permite uma melhor interpretação das medições isoladas (ROSMAN, 2001).

Além disso, a aplicação de modelos numéricos para a estimativa de padrões de circulação e transporte fluido em corpos d'água costeiros é de importância fundamental, tanto no que se refere a sua poderosa contribuição na avaliação de impactos ambientais como na identificação e definição das estratégias para a operacionalização e gerenciamento de programas de monitoramento ambiental (AMARAL, 2003).

5.3 PRINCÍPIOS DA MODELAGEM ESTUARINA

5.3.1 Modelos de Circulação Hidrodinâmica

As equações gerais que representam os escoamentos naturais dos corpos d'água são não lineares e não possuem solução analítica conhecida para os domínios e condições de contorno existentes. Para que seja possível a solução destas equações, utilizam-se soluções numéricas, substituindo o domínio contínuo por um domínio discreto, o que resulta em equações algébricas cujas soluções podem ser obtidas através de algoritmos computacionais. A modelagem hidrodinâmica consiste na determinação de níveis e velocidades, o que permite definir os padrões de correntes (AMARAL op cit.).

5.3.2 Classificação dos Modelos Hidrodinâmicos

Segundo Rosman (1997), os modelos hidrodinâmicos aplicáveis a sistemas estuarinos podem ser divididos em três tipos, variando de acordo com a sua complexidade:

5.3.2.1 Modelos tridimensionais

São modelos que possuem todas as dimensões (x,y,z,t) , sendo z a dimensão vertical. Os modelos 3Dg, ou gerais, incluem forçantes baroclínicas e barotrópicas. Sendo assim, se aplicam a qualquer caso. Já o modelo 3D sem termos baroclínicos possui uma hidrodinâmica mais simples, pois não se incluem gradientes de densidades. São aplicáveis a corpos d'água com coluna d'água homogênea ou pouco estratificada, com o objetivo de se obter perfis verticais das variáveis.

5.3.2.2 Modelos bidimensionais

Estes modelos são subdivididos em 2 tipos, modelo bidimensional na horizontal ou modelo em planta (2DH) e modelo bidimensional na vertical (2DV). No modelo 2DH utilizam-se como variáveis as velocidades médias na vertical, ou seja, possuem somente as dimensões (x,y,t) . São aplicáveis a corpos d'água pouco estratificados, tendendo a verticalmente homogêneos. No modelo 2DV as variáveis são médias lateralmente, restando as dimensões (x,z,t) . São aplicáveis a corpos d'água com estratificação vertical de densidade, mas com pouca variação lateral. Normalmente são corpos d'água estreitos.

5.3.2.3 Modelo unidimensional (1D)

Este modelo é aplicável a corpos d'água longitudinais com seção transversal homogênea, como canais. Considerando o eixo x como longitudinal, têm-se somente as dimensões (x, t) .

A adoção do modelo tridimensional geral é possível para todos os casos. Entretanto, os custos relacionados à sua utilização (tempo de preparação do modelo ou das simulações) são maiores, oferecendo um resultado que pode muitas vezes ser obtido com modelos mais simplificados, dependendo das características do corpo d'água a ser estudado e da qualidade dos resultados requeridos (Rosman, 1997).

5.3.3 Sistema de Modelos Adotados

O modelo que será utilizado para modelagem da hidrodinâmica na área de estudo faz parte do SisBAHIA® - **Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental**. O SisBAHIA® encontra-se continuamente sendo ampliado e aperfeiçoado na COPPE/UFRJ desde 1987, através de várias teses de mestrado e doutorado, além de projetos de pesquisa. O sistema tem sido adotado em dezenas de estudos e projetos contratados à Fundação Coppetec envolvendo modelagem de corpos de água naturais. O modelo utilizado foi:

5.3.3.1 Modelo Hidrodinâmico: é um modelo de circulação hidrodinâmica 3D ou 2DH dominada por forçantes barotrópicos, e otimizado para corpos de água naturais nos quais efeitos de densidade variável possam ser desprezados. Resultados podem ser tanto 3D quanto 2DH, dependendo dos dados de entrada. “Otimizado” é usado no sentido de um modelo planejado para ótima representação de escoamentos em domínios naturais com geometria complexa. Processos de calibração são minimizados devido a fatores como: discretização espacial via elementos finitos quadráticos e transformação, permitindo ótimo mapeamento de corpos de água com linhas de costa e batimetrias complexas, campos de vento e atrito do fundo podendo variar dinamicamente no tempo e no espaço, e modelagem de turbulência multi-escala baseada em Simulação de Grandes Vórtices (LES).

5.4 RESUMO DAS EQUAÇÕES GOVERNANTES DO MÓDULO 2DH DO MODELO HIDRODINÂMICO

As três equações necessárias para determinar as três incógnitas de circulação hidrodinâmica em um escoamento 2DH integrado na vertical, (ζ, U, V) , são resumidas abaixo:

1. Equação de quantidade de movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical, na direção x:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial (H \bar{\tau}_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (H \bar{\tau}_{xy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_x^S - \tau_x^B) + 2\phi \sin \theta V$$

2. Equação de quantidade de movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical, na direção y:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial (H \bar{\tau}_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (H \bar{\tau}_{yy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_y^S - \tau_y^B) - 2\phi \sin \theta U$$

3. Equação da continuidade (do volume):

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial t} + \frac{\partial VH}{\partial y} = 0$$

Onde:

– u , v e w são as componentes da velocidade do escoamento respectivamente nas direções x , y e z

– $\zeta(x,y,z)$ é a elevação da superfície livre;

– g é a aceleração da gravidade;

- ρ é a densidade local do fluido;
- ρ_0 é uma densidade constante de referência;
- Φ é a velocidade angular de rotação da Terra no sistema de coordenadas local e os termos com Φ são as forças de Coriolis, no qual θ é o ângulo de latitude.

Quadro 01: Significado dos termos das equações governantes do módulo 2DH.

$\frac{\partial U}{\partial t}$	Representa a aceleração local do escoamento;
$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y}$	Representa a aceleração advectiva do escoamento;
$-g \frac{\partial \zeta}{\partial x}$	Representa a pressão hidrostática resultante na direção x (gradiente de pressão), devido à declividade da superfície d'água na direção x ;
$\frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial (H \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (H \tau_{xy})}{\partial y} \right)$	Representa a resultante das tensões dinâmicas turbulentas 2DH no escoamento;
$2\phi \sin \theta V$	Representa a força de Coriolis devido ao fato do referencial estar em movimento na superfície da Terra;
$\frac{1}{\rho_0 H} (\tau_x^S)$	Representa a tensão do vento na superfície livre por unidade de massa;
$\frac{1}{\rho_0 H} (-\tau_x^B)$	Representa a tensão de atrito no fundo atuante no escoamento por unidade de massa.

6. METODOLOGIA

Os métodos utilizados para atingir os objetivos da pesquisa encontram-se descritos neste item, como: o levantamento bibliográfico com informações da área e do modelo; a coleta de dados realizada durante as campanhas oceanográficas; e o processamento desses dados no laboratório.

6.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

Foi realizado um levantamento de dados referentes à área de estudo, com base em literatura científica de pesquisadores nacionais, estrangeiros, no acervo da Biblioteca Setorial do Centro de Geociências, internet, Periódicos CAPES, monografias de conclusão de curso, teses de mestrado e doutorado, periódicos e livros. Além disso, foi realizada uma pesquisa orientada intitulada “Estuários: definição, gênese, processos, sedimentação, classificação e parâmetros”, cujos principais resultados são mostrados no capítulo 3.

6.2 TREINAMENTO

O treinamento foi dividido em duas partes:

- 1) Desenvolvimento de modelos computacionais através do software SisBAHIA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental), este foi realizado no Rio de Janeiro, no período de março a maio de 2006, sob orientação do Prof. Dr. Paulo Cesar Colonna Rosman, na COPPE/UFRJ.
- 2) Treinamento com equipamentos (correntógrafo, marégrafos), que foram utilizados nos trabalhos de campo, assim como a interpretação destes dados e além disso um aperfeiçoamento do Programa SisBahia. Esta fase do trabalho foi realizada no CTTMar/UNIVALI -SC, com duração de Junho a agosto de 2006, sob orientação do Prof. Dr. João Luiz Baptista de Carvalho.

6.3 CAMPANHAS OCEANOGRÁFICAS

As campanhas oceanográficas foram realizadas com o intuito de validar o modelo, com o levantamento de uma série de informações medidas em campo necessárias à implementação do modelo computacional no estuário do rio Maracanã. Para a geração dos dados iniciais do modelo ou mesmo para os processos de calibração e validação, foi de grande ajuda medições de dados, incluindo registros de elevação do nível de mar, levantamento de linhas batimétricas, velocidades das correntes e vazão, que foram utilizados na comparação dos resultados das simulações realizadas com o modelo computacional.

6.3.1 Levantamentos Ecobatimétricos

Em virtude da escassez de dados batimétricos e do alto custo envolvido neste trabalho de campo, foram realizados transectos ecobatimétricos transversais e longitudinais no estuário, durante a maré cheia. O levantamento ecobatimétrico é de semi-detalhe e não houve eqüidistância entre os perfis durante esta campanha. Esses perfis foram utilizados para definir as características do canal, gerar um mapa com algumas linhas batimétricas.

Os trabalhos dos levantamentos batimétricos foram realizados empregando-se uma Ecossonda DGPS/PLOTTER/SONAR (Figura 30), com visor colorido FURUNO GP-1850 F, com 28 canais de recepções paralelas, e frequência de transmissão de som de 50 kHz, sendo capaz de atingir profundidades de até 800 m. As informações foram adquiridas através de um notebook para armazenar estes dados.

Os dados deste levantamento batimétrico foram obtidos com ajuda de um sensor, que foi instalado a 0,5 m abaixo do calado do barco e um DGPS preso na parte superior (Figura 31), e foram corrigidos mediante uso de uma régua de maré (Figura 32), com medidas a cada 20 minutos durante todo o período de coleta de dados.



Figura 30: A Ecossonda DGPS/PLOTTER/SONAR, com visor colorido FURUNO GP-1850 F e o nottbook.



Figura 31: A Ecossonda, o Sensor de recepção dos dados e o DGPS.



Figura 32: Régua de maré presa em um “curral” de pesca, onde as medidas foram obtidas a cada 20 minutos.

6.3.2 Medição de Correntes de maré

Durante o trabalho de campo, realizado no período chuvoso de 04/02/07 à 11/02/07, foram obtidas medidas de intensidade e direção das correntes em um ponto estratégico (Latitude $00^{\circ} 45,187' S$ e Longitude $47^{\circ} 26,712' W$) (Figura 33), ao longo da baía de Maracanã, durante um período de amostragem contínua de 8 dias (preamar e baixamar), abrangendo a sizígia. Para obter as medidas das correntes foi utilizado um Correntógrafo Falmouth Scientific 2D-ACM (Figura 34).

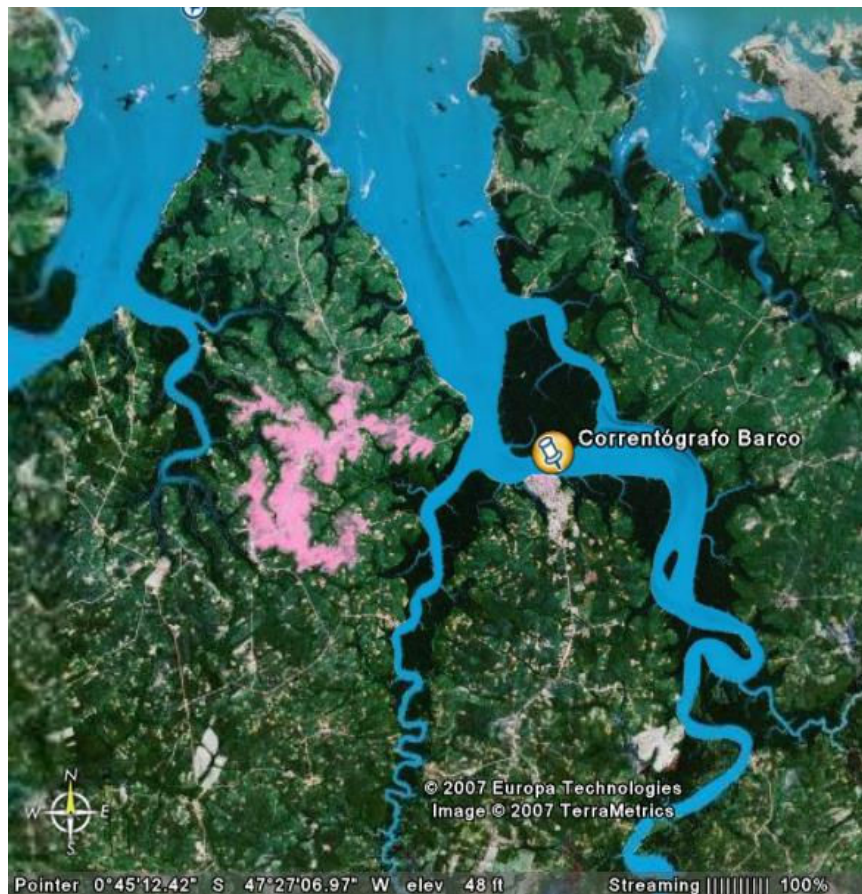


Figura 33: Localização do Correntógrafo



Figura 34: O Correntógrafo Falmouth 2D.

O equipamento fez a leitura a cada 20 minutos e foi fundeado a 1 m de profundidade em um barco de pequeno porte (Figura 35), sendo atravessado por um pedaço de madeira na proa, para que ficasse afastado do calado do barco (Figura 36). Além disso, foi fixado abaixo do equipamento um peso equivalente a 80 kg para evitar a inclinação deste, onde foram amarradas cordas que ligavam o equipamento à frente do barco, também com o mesmo objetivo, e uma corda de segurança para evitar sua perda (Figura 37). O objetivo foi fazer com que o equipamento tivesse uma inclinação menor do que 15° , para que os dados fossem considerados coerentes. Com relação ao barco, este foi preso por duas âncoras que foram lançadas pela “proa” (parte da frente) do barco para evitar o arrasto, o ideal era que o barco ficasse na mesma posição durante todo o período de coleta, ou seja, não fosse arrastado, com exceção do movimento relacionado à inversão da maré (enchente e vazante) em que o barco vira 180° , isto é, de acordo a direção predominante da corrente.



Figura 35: O Barco ancorado para a medição de corrente.



Figura 36: Pedaço de madeira atravessado sobre a proa do barco.



Figura 37: Equipamento preso com um peso de 80 Kg no fundo.

6.3.3 Monitoramento da maré

Durante a realização do campo, período chuvoso – 04/02/07 à 11/02/07, para caracterizar as marés na área, as informações sobre estas foram obtidas com a instalação de medidores de marés na baía (Figura 38), que mediram o nível d'água simultaneamente, em dois pontos distintos (Tabela 1), em um período de 8 dias contínuos a cada 20 minutos. De posse destas informações o modelo foi alimentado com dados reais de nível d'água, com o objetivo de estabelecer níveis d'água ao longo do estuário procurando conhecer a altura e defasagem da onda de maré nos pontos de grade do modelo.

As informações de nível de água foram obtidas, simultaneamente com o correntógrafo, através de Marégrafos Orphirmedes da marca OTT-Hidrometrie (Figura 39).

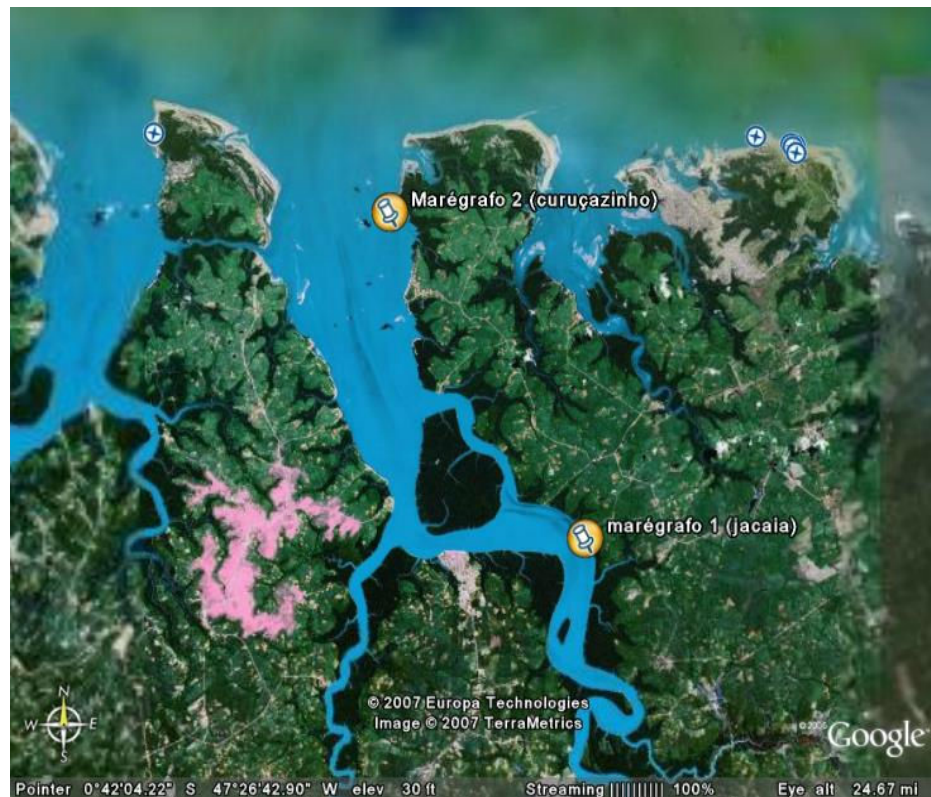


Figura 38: Localização dos Marégrafos.



Figura 39: Marégrafos Orphirmedes da marca OTT-Hidrometrie

Tabela 1: Localização dos equipamentos.

Equipamentos	Latitude	Longitude
Marégrafo 1	00° 45,402' S	47° 23,875'W
Marégrafo 2	00° 37,326'S	47° 29,044'W

A instalação dos marégrafos consistiu na introdução destes equipamentos em tubos PVC's, sendo estes tubos fechados (Figura 40) para evitar que os marégrafos

entrassem em contato com a água. Os marégrafos foram ligados a um tubo medidor de nível de cor preto (Figura 41), que se estendeu, sendo esticado e preso, até às proximidades do fundo e responsável pela medição do nível da maré. Com isso, estes marégrafos foram fixados em pedaços de madeira com cerca de 6 a 7 m de comprimento em pontos pré-definidos, de modo que, onde ficaram estes pontos houvesse sempre a presença de água (Figura 42). Depois de fixação do tubo PVC, que contém o marégrafo no seu interior, o marégrafo ficou pronto para a medição de nível (Figura 43).



Figura 40: Tubo sendo fechado para evitar contato com a água.

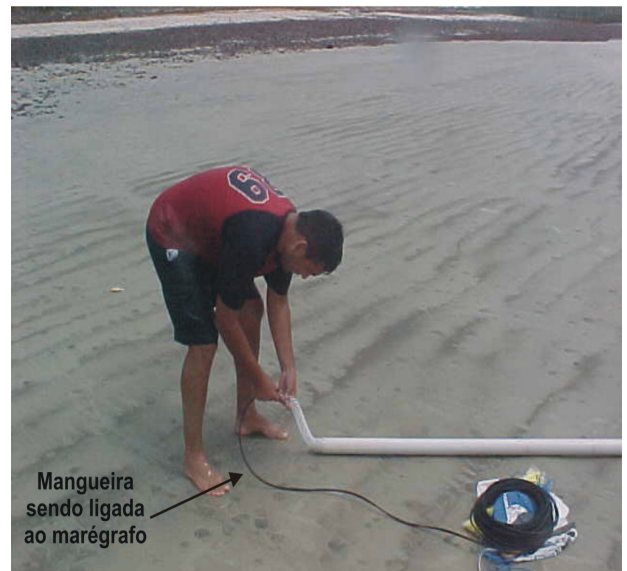


Figura 41: O tubo medidor de nível sendo preso ao equipamento.



Figura 42: Tubo sendo fixado ao pedaço de madeira.



Figura 43: O Marégrafo funcionando, nesta figura, ilustra a dificuldade da coleta de dados na área.

6.3.4 Vazão

Não foram encontrados dados relativos à vazão do rio Maracanã, em nenhum órgão competente, com isso adotou-se a estimativa de vazão do rio Maracanã através de um método simples e racional (Pinto *et al.*, 1976), o modelo para estimativa de vazão, escolhido foi em função da pouca quantidade de dados referentes à área de estudo.

A equação foi a seguinte:

$$Q = \frac{C. im. A}{3,6}$$

Onde:

Q: Pico de vazão em m^3/s ;

C: Coeficiente de deflúvio, definido como a relação entre o pico de vazão por unidade de área e a intensidade média da chuva;

im: intensidade média da precipitação, sobre toda a área drenada;

A: Área drenada em Km^2 .

O coeficiente de deflúvio foi baseado nas características físicas da bacia (solos, vegetação, etc.) obtidos através de mapas da área de estudo, que caracteriza um coeficiente de deflúvio entre 40% a 65% de acordo com o Ábaco do Colorado Highway Department, por isso foi adotado um valor de C:0,5.

A intensidade média da precipitação adotada foi do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2003), no gráfico (Figura 18) mostra a distribuição da precipitação total para região Nordeste do Pará para todos os meses do ano de 2003.

A área da bacia considerada foi 75 % da área total (895 Km^2), equivale a uma área de $671,25 \text{ km}^2$. Isto porque, foi adotado um cálculo considerando uma parte da área drenada ligada a bacia de maracanã.

Esta estimativa é aproximada e geralmente aplicável para pequenas bacias hidrográficas. Com as informações obtidas e realizando-se os cálculos necessários, obteve-se uma estimativa média de vazão para os meses do ano (Tabela 2). Vale ressaltar, que na calibração do modelo este dados podem ser alterados, já que não estão baseados em medidas de campo.

Tabela 2: Tabela mensal com precipitações totais (mm/ mês) e vazões (m^3/s) estimadas para o ano de 2003, respectivamente.

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN
275 mm/mês	550 mm/mês	450 mm/mês	450 mm/mês	180 mm/mês	180 mm/mês
Q: $2,56 \times 10^4$	Q: $5,12 \times 10^4$	Q: $4,19 \times 10^4$	Q: $4,19 \times 10^4$	Q: $1,67 \times 10^4$	Q: $1,67 \times 10^4$
JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
140 mm/mês	90 mm/mês	30 mm/mês	30 mm/mês	35 mm/mês	90 mm/mês
Q: $1,3 \times 10^4$	Q: $8,39 \times 10^3$	Q: $2,7 \times 10^3$	Q: $2,7 \times 10^3$	Q: $3,2 \times 10^3$	Q: $8,39 \times 10^3$

6.4 LABORATÓRIO

Os dados coletados em campo foram processados no laboratório no Instituto de Geociências (IG) da UFPA.

6.4.1 Processamento de Dados

Os dados coletados em campo foram necessários na calibração do modelo, isto é, valores reais medidos na área que foram inseridos em um programa computacional, no caso o SisBAHIA, com o intuito de fazer com que este programa gere modelos que reproduzam a realidade. Entre estes dados coletados tem-se: levantamentos ecobatimétricos, séries temporais de correntes e níveis de marés.

A batimetria foi fundamental na geração da grade do modelo. Esse é um dos pontos mais importantes na implantação do modelo sendo determinante na qualidade dos resultados. A geração da grade do modelo depende basicamente do conhecimento da batimetria do estuário. Os dados foram organizados em ambiente Excel e digitalizados no Programa Surfer e depois inseridos no Programa Sisbahia.

As séries temporais de Corrente e nível de maré foram submetidas a rotinas de processamento de dados elaboradas em ambiente Excel, os dados de correntes foram organizados de forma que as velocidades obtidas fossem consideradas coerentes com a realidade, nos dados dos marégrafos, o que é importante é a variação da maré, considerou-se um nível relativo, os dados foram organizados para esse fim.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Aqui estão apresentadas as etapas de implementação, calibração e validação dos resultados da modelagem hidrodinâmica da circulação do estuário de Maracanã, e da análise dos resultados obtidos. Além disso, aqui também foram correlacionados os dados de campo com os cenários simulados pelo modelo, afim de que se obtivessem resultados que fossem satisfatórios e que fossem correspondentes, no estuário do rio Maracanã (PA).

7.1 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO

A implementação do modelo corresponde à parte inicial, onde são reunidos todos os dados coletados na área de estudo. Esses dados são então fornecidos ao modelo dentro de um domínio pré-definido.

7.1.1 Definição do Domínio de Modelagem

O passo inicial foi à definição de um domínio de interesse. Este domínio é o estuário de Maracanã (área na coloração branca) (Figura 44), de acordo com informações de campo, o curso do rio é extenso e sinuoso e não está totalmente apresentado nesta figura, adotou-se como domínio fluvial somente o curso regularizado, os pequenos canais ao longo do rio não foram considerados por falta de informações.

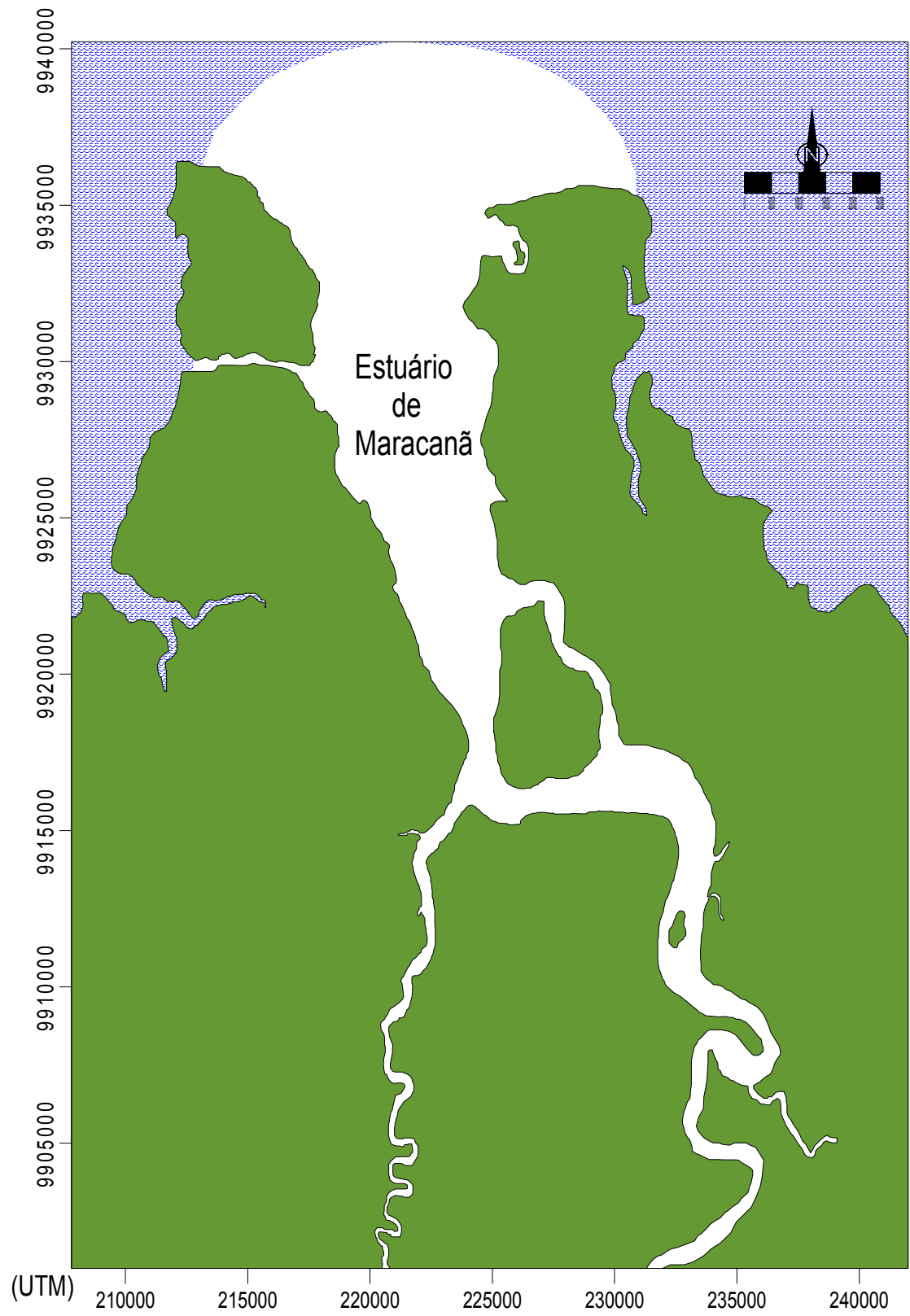


Figura 44: O domínio definido para a modelagem.

7.1.2 Levantamento Batimétrico

As informações relativas às linhas batimétricas, utilizadas neste trabalho, foram obtidas em trabalho de campo com valores reais medidos (Figura 45). Com exceção, de pontos que foram criados utilizando o “bom senso”.

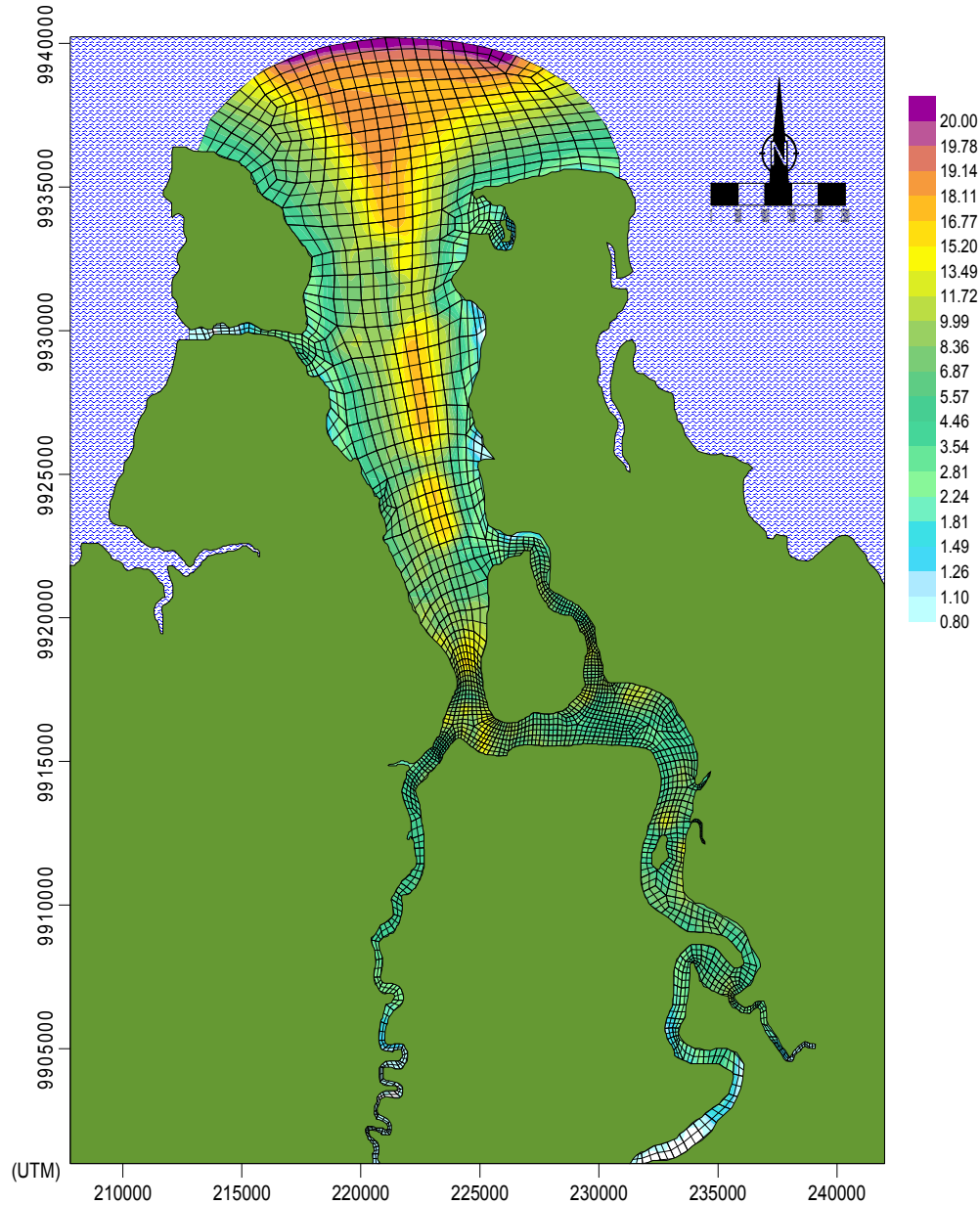


Figura 45: Domínio modelado do Estuário de Maracanã, indicando a malha de discretização em elementos finitos e a batimetria atual com nível de referência a 3 m acima do nível médio do mar. Os eixos representam distâncias em UTM (Universal Transverse Mercator).

7.1.3 Características da Malha Adotada

Para conseguir resultados satisfatórios na modelagem hidrodinâmica, a confecção da malha respeitou os contornos dos limites do domínio a ser estudado, tendo a densidade de elementos definida de acordo com o grau de detalhamento dos resultados esperados.

Nesta confecção da malha adotou-se elementos finitos quadrangulares de 9 nós em uma formulação Lagrangeana sub-paramétricos, pois se obtêm melhores resultados com a malha quadrática, devido maior estabilidade e acurácia.

A malha utilizada para a modelagem do estuário do rio Maracanã (Figura 45), respeita os limites do domínio a ser estudado, totalizando 745 elementos e 3590 nós, nas quais 3546 fazem parte do contorno de terra e 44 são pertencentes à fronteira aberta.

7.1.4 Dados de Marés

7.1.4.1 Marés geradas a partir de constantes harmônicas

Para as simulações do modelo do Estuário de Maracanã são consideradas marés sintéticas geradas a partir das constantes harmônicas para Salinópolis-PA. Por se tratar de uma região não hidrografada, foi realizada uma defasagem de maré calculada para o estuário de Maracanã. Foram usadas 29 constantes harmônicas (Tabela 3), conforme informações contidas no Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras da Fundação de Estudos do Mar (FEMAR).

Foram utilizadas as curvas de maré típicas de Salinópolis-PA como condições de contorno para as simulações realizadas (Figura 46). As curvas de maré foram geradas a partir das constantes harmônicas de Salinópolis-PA (Tabela 3), e foram utilizadas como forçantes do modelo hidrodinâmico do Estuário de Maracanã.

Tabela 3: Constantes harmônicas referentes à estação maregráfica de Salinópolis-PA.

Componentes	Período (Horas)	Amplitude (m)	Fase (Graus)
2N2	12.90537448	0.0370	187.9989
J1	23.09847677	0.0060	266.0014
K1	23.93446966	0.1120	247.0021
K2	11.96723479	0.1400	240.0006
L2	12.19162021	0.0740	193.9978
M1	24.83324836	0.0020	354.002
M2	12.42060122	1.7250	210.9974
M3	8.280400814	0.0240	5.998868
M4	6.21030061	0.0820	315.9977
MK3	8.177139966	0.0140	39.99818
MN4	6.269173909	0.0310	335.9996
MNS2	11.78613095	0.0260	257.0002
MO3	8.38630297	0.0160	13.00041
MS4	6.103339279	0.0660	5.001922
'MSf	354.3670522	0.0280	26.99777
Mf	327.8589689	0.0140	7.998491
Mm	661.3092049	0.0220	24.99815
N2	12.65834824	0.3200	202.002
O1	25.81934166	0.0960	223.0009
OO1	22.3060742	0.0050	253.9979
P1	24.06589016	0.0290	245.0025
Q1	26.86835667	0.0150	230.0024
S2	12	0.5570	245.9994
SN4	6.160192785	0.0120	67.00168
Sa	8765.82109	0.0210	311.0015
Ssa	4382.905209	0.0760	3.002299
T2	12.0164492	0.0440	183.9997
mu2	12.87175763	0.0900	279.0018
nu2	12.62600441	0.0620	185.0023

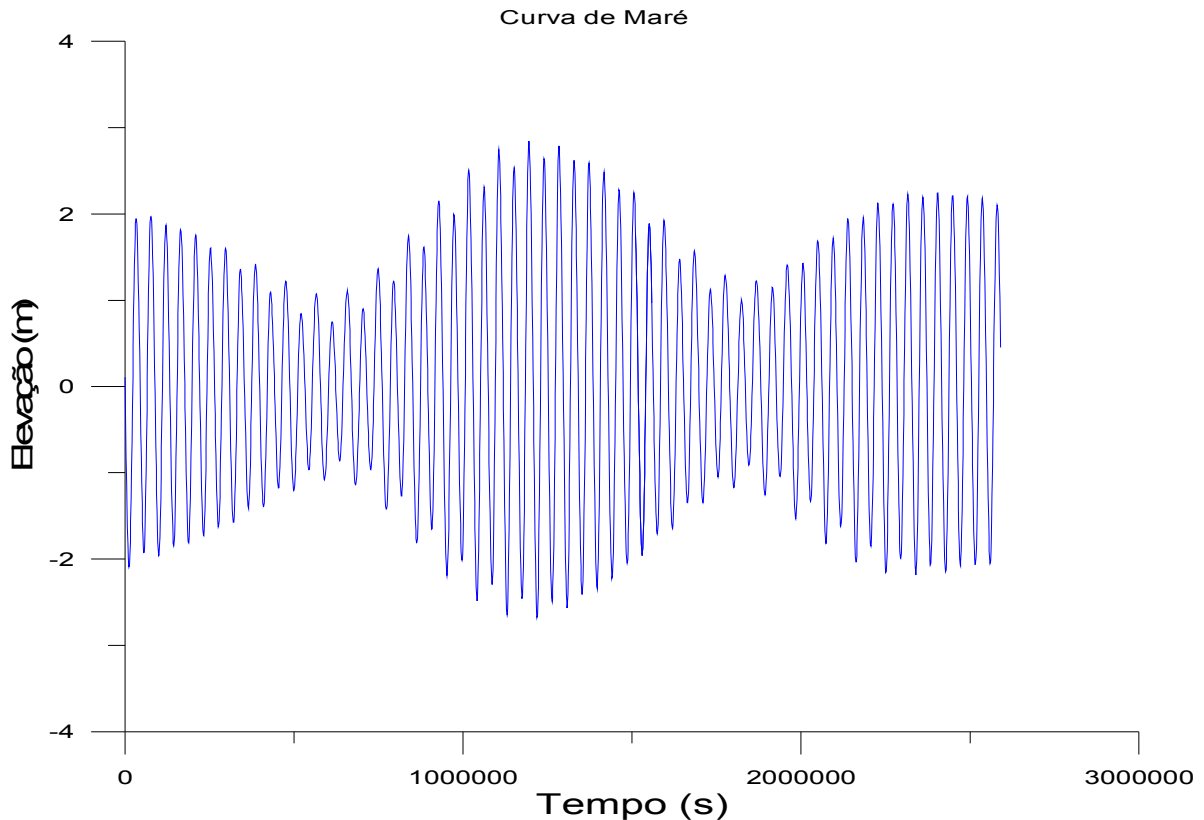


Figura 46: Curva de maré típica na região de Salinópolis geradas a partir das constantes harmônicas desta área, ao longo de 30 dias, sendo estas condições adotadas na modelagem do Estuário de Maracanã. O período gerado com auxílio do SisBAHIA foi do 1 a 28 de Fevereiro de 2007.

7.1.4.2 Elevação de Nível d' água medido no campo

As medidas “*in situ*” foram obtidas em relação a um nível relativo e apresentando os valores de elevação (Figura 47). Os dados do marégrafo 1, foram considerados do dia 04/02/07 até o dia 08/02/07, pois nos dias seguintes houve problema com a medição e os dados não foram considerados coerentes, já nos dados do marégrafo 2, pode-se observar um período maior de medição (04/02 até 11/02).

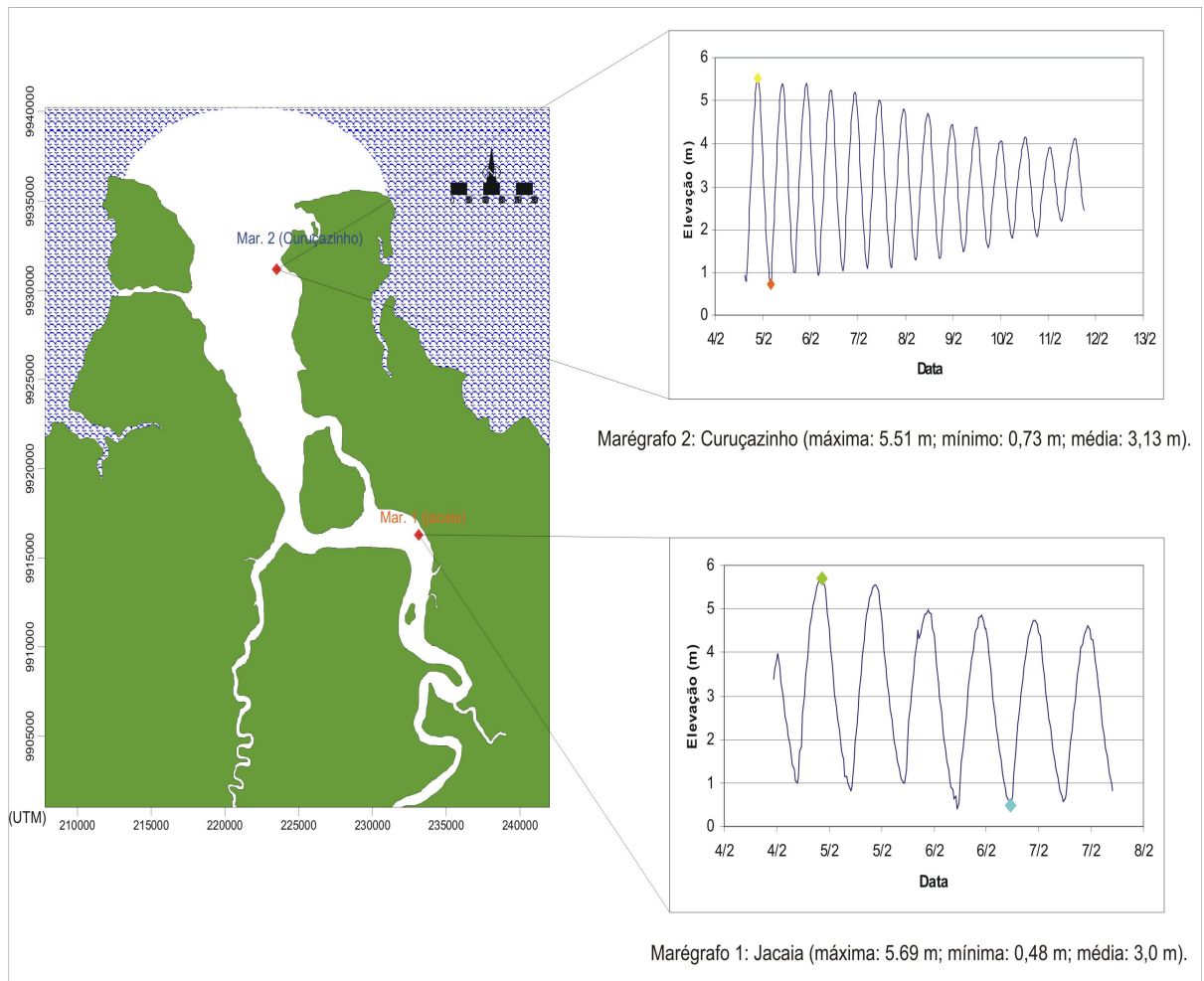


Figura 47: Localização e valores de elevação máximo, mínimo e médio registrados.

7.1.4.3 Relação entre Marés geradas pelas Constantes Harmônicas e Dados Medidos no campo.

Na relação entre os dados gerados pelas constantes harmônicas de Salinópolis-PA, com a realização da defasagem de maré para o estuário de Maracanã, e os dados medidos em campo mostraram um “atraso” da maré de Maracanã em relação a Salinópolis, sendo este mais acentuado no interior do estuário (Figura 48), do que próximo à foz (Figura 49).

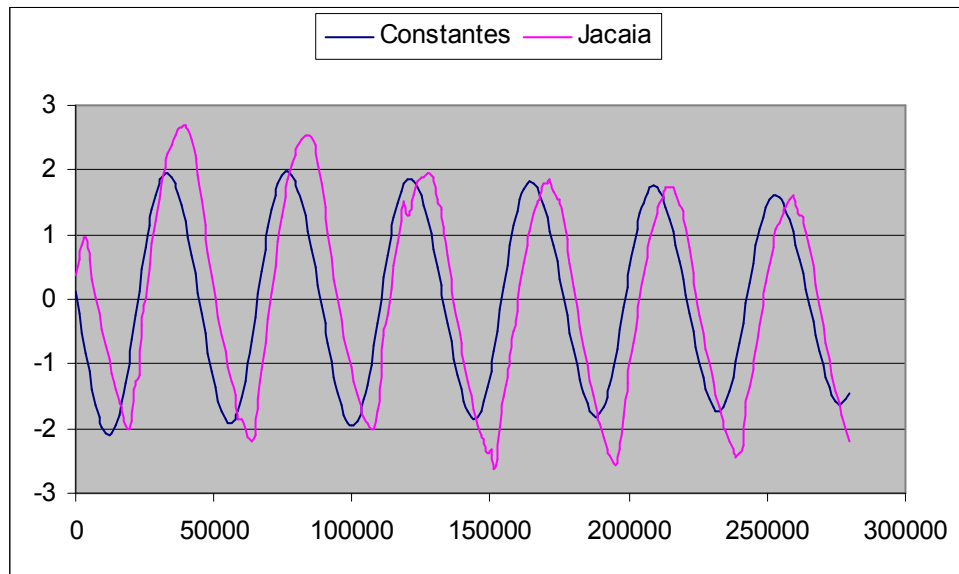


Figura 48: Relação entre as constantes harmônicas e o marégrafo 1 (Localidade Jacaia).

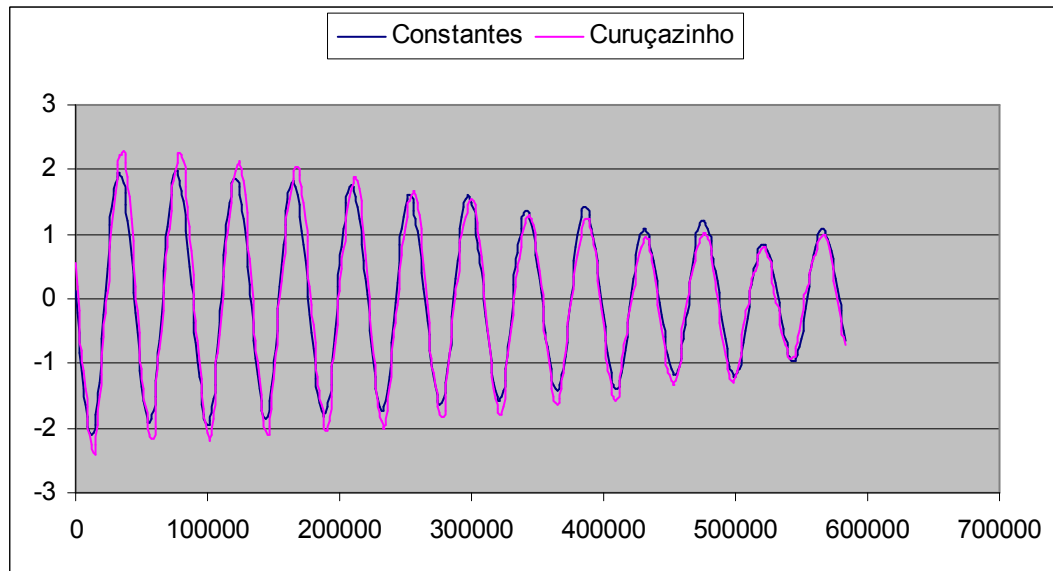


Figura 49: Relação entre as constantes harmônicas e o marégrafo 2 (Localidade Curuçazinho).

7.1.5 Dados de direção e velocidade das Correntes

Os dados de correntes medidos são dados brutos onde é observada a velocidade longitudinal ao canal principal (VN) e a velocidade transversal ao canal (VE). No processamento destes dados, realizou-se a decomposição das velocidades e a

correção através da declinação magnética da Terra, isto com o intuito de se observar a direção preferencial do canal NW-SE (Figura 50). Pode-se constatar também, que os menores valores de velocidade absoluta das correntes estão relacionados ao instante de virada da maré (estofa de preamar e baixamar) e que os maiores valores são encontrados na meia maré enchente e vazante (Figura 51).

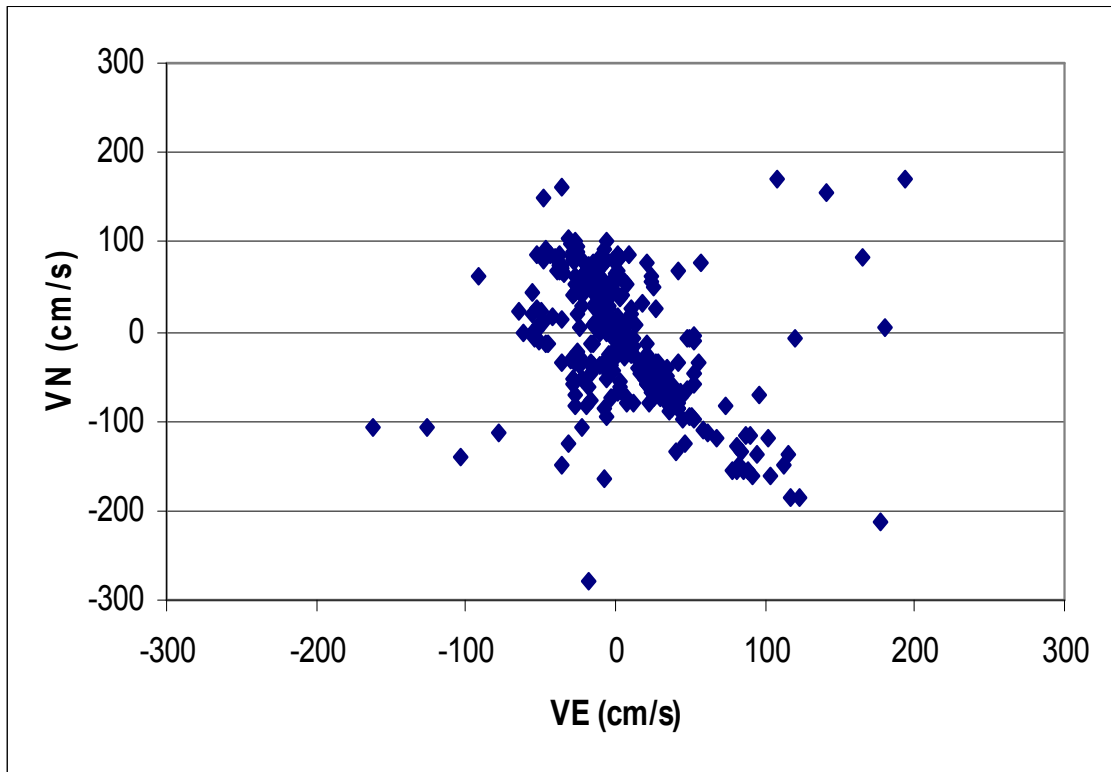


Figura 50: Direção do canal principal NE-SW do Estuário do rio Maracanã.

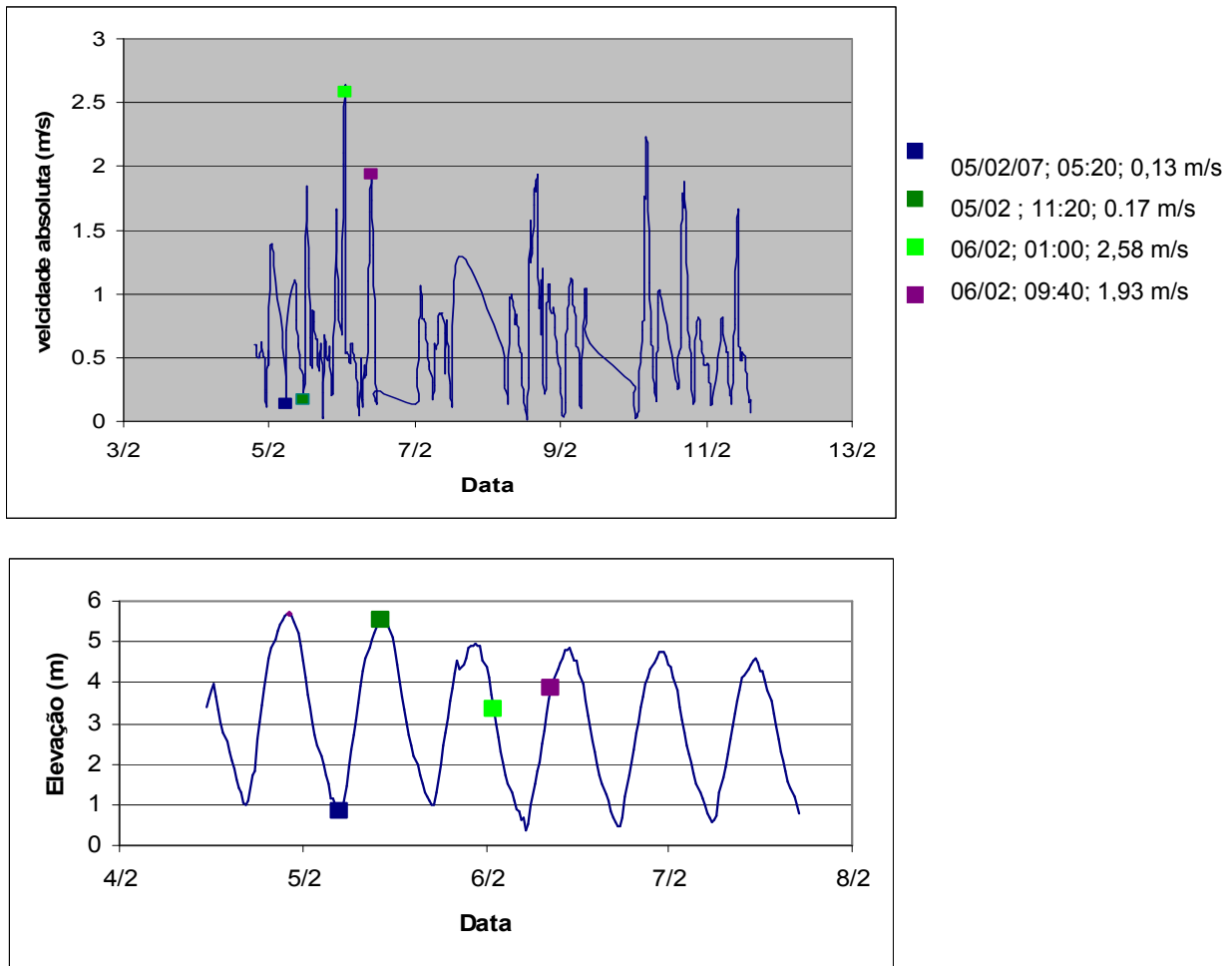


Figura 51: A velocidade da corrente absoluta em relação à elevação do Marégrafo 1.

7.1. 6 Determinação do tipo de sedimento de fundo

A determinação da granulometria do sedimento de fundo da calha do estuário do rio Maracanã é necessária para a sua caracterização, que é um parâmetro ambiental importante para definir o coeficiente de rugosidade de fundo no modelo. Para se determinar a rugosidade equivalente do fundo é necessário o conhecimento da granulometria dos sedimentos presentes no rio maracanã. A amplitude da rugosidade equivalente do fundo (ϵ) é função direta do material componente do leito e é empregada no cálculo do coeficiente de Chézy, que, por sua vez, é utilizado na equação da tensão de atrito no fundo.

Abbot & Basco⁸ (1989) apud Amaral (2003) recomendam como amplitude da rugosidade equivalente os valores apresentados no Tabela 4. Além desses valores proposto por esses autores, Topázio (2003) e Martins (2001) adotaram valores mais específicos para a distribuição da amplitude da rugosidade equivalente de fundo (Tabela 5).

Tabela 4: Valores recomendados para a rugosidade equivalente de fundo. (ABBOT & BASCO, 1989 apud AMARAL, 2003).

Terreno ou leito de terra (areia, terra, vasa, etc.)	
Leito com transporte de sedimentos	$0.0070 \text{ m} < \varepsilon < 0.0500 \text{ m}$
Leito com vegetação	$0.0500 \text{ m} < \varepsilon < 0.1500 \text{ m}$
Leito com obstáculos	$0.1500 \text{ m} < \varepsilon < 0.4000 \text{ m}$
Fundo de pedra ou rochoso	
Fundo de alvenaria	$0.0003 \text{ m} < \varepsilon < 0.0010 \text{ m}$
Fundo de pedra lisa	$0.0010 \text{ m} < \varepsilon < 0.0030 \text{ m}$
Fundo de asfalto	$0.0030 \text{ m} < \varepsilon < 0.0070 \text{ m}$
Fundo com pedregulho	$0.0070 \text{ m} < \varepsilon < 0.0150 \text{ m}$
Fundo com pedras médias	$0.0150 \text{ m} < \varepsilon < 0.0400 \text{ m}$
Fundo com pedras	$0.0400 \text{ m} < \varepsilon < 0.1000 \text{ m}$
Fundo com rochas	$0.1000 \text{ m} < \varepsilon < 0.2000 \text{ m}$
Fundo de concreto	
Fundo de concreto liso	$0.0001 \text{ m} < \varepsilon < 0.0005 \text{ m}$
Fundo de concreto inacabado	$0.0005 \text{ m} < \varepsilon < 0.0030 \text{ m}$
Fundo de concreto antigo	$0.0030 \text{ m} < \varepsilon < 0.0100 \text{ m}$

Tabela 5: Valores recomendados para a rugosidade equivalente do fundo segundo Topázio (2003) e Martins et al. (2001).

Granulometria	Amplitude da Aspereza Equivalente de Fundo (m)
Lama a areia fina	$0.020 < \varepsilon < 0.030$
Areia fina a areia média	$0.030 < \varepsilon < 0.045$
Areia média a grossa	$0.045 < \varepsilon < 0.065$

⁸ ABBOT, M. B., BASCO, D. R. *Computational fluid dynamics, an introduction for engineers*. Logan Group, UK Limited. 1989.

O número para a rugosidade equivalente do fundo é atribuído individualmente para cada ponto da grade do modelo. Pode-se também especificar um valor para todos os pontos da grade ou um valor de rugosidade equivalente para cada ponto da grade. Neste trabalho, como não houve coletas de sedimentos, foi adotado um valor único, que foi de 0,02 utilizado para rugosidade de fundo que compreende ao fundo com de lama a areia fina, que foi determinado para o estuário do rio de Maracanã.

7.1.7 Vazão

Dados referentes às vazões dos rios considerados no modelamento foram obtidos de acordo com valores estimados através de método simples e racional, isto é, sem medidas reais. Foram considerados dois pontos na região modelada do estuário do rio Maracanã (Figura 52). Os subdomínios modelados representam parte do trecho estuarino de tais rios. As seguintes vazões médias foram adotadas (Tabela 6).

Tabela 6: Valores de vazões médias.

Localização	Vazão (m³/s)
Montante Leste	25.000 m ³ /s
Montante Oeste	15.000 m ³ /s

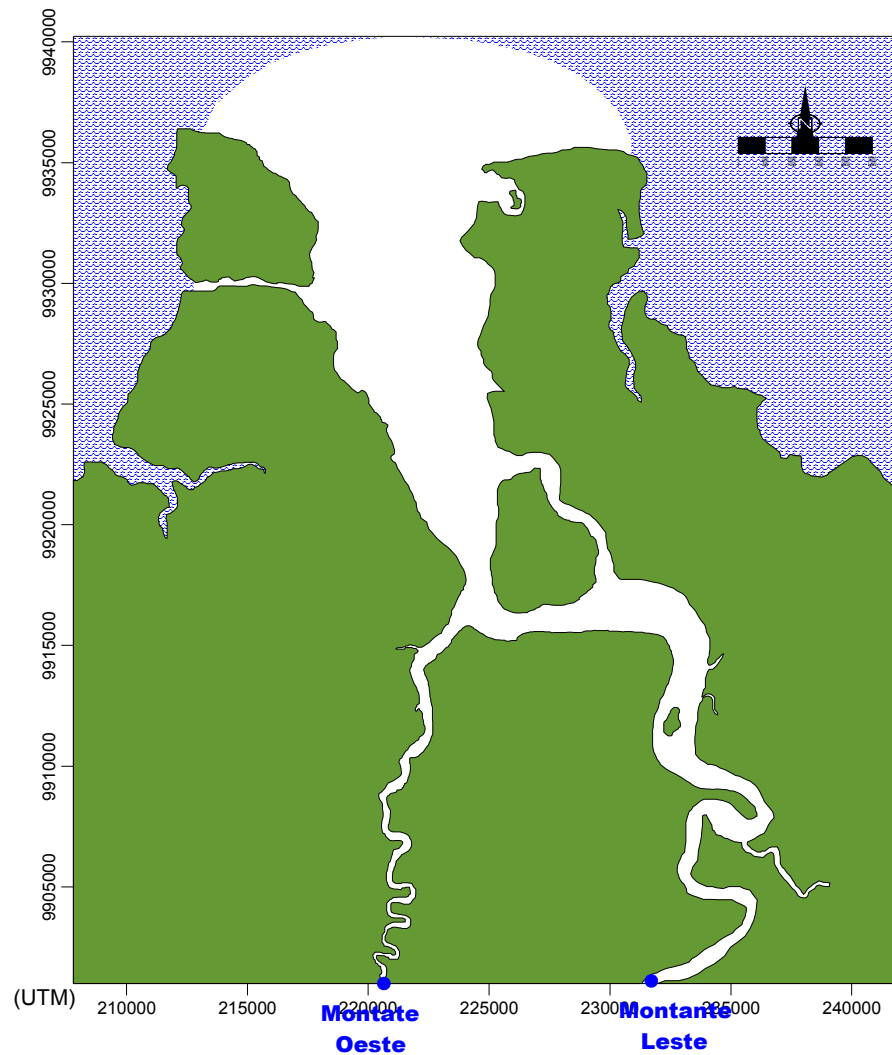


Figura 52: Mapa mostrando a localização das estações com valores de vazão (na cor azul).

7.1.8 Dados de Vento

Os dados de vento para modelagem da circulação hidrodinâmica podem ser fornecidos de diversas formas ao modelo. Os dados podem ser desde constantes no tempo e uniformes no espaço, até totalmente variáveis no tempo e variados no espaço. O fornecimento de dados de vento variados no espaço depende da disponibilidade de medições, que em geral só são efetuadas em pontos esparsos. Assim, é mais comum alimentar o modelo com dados de vento variáveis no tempo, mas uniformes no espaço. No entanto, neste trabalho foram considerados os ventos tipo permanente e uniforme com intensidade média de 6 m/s e direção 75° ENE.

7.2 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO

A calibração do modelo é o ajuste dos fatores inexatos conhecidos (coeficiente de rugosidade do fundo ou condições de contorno), procurando alcançar a concordância entre o modelo e os dados medidos no campo.

Os ajustes dos parâmetros na modelagem não acaba com calibração. Como complemento deste processo, é necessário que os parâmetros do modelo sejam validados, é a chamada de validação do modelo. Conforme Ribas (2004), a validação de um modelo computacional é o processo de formular e documentar a aplicabilidade e precisão dos resultados computacionais do modelo em relação aos seus propósitos, e do sistema natural que o mesmo representa. Nesta etapa da validação, experimentos computacionais devem ser realizados para provar o modelo como um todo e não buscar erros isolados, resultando na representação da habilidade do modelo reproduzir os fenômenos reais. Durante o processo de validação não se pode alterar os parâmetros do modelo obtidos na etapa da calibração e os resultados do modelo computacional devem ser comparados com informações de campo.

No presente trabalho, a calibração e a validação tiveram como foco principal os valores de correntes e marés, com o objetivo de comparar e equilibrar os valores gerados do modelo com os valores medidos no trabalho de campo. Além da vazão, que é importante na circulação do estuário de Maracanã.

7.3 CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA NO ESTUÁRIO DO RIO MARACANÃ

A circulação no estuário de Maracanã depende basicamente da ação das marés, que possuem alturas iguais ou maiores do que 4 m, caracterizando um regime de macromarés. Nesta região, observa-se que as alturas de marés são maiores no interior do estuário (estação braço direito - Marégrafo 1) do que em relação à costa aberta (estação Foz – Marégrafo 2), (Figura 53). O modelo adotado representa bem o efeito (Figura 54), das alturas de marés nas estações do braço direito e da foz, observando que as alturas de maré são maiores na montante do que na jusante, provavelmente por conta da amplificação das componentes de marés em regiões de baías rasas e também pela geometria do estuário.

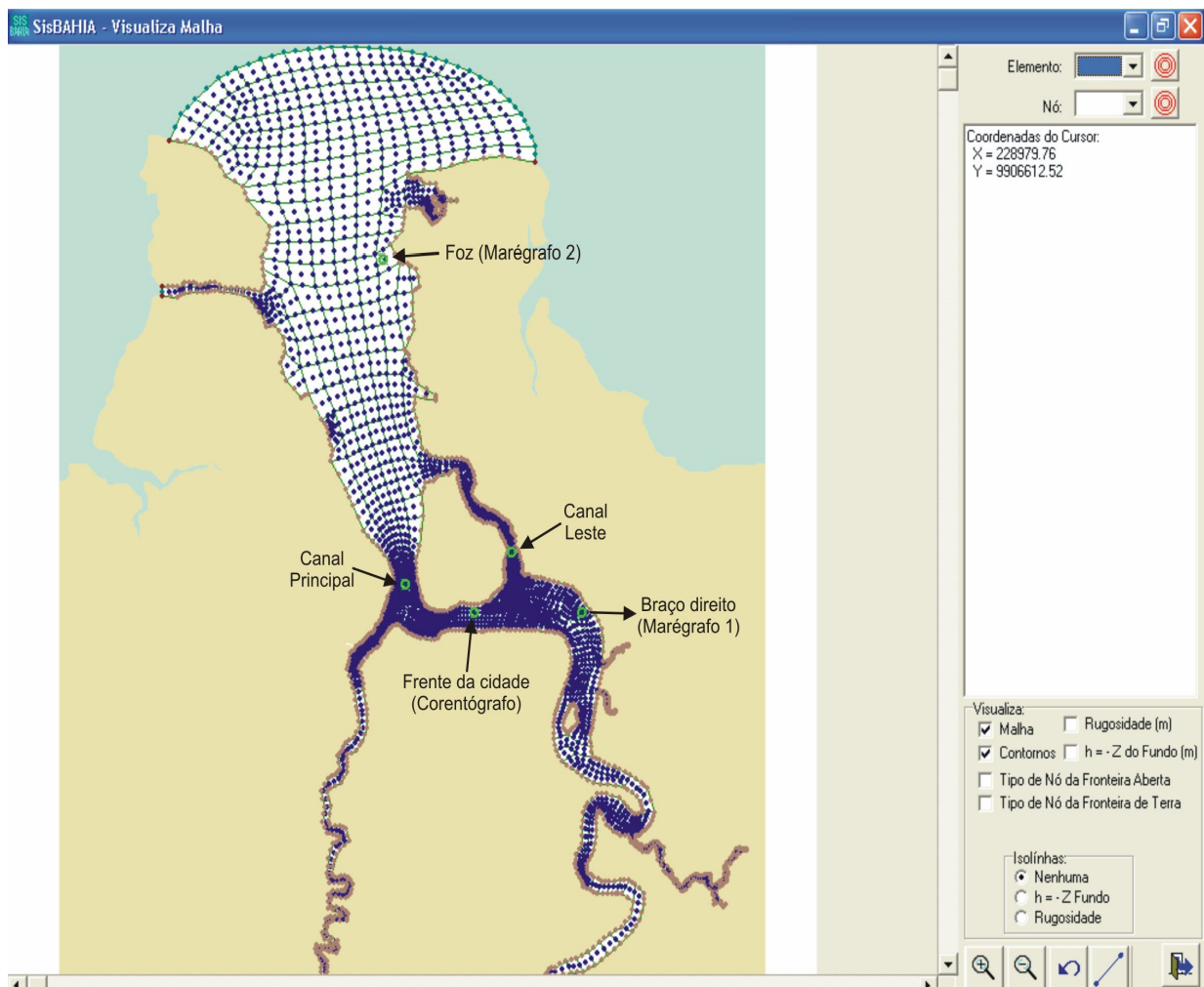


Figura 53: A localização das estações definidas no processo de modelagem.

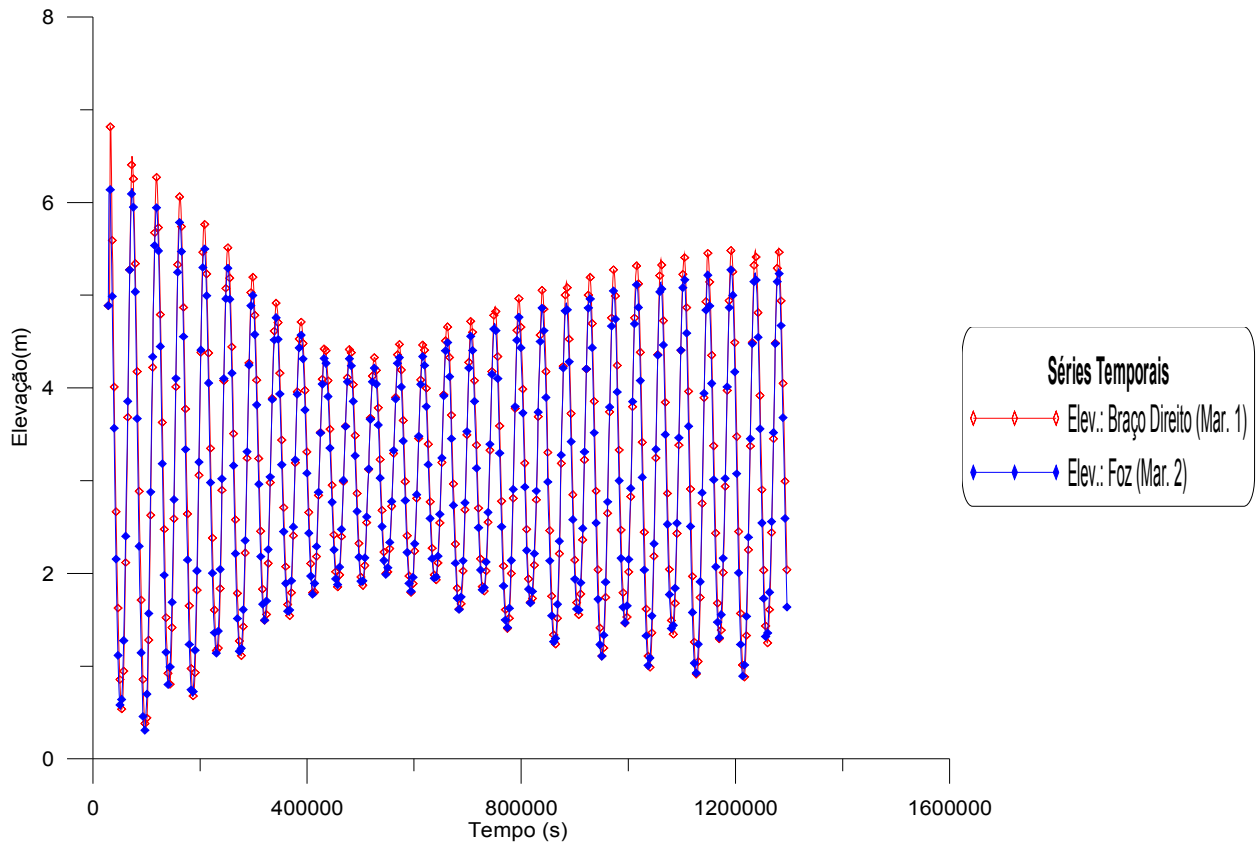


Figura 54: Comparação de níveis de maré nas estações braço direito (posição do marégrafo 1) e Foz (posição do marégrafo 2). Nota-se o aumento das marés na região da estação braço direito em relação à estação foz.

7.3.1 Simulações Hidrodinâmicas

Os cenários de modelagem considerados utilizaram os dados descritos anteriormente. As simulações tiveram duração suficiente para se estabelecer uma situação de equilíbrio no Estuário do rio Maracanã. Foram adotados 15 dias para o equilíbrio do modelo hidrodinâmico, de modo que, ficasse caracterizado um período de maré de sizígia, e quadratura.

A definição dos padrões das correntes foi realizada pelos resultados fornecidos pelo modelo 2DH, através de campos de vetores representativos da velocidade resultantes das componentes x e y , integradas ao longo da coluna d'água. Desta maneira, avaliando a velocidade média, a direção e intensidade das correntes no interior do estuário.

Para os valores de correntes apresentados no resultado do modelo hidrodinâmico, definiu-se uma estação denominada Frente da Cidade que coincidiu com o ponto de coleta das correntes feitas pelo correntógrafo, de onde se obteve os instantes em que foram realizadas as simulações para as marés de sizígia e quadratura (Figura 55).

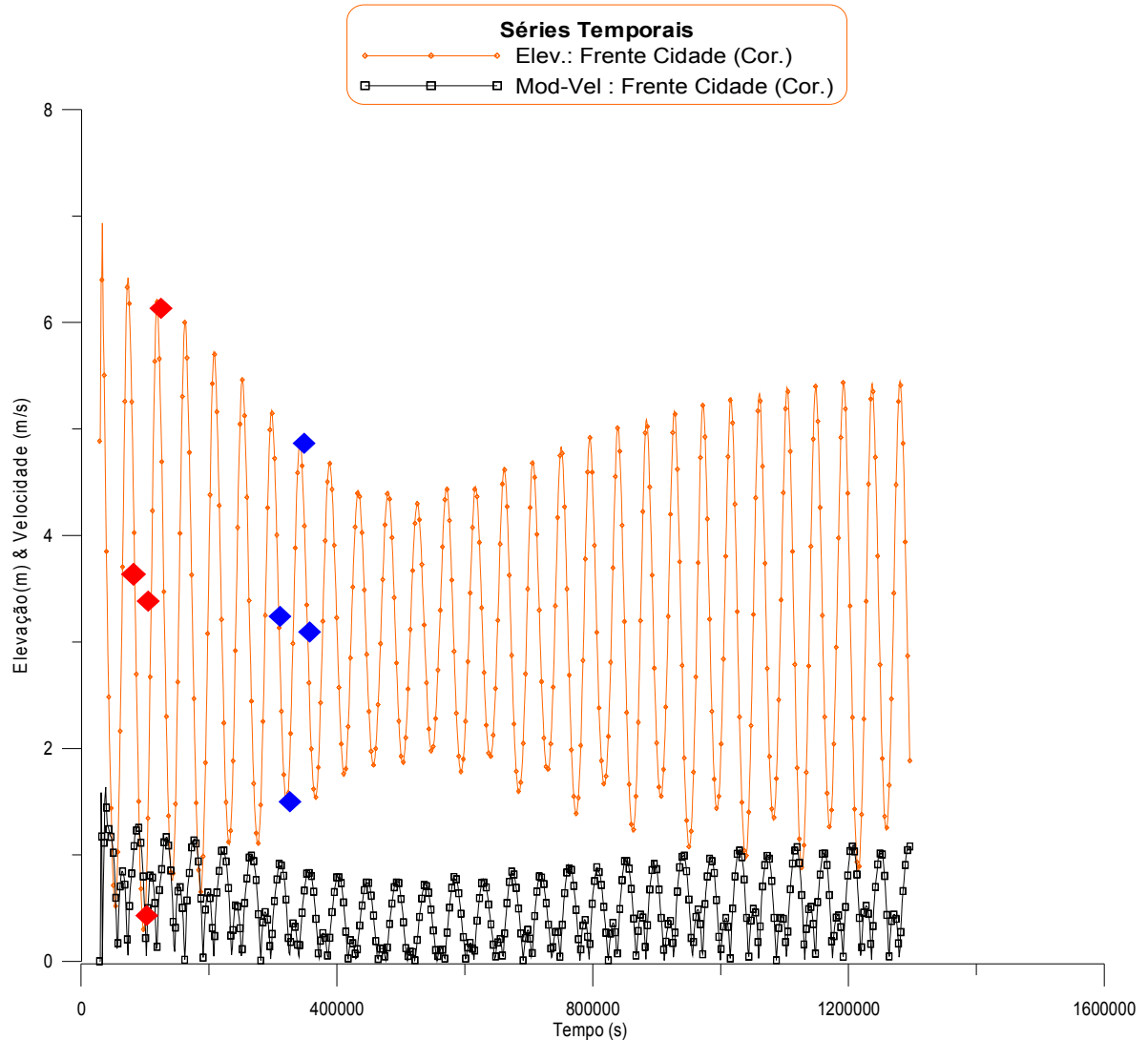


Figura 55: Instantes de maré de sizígia (meia maré vazante, estofa baixamar, meia maré enchente e estofa preamar), representadas pelos losangos vermelhos e instantes de maré de quadratura (meia maré vazante, estofa baixamar, meia maré enchente e estofa preamar), representadas pelos losangos azuis..

7.3.1.1 Maré de Sizígia

a) Cenário 1 (Meia Maré Vazante)

Nesta simulação hidrodinâmica, indicada pelo primeiro losango vermelho (Figura 55), no instante 84000 segundos. O ponto onde foi colocado o correntógrafo apresentou velocidade de 1,17 m/s (Figura 56). Essas velocidades representadas na área de estudo foram geradas pelo módulo das velocidades em U e V. Os valores de velocidades para esse instante oscilaram de um mínimo de 0 m/s a 1,63 m/s.

Observou-se, de maneira geral, que ao longo do estuário, próximos às margens as velocidades são nulas ou muito pequenas (Figura 57), pois devido à diminuição do nível de maré ocorre o aparecimento de bancos de areia. Além disso, pode-se dizer também, que as velocidades diminuíram à medida que o nível de maré começou a baixar e as correntes começaram a sofrer atrito com o fundo.

b) Cenário 2 (Estofa de baixamar)

Esta simulação foi indicada pelo segundo losango vermelho (Figura 55); no instante 99600 segundos. Quando se trata de estofa de maré, geralmente encontramos as menores velocidades ou velocidades nulas, na simulação não foi diferente. Apresentaram-se muitos valores de velocidade nula, principalmente na parte externa do estuário próximo a desembocadura, devido à grande quantidade de bancos de areia emersos durante a baixamar (Figura 58). No estuário observou-se a ocorrência de uma inversão das correntes, provavelmente relacionado à grande extensão do estuário e os instantes em que a maré atingiu seu mínimo, em uma parte do estuário, coincidindo com os primeiros instantes em que ela começa a encher, em outras partes do estuário.

c) Cenário 3 (Meia Maré Enchente)

O cenário 3 indicou-se pelo terceiro losango vermelho (Figura 55), no instante 109200 segundos. No ponto onde ficou o correntógrafo (Estação Frente da

Cidade) a velocidade atingiu valores de 0,82 m/s.. Pode-se deduzir com isso, que os valores de correntes encontrados na meia maré vazante são maiores se comparados com os de meia maré enchente. As maiores velocidades foram encontradas na parte externa do estuário (Figura 59)

d) Cenário 4 (Estofa de Preamar)

No cenário 4, indicado pelo quarto losango vermelho (Figura 55), no instante 120000 segundos. Pode-se observar que nesse instante ficou bem evidenciado o momento de estofa de preamar, quando se observou que os valores de velocidade, em sua maioria, estão no intervalo entre 0 m/s e 0,13 m/s (Figura 60). Observa-se também, que a velocidade fica menor ou nula, próximo às margens na desembocadura, isto também em virtude do aparecimento de bancos de areia..

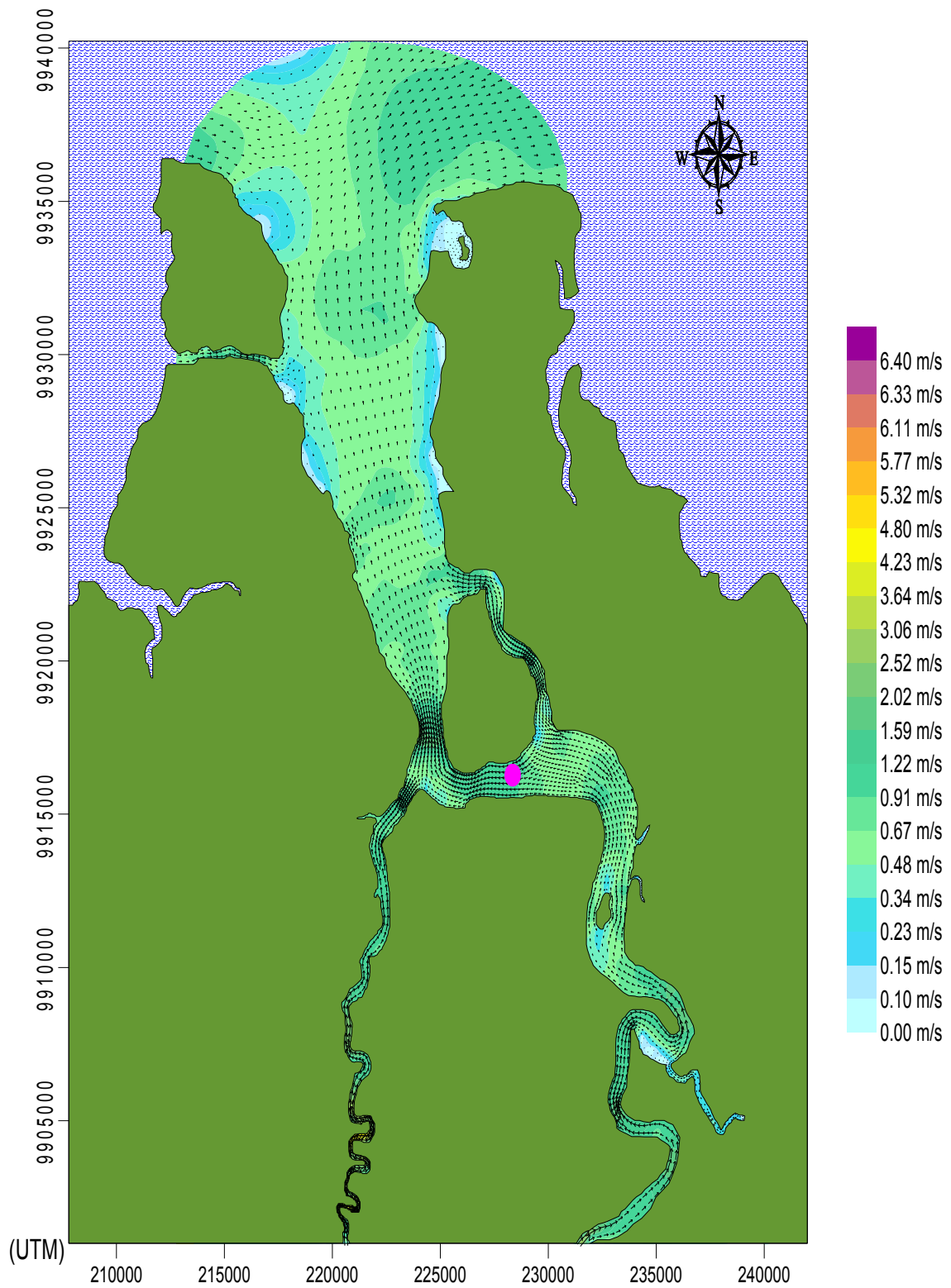


Figura 56: O padrão de correntes gerado na simulação 1 referente ao instante em que foi atingida a velocidade na Estação Frente da Cidade (ponto róseo) Os vetores correspondem às velocidades e suas magnitudes são verificadas através do padrão de cores.

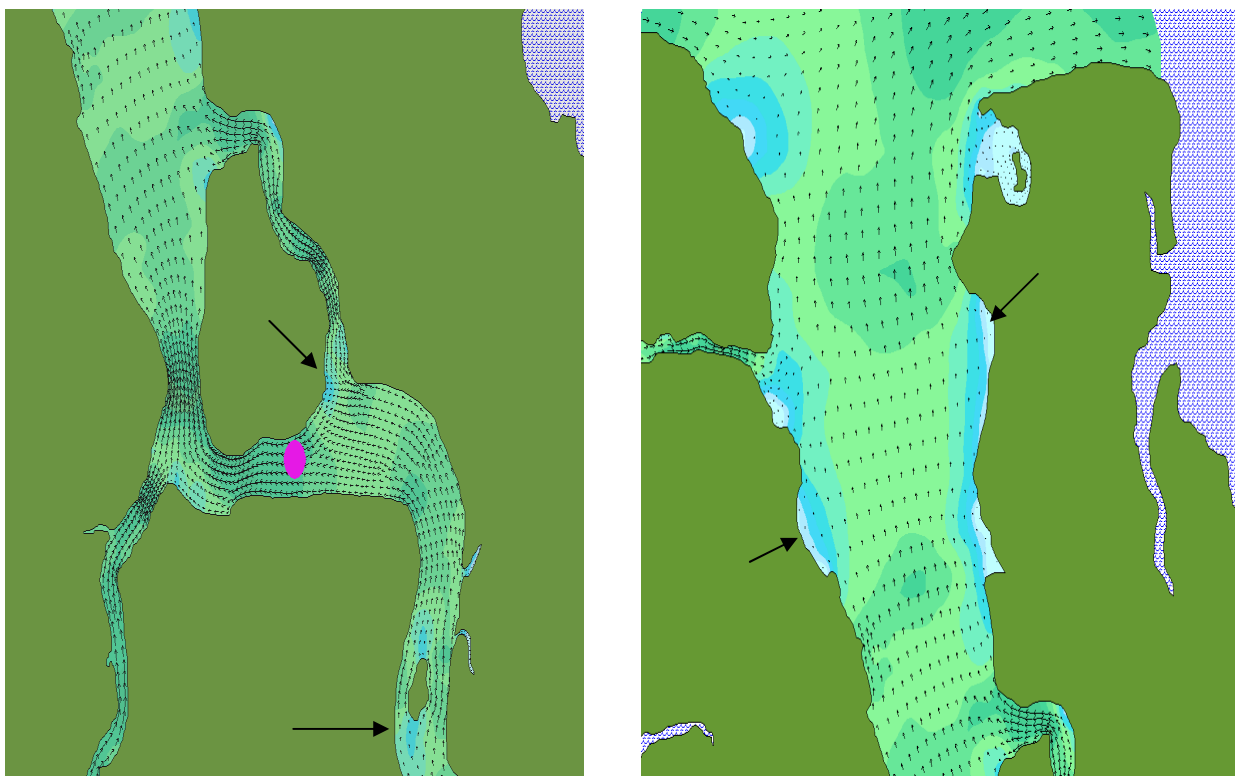


Figura 57: Detalhamento mostrando a localização (através de setas) das velocidades muito pequenas ou nulas nas margens ao longo do estuário.

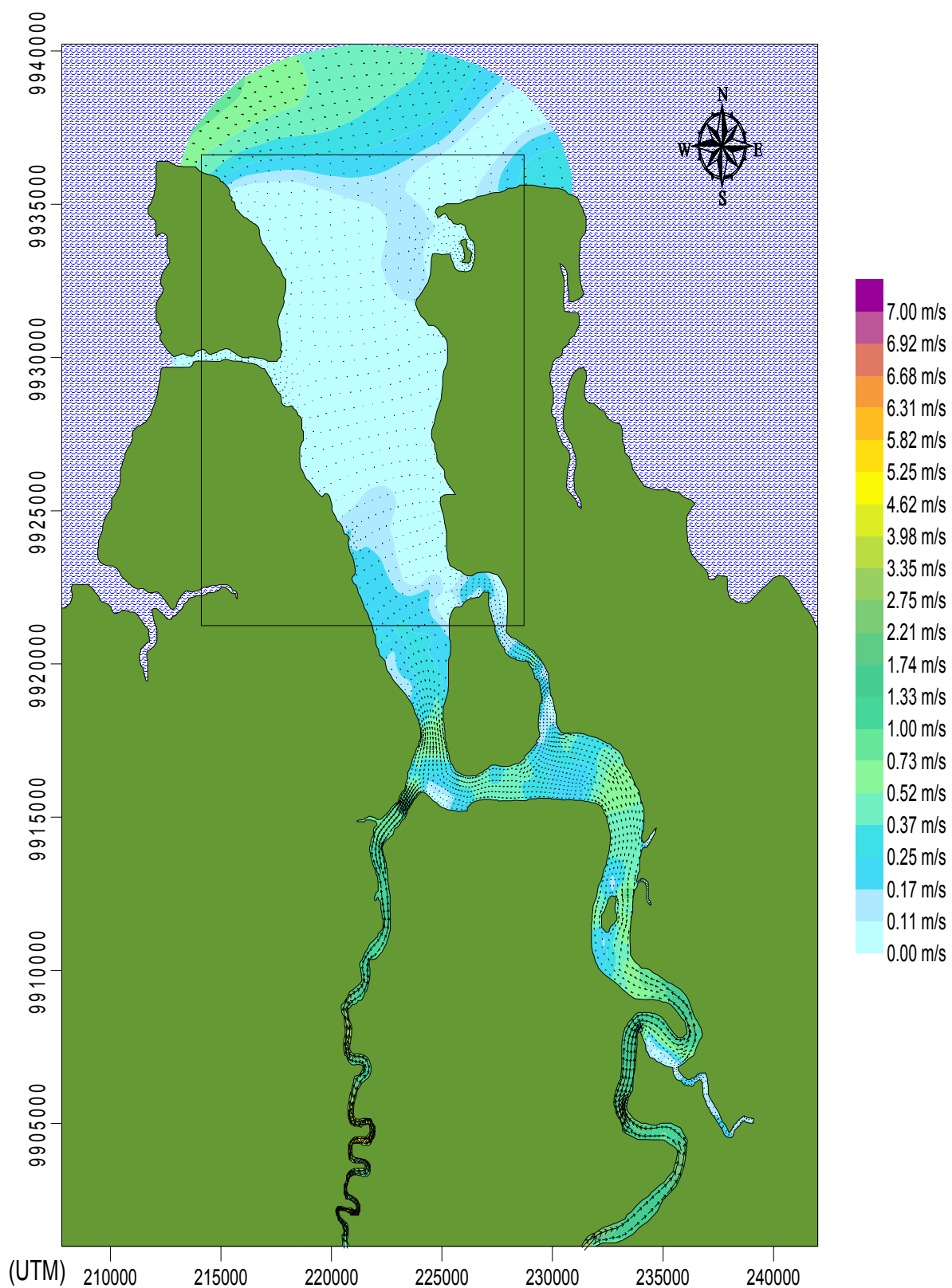


Figura 58: O padrão de correntes gerado no Cenário 2 (Estofa de baixamar), em destaque na figura (o quadrado) representa a parte do estuário com as menores velocidades de correntes neste cenário.

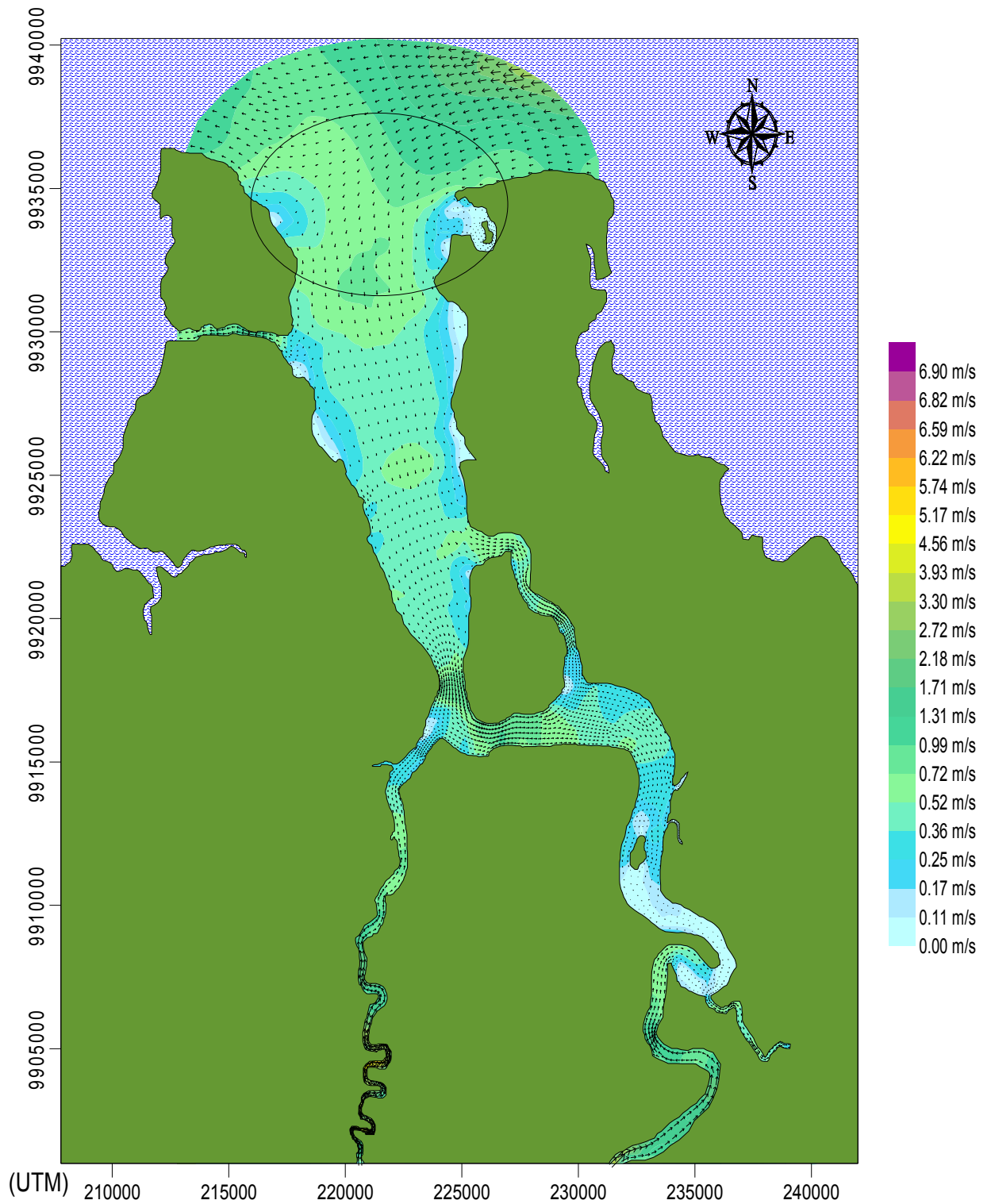


Figura 59: O padrão de correntes gerado no cenário 3 (Meia Maré enchente), em destaque na figura (o círculo) representa a parte do estuário com as maiores velocidades de correntes.

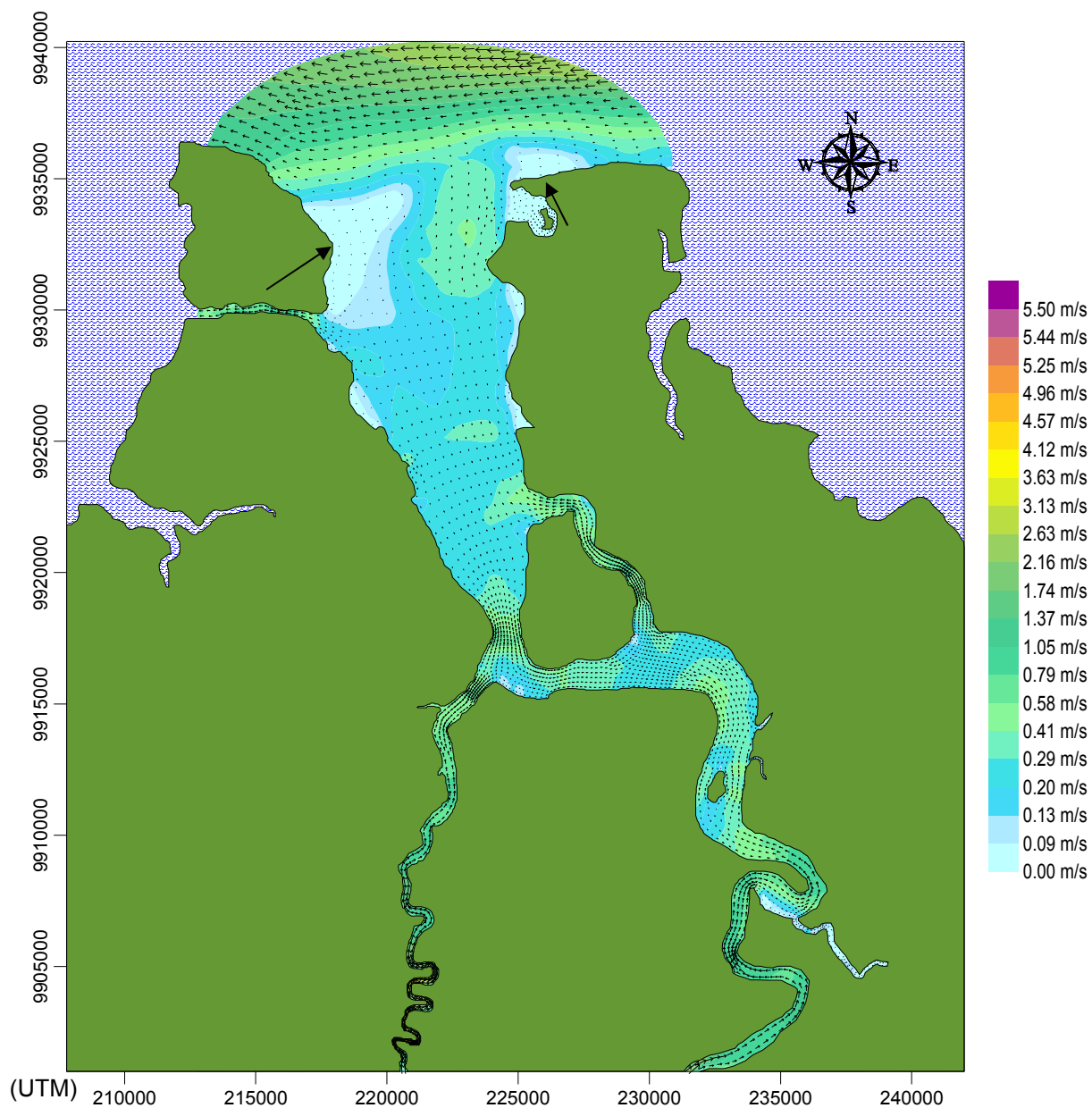


Figura 60: O padrão de correntes gerado no cenário 4 (Estofa de Preamar), as menores velocidades se encontram próximas as margens na desembocadura., com velocidades variando de 0 a 0,13 m/s ao longo do estuário.

7.3.1.2 Maré de Quadratura

e) Cenário 5 (Meia Maré Vazante)

O cenário 5 ocorre numa maré de Quadratura (Meia Maré Vazante), representado pelo primeiro losango azul (Figura 55), no instante 309600 segundos (Figura 61). Aqui, observou-se que os valores de velocidades de correntes nas marés de sizígia são maiores que nas marés de quadratura, tanto nos valores gerados pelo modelo (sizígia de 0 a 1,17 m/s e quadratura de 0 a 0,91 m/s); como nos dados coletados em campo (sizígia de 0 a 2,58 m/s).

f)_Cenário 6 (Estofa de baixamar)

O cenário 6 ocorre na estofa de baixamar (maré de quadratura), sendo representado pelo segundo losango azul (Figura 55), no instante 319200 segundos. Pode-se observar que nesse instante (baixamar) as velocidades das correntes estão variando de 0 m/s a 0,67 m/s (Figura 62).

g) Cenário 7 (Meia Maré Enchente)

No cenário 7, ocorre uma meia maré enchente, sendo representada pelo terceiro losango azul (Figura 55), no instante 332400 segundos. Observou-se que ao longo do estuário as velocidades foram baixas (Figura 63), com exceção da desembocadura que sofreu uma variação de a 0,32 m/s. Os valores gerados pelo posição do correntógrafo no modelo apresentarm uma variação de 0 a 0,35 m/s.

h) Cenário 8 (Estofa de Preamar)

O cenário 8 está representado pelo losango azul (Figura 55), no instante 343200. Observou-se que o comportamento da velocidade é semelhante com a estofa de preamar da maré de sizígia (Figura 64). Porém, quando se compara as estofas de preamar de quadratura e sizígia observa-se que as marés de sizígia apresentam profundidade mínima maior (Figura 65) do que a de quadratura (Figura 66). Isto também pode ser ligado ao fato de a sizígia apresentar as maiores elevações de maré

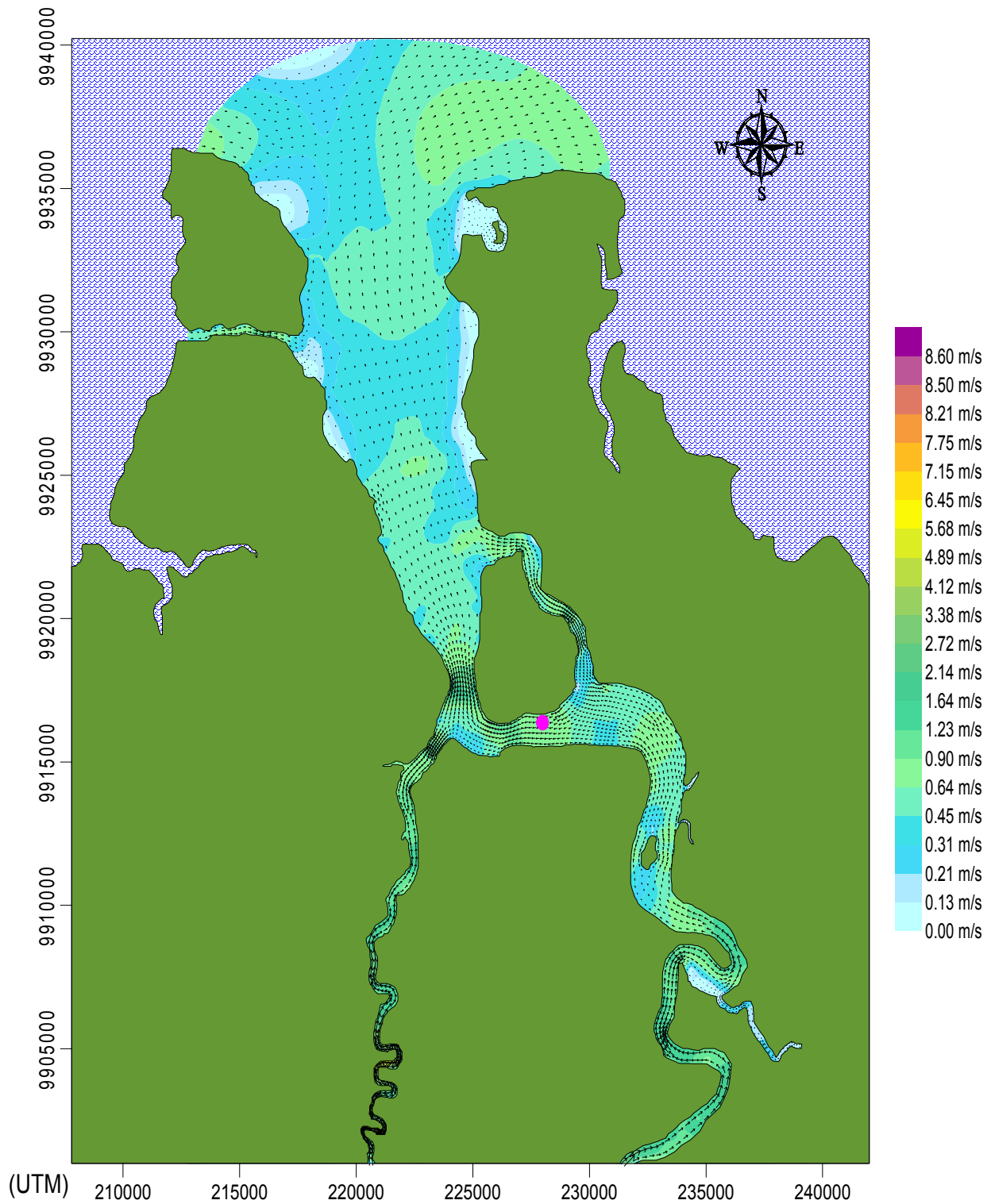


Figura 61: O padrão de correntes gerado na simulação 5 referente ao instante em que foi atingida a velocidade na Estação Frente da Cidade (ponto róseo) Os vetores correspondem às velocidades e suas magnitudes são verificadas através do padrão de cores.

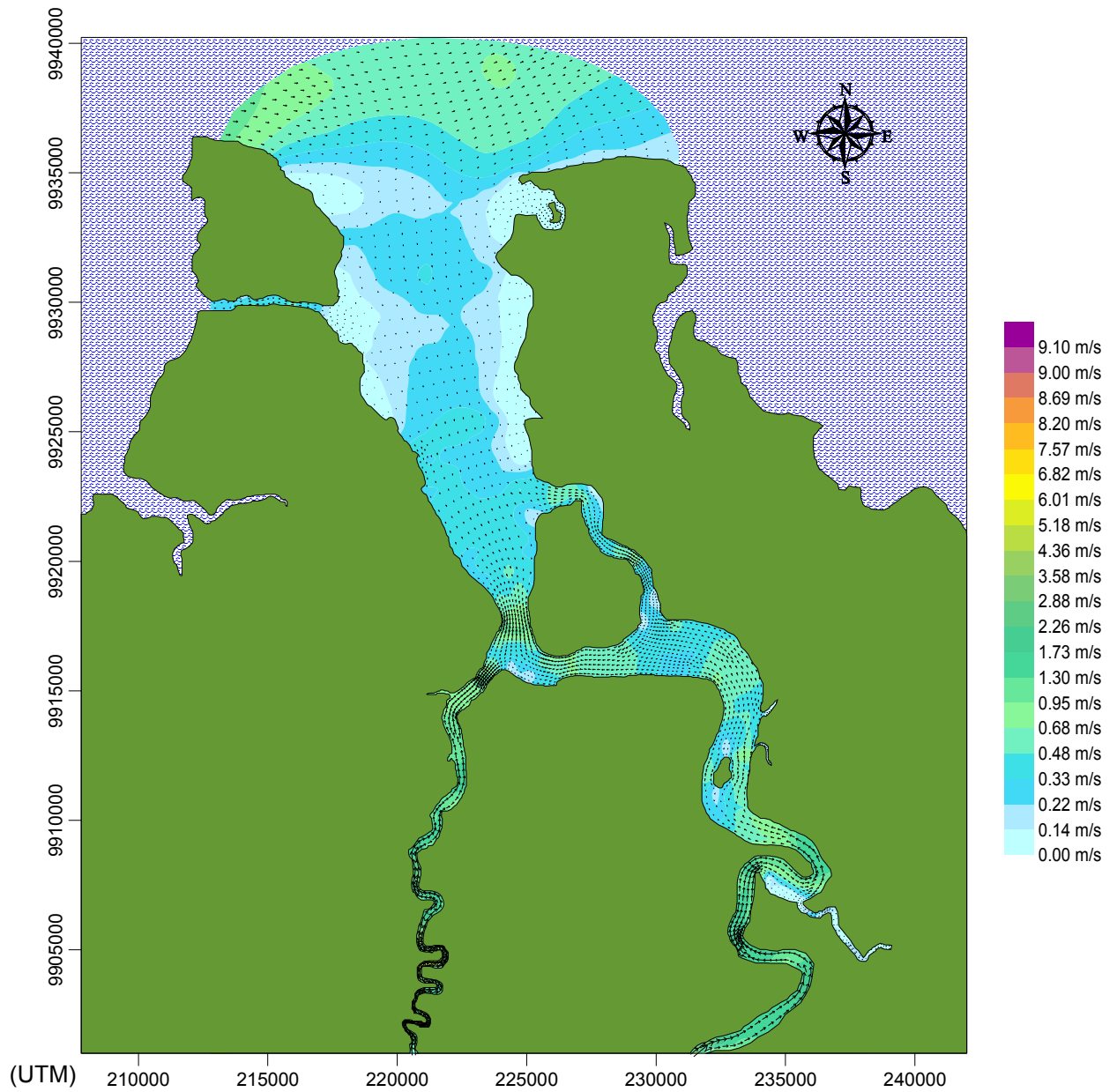


Figura 62: Detalhamento do padrão de correntes no cenário 6 (estofa de baixamar).

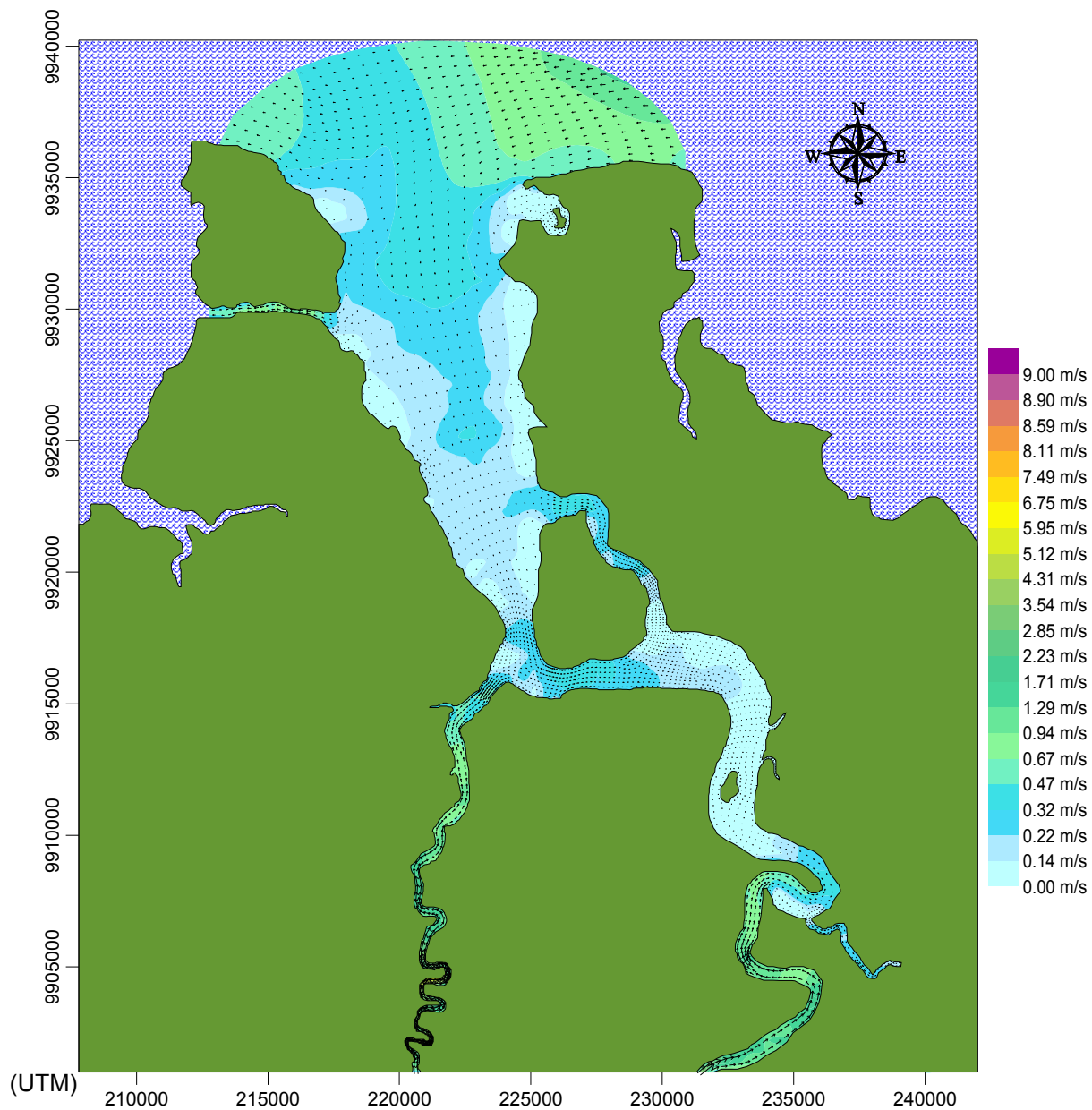


Figura 63: Detalhamento do padrão de correntes no cenário 7 (meia maré enchente), mostrando na maior parte do estuário velocidades variando de 0 a 0,32 m/s.

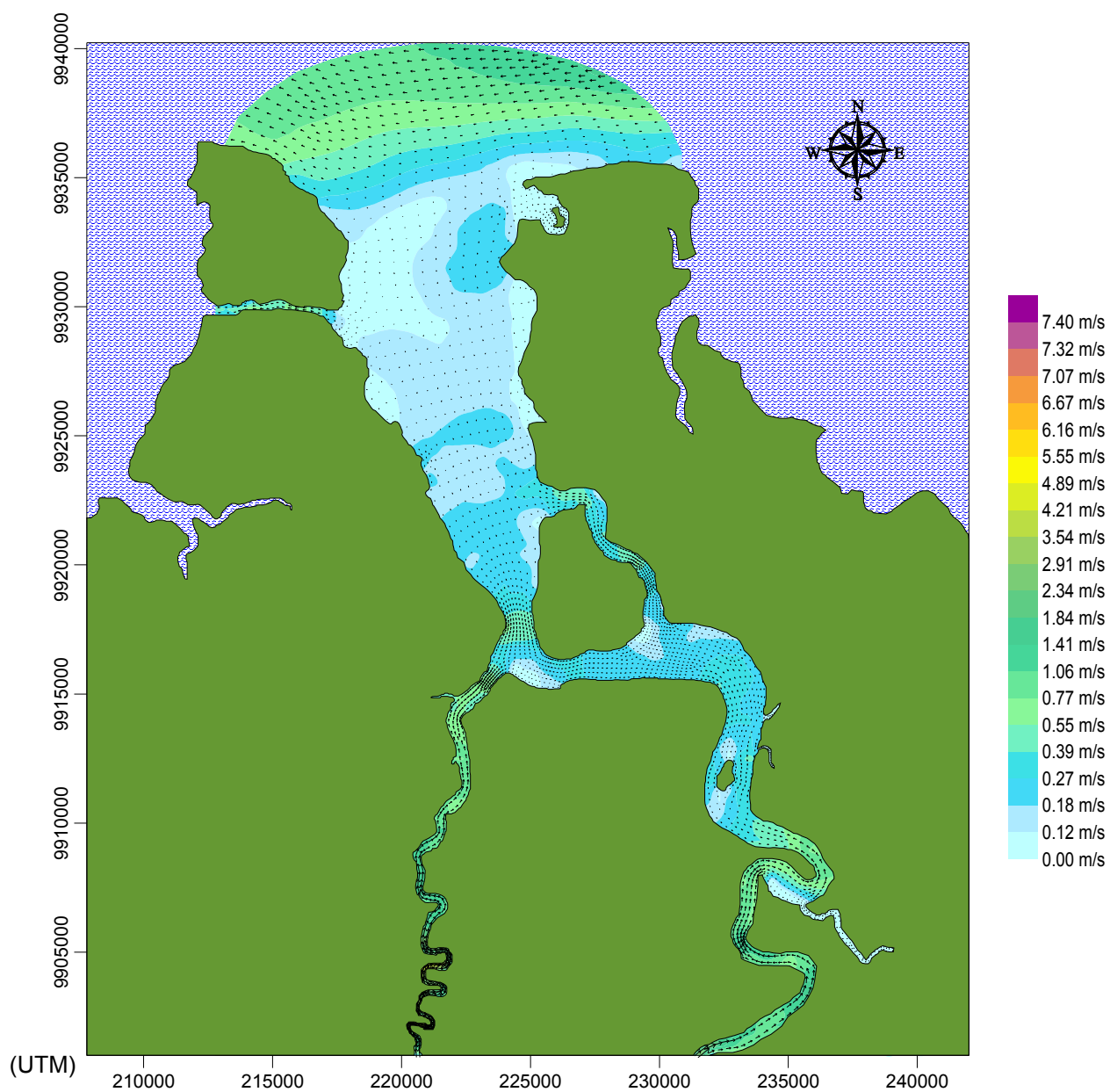


Figura 64 : Velocidade da corrente na estufa de preamar durante uma maré de quadratura

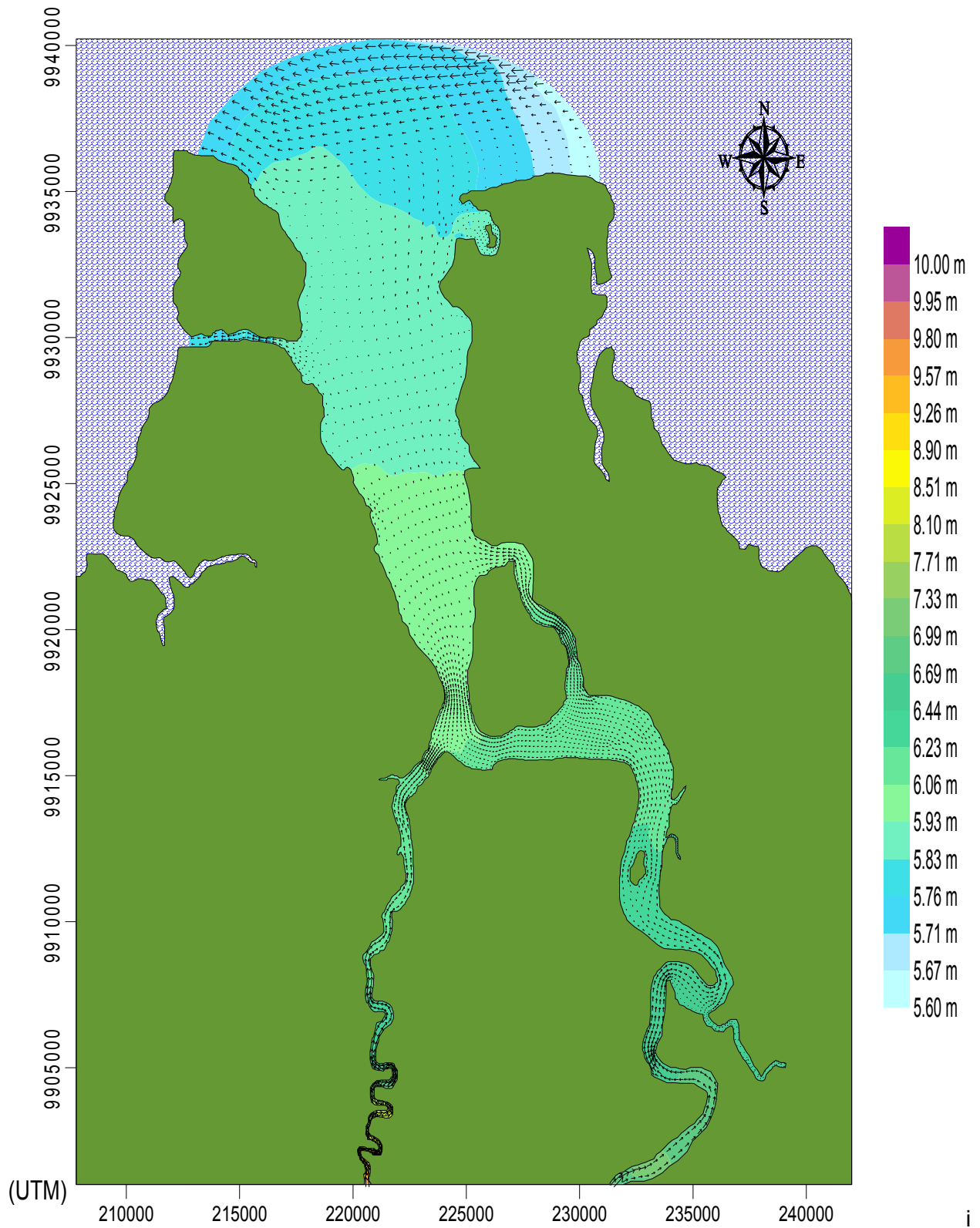


Figura 65: Instante de estufa de preamar de sizígia onde se observa que, a profundidade mínima de 5,60 m, verificada através do padrão de cor azul.

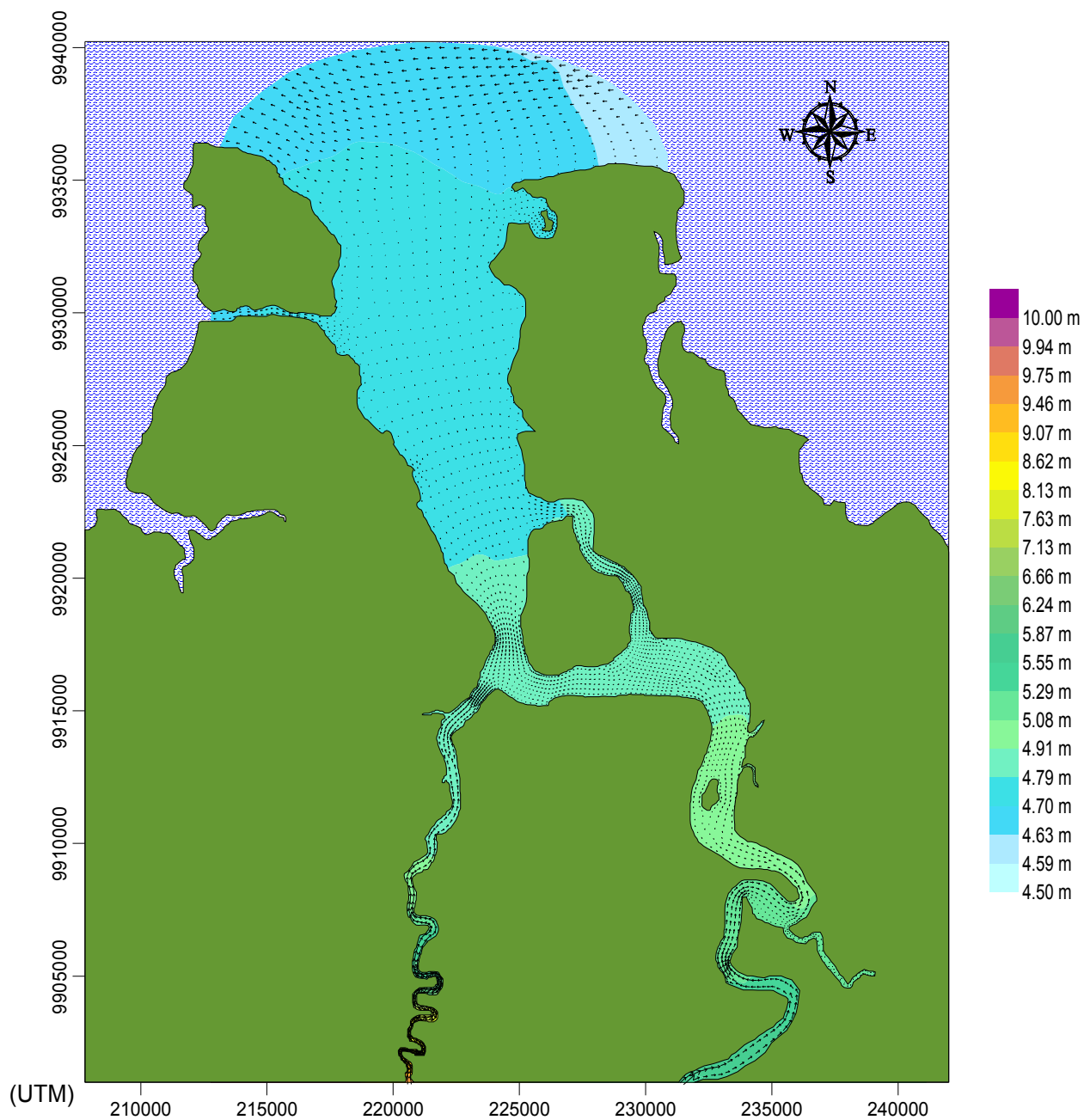


Figura 66: Instante de estufa de preamar de quadratura onde se observa que, a profundidade mínima de 4,50 m, verificada através do padrão de cor azul

8. CONCLUSÕES

É indiscutível a importância deste trabalho, pois em se tratando de uma região carente em estudos de hidrodinâmica sobre estuários, este passa a ser um trabalho pioneiro. A aplicação do Programa SisBAHIA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental), em regiões sobre regime de macromarés, mostrou-se fundamental, em virtude da escassez de dados (cartas náuticas, correntes, marés, condições meteorológicas, entre outros.), este permitiu dar uma contribuição científica para a área de estudo. O modelo utilizado nas simulações hidrodinâmicas foi o 2DH que utiliza como variáveis as médias na vertical, ou seja possui dimensões (x, y, t) e foi considerado adequado para o estuário de Maracanã.

A modelagem hidrodinâmica do estuário do Rio Maracanã mostrou resultados esperados onde, observou-se que durante as marés de sizígia, as velocidades são maiores (meia maré enchente: 0 a 0,82 m/s e meia maré vazante: 0 a 1,17 m/s) se comparadas com as marés de quadratura (meia maré enchente: 0 a 0,35 m/s e meia maré vazante: 0 a 0,91 m/s). Os valores de velocidade de corrente não foram iguais ao medidos em campo em virtude da complexidade da área de estudo e da quantidade de dados adquiridos. O posicionamento do correntógrafo, pode ter sofrido medições que não representaram a realidade, daí a discrepância entre os valores gerados no modelo (estofa de preamar de sizígia: 0,37 m/s; estofa de baixamar de sizígia: 0,44 m/s; meia maré enchente de sizígia: 0,82 m/s e meia maré vazante de sizígia: 1,17 m/s) e os valores medidos em campo (estofa de preamar de sizígia: 0,17 m/s; estofa de baixamar de sizígia: 0,13 m/s; meia maré enchente de sizígia: 1,93 m/s e meia maré vazante de sizígia: 2,58 m/s), além de problemas normais relacionados ao próprio trabalho de campo que geraram perda de informações;

Em relação às marés, os dados medidos em campo e os dados do modelo mostraram boa correlação, com as maiores elevações ocorrendo no interior do estuário, marégrafo 1 - localidade Jacaia (máxima: 5,69 m) em relação à foz, marégrafo 2 - localidade Curuçaquinho (máxima: 5,51 m), em virtude da menor profundidade (1 a 4m) e pela geometria do estuário (estreitamento do canal fazendo com que a água canalize atingindo maiores elevações).

REFERÊNCIAS

- ACKERMANN, F. L. *Esboço para a geologia entre a cidade de Belém – rio Gurupi e Atlântico – rio Guamá*. Belém-PA: Universidade Federal do Pará. Imprensa Universitária, 1964. 79 p., 26 fotos, 1 mapa.
- ALLEN, G.P. ; POSAMENTIER, H.W. Sequence stratigraphy and facies model of an incised valley fill: the Gironde Estuary, France. *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 63, n. 3, p. 378-391. 1993.
- ALLEN, J.R.L. The severn estuary in Southwest Britain: its retreat under marine transgression and fine sediment regime. *Sedimentary geology*, v. 66, p. 13-28. 1990.
- ALMARAZ, J.S. Aspectos geoquímicos e ambientais dos calcários da Formação Pirabas, Estado do *Pará*. 1979. 198 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1979.
- ALVES, M. A. M. S. Morfodinâmica e Sedimentologia da Praia de Ajuruteua – NE do *Pará*. 2001. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do *Pará*, Centro de Geociências, Belém, 2001.
- AMARAL, K.J. Estuário do Rio Macaé: Modelagem Computacional como Ferramenta Para o Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos. 2003. 147 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. COPPE, Rio de Janeiro, 2003.
- ARAI, M.; TRUCKENBRODT, W; NOGUEIRA A. C. R.; GOES, A. M ; ROSSETI, D. F., Novos dados sobre a estratigrafia e ambiente deposicional dos sedimentos Barreiras, NE do *Pará*. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 4., 1994, Belém. *Resumos expandidos*. Belém: SBG, 1994. p 185-187.
- ARAI, M.; UESUGUI, N.; ROSSETTI, D.F. ; GÓES, A.M. Considerações sobre a idade do Grupo Barreiras no nordeste do estado do *Pará*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35, 1988, Belém. *Anais*. Belém, Sociedade Brasileira de Geologia, 1988. v. 2, p. 738-752.
- ARAÚJO, J.V.; VIEIRA, L.S.; ARAÚJO, M.P. de; MARTINS, J.S. Levantamento exploratório de solos da folha SA. 23 São Luís e parte da folha SA. 24 Fortaleza. In: BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Secretaria Geral. Projeto RADAMBRASIL. *Folha SA.-23 São Luís e parte da folha SA-24 Fortaleza: geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra. : geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra*. Rio de Janeiro-RJ, 1973. p. III 2-117.
- ASMUS, H. E. Geologia da margem continental brasileira. In: GEOLOGIA do Brasil. Rio de Janeiro: DNPM, 1984. p. 443-472.

BARBOSA, G. V. ; PINTO, M. N. Geomorfologia da Folha SA 23 São Luiz e parte da Folha SA 24 Fortaleza. In: BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Secretaria Geral. Projeto RADAMBRASIL. *Folha SA.-23 São Luís e parte da folha SA-24 Fortaleza* : geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 1973. p. II 2-30. (Levantamento de Recursos Naturais, 3).

BEARDSLEY, R.C.; CANDELA, J.; LIMBURNER, R.; GEYER, W.R.; LENTZ, S.J.; CASTRO, B.M.; CACCHIONE, D.; CARNEIRO, N. The M2 tide on the Amazon. *Journal of Geophysical Research*, v. 100, p. 2283–2320. 1995.

BEZERRA, P. E. L. Geologia. In: FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Geografia do Brasil (Região Norte)*. Rio de Janeiro-RJ: Diretoria de Geociências, 1991. v. 3, 307 p.

BRASIL. MINISTÉRIO DA MARINHA. DIRETORIA DE HIDROLOGIA E NAVEGAÇÃO GEOMAR II. In: COMIS. OCEAN. COSTA NORTE (GEOLOGIA MARINHA), 46., 1972, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro – RJ: [s.n.], 1972. 79 p.

CANDELA,J; BEARDSLEY, R.; LIMBURNER,R; LENTZ,S. GEYER,R. ; TROWBRIDGE, J. Tidal and Low-frequency circulation on the on the Amazon Shelf, obtained from Ship-mounted ADCP, Observations. In: FIGURES from presentations (with abstract). From the Amasseds Session at Agu Fall Metting. San Francisco, 1990. p. 67-86.

CARUSO JUNIOR, F. Texto explicativo para o mapa geológico da ilha de Santa Catarina Escala 1:100.000. *Notas Técnicas*, Porto Alegre, v. 6, p. 1-28. 1993.

CARVALHO, C.A. *Estudos morfoestratigráfico e sedimentológico dos depósitos holocênicos da Planície Costeira de Maracanã – NE do Pará*. 2007. 127 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, IG, UFPA, 2007.

CARVALHO, J. S. B. *Caracterização morfoestratigráfica do preenchimento sedimentar da Baía de Iguape, Bahia*: influência das variações eustáticas do nível do mar e atividades tectônicas recentes. 2000. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia, 2000.

CHESTER, R. *Marine geochemistry*. London, UK: Unwin Hyman Ltd. 1990. 698 p.

CLASSIFICATION by salinity and stratification structures. 2007. Disponível em: www.soes.soton.ac.uk/.../salinity.html. Acessado em: 22/03/2007.

COSTA, F.F. *Avaliação geoquímica ambiental de área selecionada da bacia hidrográfica do rio Maracanã (Nordeste do Pará)*. 2004. 143 f. Dissertação (Mestrado em Geoquímica)-Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2004.

COSTA, J. B. S.; BORGES, M. S.; BEMERGUY, R. L.; FERNANDES, J.M.G.; COSTA, M. L. *Geologia*. In: PROGRAMA NACIONAL DE GERENCIAMENTO COSTEIRO. *Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro*. Belém. IDESP/IBAMA/SECTAM, 1992. p.17-58. (Relatório Técnico)

COSTA, J.B.S., BORGES, M.S., IGREJA, H.L.S., PIHEIRO, R.V.L. Aspectos da tectônica cenozóica da região do Salgado, litoral nordeste do Estado do Pará. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 3., 1991, Belém. *Anais...* Belém: SBG, Núcleo Norte, 1991. p.156-165.

COSTA, J.L.; VILLAS BOAS, J. M.; PESTANA, J. M.N; WANDERLEY, V.J.R.; ARAÚJO, A.A.F.; FRIZZO, J.S. *Projeto Gurupi*: relatório final de etapa. Belém-PA, Ministério das Minas e Energia (MME). Departamento Nacional da Produção Mineral (Convênio DNPM/CPRM), 1977. v. 2, 258 p.

COSTA, L.T.R. *Sedimentação holocênica /o estuário do Rio Araguari – AP*. 1996. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 1996.

CUNHA, E.M.S. *Considerações gerais sobre a Zona Costeira* (Cap. III). 2005. p. 126-153. Disponível em: www.tdx.cesca.es/tesis_ub/available/tdx-0422105-33010/3.consider_gerais_zona_costeira. Acessado em jan. de 2008.

DALRYMPLE, R. W.; ZAITLIN, B. A. ; BOYD, R. Estuarine facies models: conceptual basis and stratigraphic implications. *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 62, n.6, p.1130-1146. 1992.

DEGENS, E. T.; KEMPE, S.; RICHEY, J. E. Biogeochemistry of major world In: DEPARTAMENTO DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN). *Tábuas de Maré (Pará). Costa do Brasil e alguns portos estrangeiros*. Rio de Janeiro: DHN. 1991. p: 1-6.

DEPARTAMENTO DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN). *Tábuas de Maré (Pará). Costa do Brasil e alguns portos estrangeiros*. Rio de Janeiro, DHN, 1994. p: 1-6.

DIÉGUES, F.M. F. Introdução à oceanografia do estuário amazônico. In: CONG.BRAS. GEOL., 36, 1972, Belém. *Anais...* Belém-PA: SBG, 1972. v.2, p. 301-317.

DUKE energy. 2007. Disponível em: www.duke-energy.com.br/PT/Negocios/climaenerg..., 2007. Acessado: 29/06/2007.

DYER, K.R. *Estuaries: a physical introduction*. 2 ed. Chichester: Wiley, 1997. 195p.

EL-ROBRINI, M.; FARIAS JÚNIOR, L. E. C.; TORRES, A. M.; SOUZA FILHO, P. W. M.; SILVA, M. S. Deposição e assoreamento das rias do Nordeste do Estado do Pará/Brasil. In: CONG. BRAS. GEOL., 37., 1992, São Paulo. *Boletim de resumos expandidos*. São Paulo, SP: SBG, 1992. v.1, p. 79-80.

ESCHRIQUE, S. A. *Avaliação do teor de silicato inorgânico dissolvido na Plataforma Continental do Amazonas*. Relatório de Bolsa ITI-1^A/CNPq. 2001. 38 p.

ESTEVES, F. DE A. *Fundamentos da limnologia*. Rio de Janeiro: Editora Interciência/FINEP., 1988. p. 276 – 290.

FEITOSA, F. A. N. *Produção primária do fitoplâncton correlacionada com parâmetros bióticos e abióticos na Bacia do Pina*. 1988. 270 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Biológica) - UFPE, Recife, 1988.

FARMER, H.G.; MORGAN, G.W. The salt wedge. In: PROC. THIRD CONF COASTAL ENGINEERING, *Council Wave Res. Cambridge, Mass.*, 1953. p. 54-64.

FERREIRA, C.S ; CUNHA, O.R. Contribuição à paleontologia do Estado do Pará. Notas sobre a Formação Pirabas com descrição de novos invertebrados fósseis. I(Mollusca-Gastropoda). Belém-PA, *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, nova série Geologia*, n. 2, p. 1-61. 1957.

FERREIRA, C.S. Correlação da Formação Pirabas (Mioceno Inferior) N e NE do Brasil, com as formações Chipola e Tampa da Península da Flórida, USA. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE PALEONTOLOGIA, 1., 1978, Buenos Aires. *Atas*. Buenos Aires, 1980. v3, p.49-55.

FLORES MONTES, M. J. *Variação nictemeral do fitoplâncton e parâmetros hidrológicos no Canal de Santa Cruz, Itamaracá, PE*. 1996. 174 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Biológica) – UFPE, Recife, 1996.

FRANZINELLI, E. Evolução e origem da Costa Atlântica do Estado do Pará. In: CONGRESSO DA ABEQUA, 3. *Publicação especial...* Belo Horizonte, ABEQUA, 1991. v. 1, p. 117-118.

FRANZINELLI, E. Evolution of the geomorphology of the Coast of the State of Pará, Brazil. In: PROST, M.T. (Ed.) *Évolution des littoraux de Guyane et de la Zone Caraïbe Méridionale pendant le Quaternaire*. Paris: ORSTOM, 1992. p.203-230.

GEYER, W. R.; BEARDSLEY, R. C.; LENTZ, S. J.; CANDELA, J.; LIMEBURNER, R.; JOHNS, W. E.; CASTRO, B. M.; SOARES, I. D. Physical oceanography of the Amazon shelf. *Continental Shelf Research*. 16, p. 575-616. 1996.

GEYER, W. R.; BEARDSLEY, R. D; CANDELA, J.; CASTRO FILHO, B. M.; LEGECKIS, R. V.; LENTZ, S. J.; LIMEBURNER, R.; MIRANDA, L. B. ; TROWBRIDGE, J. H. The Physical Oceanography of the Amazon Outflow. *Oceanography*, vol. 4, pp. 8-14. 1991.

GIBBS, R.J. The geochemistry of the Amazon River system. Part I. The factors that control the salinity and the composition and concentration of the suspended solids. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 78, p.1203-1232. 1967.

GÓES, A.M.; TRUCKENBRODT, W. Caracterização faciológica e interpretação ambiental dos sedimentos Barreiras na Região Bragantina, Nordeste do Pará. In: CONG. BRAS. GEOL., 31., 1980, Camboriú-SC. *Anais...* Camboriú-SC: SBG, 1980. v.2, p. 766-771.

GÓES, A.M.; ROSSETTI, D.F.; NOGUEIRA, A.C.R.; TOLEDO, P.M. Modelo deposicional preliminar da Formação Pirabas no Nordeste do estado do Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi (série Ciências da Terra)*. Belém-PA, n. 2, p. 3-15. 1990.

GORINI, M.A. ; BRYAN, G.M. The tectonic fabric of the Equatorial Atlantic and adjoining continental margins: gulf of Guinea to Northeastern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 48:101-119. 1976.

HASUI, Y. Neotectônica e aspectos fundamentais da tectônica ressurgente no Brasil. In: Workshop sobre neotectônica e sedimentação cenozóica Continental no Sudeste do Brasil. Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: SBG, 1990. v.1, p.766-771.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). *Normais Climatológicas*. 1992. 155p.

INSTITUTO DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO-SOCIAL DO PARÁ (IDESP) *Setor de coleta e tratamento de dados (município de Maracanã)*. 1993. p. 1-13.

JAPIASSU, A. M. S. ; GÓES FILHO, L. As regiões fitoecológicas, sua natureza e seus recursos econômicos. In: BRASIL. Projeto RADAMBRASIL. *Folha SA-22 Belém*. Rio de Janeiro: DNPM, 1974. (Levantamento de Recursos Naturais, 5).

KETCHUM, B.H. *Estuaries and enclosed seas*. Amsterdam: Elsevier. 1983. 500p.

KJERFVE, B. Manual for investigation of hydrological processes in mangrove ecosystems. New Delhi: UNESCO-UNDP. 1990. 79 p.

KJERFVE, B., RIBEIRO, C. H. A.; DIAS, G. T. M.; FILIPPO, A. M.; QUARESMA, V. S. Oceanographic characteristics of an impacted coastal bay: Baía de Guanabara, Rio de Janeiro, Brazil. *Cont. Shelf Res.*, v.17, p. 1609-1643. 1997.

LEITE, A.A.S., FILHO, R.L.G.N., JUNIOR, R.O.S. *Mapeamento geológico do município de Maracanã, Nordeste do Estado do Pará*. Belém: CG, UFPA, 1992. 143 p. (Relatório Final de Estágio de Campo III).

LESSA, G.C, BITTENCOURT, A.C.S.P., BRICHTA, A. e DOMINGUEZ, J.M.L. Late quaternary sedimentation in Todos os Santos Bay. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 72, n.4, p. 573- 590. 2000.

LESSA, G.C., MEYERS, S.; MARONE, E. Holocene stratigraphy in the Paranaguá Bay estuary, south Brazil. *Journal of Sedimentary Research*, v.68, n.6, p.1060-1076. 1998.

LESSA, L. C. *Baías Brasileiras: grandes estuários em uma costa regressiva?* 2005. Disponível em: http://www.abequa2005.geologia.ufrj.br/nukleo/pdfs/0299_guilherme_lessa.pdf#search=%22estu%C3%A3rios%20brasileiros%22. Acessado em : 20/09/06

LOS ESTUARIOS: modelo sedimentário. 2007. Disponível em: www.geocities.com/.../geo/deltdoc/deltdoc4.htm. Acessado em: 20/03/2007.

MARTIN, L.; BITTENCOURT, A.C.S.P.; FLEXOR, J.M.; SUGUIO, K.; DOMINGUEZ, J.M.L. Neotectonic movements on a passive continental margin: Salvador region, Brazil. *Neotectonics*, v. 1, n.1, p.87-103. 1986.

MARTINS, A.C.S.; LUZ, M.S.F.C. *Cenário climatológico atuante no Litoral Norte da Amazônia Brasileira*. 2004. 63 f. Monografia (Especialização em Oceanografia) - Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2004.

MARTINS, R.P.; ROSMAN, P.C.C.; XAVIER, A.G.; ROSSO, T.C.A. Estudo da maré astronômica na Baía de Guanabara - interpretação das constantes harmônicas e modelagem Numérica. In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 14., 2001, Sergipe. *Gestão de Recursos Hídricos*. Sergipe: SBRH, 2001. 1 CD-ROM.

MARTORANO, L.G.; PEREIRA, L.C.; CÉSAR, E.G.M.; PEREIRA, I.C.B. *Estudos climáticos do Pará: classificação climática (KÖPPEN) e deficiência hídrica (THORNTHWHITE, MATHER)*. Belém: SUDAM/EMBRAPA/SNLCS, 1993. 53p.

MENDES, A.C., SILVA, M.S., FARIA JUNIOR, L.E.C. A Expansão Urbana e seus efeitos danosos ao meio ambiente da Ilha do Atalaia-Salinópolis, Pa. In: COSTA, M.L.; ANGELICA, R. S. (Ed.) *Contribuições à geologia da Amazônia*. Belém: [SBG], 1997. p. 359-396

MENEZES, L. B. DE C. *Caracterização Biogeoquímica de ecossistemas Amazônicos: Rios e Lagos selecionados nas macroregiões Bragantina, do Salgado e Guajarina – PA*. 1999. 169 f. Tese (Doutorado) - Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 1999.

MILLERO, F. J. The pH of estuarine waters. *Limnol Oceanogr*, v.31, n.4, p. 839-847. 1986.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *Diagnóstico para avaliação e ações prioritárias para conservação da biodiversidade da Zona Costeira-Estuarina dos Estados do Piauí, Maranhão, Pará e Amapá*. 2006. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/ibamaperfuracao/refere/Estu%E1rios%20Norte.pdf#search=%22estu%C3%A3rios%20regi%C3%A3o%20norte%22>. Acessado em: 20/09/06.

MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. *Princípios de oceanografia física de estuários*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2002. 414 p.

MOREIRA, M. O. P. *Produção do fitoplâncton em um ecossistema estuarino tropical (estuário do rio Cocó, Fortaleza, Ceará)*. 1994. 338 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Biológica) - UFPE. Recife, 1994.

MOURA, R. T. *Biomassa, produção primária do fitoplâncton e alguns fatores ambientais na Baía de Tamandaré, Rio Formoso, Pernambuco, Brasil*. 1991. 290 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Biológica) – UFPE, Recife, 1991.

NITTROUER, C. ; DeMASTER, D. J. Sedimentary processes on the Amazon Continental shelf: past, present and future research. *Continental Shelf Research*, v. 6, n. 1/2, p. 5-30. 1986.

OFFICER, C. B. Physics of estuarine circulation. In: KETCHUM, B. H. (Ed.). *Estuaries and enclosed seas*. Amsterdam, elsevier, 1983. v. 26, 15-41 p, (Ecosystems of the World).

PALMA, J.J.C. Geomorfologia da margem Continental Norte Brasileira. In: PETROBRAS (ed). *Geomorfologia da margem continental Brasileira e Áreas Adjacentes*. Rio de Janeiro, 1979. p.7-24 (Série Projeto REMAC, 7).

PETRI, S.; FULFARO, V. J. *Geologia do Brasil (Fanerozóico)*. São Paulo-SP. Ed. T. A. Queiroz & Ed. da USP, 1983. 613 p.

PINHEIRO, R.V.L. *Estudo hidrodinâmico e sedimentológico do estuário do Guajará*. 1987. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 1987.

PINTO, N.L.S; HOLTZ,AC.T.; MARTINS J.A.; GOMIDE,F.S. *Hidrologia básica*. [S.l.]: Ed. Edgard Blucher Ltda., 1976. 278 p.

PRITCHARD, D. W. Salinity distribution and circulation in the Chesapeake bay estuarine system. *Journal of Marine Research*, v. 11, p. 106-123. 1952.

PRITCHARD, D.W. Estuarine circulation patterns. *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.*, v. 81, n. 717, p. I-II. 1955.

PRITCHARD, D. W. What is a estuary. Physical viewpoint. In: LAUFF, G. H. ed *Estuaries*. Washington: American Association for the Advance of Science, 1967. p. 3-5.

PRITCHARD, D. W. *Estuarine modelling: an assessment capabilities and limitations for resource management and pollution control*. Austin: Tracor, 1971. 22-33 p.

PRITCHARD, D. W. Circulação e mistura das águas nas regiões costeiras e estuários. In: OCEANOGRAFIA: a última fronteira. São Paulo: Editora Cultrix Ltda, 1981. p. 321 – 332.

RIBAS, T.M. *Implementação de Modelo Numérico para Estudo Hidrodinâmico das Baías de Antonina e de Paranaguá*. 2004. 136 f. Dissertação (Mestrado Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2004.

ROSMAN, P. C. C. Subsídios para modelagem de sistemas estuarinos. In: *MÉTODOS numéricos em recursos hídricos*. Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH, 1997. v.3, cap. 3.

ROSMAN, P.C.C. Um sistema computacional de hidrodinâmica ambiental. In: ROSMAN, P.C.C.; MASCARENHAS, F.C.B.; MIGUEZ, M.G. et al. *Métodos numéricos em recursos hídricos* 5, 1. ed. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2001. Cap. 1.

ROSSETTI, D. F. Late cenozoic sedimentary evolution in northeastern Pará, Brazil, within the context of sea level changes. *Journal of South American Earth Sciences*, v.14, p.77-89. 2001.

ROSSETTI, D.F.; TRUCKENBRODT, W.; GÓES, A.M. Estudo paleoambiental e estratigráfico dos sedimentos barreiras e Pós-Barreira na Região Bragantina, Nordeste do Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*: 1, 25-74. 1989.

SÁ, J.H.S. Contribuição à geologia dos sedimentos terciários e quaternários da região Bragantina. *Bol. Inst. Geol.* Rio de Janeiro-RJ. v.3, p. 21-36, 1969.

SAMPAIO, M. *Estudo de circulação hidrodinâmica 3D e trocas de massas d'água da Baía do Guanabara-RJ*. 2003. 213 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE., 2003.

SANDERS, J.L.; MAXIMON, L.C.; MORGAN, G.W. On the stationary 'salt Wedge' – A Two layer free surface flow. *Tech. rept.*, brown university, 1953. n. 1, 44 p.

SANTOS, M. L. S. *Influência dos Rios Amazonas e Pará sobre a Biomassa Fitoplanctônica*. 2000. 92 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Biológica) CTG, UFPE, Recife, 2000.

SANTOS, V. F. dos, Estratigrafia holocênica morfodinâmica atual da Planície Costeira da ilha de Algodão e Marudá. 1996. 138 f. Tese (Mestrado) - Centro de Geociências, UFPA, Belém, 1996.

SCHUBEL, J.R. Classification of estuaries. In: SCHUBEL, J.R., (ed.) *Estuarine environment: estuaries and estuarine sedimentation*. Washington D.C.: American Geological Institute. 1971. Cap. 2, p.2-8.

SILVA JÚNIOR, O.G. do. *Morfostratigrafia da Planície Costeira do município de São João de Pirabas (Porção NW) - NE do Estado Pará*. 1998. 89 f. Dissertação (Mestrado). – Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 1998.

SILVA, C.A. *Análise morfoestratigráfica do estuário do Rio Marapanim – NE do Estado do Pará*. 1998. 133 f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 1998.

SILVA, J.M.L da; OLIVEIRA JÚNIOR, R.C de; RODRIGUES, T. E. Levantamento de reconhecimento de alta intensidade dos solos da folha Salinópolis. *Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Série Ciência da Terra*, n.6, p. 61-90. 1994.

SILVA, O.F.; LOEWESTEIN, P. Contribuição a geologia da Folha de São Luis no Estado do Pará II. Novas Localidades e Razão Mg-Ca do Clacário Pirabas. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências da Terra*, n.13, p.17. 1968.

SIOLI, H. Studies in Amazonian waters. In: SIMPÓSIO SOBRE A BIOTA AMAZÔNICA. Belém-PA, 1996. *Atas...* Rio de Janeiro: CNPq., 1967. v. 3, p. 9-50.

SOUZA FILHO, P.W.M.; EL-ROBRINI, M. Geomorphology of the Bragança Coastal Zone, Northeastern Pará State. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 30, n. 3, p. 522-526. 2000.

SOUZA FILHO, P.W.M. *A Planície Costeira Bragantina (NE do Pará): Influência das Variações do Nível do Mar na Morfoestratigrafia Costeira durante o Holoceno*. 1995. 123p. Tese (Mestrado) - CPGG, UFPA, Belém, 1995.

SOUZA FILHO, P.W.M., COHEN, M.C.L., LARA, R.J., LESSA, G. C., KOCH, B. e BEHLING, H. Holocene coastal evolution and facies model of the Bragança macrotidal flat on the Amazon Mangrove Coast, Northern Brazil. *Journal of Coastal Research* .2005.

SOUZA JÚNIOR, C. M. de; QUADROS, M. L. do E. S; BEZERRA, O. V. *Projeto Nordeste do Estado do Pará*. Belém-PA, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. Departamento de Geologia. Estágio de Campo III 1992. 163 p. (Relatório Final),

SOUZA, C. S.; OLIVEIRA, V. de; COUTINHO, R. C. P. Solos. In: FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *GEOGRAFIA DO BRASIL* (Região Norte). Rio de Janeiro-RJ: Diretoria de Geociências, 1991. v. 3, 307 p.

SOUZA, R.R. *Modelagem numérica da circulação de correntes de maré na Baía de Marajó e Rio Pará (PA)*. 2006.159 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (SP). 2006.

SUGUIO, K. *Geologia sedimentar*. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2003. 400p.

TOPÁZIO, E. F. S. *Modelagem de pluma de emissários com T_{90} variável na Costa Oceânica de Salvador, BA*. 2003 129 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2003.

XAVIER, A.G. *Um estudo sobre a circulação hidrodinâmica da Baía de Todos os Santos*. 2002. 205 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. 2002.