



## CARACTERÍSTICAS HIDROGRÁFICAS DO ESTUÁRIO DA BEIRA, MOÇAMBIQUE

António Fernandes da Silva

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientadora: Susana Beatriz Vinzón

Rio de Janeiro

Abril de 2011

CARACTERÍSTICAS HIDROGRÁFICAS DO ESTUÁRIO DA BEIRA,  
MOÇAMBIQUE

António Fernandes da Silva

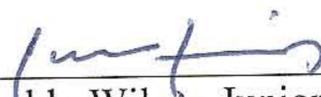
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Examinada por:



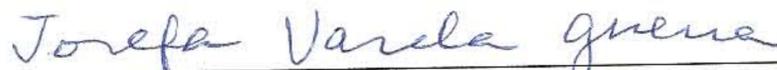
---

Prof<sup>a</sup>. Susana Beatriz Vinzon, D.Sc.



---

Prof. Geraldo Wilson Junior, Docteur d'Etat.



---

Prf<sup>a</sup>. Josefa Varela Guerra, Ph. D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 2011

Silva, António Fernandes da

Características Hidrodinâmicas do Estuário da Beira,  
Moçambique/ António Fernandes da Silva – Rio de Janeiro: UFRJ/  
COPPE, 2011.

XVII, 100 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadora: Susana Beatriz Vinzón

Dissertação (Mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de  
Engenharia Oceânica, 2011.

Referências Bibliográficas: p. 84-87.

1. Frente Salina do Estuário da Beira. 2. Correntes de Marés no  
Estuário da Beira. 3. Alinhamento do Canal de Acesso ao Porto da  
Beira. I. Vinzón, Susana Beatriz. II. Universidade Federal do Rio de  
Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa, Elisa Boaventura Panguene, aos meus filhos Anelka Gabriel F. da Silva e Aline Emilia da Silva por terem compreendido a minha ausência e me apoiado em todos os momentos, com muito carinho.

À minha querida Elisa pelo companheirismo, compreensão e o indescritível apoio que me ajudou a seguir em frente nas horas mais dúbias.

Aos meus pais: Helena Tovela e Gabriel Rego da Silva (*in memorian*).

A todos meus irmãos: Ângelo, Virgínea, Isaura, Ana, Argentina, Alice, Vânia, Emilia Alberto (*in memorian*) e Gabriel (*in memorian*); tios, dos quais menciono o Armando Nabingo, Tomas Tovela e Armando Conwana (*in memorian*), aos meus primos e sobrinhos, entre os quais menciono Gabriel Albino Tivane.

Ao meu cunhado Viegas Mahumane, pela sua contribuição na minha educação acadêmica, profissional e moral.

Aos meus Avôs: Alice Tovela, Julia Guanasse; Sebastião Cossa, Emilia Fernandes e Chuva Malta (*in memorian*).

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por ter zelado pela minha saúde física e mental, que me permitiu realizar esta tarefa.

À Professora Susana Beatriz Vinzón, pela paciente orientação, direcionamento do estudo e pelo tratamento recebido, sem os quais não teria sido possível a elaboração deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora por aceitarem o convite e pela cooperação na conclusão desta tese.

Aos professores da Área de Engenharia Costeira e Oceânica pelo carinho e pelo conhecimento a mim confiado.

Aos colegas de curso de Engenharia Costeira e Oceânica da Universidade Federal do Rio de Janeiro: Teodósio Nzualo, Gustavo Spiegelberg, Marcelo Toffoli, Soyla Olenka, Betina Lima e Ana Paula, pelo companheirismo por eles mostrado em todas as atividades acadêmicas em que estivemos envolvidos.

Agradeço de forma especial a todos os colegas do Laboratório de Dinâmica de Sedimentos Coesivos, em especial Marcos Gallo e Iranilson Oliveira Silva, pelo apoio prestado em relação a minha integração social, e na técnica de uso do AWAK para a medição de dados de correntes, marés e processamento de dados.

A todos os funcionários da Secretaria do Programa de Engenharia Oceânica e da Reitoria da UFRJ, em especial Glace Farias da Costa e Marise Cardoso dos Santos que me orientaram na resolução de assuntos acadêmicos e institucionais.

A direção do Instituto Nacional de Hidrografia e Navegação, em especial Augusto Bata, Sid Cambul, Cândida Sete, Simião Mungambe pelo apoio financeiro que tornou

possível as viagens, equipamentos e meios circulantes para a execução das atividades de campo. Aos técnicos Célia Magaia, Clousa Mawewa, Sinibaldo Canhanga, Mereles (*in memorian*) pelo apoio técnico que tornou possível a execução das atividades de campo e de gabinete.

Aos professores Mário Cuamba (*in memorian*) e Victor Said, pela credibilidade a mi depositada e pela oportunidade de viver experiências profissionais e pessoais com entusiasmo e dedicação.

Agradeço aos meus amigos Obadias Cossa, António Ueisson, Gonçalves Nhambane, Bernardino Malawene, Amador Sunde, Beijamin Nanja e Assif Muchanga, pela amizade de longa data e pelas conversas sempre encorajadoras.

Aos colegas de trabalho Inércio Tomás, Paulo Sigauque, Carlos Mugawa, Tomás Muianga e outros que não tenha mencionado, pelas dicas, sugestões sempre úteis, conversas esclarecedoras e pelos melhores e maus momentos que passamos no mar.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.).

## CARACTERÍSTICAS HIDROGRÁFICAS DO ESTUÁRIO DA BEIRA, MOÇAMBIQUE

António Fernandes da Silva

Abril/ 2011

Orientadora: Susana Beatriz Vinzón

Programa: Engenharia Oceânica

O Estuário da Beira é um dos mais importantes ecossistemas costeiros de Moçambique devido à sua biodiversidade, ao seu valor como via de transporte, como local de exploração de recursos pesqueiros e prática de turismo.

Nesta dissertação são estudadas as características da frente salina e hidrográficas do Estuário da Beira. Este conhecimento é essencial para a descrição das condições ambientais e concepção do alinhamento do canal de navegação. A partir destes estudos, programas e projetos de mitigação de degradação do meio marinho, assoreamento, deriva do canal e diminuição dos custos de dragagem de manutenção, poderão ser elaborados.

Os resultados do estudo mostram que as correntes são condicionadas pela topografia do fundo e pelas marés, sendo que cada ponto de medição apresenta um padrão diferente de direção e sentido de corrente, relativo ao alinhamento do canal de acesso ao porto da Beira.

Os resultados do estudo da frente salina com base nas variáveis físicas (temperatura e salinidade) medidas no estuário de Púngué, mostram que o sentido da circulação da água no seu interior é horário, e que existe uma variação sazonal das grandezas físicas medidas.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

## HYDRODYNAMICS CHARACTERISTICS OF BEIRA ESTUARY, MOZAMBIQUE

António Fernandes da Silva

April/ 2011

Advisor: Susana Beatriz Vinzón

Department: Ocean Engineering

Beira estuary is one of the most important coastal ecosystems of Mozambique as the value of their biodiversity, through shipping, fisheries and tourism practice.

This dissertation work aims to study the hydrodynamics characteristics and saline front of Beira estuary. The knowledge of hydrodynamic characteristics and saline front of Beira estuary can contribute to a better knowledge of environmental conditions and design of navigation channel alignment, thereby, minimizing the siltation, shifting of the channel and the costs of maintenance dredging and environment degradation.

The study results show that the currents are constrained by bottom topography and tides, and each measuring point presents different patterns of intensity and direction of currents on the alignment of the channel access to the Beira Port.

The study results of saline front based on physical variables (temperature and salinity) measured in the estuary of Beira show that the circulation of water inside is an hourly and the variation of physical parameters measured is seasonal

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	1
2.	OBJETIVOS .....	3
2.1.	Objetivo Principal.....	3
2.2.	Objetivos Complementares .....	3
3.	REVISÃO DA LITERATURA.....	4
3.1.	Classificação dos Estuários .....	4
3.2.	Correntes de Marés.....	9
3.2.1.	Correntes de Marés num Estuário .....	11
3.3.	Presença de Bancos Alinhados com a Corrente nos Estuários.....	12
3.3.1.	Caracterização dos bancos em canais de maré .....	12
3.4.	Fluxo Oblíquo que Passa Através de Canais Dragados.....	15
3.4.1.	Descrição do Escoamento na Profundidade Media .....	15
3.5.	Conceitos do transporte de sedimentos .....	22
4.	ÁREA DE ESTUDO .....	24
4.1.	Descrição Geral da Área de Estudo.....	24
4.2.	O Porto da Beira .....	25
4.3.	Histórico de Estudos Efetuados no Estuário da Beira. ....	26
4.4.	Geomorfologia.....	34
4.5.	Clima e Regime de Ventos .....	37
4.6.	Recursos Hídricos.....	38
4.7.	Marés e Ondas incidentes na região de estudo.....	40
5	METODOLOGIA ADOTADA PARA O ESTUDO DA FRENTE SALINA NO ESTUÁRIO DA BEIRA.....	42
5.1.	Localização das Estações de Medição do Ano de 2006 .....	44
5.2.	Localização das Estações de Medição dos Anos de 2009 e 2010 .....	45
5.3.	Precipitação, Evaporação, Ventos e Marés Durante os Períodos de Medições.....	46
6.	ANALISE DE RESULTADOS E DISCUSSÕES SOBRE A FRENTE SALINA DO ESTUÁRIO DA BEIRA.....	52

6.1.	Perfis Longitudinais de Salinidade e Temperatura em Profundidade na Baía de Sofala para os Períodos: Março e Junho de 2006 .....	52
6.2.	Perfil Longitudinal de Salinidade e Temperatura em Profundidade do Rio Púngué e Baía de Sofala (Maio de 2009) .....	54
6.3.	Perfil Longitudinal de Salinidade e Temperatura em Profundidade do Rio Búzi (Julho de 2010) .....	55
6.4.	Perfis Transversais de Salinidade e Temperatura em Profundidade no rio Púngué (Maio de 2009) .....	56
6.5.	Perfis Transversais de Salinidade e Temperatura na Baía de Sofala.....	60
6.6.	Discussão de Resultados de Salinidade e da Intrusão Salina no Estuário da Beira. .	63
7.	MEDIÇÕES DE CORRENTES DE MARÉS NA BAÍA DE SOFALA.....	64
7.1.	Equipamento e Material Usado na Pesquisa.....	64
7.2.	Localização das Estações de Medição de Correntes .....	65
7.3.	Correntes de Marés Medidas no Ponto 1 .....	67
7.4.	Correntes de Marés Medidas no Ponto 2.....	68
7.5.	Correntes de Marés Medidas no Ponto 3.....	70
7.6.	Correntes de Marés Medidas no Ponto 4.....	71
8.	CORRENTES DE MARÉ E CANAL DE ACESSO AO PORTO DA BEIRA .....	75
8.1.	Comparação das Correntes Medidas em 2009 com dados prévios e resultados de modelo hidrodinâmico.....	75
9.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	81
9.1.	Frente Salina no Estuário da Beira .....	81
9.2.	Correntes de Marés no Canal de Acesso ao Porto da Beira .....	82
9.3.	Movimento dos Bancos de Areia.....	82
9.4.	Recomendações .....	83
10.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	84
11.	ANEXOS .....	88

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Carta náutica que ilustra o canal de acesso ao porto da Beira .....	2
Figura 2: Variações de níveis causados pela maré e velocidades de correntes em um sistema de onda de maré sintética, idealizada e do tipo puramente progressiva (PARKER, 2005 <i>apud</i> NZUALO 2010).....	10
Figura 3: Variações de níveis causados pela maré e velocidades de correntes em um sistema de maré sintética, idealizada e puramente estacionária (PARKER, 2005 <i>apud</i> NZUALO 2010).....	11
Figura 4: Seção transversal do canal (JENSEN, MADSEN E FREDSØE, 1999). .....	16
Figura 5: Esboço da definição dos ângulos de escoamento.....	17
Figura 6: Perfil de velocidade na profundidade média para um fluxo paralelo ao canal (Fonte: Fredsøe <i>et. al.</i> , 1999).....	18
Figura 7: Esboço do padrão de refração na profundidade media (Fonte: Fredsøe <i>et al.</i> 1999) .....	21
Figura 8: Imagem da África, mapa geográfico de Moçambique; Província de Sofala, Imagem do Estuário da Beira (Wikipédia e Google Earth, 2010). .....	25
Figura 9: Comportamento da intensidade e direção da corrente de marés no Estuário da Beira, na vazante e na enchente, parte interna (FERNANDES, 1958).....	27
Figura 10: Comportamento da intensidade e direção da corrente de marés no Estuário da Beira, na vazante e na enchente, parte externa (FERNANDES, 1958). .....	28
Figura 11: Regiões de assoreamentos e erosões na Baía de Sofala (FERNANDES, 1958). 29	
Figura 12: Deriva do canal Macuti de 1968 a 1981 (NEDECO, 1982).....	32
Figura 13: Distribuição de profundidades na Baía de Sofala, levantamentos batimétricos do ano 1982 (NZUALO, 2010). .....	36
Figura 14: Direção dos ventos predominantes observados na Estação Meteorológica do Aeroporto da Beira, entre 1961 e 2005 (INAM, 2009). .....	37
Figura 15: Velocidade média mensal do vento na estação meteorológica do aeroporto da Beira, de 1961 a 1990 (INAM, 2009).....	38
Figura 16: Bacias hidrográficas dos rios Púngué e Búzi ( <a href="http://www.cfmnet.co.mz">http://www.cfmnet.co.mz</a> ) .....	39

Figura 17: Instrumento de medição de condutividade, temperatura e profundidade (CTD) e operador. ....	43
Figura 18: Localização das secções e estações de medição com CTD na Baía de Sofala, (Secções de 2006: A, B, C, D e E). (Google Earth, 2009). ....	45
Figura 19: Localização das secções e estações de medição na Baía de Sofala, estuários dos Rios Púngué e Búzi, em Maio de 2009 e Julho de 2010 (Google Earth, 2010). .	46
Figura 20: Médias mensais de evaporação e precipitação na cidade da Beira, de Junho de 2005 a Maio de 2006 (Estação Meteorológica do Aeroporto da Beira) .....	47
Figura 21: Médias mensais de precipitação na cidade da Beira, de Janeiro a Dezembro de 2009 (Estação Meteorológica do Aeroporto da Beira) .....	47
Figura 22: Variação da maré no porto da Beira.....	48
Figura 23: Marés previstas nos períodos de medição dos parâmetros físicos no Estuário da Beira.....	49
Figura 24: Amplitudes de maré prevista e medida pelo AWAC durante o período de medição dos parâmetros físicos na Baía de Sofala.....	51
Figura 25: Perfil longitudinal da variação de salinidade na Baía de Sofala, Março 2006....	53
Figura 26: Perfil longitudinal da variação de salinidade na Baía de Sofala Junho de 2006.	53
Figura 27: Perfil longitudinal da variação de temperatura na Baía de Sofala em Março de 2006 .....	54
Figura 28: Perfil longitudinal da variação de temperatura na Baía de Sofala em Junho de 2006 .....	54
Figura 29: Secção longitudinal de salinidade no estuário de Púngué (Maio de 2009).....	55
Figura 30: Secção longitudinal de temperatura no estuário de Púngué (Maio de 2009).....	55
Figura 31: Secção longitudinal de salinidade do rio Búzi (julho de 2010) .....	56
Figura 32: Secção longitudinal de temperatura do rio Búzi (julho de 2010) .....	56
Figura 33: Perfis transversais da variação de salinidade no rio Púngué, medições realizadas durante a quadratura em maio de 2009 (estação seca).....	58
Figura 34: Perfis transversais da variação de temperatura no rio Púngué, Maio de 2009....	59
Figura 35: Perfis transversais da variação de salinidade na Baía de Sofala, Maio de 2009.	61
Figura 36: Perfis transversais da variação de temperatura na Baía de Sofala, Maio de 2009. ....	62

Figura 37: Correntometro AWAC e modo de ancoramento .....	64
Figura 38: Estações de medição de correntes realizadas em Maio de 2009 (Fonte: Adaptado do Google Earth, 2010).....	66
Figura 39: Intensidade de corrente na profundidade média e nível d água no ponto 1.....	67
Figura 40: Direção da corrente na profundidade média e nível d água no ponto 1.....	68
Figura 41: Diagrama polar das correntes medidas, na profundidade média no ponto 1. ....	68
Figura 42: Intensidade de corrente na profundidade média e nível d água no ponto 2.....	69
Figura 43: Direção da corrente na profundidade média e nível d água no ponto 2.....	69
Figura 44: Diagrama polar das correntes medidas, na profundidade média no ponto 2. ....	70
Figura 45: Intensidade da corrente na profundidade média e nível d água no ponto 3.....	70
Figura 46: Direção da corrente na profundidade média e nível d água no ponto 3.....	71
Figura 47: Diagrama polar das correntes medidas, na profundidade média no ponto 3. ....	71
Figura 48: Intensidade da corrente na profundidade média e nível d'água no ponto 4.....	72
Figura 49: Direção da corrente na profundidade média e nível d água no ponto 4.....	72
Figura 50: Diagrama polar das correntes medidas, na profundidade média no ponto 4. ....	72
Figura 51: Sobreposição de maré prevista para o porto da Beira e da maré observada pelo AWAC nos pontos de observação da maré (1, 2, 3 e 4).....	73
Figura 52: Sobreposição de maré prevista para o porto da Beira e intensidade da corrente observada pelo AWAC nos pontos (1, 2, 3 e 4). ....	73
Figura 53: Níveis de maré e direções da corrente na profundidade média nos quatro pontos de medições. ....	74
Figura 54: Elipses de correntes do Ano 2009, 1982 (NEDECO) e traçado do canal de acesso ao Porto da Beira (Fonte: INAHINA, 2010). ....	77
Figura 55: Padrão de correntes 2DH na meia maré enchente de sizígia do período de inverno no Estuário da Beira (de Nzualo, 2010). ....	78
Figura 56: Padrão de correntes 2DH na meia maré vazante de sizígia do período de inverno no Estuário da Beira (de Nzualo, 2010).....	78
Figura 57: Deriva do canal portuário para Oeste, de contorno a azul do ano de 1986 para o contorno a vermelho ilustrando o canal do ano de 2009 (Fonte: Nzualo 2010)..	80

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Períodos de medição e parâmetros medidos no Estuário da Beira .....	44
Tabela 2: Direção e intensidade média mensal do vento no período de Junho de 2005 a Maio de 2006 (Estação Meteorológica do Aeroporto da Beira) .....	47
Tabela 3: Constantes harmônicas referentes à estação maregráfica do Porto de Beira para o ano de 1999 - Baía de Sofala .....	50
Tabela 4: Especificações do AWAC para a medição de corrente e marés no Estuário da Beira .....	65
Tabela 5: Coordenadas das estações de medição das correntes e marés .....	66
Tabela 6: Velocidades das correntes de marés no interior do canal calculadas para a vazante e enchente.....	79

## **ANEXOS**

### **ANEXOS A**

Tabela A.6: Coordenadas das estações de medição de condutividade, temperatura, e pressão na Baía de Sofala (Março de 2006) .....	89
Tabela A.7: Coordenadas das estações de medição de condutividade, temperatura e pressão na Baía de Sofala (Junho de 2006) .....	90
Tabela A.8: Coordenadas das estações de medição de condutividade, temperatura e pressão, na Baía de Sofala (Maio de 2009) .....	91
Tabela A.9: Coordenadas das estações de medição de temperatura, salinidade e profundidade no rio Búzi (Julho de 2010).....	93

### **ANEXOS B**

Figuras B.1: Destruição de habitações .....	95
Figuras. B. 2: Erosão costeira.....	95
Figuras. B.3: Destruição de quebra correntes.....	95
Figuras B.4: Extração de areia, na zona de deposição de sedimentos (Clube Palmeiras da Beira). .....	96
Figuras B.5: Extração de areia, na zona de deposição de sedimentos (Clube Palmeiras da Beira) para fins de construção e aterros nos arrozais.....	96
Figuras B.6: Devastação dos mangais para fins comerciais.....	97
Figuras B.7: Exploração do metal existente nas barreiras criadas para a proteção costeira, para fins de construção e venda respectivamente. ....	97

### **ANEXOS C**

Imagens de equipamento e pessoal técnico.....	96
---	----

## **ABREVIATURAS E ACRÔNIMOS**

AWAC – Acoustic Wave and Current Meter

CFM – Portos e Caminhos de Ferro de Moçambique, Empresa Pública

CONSULTEC – Consultores Associados, Lda

DNA – Direção Nacional de Águas (de Moçambique)

DNA ARA - CENTRO – Administração Regional de Águas do Centro

DNA ARA - NORTE – Administração Regional de Águas do Norte

EMODRAGA – Empresa Moçambicana de Dragagem, Empresa Pública

GROW – Global Reanalysis of Ocean Waves

INAHINA – Instituto Nacional de Hidrografia e Navegação (de Moçambique)

INAMAR – Instituto Nacional da Marinha (de Moçambique)

INE – Instituto Nacional de Estatística (de Moçambique)

JICA – Agencia Japonesa para a Cooperação Internacional

MHM – Missão Hidrográfica de Moçambique

MDNM – Ministério da Defesa Nacional de Moçambique

MOPH – Ministério das Obras Públicas e Habitação (de Moçambique)

INAM – Instituto Nacional de Meteorologia (de Moçambique)

NEDECO – Netherlands Engineering Consultants

SisBaHia – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental

ZH – Zero Hidrográfico

## LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

Simbolo	Descrição	Unidades
PM	Preamar	m
BM	Baixa-Mar	m
NMM	Nível médio do mar, valor médio em torno do qual a maré oscila	m
$\zeta$	Elevação da superfície livre	m
t	Tempo	s
c	Celeridade da onda	
$u, v$ e $w$	Componentes da velocidade na direção dos eixos $x, y$ e $z$	m/s
$g$	Aceleração da gravidade local	$m/s^2$
$\rho_0$	Massa específica da água	$Kg/m^3$
$C_h$	Coeficiente de Chézy	
$D$	Profundidade	m
$\varepsilon_{s,z}$	Coeficiente de difusão do material	
$W_{eff}$	Largura efetiva	m
$W$	Largura do fundo do canal	m
$\alpha$	Razão de inclinação	
$\Delta h$	Aprofundamento do canal	m
$\rho$	Densidade da água	$Kg/m^3$
$p$	Pressão	$N/m^2$
$\tau_{bx}$ e $\tau_{bz}$	Tensão de fundo na direção x e z respectivamente	$N/m^2$
$T_{xz}$ e $T_{zz}$	componentes de tensão de resposta aos gradientes do campo de velocidade horizontal e na profundidade média	$N/m^2$
$S_0$	Declividade máxima do talude.	
$D_0$	Profundidade máxima a montante	m
$D_1$	Declividade máxima no interior do canal	
$\alpha_0$	ângulo de ataque	°
$w_i$	Velocidade na profundidade média dentro do canal	m/s
$w_0$	Velocidade média fora do canal	m/s
$\partial p / \partial z$	Gradiente longitudinal de pressão	$N/m^2$
$V$	Velocidade total na profundidade média	m/s
$K_n$	Rugosidade de fundo de Nikuradse	
$V_f$	Velocidade de fricção	m/s
$\tau_b$	Tensão de fundo	$N/m^2$
$b_0$ e $b_1$	Larguras das linhas de fluxo fora e dentro do canal	m

## 1. INTRODUÇÃO

O Estuário da Beira situa-se sobre o Banco de Sofala<sup>1</sup>, zona central de Moçambique que é conhecida pela sua biodiversidade. A pesca industrial e artesanal dos crustáceos é a referência desta região, dado que este local é conhecido como uma das áreas da Costa Oriental da África para esta atividade. O camarão (larva, juvenil e adulto) necessita de diferentes condições ambientais para o seu crescimento. Isto está intimamente relacionado com a dinâmica e o funcionamento dos ecossistemas costeiros. Daí ser importante o estudo dos fatores ambientais, particularmente as variações periódicas de salinidade e de temperatura, as marés e correntes de marés. Estas características permitem a interpretação da distribuição e abundância de diferentes espécies, e sobretudo, os períodos de sua maior ocorrência. A interpretação e análise da dinâmica dos processos físicos que ocorrem neste ambiente aquático facilitam a gestão destes recursos.

A agricultura, a mineração, bem como outros usos de água a montante dos rios Búzi e Púngué tem gerado problemas ambientais no sistema estuarino (ecossistema), devido às vazões de produtos agroquímicos que são efetuadas na Baía de Sofala e à intrusão salina (SWECO & Associados, 2004). O estudo das correntes de marés e da frente salina contribuirá para a calibração de modelos de intrusão salina, transporte de sedimentos e de poluentes no interior da Baía.

Os portos desempenham um papel vital na economia de países costeiros. O maior calado das embarcações modernas requer trabalhos de dragagem para o aumento de profundidades dos canais que ligam os portos às águas profundas. Esses canais sofrem de problemas de assoreamento periódicos ou contínuos e requerem manutenção por dragagem com objetivo de torná-los seguros para a navegação. Os custos relacionados

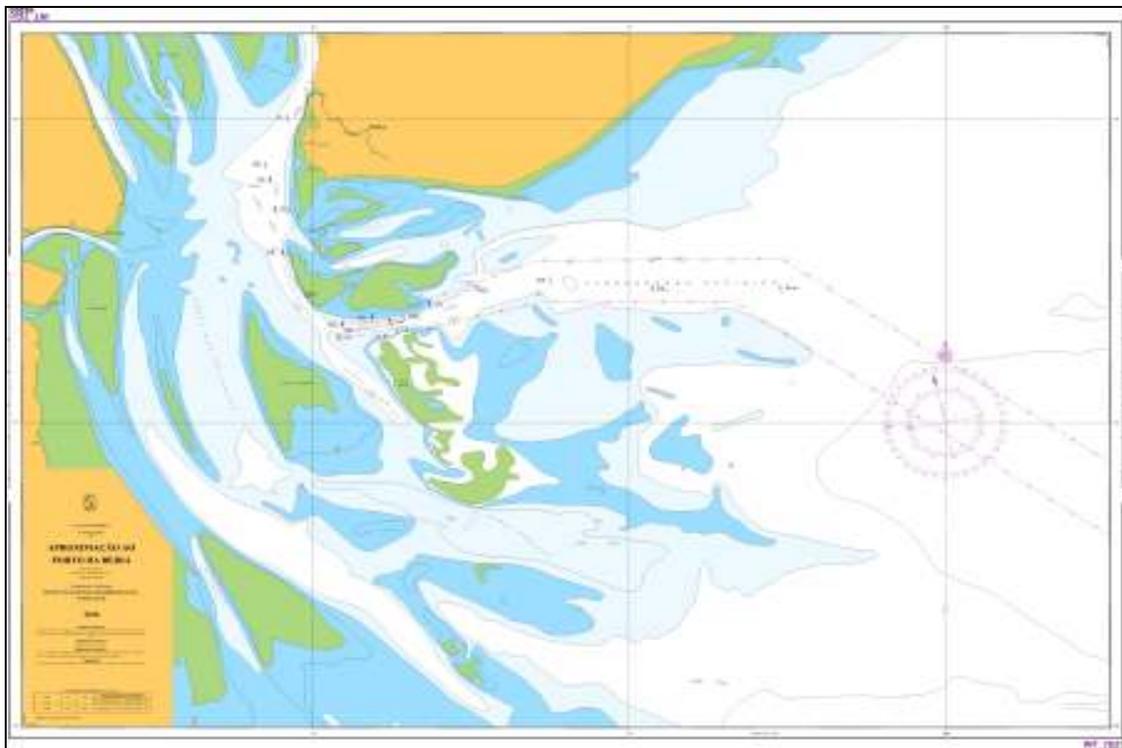
---

<sup>1</sup> Designa-se de “Banco de Sofala” ao corpo de água situado na costa oriental da África, ao longo do canal de Moçambique entre as latitudes 16° e 22° S, e caracterizado por uma extensa região costeira com cerca de 148,16 Km, e profundidades inferiores a 20 metros.

com esta manutenção são altos para a economia de funcionamento dos portos (JENSEN, MADSEN e FREDSE, 1999).

A variação espacial da salinidade também fornece uma informação relevante no que concerne ao calado dos navios que passam pelo canal de acesso ao porto da Beira. De acordo com a NEDECO (1982), as áreas de ocorrência de salinidade com valores baixos ao longo do canal irão requerer maior profundidade náutica para navios de maior calado.

O canal de acesso ao porto da Beira foi desde o início definido pelos portugueses seguindo a orientação dos canais existentes entre os bancos na foz do Estuário da Beira (**Figura 1**) e naturalmente, a direção da corrente. Porém, esses bancos não são fixos, devido à dinâmica sedimentar o que contribui para o assoreamento do canal. Para o estudo do assoreamento deste foram realizadas medições de correntes em Regiões próximas, as quais serão analisadas nesta dissertação.



**Figura 1:** Carta náutica que ilustra o canal de acesso ao porto da Beira (INAHINA, 2010).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Principal**

Esta dissertação tem como objetivo principal caracterizar a frente salina do Estuário da Beira, bem como a relação das correntes de marés com o alinhamento do canal de acesso ao porto da Beira.

### **2.2. Objetivos Complementares**

- Identificar as características físicas da mistura das águas fluviais e oceânicas no Estuário da Beira.
- Associar os processos climáticos predominantes na zona de estudo (ventos, precipitação e descarga fluvial) com a circulação hidrodinâmica.
- Caracterizar as correntes de marés no canal de acesso ao porto da Beira
- Estudar a influencia das correntes de maré no alinhamento do canal de acesso ao porto da Beira.

### **3. REVISÃO DA LITERATURA**

Define-se estuário, de acordo com CAMERON e PRITCHARD (1963), como sendo um corpo de água costeiro semiconfinado com ligação livre ao oceano, estendendo-se rio acima até o limite da influência das marés, sendo que em seu interior a água do mar é mensuravelmente diluída pela água doce oriunda da drenagem continental (Dyer, 1997).

Estuários são feições costeiras bastante dinâmicas no tempo e no espaço, com origem associada à elevação do nível do mar e inundação de vales na zona costeira. Durante uma transgressão marinha, os estuários migram para montante inundando novas áreas, especialmente os vales fluviais. Entretanto, quando o nível do mar para de subir, ou quando o balanço de sedimentos no contexto estuarino se torna positivo, os estuários passam a ser assoreados. Normalmente, este assoreamento inicia-se na área mais interna e rasa, próxima à embocadura fluvial, o que reduz a área estuarina. A deposição de material sólido dentro do estuário provoca modificações morfológicas, que de acordo com o modelo de Dyer (1997), podem variar no tempo.

#### **3.1. Classificação dos Estuários**

As diferentes classificações de estuário existentes na literatura são baseadas nas variações de salinidade ou de densidade da água, nas amplitudes de maré da área oceânica adjacente e nas características geomorfológicas. Não existe qualquer consenso sobre qual das classificações é a mais completa.

Segundo DYER (1997), a classificação baseada nos padrões de variação de salinidade introduzida por PRITCHARD (1955), esta intimamente ligada à circulação da água dentro do estuário que é influenciada pela vazão fluvial, ondas, marés e também pelo vento. Esta circulação será função da importância relativa de cada um dos fatores

dinâmicos descritos acima. O ambiente estuarino pode ser subdividido em três zonas com base na interação entre o prisma de maré e a vazão fluvial, fatores primeiramente responsáveis pela circulação e padrão de sedimentação:

- Zona Estuarina Fluvial, região onde a salinidade das águas é sempre menor que 1 PSU, mas os efeitos da maré ainda são observados.
- Zona de turbidez máxima pode ser observada, normalmente na região de salinidade entre 4 a 10 PSU.
- Zona Estuarina Costeira, localizada na região costeira adjacente onde a salinidade observada coincide com a salinidade oceânica.

Quando o estuário é dominado pelo rio, ou seja, a forçante fluvial é mais forte que a forçante de maré, ele é classificado como um estuário altamente estratificado ou de cunha salina. 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 (DYER, 1997). Neste caso, a grande parte dos sedimentos proveniente dos rios é levada para a região oceânica na camada de água superior e pouca sedimentação ocorre dentro do corpo estuarino. Exemplo de um estuário altamente estratificado é o Rio Mississippi, no Golfo do México, Estados Unidos.

Quando a forçante de maré é mais importante que a forçante fluvial o estuário é classificado como bem misturado. Neste estuário o perfil vertical de salinidade é homogêneo, ou seja, a salinidade das águas superficiais é igual à salinidade das águas do fundo. A salinidade da água só varia lateralmente, sendo mais alta na região oceânica e mais baixa em direção ao continente (DYER, 1997). Exemplo: Delaware Bay, nos Estados Unidos.

Quando a forçante fluvial e de maré são comparáveis, o estuário é classificado como parcialmente estratificado ou parcialmente misturado. Neste estuário o aumento de salinidade ocorre de maneira gradativa tanto na escala vertical quanto na horizontal. Exemplos: o estuário do Rio Tamar, na Inglaterra.

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 a montante e a 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. Esta classificação de alturas de maré foi proposta por DAVIES (1964), onde o termo micro maré se refere a marés com altura menor que 2 m, meso marés a marés com alturas variando de 2 a 4 m e macro marés a marés com altura maior que 4 m.

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 (Dyer, 1997).

É importante salientar 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 vazão 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 apresenta águas bem misturadas na sua entrada enquanto que na região da ponte Rio - Niterói, as águas são classificadas como parcialmente misturadas (MIRANDA *at al.*, 2002).

HAYES (1975), propôs uma classificação geomorfológica baseada na altura da maré. Em função das formas deposicionais distintas observadas na embocadura de canais estuarinos e lagunares ao longo de costas de restinga, que apresentaram variações longitudinais na altura das marés.

Na classificação de HAYES, estuários de micro e meso marés estão associados a restingas e ocasionais canais de conexão entre o estuário ou laguna e o mar. Estuários largos, com ampla desembocadura e forma longitudinal em funil são característicos de regiões de macro marés. Apesar desta classificação ter se tornado bastante popular, existem quatro problemas que merecem ser destacados:

(1) A classificação é baseada na altura absoluta e não na altura relativa das marés (altura das ondas em função da altura da maré).

(2) Ela enfoca mais a configuração da embocadura do que a do próprio estuário.

(3) Combina morfologia da restinga com a morfologia do canal, e por isso se torna mais uma classificação de linha de costa.

(4) Aplica-se apenas a costas em submersão, onde a retrogradação da linha de costa é evidente.

A maioria das classificações de estuário propostas até hoje tem cunho geomorfológico (KJERFVE *at al.*, 1989). Apesar dos autores terem sugerido diferentes números de classe, basicamente quatro tipos principais podem ser relacionados, como descritos a seguir.

**a) estuários de planície costeira:** também denominados como estuários clássicos, pois é o tipo mais comum encontrado em costas com ampla planície litorânea e tem sua formação associada à inundação de um vale fluvial. Apesar de sua área ser predominantemente inframareal, estes estuários formam feições, com vales em "V" e largas áreas de inundação. A calha central do vale torna-se mais larga e profunda em direção à embocadura, mas raramente ultrapassa os 20 m de profundidade.

**b) estuários barrados por restingas:** estes estuários são distinguidos pela presença de uma barreira arenosa formada por processos de deposição costeira restringindo as

embocaduras do estuário. Estes estuários são geralmente mais rasos que os anteriores, e devido à restrição ao fluxo de maré imposta pela barreira arenosa, a ação das correntes e ondas é restrita à embocadura. Esta sofre mudanças sazonais de posição e morfologia devido à variação da vazão fluvial, intensidade e frequência de tempestades.

Estes estuários podem adquirir variadas configurações, dependendo da seção da zona costeira isolada pela formação da restinga. A restinga pode isolar um vale afogado normal à linha de costa (característica definição de estuário), ou então isolar um embaçamento com maior extensão ao longo da linha de costa. É neste ponto que a conceituação se torna confusa, pois ao invés de estuário teríamos uma laguna. KJERFVE (1989) et al. propuseram a subdivisão de estuários rasos barrados por restingas em duas categorias: estuários de pântanos salgados (manguezais na zona tropical) e lagunas, dependendo do grau de preenchimento da feição costeira e da extensão da influência da maré.

**c) estuário de pântanos salgados:** são normalmente caracterizados pela ausência de uma vazão fluvial significativa e por extensas áreas de entre marés colonizadas por vegetação. O estuário propriamente dito consiste de canais de drenagem, onde a circulação de água é dominada pelas correntes de maré. A rede bem definida de canais de maré conecta-se ao oceano através de uma ou mais aberturas na restinga, com profundidades em torno de 10 m.

**b.(2) A laguna** é considerada por KJERFVE (1989) como uma definição um pouco arbitrária de um estuário com barreira arenosa. O autor caracteriza as lagunas por sua grande superfície livre, uniformemente rasa, orientação paralela à linha de costa, profundidade inferior a 2 m, com canais subaquáticos pouco desenvolvidos e circulação de água causada principalmente pelo cisalhamento eólico. Além disso, a variação da maré dentro das lagunas é bem menor que nos demais estuários já mencionados. Dentro de uma perspectiva geológica, as lagunas poderiam ser consideradas como estuários de manguezais ainda a serem preenchidos.

**d) fiordes** são vales profundos (até 800 m) entalhados no gelo, com seção transversal em "U", com depósitos de moraina<sup>2</sup> localizados junto a embocadura e onde a profundidade varia de 10 a 90 metros.

### **3.2. Correntes de Marés**

Associa-se a maré a uma onda progressiva na qual as partículas líquidas descrevem órbitas fechadas situadas em planos verticais paralelos. Mas como o comprimento desta onda é extremamente grande em relação à profundidade dos oceanos, as trajetórias das partículas apresentam um pequeno deslocamento no sentido vertical, cuja amplitude vai decrescendo com a profundidade. Por outro lado, as características do deslocamento horizontal mantêm-se praticamente idênticas ao longo da coluna líquida fazendo com que estas características classifiquem a maré como uma onda de massa (INSTITUTO HIDROGRÁFICO, 1989).

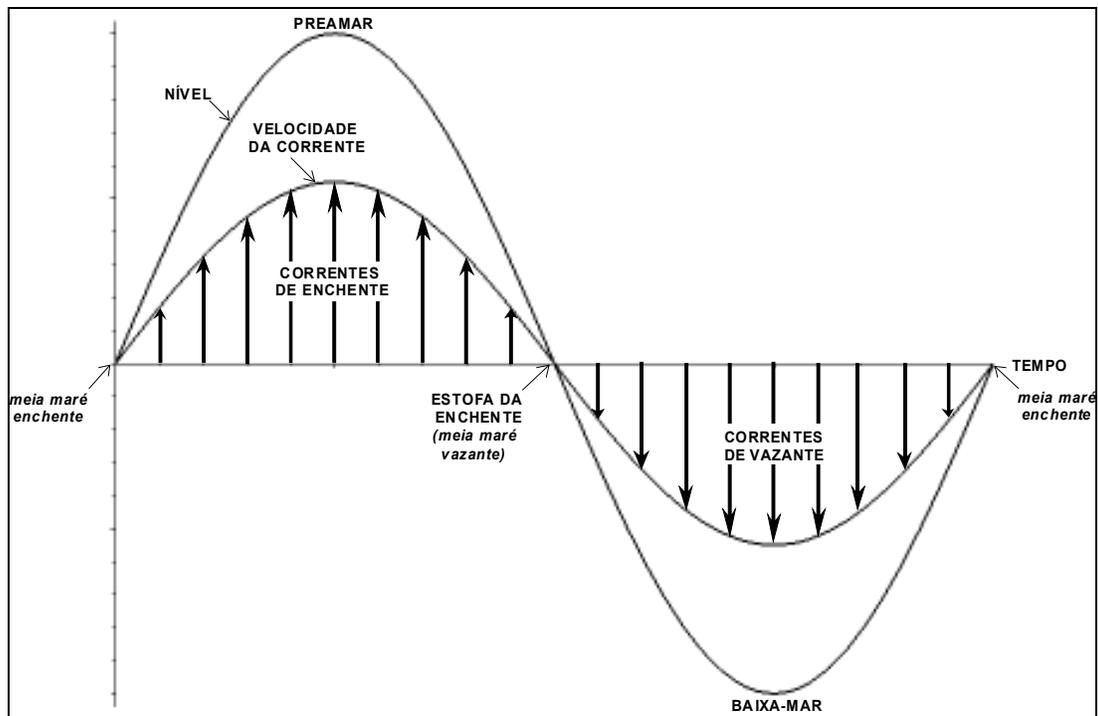
A oscilação vertical das partículas superficiais chama-se maré, enquanto que os deslocamentos horizontais das mesmas partículas tomam a designação de corrente de maré ou corrente de massa, pois afeta todas as partículas da coluna de água. Apenas o atrito junto ao fundo introduz uma redução de velocidade que por viscosidade se transmite às camadas superiores. Esta resistência decresce exponencialmente, por isso pode-se em princípio assumir que a intensidade da corrente é constante em grande parte da coluna d'água (INSTITUTO HIDROGRÁFICO, 1989).

As expressões que traduzem o deslocamento das partículas líquidas ao longo da sua trajetória (ondas progressivas) mostram que a corrente de maré é dirigida no sentido da propagação em toda a região onde a água está acima do nível médio e em sentido contrário na região oposta (Error! Reference source not found.). Nestas condições, o valor máximo da corrente de enchente coincide com a preamar e o valor máximo da

---

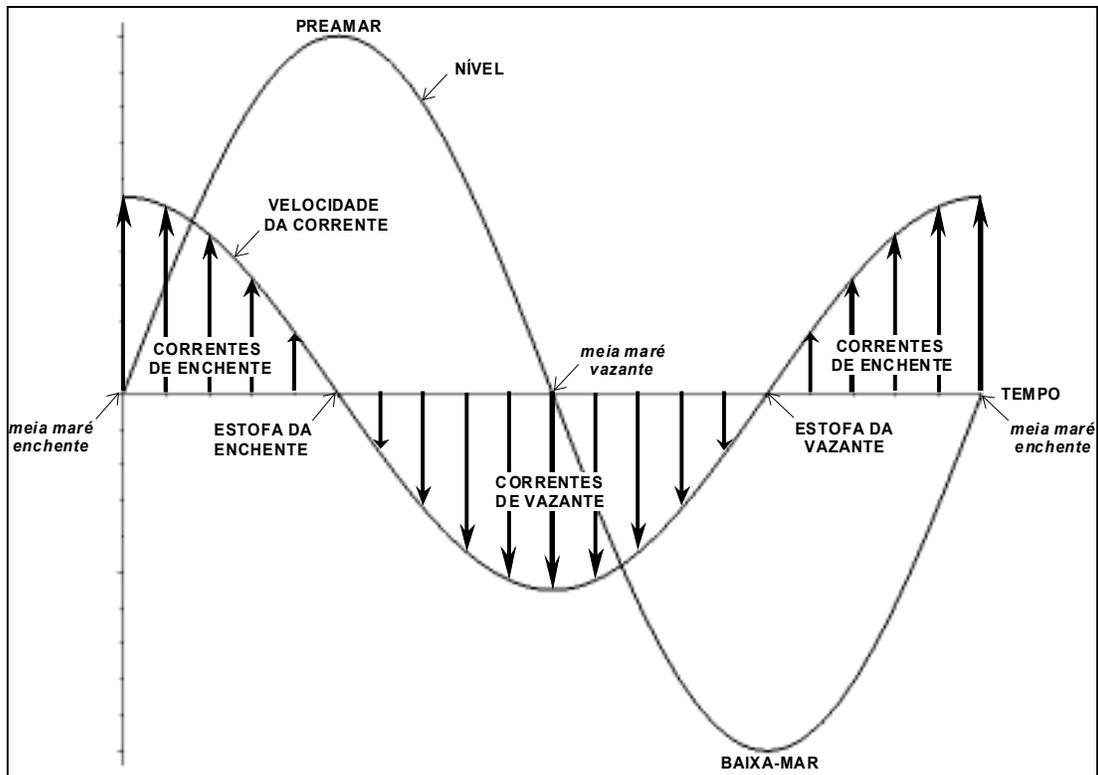
<sup>2</sup> Moraina = depósitos de blocos e argilas carregados pelas geleiras

corrente de vazante ocorrerá na baixa-mar. As estofas de corrente ocorrerão na meia – maré (INSTITUTO HIDROGRÁFICO, 1989).



**Figura 2:** Variações de níveis causados pela maré e velocidades de correntes em um sistema de onda de maré sintética, idealizada e do tipo puramente progressiva (NZUALO 2010).

Perto da costa e sempre que haja propagação da maré numa direção perpendicular a ela, é natural que seja gerada uma onda de maré refletida com a mesma direção e sentido oposto e que terá uma amplitude próxima da incidente quanto mais completa for esta reflexão. Estão assim criadas as condições para que se estabeleça um regime de ondas estacionárias cujas características fundamentais são as seguintes: a intensidade da corrente será máxima a meia maré e será nula durante a PM e BM (Figura 3). A superfície do mar oscila em torno de uma linha nodal que separa duas zonas dentro das quais todos os pontos dum mesmo lado da nodal têm a mesma fase de oscilação. Os valores máximos da corrente ocorrerão sobre a nodal. Quando se está em enchente num dos lados desta linha o regime será forçosamente de vazante na região oposta.



**Figura 3:** Variações de níveis causados pela maré e velocidades de correntes em um sistema de maré sintética, idealizada e puramente estacionária (NZUALO 2010).

As medições feitas na natureza revelam que a corrente é normalmente giratória segundo diversas modalidades, que vão de um odógrafo elíptico a outros em forma de oito “8”. É fácil perceber que a orientação dos filetes de água em zonas que são cobertas e descobertas dependem muito de outros fatores e não somente dos de origem astronômica. A tendência para a rotatividade da corrente de maré não é percebida devido à sobreposição de duas ondas, progressivas ou estacionárias de direções diferentes. A corrente resultante, mesmo que devido a duas correntes alternadas puras, assumirá um caráter giratório (INSTITUTO HIDROGRÁFICO, 1989).

### 3.2.1. Correntes de Marés num Estuário

Num estuário tem-se água fluvial doce e água marinha salgada, e o seu comportamento hidrodinâmico não é homogêneo na mesma vertical. As águas mais densas situam-se mais ao fundo por onde começará a corrente de enchente, que se propagará sucessivamente até a superfície o mesmo ocorre com a corrente de vazante,

de modo que as inversões têm origem normalmente junto ao fundo (INSTITUTO HIDROGRÁFICO, 1989).

### **3.3. Presença de Bancos Alinhados com a Corrente nos Estuários**

Em ambientes marinhos definem-se bancos de areia como sendo feições costeiras arenosas que formam uma sobre-elevação no leito, caracterizadas por um contorno batimétrico fechado. São encontrados em estuários e áreas costeiras onde há abundância de areia e o regime hidrodinâmico é capaz de transportá-los (BELDERSON *et al.*, 1982 *apud* FERNANDES, 2010). Eles são fornecedores potenciais de agregados marinhos; representam um sistema de defesa costeiro natural, mas também representam uma ameaça à navegação, além disso, são regiões preferenciais de acúmulo de microorganismos.

Os bancos de areia modificam as correntes residuais de maré conforme crescem. Dentre os fatores que determinam seu crescimento destaca-se a disponibilidade de areia, o tamanho do grão e a presença de escoamentos secundários. Bancos são formados em decorrência da assimetria no movimento de sedimentos em cada um de seus lados, devido ao escoamento reversível da maré. Eles inicialmente se desenvolvem em forma circular e evoluem para uma forma mais alongada. A morfologia dos bancos é resultado de uma interação não linear entre correntes de maré, transporte de sedimentos e a topografia de fundo. Devido à interação desses processos, uma variedade de bancos de diferentes origens pode existir no mesmo ambiente de maré (FERNANDES, 2010).

#### **3.3.1. Caracterização dos bancos em canais de maré**

Segundo FERNANDES (2010), a profundidade, velocidade das correntes e tamanhos dos sedimentos são funções determinantes para a definição do tamanho dos bancos, de seu comprimento de onda e altura. Os bancos de canais de maré quanto a sua estrutura

podem se apresentar em três principais categorias: os bancos alternados, múltiplos e lineares.

Os bancos alternados ocorrem quando a razão entre a largura e a profundidade do canal é grande o suficiente, em geral maior do que 10. Assim como as barras de meandro em rios, esse tipo de banco está geralmente situado na curvatura interna do meandro de um canal, evidenciando que os desenvolvimentos desses bancos e dos meandros estão relacionados (FERNANDES, 2010).

Os bancos múltiplos ocorrem quando a razão entre largura e profundidade do canal é maior do que 100. Surge então, um sistema de canais múltiplos e bancos. As mudanças longitudinais da largura e curvatura do canal têm forte influência na natureza dos bancos que são desenvolvidos. Em canais estreitos e sinuosos que caracterizam os trechos mais internos dos sistemas de maré, os bancos se desenvolvem na curvatura interna dos meandros (BARWIS, 1978, DALRYMPLE E KYUNGSIK, 2007 *apud* FERNANDES, 2010).

DYER e HUNTLEY (1999) *apud* FERNANDES (2010) aplicando um sistema de classificação qualitativo baseado numa relação genérica em função de sua origem e desenvolvimento, classificou os bancos em três tipos principais e vários subtipos como se segue:

Tipo 1. Bancos de plataforma (*open shelf ridges*)

Tipo 2. Bancos da foz de estuários (*estuary mouth*)

A) Bancos de foz larga (*wide mouth ridges*)

B) Bancos de foz estreita (*narrow mouth ridges*)

i) Com recessão - Deltas de maré vazante (*with recession - Ebb tidal deltas*)

ii) Sem recessão - Bancos conectados à costa (*without recession - Shoreface connected ridges*)

Tipo 3. Bancos associados a promontórios (*headland associated banks*)

A) *Banner banks* – Promontório sem recessão (*banner banks*)

B) Bancos alternados - Promontório com recessão (*alternating ridges - recessional*)

Os bancos de plataforma (tipo 1) possuem até 80 km de extensão, 13 km de largura média e dezenas de metros de altura. Eles parecem estar quase em equilíbrio com o escoamento. Em geral, formam um ângulo com relação a direção do escoamento, são assimétricos e parecem migrar no sentido de sua face mais íngreme. Diferem os bancos lineares formados na foz de estuários largos (tipo 2A) estão alinhados com o escoamento e migram no sentido contrário à face mais íngreme.

Em estuários de foz estreita, as correntes de maré são fortes o suficiente para fechar a embocadura, enquanto as ondas são dominantes. Os bancos então, se formam próximo à foz como deltas de vazante e enchente (tipo 2Bi). Quando a costa está se retraindo, o delta de vazante forma uma fonte primária de areia para a região próxima à costa, a qual pode ser modificada por tempestades e originar bancos conectados à costa (tipo 2Bii). Vórtices de maré produzidos por Cabos podem gerar "banner banks" (tipo 3A), mas quando o Cabo está se retraindo, bancos alternados ou "en-echelon" podem ser formados e ficar isolados da costa conforme ela regride (tipo 3B).

As mudanças longitudinais da largura e curvatura do canal têm forte influência na natureza dos bancos que são desenvolvidos. Em canais estreitos e sinuosos que caracterizam os trechos mais internos dos sistemas de maré, os bancos se desenvolvem na curvatura interna dos meandros. Já na extremidade de jusante do sistema, como próximo à foz, onde os canais são mais largos e retilíneos, há a formação de bancos de areia mais alongados ou lineares que separam o escoamento em canais dominados por enchente e vazante. Esta transição entre estes dois tipos de bancos ocorre gradualmente conforme o canal se alarga e retifica (DALRYMPLE e CHOI, 2007).

Baseado nas evidências disponíveis, DALRYMPLE e CHOI (2007) observaram que em geral, os bancos de maré alongados migram lateralmente, isto é, transversalmente

às correntes dominantes, o que se constata nos bancos que ladeiam o canal de acesso ao porto da Beira, sobretudo na curva de Macuti.

### **3.4. Fluxo Oblíquo que Passa Através de Canais Dragados**

JENSEN, MADSEN E FREDSE (1999), afirmam que o assoreamento dos canais dragados ocorre quando a capacidade de transporte de sedimentos é menor dentro do canal do que no seu exterior. A previsão do assoreamento é bem sucedida quando o comportamento hidrodinâmico do escoamento e do movimento sedimentar forem bem descritos. Com base num modelo 3D, estes autores analisaram o comportamento do escoamento que passa perpendicularmente aos canais dragados, assumindo que existe uma distribuição da pressão hidrostática e perfis de logarítmicos de velocidade do escoamento horizontal. Segundo a análise feita, a corrente que entra obliquamente num canal será refletida na direção do alinhamento do canal. Esta refração é causada pelo gradiente positivo de pressão que se opõe ao escoamento que entra no canal. A refração da corrente varia ao longo da profundidade e na horizontal, que é unidirecional a montante e a jusante do canal tornando-se 3D. O modelo aplicado foi construído sobre o pressuposto de uniformidade em uma das três direções, que no caso é o alinhamento do canal.

### **3.5. Descrição do Escoamento na Profundidade Média**

Considerando a profundidade média, JENSEN, MADSEN E FREDSE, (1999) discutiram a física por trás do padrão de fluxo de corrente oblíquo que em estado estacionário cruza um canal, longo e reto. Onde o sistema de coordenadas cartesianas e na profundidade média as equações de movimento e de continuidade se apresentam da seguinte forma (equações 1, 2 e 3):

$$\rho D \frac{du}{dt} = \rho D \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -D \frac{\partial p}{\partial x} - \tau_{bx} + \frac{\partial T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial y} \quad (1)$$

$$\rho D \frac{dv}{dt} = \rho D \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + w \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -D \frac{\partial p}{\partial y} - \tau_{by} + \frac{\partial T_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(Du)}{\partial x} + \frac{\partial(Dv)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

Onde:

$u$  e  $v$  = componentes da velocidade na profundidade média em  $x$  e  $y$  respectivamente

$\rho$  = densidade da água

$D$  = profundidade média

$t$  = tempo

$p$  = pressão

$\tau_{bx}$  e  $\tau_{by}$  = tensão de fundo na direção  $x$  e  $y$  respectivamente

$T_{xy}$  e  $T_{zy}$  = componentes de tensão de resposta aos gradientes do campo de velocidade horizontal e na profundidade média

A topografia ao longo do canal é uniforme. Assim, a dependência de  $y$  nas equações (1) e (3) pode ser eliminada [exceto os termos das forças de deriva da equação (2)] se o eixo  $y$  for paralelo a esta direção. Esta direção é denominada direção longitudinal.

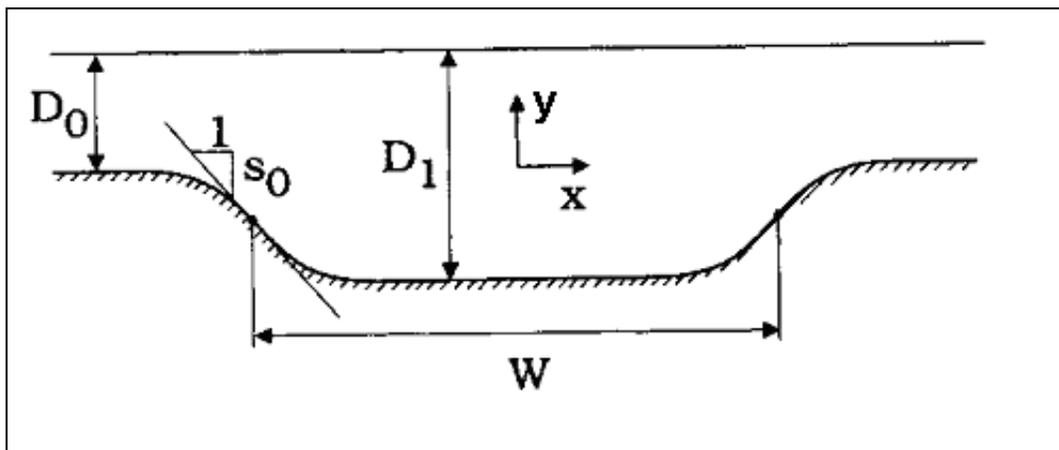
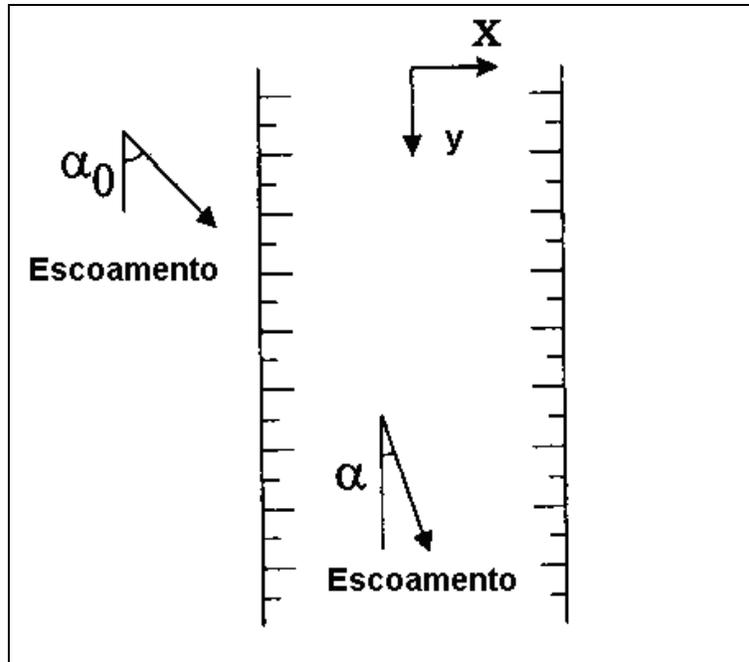


Figura 4: Seção transversal do canal (JENSEN, MADSEN E FREDSSØE, 1999).



**Figura 5:** Esboço da definição dos ângulos de escoamento (JENSEN, MADSEN E FREDSØE 1999).

A largura do canal é definida pela distância entre o centro do talude a montante e o centro do talude a jusante.  $S_0$  é o símbolo da declividade máxima do talude.  $D_0$  é a profundidade máxima a montante e  $D_l$  é a declividade máxima no interior do canal (Figura 4). O ângulo de ataque do fluxo é também conhecido como o ângulo de entrada do fluxo dentro do canal. (Figura 5)

JENSEN, MADSEN E FREDSØE (1999), afirmam que o escoamento de ataque num canal pode ser dividido em três casos distintos, caracterizados pelo ângulo de ataque ( $\alpha_0$ ):

- (1)  $\alpha_0 = 0^\circ$  – A direção da corrente é paralela ao alinhamento do canal
- (2)  $\alpha_0 = 90^\circ$  – A direção da corrente é perpendicular ao alinhamento do canal
- (3)  $0^\circ < \alpha_0 < 90^\circ$  - A direção da corrente de ataque varia entre  $0^\circ$  -  $90^\circ$

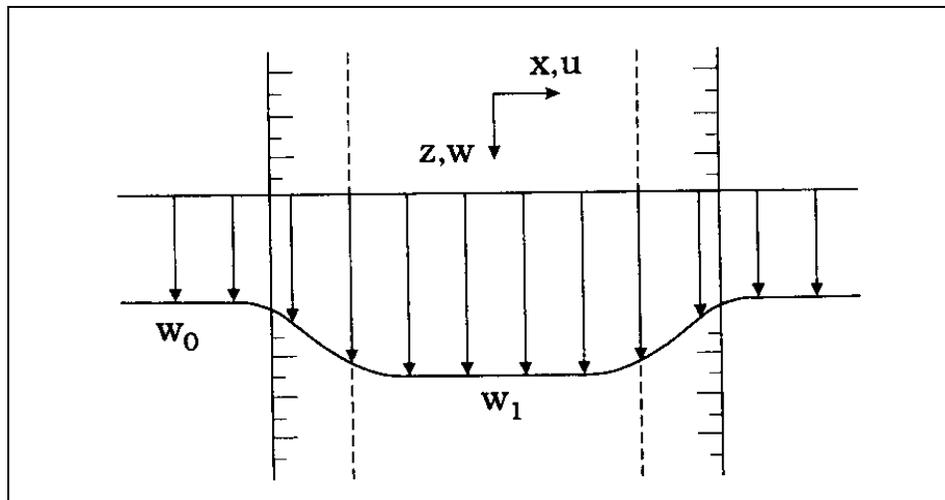
Para uma explicação física didática os casos 1 e 2 serão considerados em termos de velocidades médias  $u$  e  $v$ , na profundidade média, sendo que  $u$  é transversal ao canal e

$v$  é longitudinal. A combinação destes dois casos explica, parcialmente, o padrão de refração, isto é, o caso (3).

### Caso 1 – Corrente Paralela ao Alinhamento do Canal

Quando a corrente é paralela ao alinhamento do canal (Figura 6) a velocidade na profundidade média dentro do canal ( $v_i$ ) é maior que a velocidade média fora do canal ( $v_0$ ). O que se explica pelo seguinte:

Pelas considerações geométricas o gradiente longitudinal de pressão ( $\partial p/\partial y$ ) mostra-se constante ao longo da seção transversal. Portanto, como a força motriz é igual à profundidade da água no local ( $D$ ) multiplicado pelo gradiente de pressão longitudinal, um maior fluxo de água será conduzido nas seções mais profundas. Uma estimativa de aumento de velocidade longitudinal na profundidade média no centro do canal  $v_i/v_0$  é obtido assumindo que a tensão de fundo  $T_{by}$  é balanceada pela força de deriva.



**Figura 6:** Perfil de velocidade na profundidade média para um fluxo paralelo ao canal (Fonte: Fredsøe *et. al.*, 1999).

$$\tau_{by} = -D \frac{\partial p}{\partial y} \quad (4)$$

Aplicando (4) para a situação fora do canal pode se encontrar a seguinte relação:

$$\frac{\tau_{by0}}{\tau_{by1}} = \frac{D_0}{D_1} \quad (5)$$

Onde o índice  $\theta$  se refere aos valores a montante e fora do canal e o índice  $I$  aos valores das variáveis dentro do canal. Adotando-se a fórmula de atrito de Colebrook-White, tem-se (JENSEN, MADSEN E FREDSE, 1999):

$$\frac{1}{C_f} = \frac{V_f}{V} \quad (6)$$

$$\frac{V_f}{V} = \frac{1}{6.1 - 2.5 \ln \left( \frac{k_N}{D} \right)}$$

Onde:

$V$  – é a velocidade média na profundidade

$C_f$  – fórmula de coeficiente de atrito

$K_n$  – Rugosidade de fundo de Nikuradse

$V_f$  – Velocidade de fricção

$\tau_b$  - Tensão no fundo do escoamento

Desenvolvendo as equações (5) e (6) obtém-se:

$$\frac{v_1}{v_0} = \frac{C_{f1}}{C_{f0}} \sqrt{\frac{D_1}{D_0}} \quad (7)$$

Nota-se que:

$$V = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (8)$$

Esta equação reduz-se para ( $\mathbf{V} = \mathbf{v}$ ) - No caso em que a corrente é paralela ao alinhamento do canal. Isto mostra que a velocidade dentro do canal aumenta

proporcionalmente com a raiz quadrada do quociente entre as duas profundidades, desprezando-se pequenas variações do coeficiente de atrito.

$$\frac{v_1}{v_0} = \sqrt{\frac{D_1}{D_0}} \quad (9)$$

### **Caso 2 – Corrente Perpendicular ao Alinhamento do Canal**

Neste caso, a restrição na profundidade média leva-nos a (JENSEN, MADSEN E FREDSE, 1999):

$$\frac{u_1}{u_0} = \frac{D_0}{D_1} \quad (10)$$

Onde a velocidade média transversal na profundidade dentro do canal é inversamente proporcional à expansão da profundidade. Portanto a tensão de fundo no canal, reduz-se quando comparada com a do escoamento.

### **Casos 3 – Corrente Oblíquo ao alinhamento do canal**

Neste caso, ocorrerá uma interação entre os casos acima descritos e a expansão em profundidade. Se o eixo  $y$  está alinhado ao longo do traçado do canal, obtém-se a equação (3)

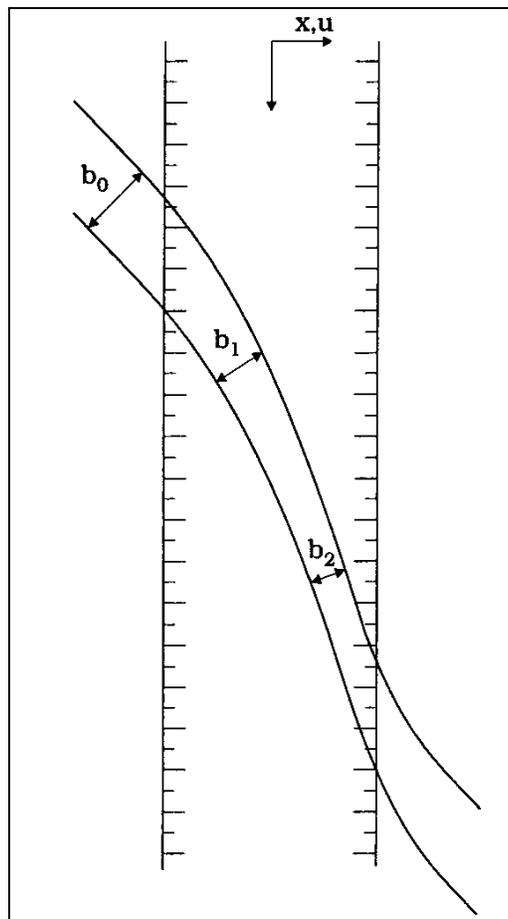
$$\frac{\partial(Dv)}{\partial y} = 0 \quad (11)$$

O que significa que a Equação (9) continua a ser válida para o caso de corrente de ataque oblíquo, bem como para as correntes de ataque perpendicular.

A refração da velocidade média na profundidade surge devido ao valor da componente de velocidade  $u$  e o aumento parcial da componente de velocidade  $v$ . Quando o escoamento cruza a talude de montante do canal ocorre o decréscimo da

componente  $u$ . Em contraste, a aceleração da componente  $v$  é um processo lento, que gradualmente reflete a corrente no interior e em direção ao alinhamento do canal.

A dinâmica do fluxo na profundidade média observada na Figura 7, mostra que na distancia entre duas linhas de fluxo na profundidade média verifica-se um afunilamento em consequência da refração. Se a equação de continuidade for aplicada entre as duas linhas fora do canal e entre as duas dentro do canal obtém se a seguinte relação.



**Figura 7:** Esboço do padrão de refração na profundidade média (Fonte: Fredsøe *et al.* 1999).

$$\frac{V_1}{V_0} = \frac{b_0}{b_1} \frac{D_0}{D_1} \quad (11)$$

Onde:

$b_0$  e  $b_1$  – são as larguras entre as mesmas linhas de escoamento fora e dentro do canal respectivamente

Nota-se que, se a relação  $b_0/b_1$  for maior do que a relação de profundidade  $d_1/d_0$ , a velocidade total a jusante (dentro do canal) ultrapassa a velocidade total a montante (fora do canal) do mesmo.

### **3.6. Conceitos do transporte de sedimentos**

Designa-se processo sedimentológico a colocação em movimento de grãos de sedimentos, o transporte e a cessação destes, através da deposição do material sólido nas depressões da bacia Hidrográfica, em reservatórios, estuários, Baías e canais de navegação (MOTTA, 1978 *apud* VIEIRA DA SILVA e WILSON-JR, 2005).

O processo morfológico consiste nas alterações das características geométricas em planta, perfil e na seção transversal do leito, como consequência da interrupção do equilíbrio dinâmico desses movimentos. A variação das posições e dimensões dos bancos de areia são exemplos deste processo (MOTTA, 1978 *apud* VIEIRA DA SILVA e WILSON-JR, 2005).

O transporte de material sólido na coluna de água pode ser feito como carga de fundo ou em suspensão, dependendo do tamanho do sólido e das condições de fluxo. A carga em suspensão pode também conter alguma carga de lavagem, composta por partículas menores e provenientes de uma fonte à montante, sem que tenham sido supridas pela erosão do leito (VIEIRA DA SILVA e WILSON-JR, 2005).

Os mecanismos de transporte dos sedimentos pela corrente, dependendo de suas propriedades físicas podem se classificar em três tipos principais:

O arrasto é o transporte de sedimentos que se efetua sempre em contato com o leito. Este movimento se processa através de uma série alternada de deslocamentos no sentido do escoamento intercalados por períodos de repouso. Os deslocamentos ocorrem por rolamento, deslizamento ou arrastamento de uma partícula sobre a outra, de modo que haja um contato quase permanente entre as partículas em movimento e as que compõem o leito. Os deslocamentos podem ser positivos, no sentido do escoamento, negativos, no sentido contrário, e nulo, quando a partícula se desloca transversalmente ao escoamento ou quando deixa de se deslocar, quando as tensões tangenciais no leito não são suficientes para manter a partícula em movimento.

A saltação é a modalidade de transporte em que o grão é removido do leito no sentido vertical, atinge uma região onde as velocidades tendem a transportá-lo no sentido do deslocamento, mas retorna ao leito sob efeito do seu peso. Entretanto estes autores afirmam que outros pesquisadores consideram a saltação do ponto de vista das quantidades transportadas, da morfologia de fundo e dependendo do “salto”, incorporadas ao transporte por arrasto. A suspensão é a mobilidade de transporte em que os sedimentos em movimento são sustentados pelas componentes verticais ascendentes das correntes turbulentas e cujo peso próprio não é suficiente para depositá-lo. Como consequência, este movimento se caracteriza também por uma troca contínua de partículas através de camadas idealizadas do escoamento. (RUI DA SILVA e WILSON-JR, 2005).

## 4. ÁREA DE ESTUDO

### 4.1. Descrição Geral da Área de Estudo

Moçambique fica situado na costa leste da África Austral, entre as latitudes 10° 27' e 26° 52' S, e entre as longitudes 30° 12' e 40° 51' E, faz fronteira com a Tanzânia ao Norte; Malawi, Zâmbia, Zimbábue, África do Sul e Suazilândia a Oeste, e pelo oceano Índico a Leste (**Figura 8**). A orientação geral da linha de costa, com cerca de 27.000 km é NE-SW, sendo a terceira maior costa de um país de África. A plataforma continental Sudeste inserida neste contexto regional contém os maiores e mais importantes portos do país, as principais Baías, além de possuir o maior fluxo de embarcações (MDNM, 1986).

A baía de Sofala (**Figura 8**) situa-se no Estuário da Beira e é reconhecida pelo seu vasto e rico ecossistema marinho da zona central de Moçambique. A Baía com cerca de 20 km de comprimento e 10 km de largura, cobre uma área de cerca de 200 km<sup>2</sup>, situada entre os paralelos 19° 49' e 19° 55' Sul, e entre os meridianos 34° 45' e 34° 55' Este. Fazem parte desta Baía os rios Púngué e Búzi (MDNM, 1986). A densidade populacional é de cerca de 20 habitantes por km<sup>2</sup> (INE, 2007), sendo maior na cidade da Beira com cerca de 2.000 habitantes por km<sup>2</sup>.

(INE, 2009).



**Figura 8:** Imagem da África, mapa geográfico de Moçambique; Província de Sofala, Imagem do Estuário da Beira (Wikipédia e Google Earth, 2010).

#### **4.2. O Porto da Beira**

O surgimento deste porto remonta a 1891, como resultado de um contrato assinado entre Portugal e a Grã-Bretanha. As primeiras instalações entraram em funcionamento no ano de 1893 (MUCHANGOS, 1994).

Atualmente, o porto ocupa uma área de mais de 7.000 km<sup>2</sup> e a sua capacidade de navios ancorados cresceu substancialmente, podendo servir simultaneamente, mais de nove navios de longo curso, numa extensão de cais de cerca de 1.700 m. Tem uma grande importância para o sistema de transportes marítimos na zona central da África especialmente para os diversos países do interior, como é o caso de Malawi, Zâmbia,

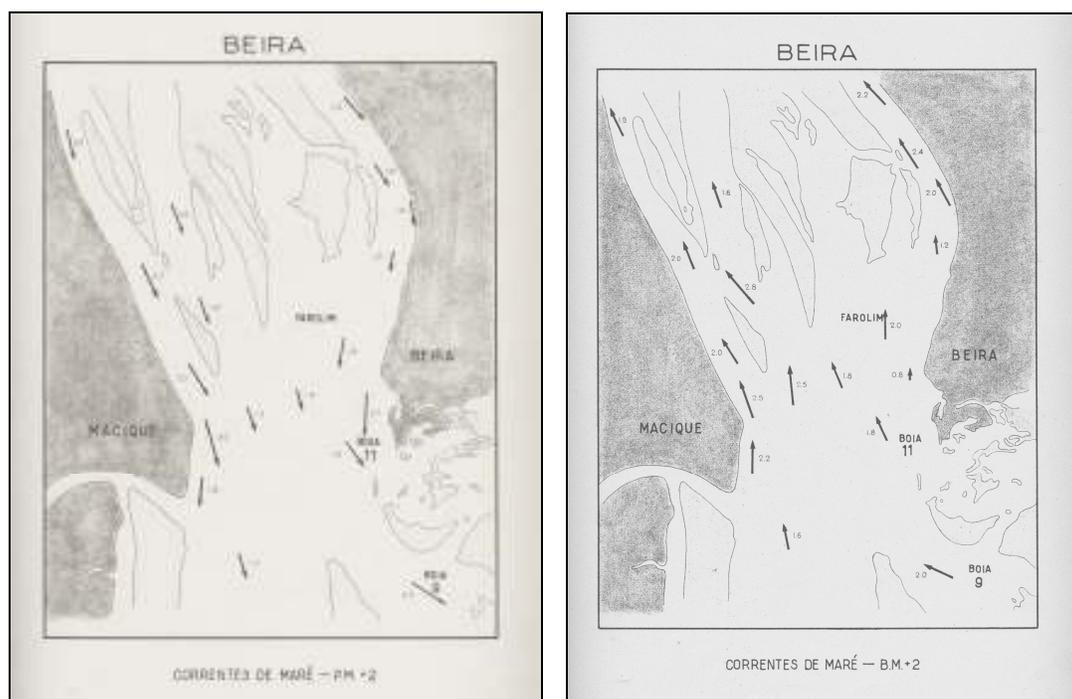
Zimbabwe e Congo. É um porto natural, localizado na zona central de Moçambique a cerca de 20 km em mar aberto (MUCHANGOS, 1994).

Em Moçambique, os sistemas portuário e ferroviário são geridos pela empresa Portos e Caminhos de Ferro de Moçambique (CFM), que por sua vez é subdividida em três zonas (Sul, Centro e Norte), nas quais se encontram os três maiores corredores e portos, nomeadamente: Maputo, Beira e Nacala. O sistema de gestão portuária, num todo, é Administrado com a intervenção de instituições tais como, o Instituto Nacional de Hidrografia e Navegação (INAHINA), que atua na área técnica e científica em águas territoriais moçambicanas visando, fundamentalmente, a garantia da segurança à navegação; o Instituto Nacional da Marinha (INAMAR), que tem como atribuições o exercício da autoridade marítima nas áreas de jurisdição marítima, lacustre e fluvial e finalmente, a Empresa Moçambicana de Dragagem (EMODRAGA - E.P.), que realiza trabalhos de dragagens nos canais de acesso portuários. Estas instituições estão subordinadas ao Ministério dos Transportes e Comunicações de Moçambique, para o exercício de suas atividades.

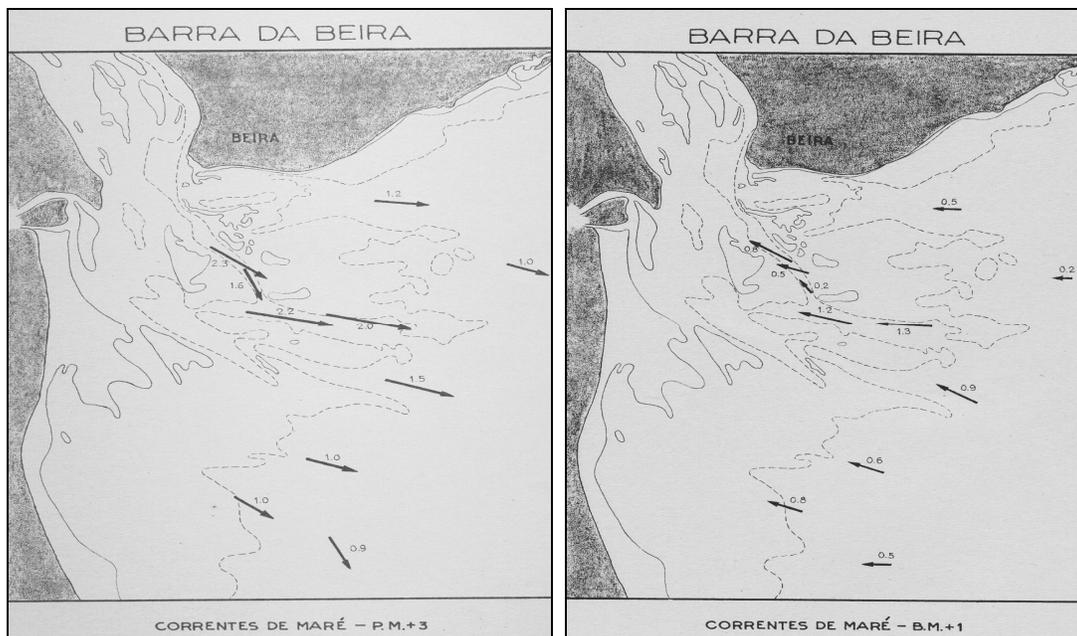
#### **4.3. Histórico de Estudos Efetuados no Estuário da Beira.**

Estudos hidrodinâmicos históricos efetuados no Estuário da Beira por FERNANDES (1958), que constam no relatório da Missão Hidrográfica de Moçambique-MHM, de 1956, baseado no método Lagrangeano e durante a estação seca relatam que a intensidade da corrente em dias de marés de sizígia varia dum valor máximo de 2,4 nós (1,29 m/s) na meia maré de vazante (3 horas depois da preamar) e 1,9 nós (0,98 m/s) na meia maré de enchente (3 horas depois da baixa-mar). A estofa da corrente de enchente ocorre 6 minutos depois da hora da preamar. A estofa da corrente de vazante ocorre 48 minutos depois da hora de baixa-mar. A corrente máxima de enchente dá-se 2,5 horas depois da hora da baixa-mar. A corrente máxima de vazante dá-se 3,5 horas depois da hora da preamar. A duração média da enchente é de 4 horas e 48 minutos, e a duração média da vazante é de 7 horas e 30 minutos.

A análise dos resultados dos gráficos obtidos com base nas observações efetuadas em 21 estações de medição mostra que a circulação na Baía de Sofala acompanha, de modo geral, a orientação dos vários canais existentes entre os diversos baixos. Segundo FERNANDES (1958), junto à curva de Macuti (Bóia 9 indicada na **Figura 9**), as correntes são concordantes com a direção dos canais. Com relação ao eixo do canal, na vazante desviam-se para Este e na enchente para Oeste. Na **Figura 10** são mostradas as correntes de vazante e enchente na área externa, com as correntes alinhadas ao longo do canal Rambler.



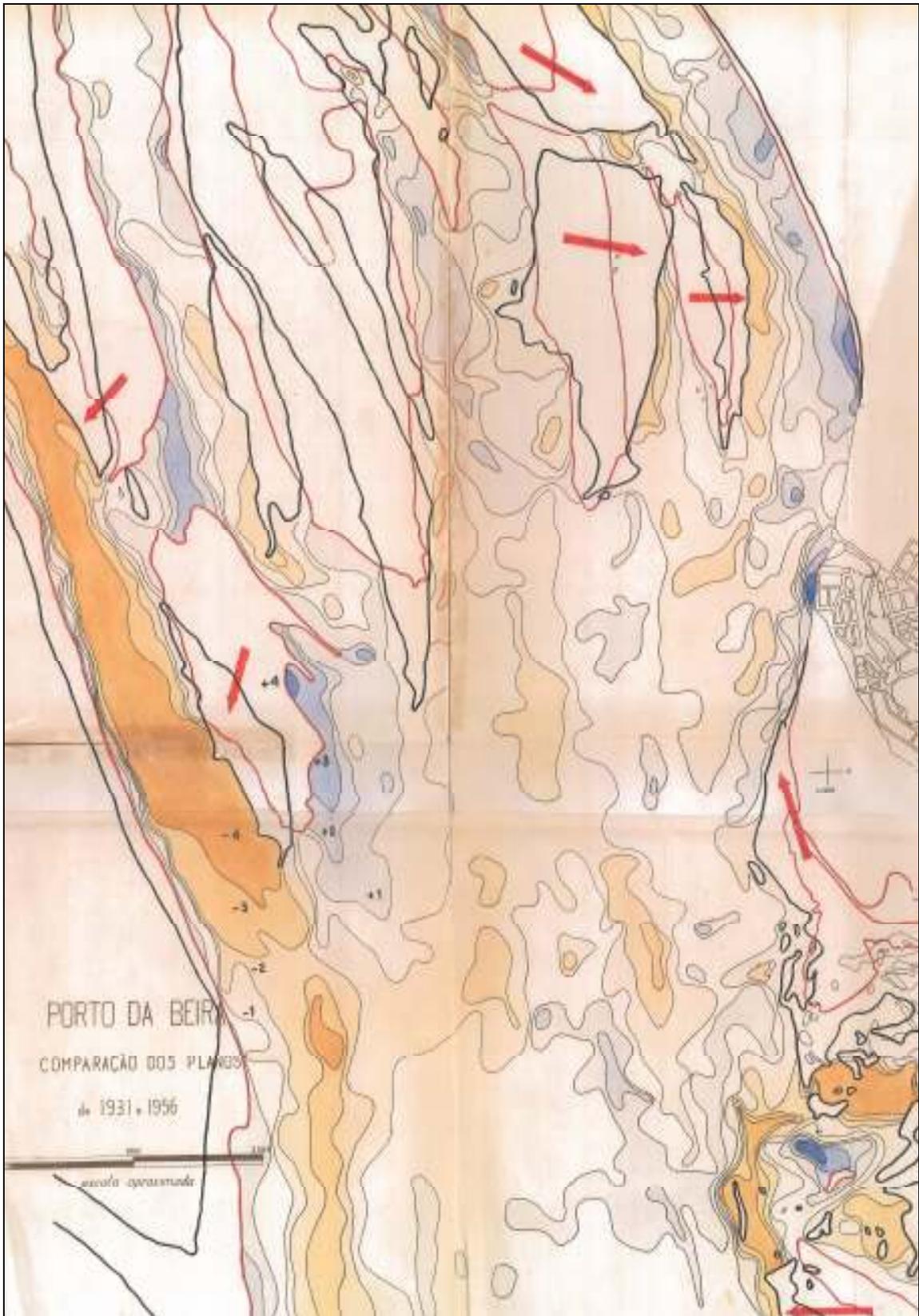
**Figura 9:** Comportamento da intensidade e direção da corrente de marés no Estuário da Beira, na vazante e na enchente, parte interna (FERNANDES, 1958).



**Figura 10:** Comportamento da intensidade e direção da corrente de marés no Estuário da Beira, na vazante e na enchente, parte externa (FERNANDES, 1958).

FERNANDES (1958), Comparou os levantamentos hidrográficos de cartas náuticas na mesma escala efetuados em 1931 e 1956, onde foram inscritas as diferenças entre as sondagens de 1931 e 1953. Elaborou um diagrama de assoreamentos e erosões demarcando e colorindo de modo diferente, com base na alteração genérica da Baía de Sofala (**Figura 11**). Nesta figura, para além das setas que indicam a direção do transporte de sedimentos destacam-se as seguintes áreas coloridas:

- Cor castanha correspondente às áreas de assoreamentos superiores a 3.5 m ou compreendidas entre +3.5 m a +0.5 m de altura.
- Cor branca correspondente às áreas de variação nula entre + 0.5 m a -0.5 m.
- Cor Azul correspondente às áreas de erosões inferiores a - 3.5 m ou compreendidas entre -3.5 m a -0.5 m de profundidade.



**Figura 11:** Regiões de assoreamentos e erosões na Baía de Sofala (FERNANDES, 1958).

Os estudos realizados pela Missão Hidrográfica de Moçambique (FERNANDES, 1958) e NEDECO (1982) sobre a morfologia e batimetria do Estuário da Beira, Banco de Sofala, praia da Ponta Gea e a plataforma continental adjacente com recurso a comparação dos dados das cartas hidrográficas dos anos 1930, 1957 (antes da dragagem do canal de acesso ocorrer), 1971 e 1974, indicam que a foz do rio Búzi esta sujeita a mudanças, e que a maior alteração ocorre a Oeste, particularmente na entrada deste rio. Entre 1930 a 1957 a parte Norte do Canal dividiu-se devido à erosão que ocorreu entre os rios Púngué e Búzi criando uma nova embocadura (**Figura 12**).

Neste relatório destaca-se o movimento dos baixos das duas margens da baía, onde predominam os assoreamentos de diversas regiões onde se destaca:

- A tendência de migração da foz do rio Púngué para Este (E), com a erosão da margem esquerda, e seu aprofundamento e assoreamento geral da sua margem direita. Assoreamento geral da zona Oeste (W) do porto em consequência da migração parcial do rio e também pela influência dos produtos dragados que são descarregados na foz do rio Búzi (**Figura 12**).

- Invasão da foz do rio Púngué por areias de origem marinha transportada pela ação das ondas no sentido E-W, SE-NW e S-N ao longo da Baía.

De modo geral esse relatório elaborado pela MHM, a cinco décadas, destaca a dinâmica da topografia de fundo da Baía de Sofala e o início das atividades de dragagem destinadas à melhoria dos canais de acesso ao porto da Beira bem como a gestão do material dragado. Por essa razão, segundo os objetivos preconizados de garantir os fundos (profundidades) indispensáveis à navegação junto ao cais e manter o canal de acesso ao porto aberto em qualquer estado da maré, recomendou-se uma atenção especial quanto à questão do alargamento do canal uma vez que esta ação poderia dar origem a uma redução da velocidade das correntes e, conseqüentemente, um maior assoreamento (FERNANDES, 1958).

Estudos posteriores, realizados pela firma Holandesa NEDECO em 1981 sobre as condições hidráulicas e de dragagem do canal de acesso ao porto, com o propósito de determinar o seu melhor alinhamento e dimensões do canal de acesso indicam que, o Estuário da Beira, de 1930 a 1981, esteve sujeito a alterações hidrográficas e geomorfológicas naturais, e as maiores alterações ocorreram a Oeste, nas proximidades da foz do rio Búzi.

Esse estudo centrou-se em dois canais de navegação nomeadamente o Rambler e o Macuti, com objetivo de encontrar o canal que fosse tecnicamente e economicamente mais viável de ser mantido em dragagens de manutenção (**Figura 12**). O antigo canal Rambler seguiria ao longo do canal indicado como Portela (**Figura 1**).

Nos estudos sedimentológicos, morfológicos, batimétricos e oceanográficos efetuados pela NEDECO concluíram-se que:

- No canal Rambler, balizado em 1965, onde foi estabelecida uma cota mínima de 6 m abaixo do zero hidrográfico, as sondagens feitas em 1971/74 mostraram que este canal havia desaparecido por falta de dragagem de manutenção. A sondagem de 1981 feita pela NEDECO encontrou o canal, mas com cotas da ordem de 2,5 m abaixo do zero hidrográfico. Devido à deriva litorânea, os canais Macuti, Rambler e Pelicanos e a parte Sul do canal Rambler tem tendência de deslocamento para Oeste.

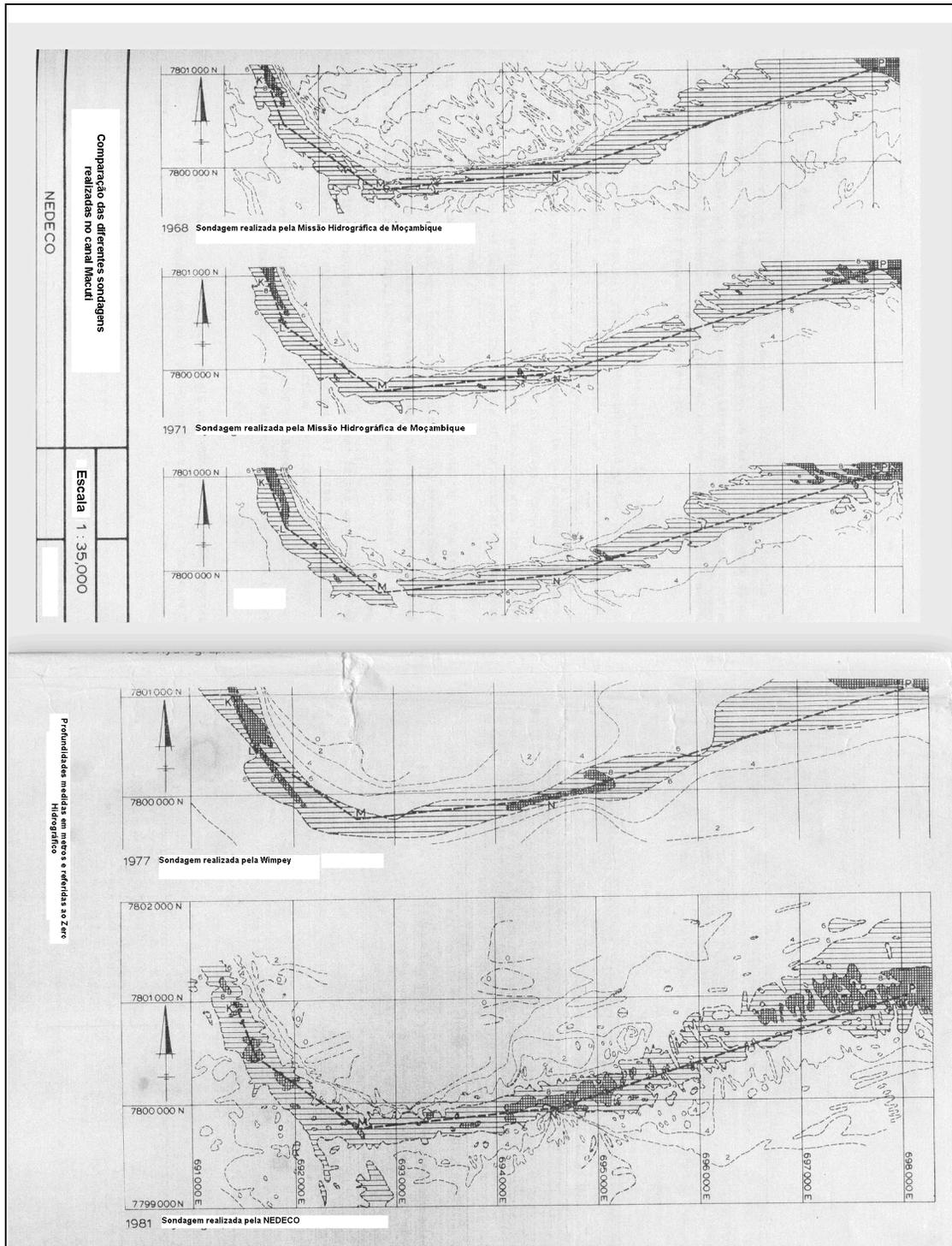


Figura 12: Deriva do canal Macuti de 1968 a 1981 (NEDECO, 1982).

O canal Macuti foi estudado em detalhe. Aplicando os resultados de estudos anteriores e complementado-os com os resultados de 1981 (**Figura 12**), chegou-se às seguintes conclusões:

- A curva de Macuti parecia ser bastante estável, poderia manter a profundidade de 6 m abaixo do zero hidrográfico com um custo de manutenção modesto, mesmo com um aumento das profundidades até 8 m mais abaixo do ZH (zero hidrográfico).

- A sedimentação que ocorre na curva de Macuti é causada pelos sedimentos dos baixos de Macuti, que por ação das correntes são transportados para o interior do canal. Observando-se a **Figura 12**, nota-se que a ponta Sul dos baixos de Macuti deslocou se ligeiramente para o Sul durante o período de 1968 a 1981, enquanto que a configuração do canal manteve-se estável.

Segundo a NEDECO (1982), as condições naturais aliadas à geometria da Baía de Sofala mostram que existe um estado de equilíbrio dinâmico da topografia do fundo, em que se nota a evolução sazonal e lenta em períodos mais longos.

O aprofundamento artificial do canal de Macuti foi realizado no período de 1967-1968 no qual se estabeleceu uma profundidade de 6 m abaixo do zero hidrográfico. A dragagem foi executada especialmente no Canal Macuti onde um volume total de cerca de 3 milhões de m<sup>3</sup> foi dragado utilizando-se uma draga de corte (NEDECO, 1982).

Até 1974 foram realizadas dragagens de manutenção, embora não se conheçam as quantidades removidas. Este procedimento foi suspenso após 1974. Os levantamentos hidrográficos de batimetria efetuados em 1981/1982 revelaram que a profundidade do canal na zona denominada curva de Macuti havia se reduzido para 4,9 m abaixo do zero hidrográfico. Além disso, foi possível notar que houve alterações na configuração do fundo e deposição local na área portuária (NEDECO, 1982).

#### 4.4. Geomorfologia

De acordo com a Empresa Portos e Caminhos de Ferro de Moçambique<sup>3</sup>, (<http://www.cfmnet.co.mz/easdoc2.html>, 2009), a cidade da Beira estende-se sobre uma planície costeira formada por acumulação aluvionar e marinha durante o último evento de regressão marinha, ocorrido no início do Quaternário<sup>4</sup> (Pleistoceno). Este fenómeno aconteceu em toda costa da africana oriental e permitiu que, na área em estudo, os rios Púngué e Búzi depositassem sedimentos continentais originários de afloramentos localizados a montante da cidade da Beira.

O geo-relevo da cidade da Beira e seus arredores são dominados por uma extensa planície litoral cujas altitudes variam entre 6 a 20 m. O declive médio desta planície é suave, apresenta uma alternância singular de depósitos argilosos e arenosos.

Esta última regressão foi também responsável pela formação das dunas na costa oceânica, que por sua vez criam condições para a formação de lagoas ao longo da costa e de extensas planícies de inundação. Pode-se considerar que as condições geomorfológicas da maior parte da área da Beira associam-se aos processos de erosão e assoreamento ativos dos ambientes litorais e flúvio-marinhos. Estes sectores sensíveis aos processos morfodinâmicos atuais, com destaque para as áreas permanentemente inundadas ou sob o domínio sazonal das marés.

O sistema marinho estende-se ao longo da costa e compreende dunas contínuas, cordões e barras arenosas, sendo que na maioria das vezes, estas formações estão intercaladas por depressões inundadas pelas marés.

---

<sup>4</sup> Na escala de tempo geológico, é a época do período compreendido entre 1 milhão e 806 mil e 11 mil e 500 anos atrás, aproximadamente.

O sistema estuarino é característico das regiões deltaicas dos rios e compreende as planícies de manguezal, a região costeira baixa e pantanosa, as regiões influenciadas pelas marés e as baías. O sistema fluvial do Estuário da Beira ocorre associado à hidrologia e à rede de drenagem natural da área de estudo, dominado pelas bacias hidrográficas dos rios Ucarranga, Búzi, Púngué e Savane. A geodinâmica da zona litoral do Estuário da Beira é relativamente complexa porque apresenta formações derivadas de processos de acumulação ativa, de enchimento recente (aluviões e coluviões), ao lado de superfícies de desnudação e terraços de erosão. Faz parte de um sistema diversificado de terras úmidas, sendo de destacar os sistemas marinhos, estuarinos e fluviais (<http://www.cfmnet.co.mz/easdoc2.html>, 2009).

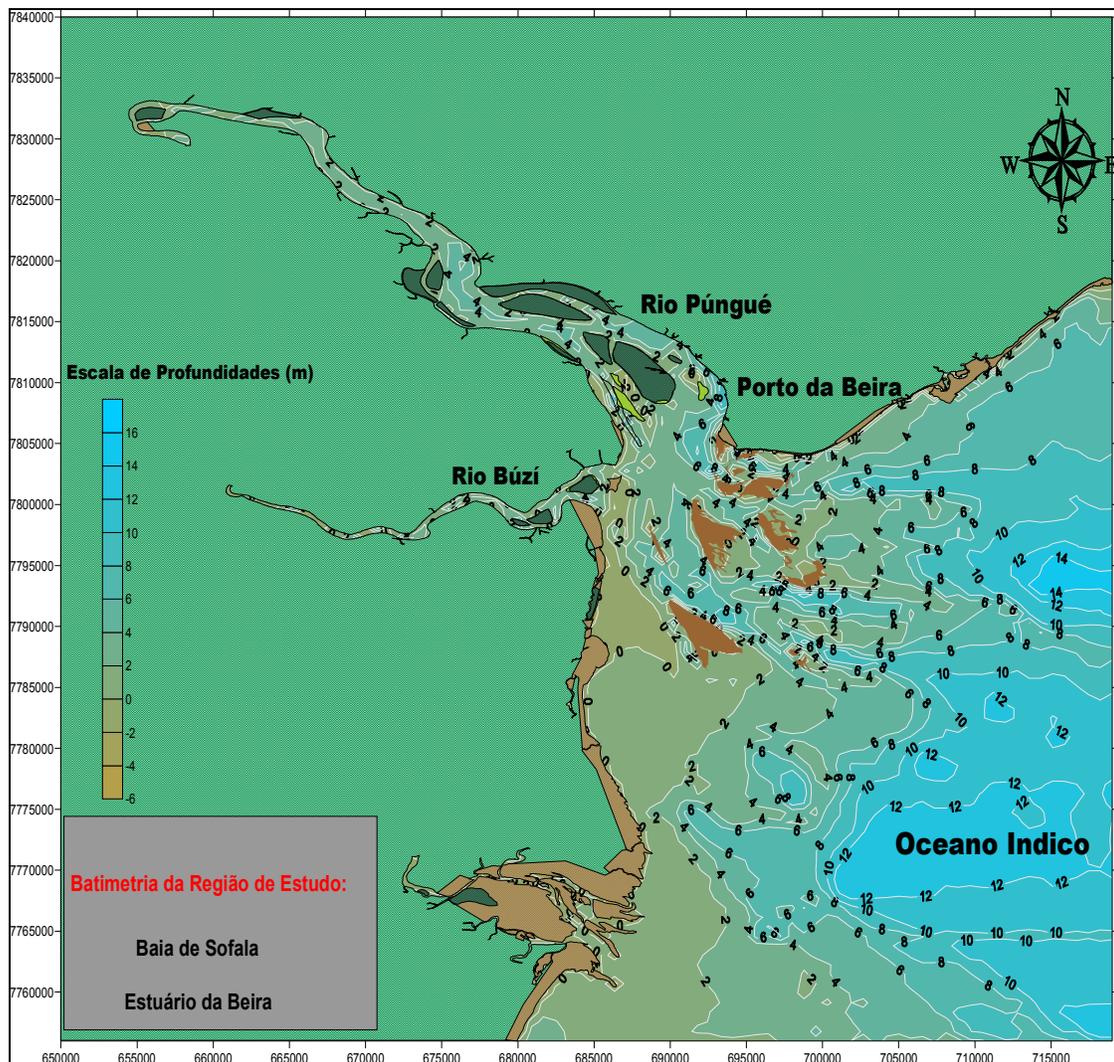
Há evidências de erosão nas praias e destruição da vegetação das dunas. O talude da praia apresenta-se íngreme, indicando a ocorrência de processos erosivos na costa Noroeste. As **figuras B1 a B8** no **Anexo B** ilustram estes processos erosivos.

Segundo CHEMANE, MOTTA e ACHIMO. (1997), as mudanças na linha de costa podem ser o resultado de atividades humanas que tendem a interferir nos processos naturais. A erosão nas dunas costeiras tem atingido a média de um metro por ano, desde 1982, e está sendo acelerada, principalmente, devido ao movimento de areia ao longo do litoral, à erosão causada pelo vento, às atividades antropicas relacionadas com a exploração de areia da praia, à exploração do manguezal para a construção de habitação e outros fins, às tempestades e ação das ondas (<http://www.cfmnet.co.mz/easdoc2.html>, 2009).

Em consequência desta erosão e deposição, os bancos existentes nessa área alargaram-se neste período, destacando-se o banco dos Pelicanos, a parte Oeste do canal Portela, a mudança da embocadura do rio Búzi, e as mudanças de direção da linha de costa, a qual é afetada pelo fluxo do canal Oeste do rio Púngué, durante os períodos de cheias e marés de sizígia, e pelo alargamento do canal em frente ao rio Búzi. Contudo, as sondagens de 1981 mostram uma redução considerável de profundidade na parte Este do canal, ou seja, no trecho que se inicia ao Norte e vai até alcançar a parte profunda (Barra local cuja profundidade esta acima de 4m), Franquia

(profundidade entre 3 a 4 m) e parte central em direção à boca do rio Púngué (NEDECO, 1982).

A Baía de Sofala é pouco profunda, como pode ser observado no mapa batimétrico apresentado na **Figura 13** com uma profundidade média de 10 metros. O fundo é desigual; a SE desta área existem baixos de 4,4 m até 5 m referidos ao ZH (zero hidrográfico). Estes bancos estão sujeitos a alterações constantes devido à dinâmica sedimentar (MDNM, 1986).

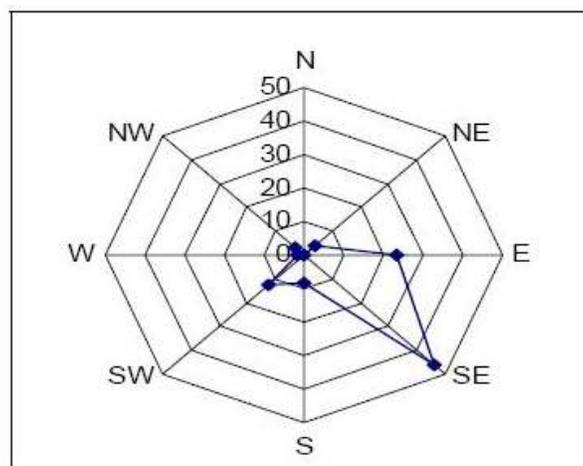


**Figura 13:** Distribuição de profundidades na Baía de Sofala, levantamentos batimétricos do ano 1982 (NZUALO, 2010).

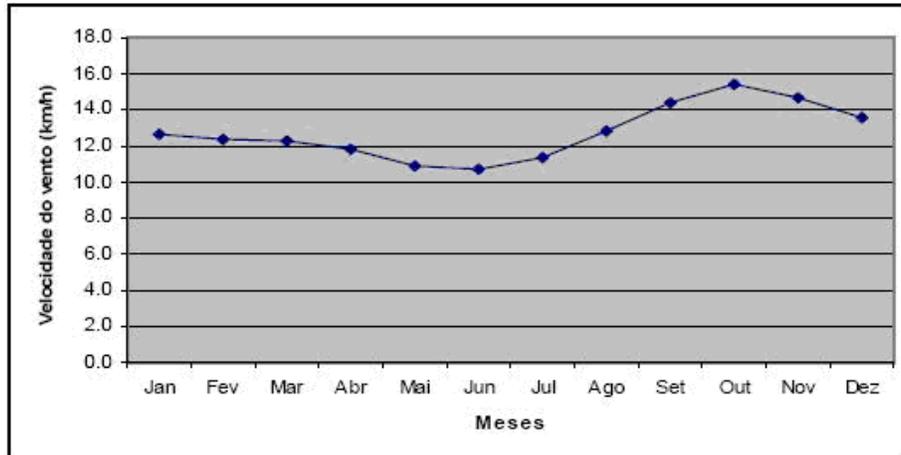
#### 4.5. Clima e Regime de Ventos

O Estuário e a cidade da Beira apresentam um clima tropical úmido. O período mais chuvoso prolonga-se entre os meses de Outubro a Março, sendo os meses de Junho a Setembro os mais secos do ano. A temperatura média anual é de 24,6 °C, enquanto a temperatura média mensal no mês mais frio (Julho) é de 20,6 °C e a média mensal no mês mais quente (Janeiro) é de 27,7 °C (CONSULTEC, 2007).

Além das ondas originadas pela ação do vento, local ou remoto, esta forçante também gera corrente intensificando a mistura vertical nos estuários (MIRANDA, CASTRO e KIJERFVE, 2002). Considerando os dados medidos de vento no aeroporto da cidade da Beira, no período compreendido entre o ano de 1961 e 2005, observa-se que as direções predominantes dos ventos são de SE e E (**Figura 14**). Na **Figura 15** são mostradas as intensidades médias mensais do vento.



**Figura 14:** Direção dos ventos predominantes observados na Estação Meteorológica do Aeroporto da Beira, entre 1961 e 2005 (INAM, 2009).



**Figura 15:** Velocidade média mensal do vento na estação meteorológica do aeroporto da Beira, de 1961 a 1990 (INAM, 2009).

#### 4.6. Recursos Hídricos

A gestão das bacias hidrográficas em Moçambique é da responsabilidade da Direção Nacional de Águas (DNA), que se subdivide em ARA-SUL, CENTRO e NORTE, subordinado ao Ministério das Obras Públicas e Habitação (MOPH). Assim, as bacias dos rios Púngué e Búzi estão sob a responsabilidade da DNA ARA-CENTRO. Esta entidade tem entre outras, a responsabilidade de gerir os recursos hídricos de cada bacia hidrográfica de sua jurisdição.

Na região destacam-se dois rios internacionais que deságuam na Baía de Sofala: Os rios Púngué e Búzi. Além das grandes bacias hidrográficas dos rios Púngué e Búzi, cabe também citar na área de estudo, as bacias hidrográficas dos rios Savane e Ucarranga. Estas bacias hidrográficas estão apresentadas na **Figura 16**.

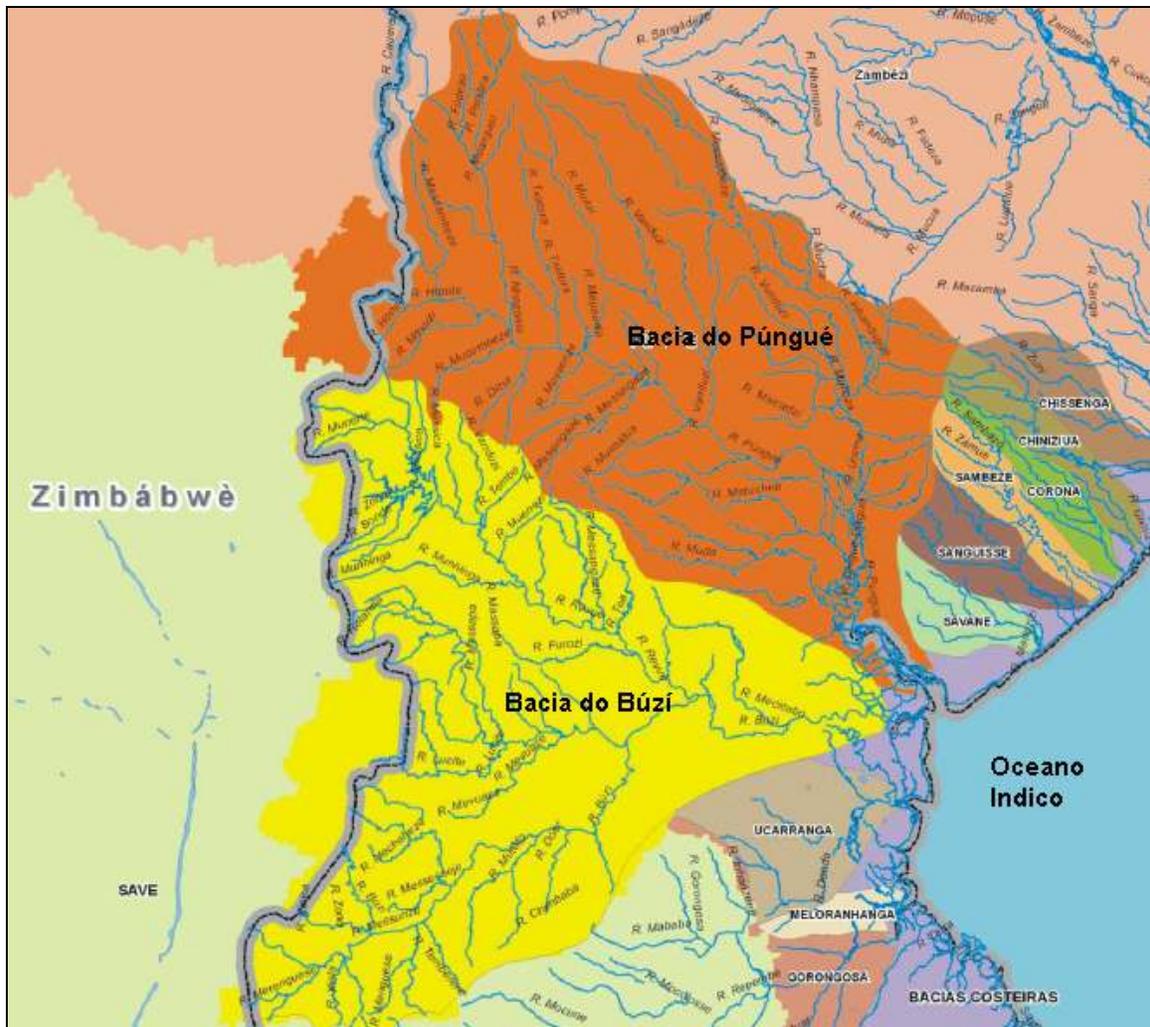


Figura 16: Bacias hidrográficas dos rios Púngué e Búzi (<http://www.cfmnet.co.mz>)

A bacia hidrográfica do rio Púngué drena uma área de 31.151 km<sup>2</sup>. O rio nasce a 2.300 m de altitude, possuindo 50 km em território Zimbabuano e 320 km em território Moçambicano. A forma da sua bacia é um losango com a orientação do eixo maior NW-SE e a precipitação anual média varia entre 1.800 mm nas cabeceiras a 1.000 mm junto à foz. (Fonte: <http://www.cfmnet.co.mz>).

A bacia hidrográfica do rio Búzi drena uma área total de 29.720 km<sup>2</sup> dos quais 13% encontra-se em território Zimbabuano e 86% em Moçambique. O rio nasce também em território Zimbabueano, a Noroeste do povoado de Chipinga. O seu comprimento total é de 31 km no Zimbabué e 366 km em território Moçambicano.

Ao contrário da bacia do Púngué, a forma da bacia do rio Búzi é triangular com a foz num dos vértices, o que faz com que a bacia seja mais propensa a cheias. Entre os seus afluentes destacam-se os rios Lucite e Revué, ambos na margem esquerda.

(<http://www.cfmnet.co.mzl>).

Segundo o relatório da NEDECO (1982), as maiores vazões dos rios Púngué e Búzi ocorrem na época chuvosa entre os meses de Dezembro e Janeiro, com um escoamento médio de 600 m<sup>3</sup>/s e 300 m<sup>3</sup>/s respectivamente, enquanto que na estação seca o escoamento médio é cerca de 80 m<sup>3</sup>/s e 50 m<sup>3</sup>/s.

#### **4.7. Marés e Ondas incidentes na região de estudo.**

O Instituto Nacional de Hidrografia e Navegação, INAHINA, recolhe dados sobre as marés e utiliza estes dados para a previsão dos valores dos anos subsequentes. A amplitude de maré é variável ao longo da costa e seu valor máximo registrado corresponde à Baía de Sofala, onde atinge cerca de 6 m. No restante da plataforma continental Moçambicana, mesmo na região limítrofe, a amplitude média de maré é cerca de 3 m. A medição de marés efetuada no Porto da Beira determina os seguintes valores que constam na Tabela de Marés do último ano (INAHINA, 2010):

- Altura Média mais Alta na Maré Viva (sizígia): 6,44 m
- Altura Média mais Alta na Maré Morta (quadratura): 4,36 m
- Nível Médio do Mar: 3,56 m
- Altura Média mais Baixa na Maré de Quadratura: 2,81 m
- Altura Média mais Baixa na Maré de Sizígia: 0,87 m

Como a plataforma continental na Baía de Sofala é bastante extensa e rasa, assim como a entrada do Porto da Beira, as componentes M4, M6 e MS4, características de águas rasas, exercem grande influência na maré local. Estas componentes são responsáveis pela geração do padrão assimétrico das marés em ambientes estuarinos

produzindo vazantes mais demoradas do que as enchentes (INSTITUTO HIDROGRÁFICO, 1986).

Com base nos resultados modelados pelo sistema internacional GROW (OCEANWEATHER, 2006) e relatados pela CONSULTEC (2007), afirma-se que as ondas significativas no Estuário da Beira provêm das direções ESE a S (112,5° a 180°) em 84% do tempo, com alturas significativas médias de 0,5 a 2,0 m; de NE a E (45° a 90°) em 14% do tempo, igualmente com alturas significativas de 0,5 a 2,0 m. As ondas com altura acima de 2,5 m vêm de SE-S em 1% do tempo e chegam a 6.5 m, sendo que os períodos computados indicam que em 85% do tempo estão entre 4 a 12 segundos, e eventualmente, ocorrem períodos de até 30 segundos.

Segundo o relatório da NEDECO (1982), os principais modos de transporte de sedimentos que predominam no Estuário da Beira são:

- Deriva litorânea
- Transporte de fundo
- Transporte de material sedimentar em suspensão

Os resultados dos processos intervenientes na erosão costeira (correntes de marés, ondas, ventos e atividades antropicas), podem ser visualizados e interpretados mediante comparação a partir das imagens colhidas em 1994 e as colhidas em 2006. Delas podem-se destacar as imagens de arquivo do INAHINA, que mostram a continua erosão costeira, degradação e destruição dos esporões, destruição de infra-estruturas nas zonas situadas entre a Praia Nova e o Restaurante Miramar (**Figuras B1 a B8 em Anexo B**).

## **5. METODOLOGIA ADOTADA PARA O ESTUDO DA FRENTE SALINA NO ESTUÁRIO DA BEIRA**

Foram coletados dados de temperatura e condutividade água em diversas profundidades, em condições de maré enchente, visando avaliar o comportamento da frente salina, nos estuários dos rios Púngué e Búzi, incluindo a Baía de Sofala (**Figura 18**). Todas as medições foram efetuadas em pontos fixos que foram demarcados e cujas coordenadas foram determinadas com auxílio de cartas náuticas, programa Google Earth e equipamento GPS. Os dados meteorológicos (precipitação, evaporação, velocidade e direção do vento) foram solicitados ao Instituto Nacional de Meteorologia de Moçambique (INAM) e os dados hidrológicos (vazões dos rios Búzi e Púngué) à Direção Nacional de Águas (DNA-ARA Centro).

A coleta de dados de temperatura, condutividade e profundidade foi feita no mesmo instante com um CTD (Conductivity, Temperature and Depth), modelo Sea - Bird plus19, próprio para medições em águas Oceânicas. O perfilador SBE19 tem a capacidade de colher dados até 600 metros de profundidade (**Figura 17**). Este equipamento tem como referência, o Modelo SE 19 plus S/N 19 P4014-4504, Sistema de comunicação 9600 baud, 8 data bits, Memória 8192 KB e Sensor de Pressão com tensão de calibração 110 dBar S/N 3898. O instrumento é alimentado por baterias alcalinas instaladas internamente, em adição aos sensores padrão (Condutividade, Temperatura e Pressão) e tem como peso 7,3 kg no ar e 2,3 kg na água.

O instrumento mediu os parâmetros Condutividade, Temperatura e Profundidade com precisão de 0.008 PSU, 0.01°C e 0.25 % respectivamente.



**Figura 17:** Instrumento de medição de condutividade, temperatura e profundidade (CTD) e operador.

Para processamentos posteriores de dados foram utilizados os seguintes programas computacionais:

- Sea-bird Seasoft - win32 – usado para a calibração do CTD, transferência de dados do instrumento para o computador, conversão e pré-validação de dados.
- Microsoft Excel 2003, MATLAB 6.5 e Surfer 7.0 – usados para a validação e processamento de dados, elaboração dos perfis transversais e longitudinais correspondentes a cada seção.

A área de estudo foi percorrida por um barco pequeno de sondagem hidrográfica por ser uma área extensa e pouco profunda (ver **Anexo C**). As estações de amostragem foram localizadas por GPS. Em cada estação colheram-se dados de Condutividade, Temperatura e Profundidade ao longo do perfil vertical durante a descida e subida do instrumento. É importante destacar que em todos os períodos as medições foram

realizadas em situação de marés próximas a preamar, de forma a viabilizar a navegação ao longo dos perfis (Tabela 1).

**Tabela 1: Períodos de medição e parâmetros medidos no Estuário da Beira.**

Período de Medição	Área de Medição	Parâmetros Medidos	Maré no Período de Medição
08 a 09/03/2006	Baía de Sofala	Temperatura Salinidade Profundidade	Maré enchente e na quadratura
08 a 10/03/2006	Baía de Sofala	Temperatura Salinidade Profundidade	Maré enchente e na transição da quadratura para a sizígia
19 a 23/05/2009	Baía de Sofala Rio Púngué	Temperatura Salinidade Profundidade	Maré enchente e na transição da quadratura para a sizígia
30/07/2010	Rio Búzi	Temperatura Salinidade Profundidade	Maré enchente e na transição da sizígia para a quadratura

### **5.1. Localização das Estações de Medição do Ano de 2006**

Foram considerados para efeito de análise, os dados das estações que constam no banco de dados do Instituto Nacional de Hidrografia e Navegação (INAHINA), referentes aos dias 8 e 9 de Março de 2006 para o verão (**Figura 18 e Tabela A.6**, em **Anexo A**) e dias 08 a 10 de Junho de 2006 para o inverno (**Tabela A.7** em **Anexo A**).

As seções transversais A, B, C e D que cruzam o estuário de Norte para Sul e a seção E que tem a mesma direção longitudinal do Rio Púngué, assim como as estações de medições estão mostradas na **Figura 18**. As coordenadas dessas 31 estações de amostragem, onde foram colhidos os dados no ano de 2006 são apresentadas nas **Tabelas A.6 e A.7**, do **Anexo A**.



**Figura 18:** Localização das seções e estações de medição com CTD na Baía de Sofala, (Seções de 2006: A, B, C, D e E). (Google Earth, 2009).

## 5.2. Localização das Estações de Medição dos Anos de 2009 e 2010

Nos dias 19 a 23 de Maio de 2009 efetuou-se a coleta de dados com o CTD. Nesse levantamento oceanográfico foi possível abranger a parte interior do rio Púngué e o mar aberto. A demarcação das novas seções e estações estão apresentadas na **Figura 19** e **Tabela A8** do **Anexo A**.

No dia 30 de Julho de 2010 efetuou-se a demarcação de estações e coleta de dados de salinidade, temperatura e profundidade ao longo do rio Búzi (**Tabela A.9** e **Figura 19**). Esta campanha contemplou oito estações ao longo do rio (estações A, B, C, D, E, F, G e H).

Nas **Tabelas A.8 e A.9**, do **Anexo A**, são apresentadas as coordenadas das 32 estações de amostragem do ano 2009 e 2010, respectivamente.



**Figura 19:** Localização das secções e estações de medição na Baía de Sofala, estuários dos Rios Púngué e Búzi, em Maio de 2009 e Julho de 2010 (Google Earth, 2010).

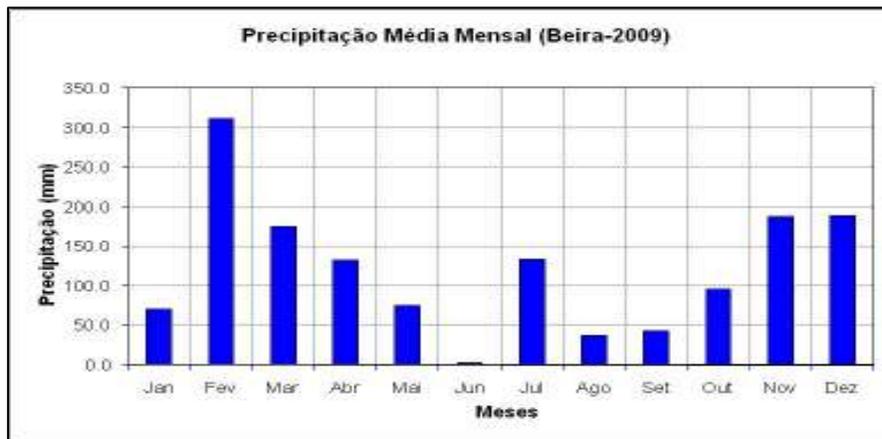
### **5.3. Precipitação, Evaporação, Ventos e Marés Durante os Períodos de Medições**

A **Figura 20** mostra as médias mensais de evaporação e precipitação na cidade da Beira, durante o ano de 2005-2006. Comparando-se os valores, nota-se que de Agosto a Novembro, inclusive, no Estuário da Beira a evaporação superou a precipitação e o único mês em que não ocorreu precipitação em Outubro. Nos meses restantes, de Dezembro a Abril, a precipitação foi superior à evaporação (**Figura 20**). A

precipitação média mensal ao longo do ano de 2009 (**Figura 21**), embora com valores médios mensais diferentes dos anos anteriores para o mesmo mês, mostra uma semelhança de comportamento sazonal.



**Figura 20:** Médias mensais de evaporação e precipitação na cidade da Beira, de Junho de 2005 a Maio de 2006 (Estação Meteorológica do Aeroporto da Beira).



**Figura 21:** Médias mensais de precipitação na cidade da Beira, de Janeiro a Dezembro de 2009 (Estação Meteorológica do Aeroporto da Beira).

Na **Tabela 2** são mostrados os valores médios mensais do vento para os anos de 2005 e 2006. Verifica-se que os ventos predominantes na Beira são de E e SE.

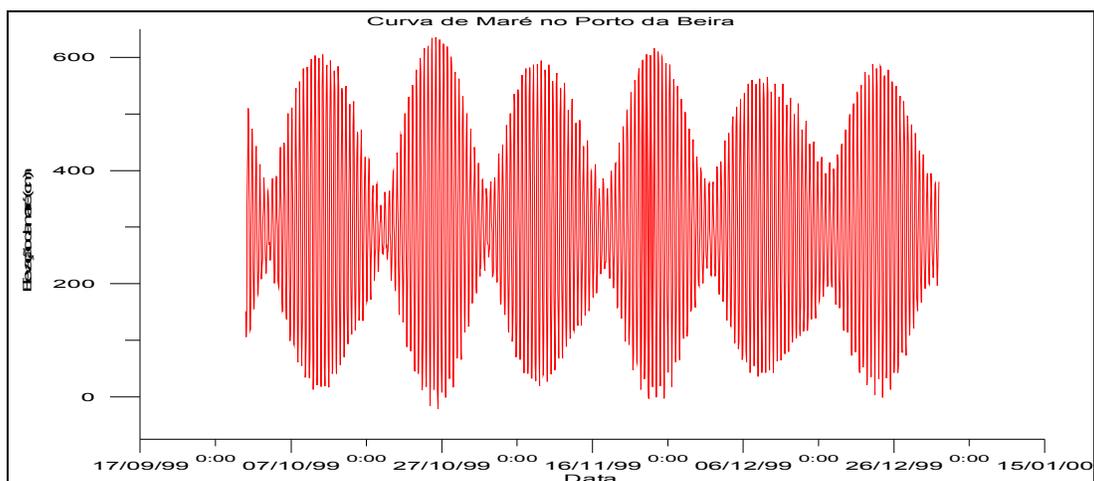
**Tabela 2:** Direção e intensidade média mensal do vento no período de Junho de 2005 a Maio de 2006 (Estação Meteorológica do Aeroporto da Beira)

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Dirç.Vento	E	SE	SW	SE	S	SE	SE	SE	E	SE	E	SE
Força do Vento Km/h	10.2	9.7	12	11.2	12.1	9.6	10.9	8.7	11.2	14.2	14.2	12.8

Os dados de marés disponíveis para o presente trabalho foram colhidos em 1999 na estação maregráfica situada na região do cais do porto da Beira, pelo Instituto Nacional de Hidrografia e Navegação de Moçambique (INAHINA, 1999) para fins de cálculo do NMM (nível médio do mar), amplitude máxima e mínima, constantes harmônicas e a previsão da maré. Com base nestes dados foram gerados constantes harmônicas por meio do programa SisBahia (**Tabela 3**).

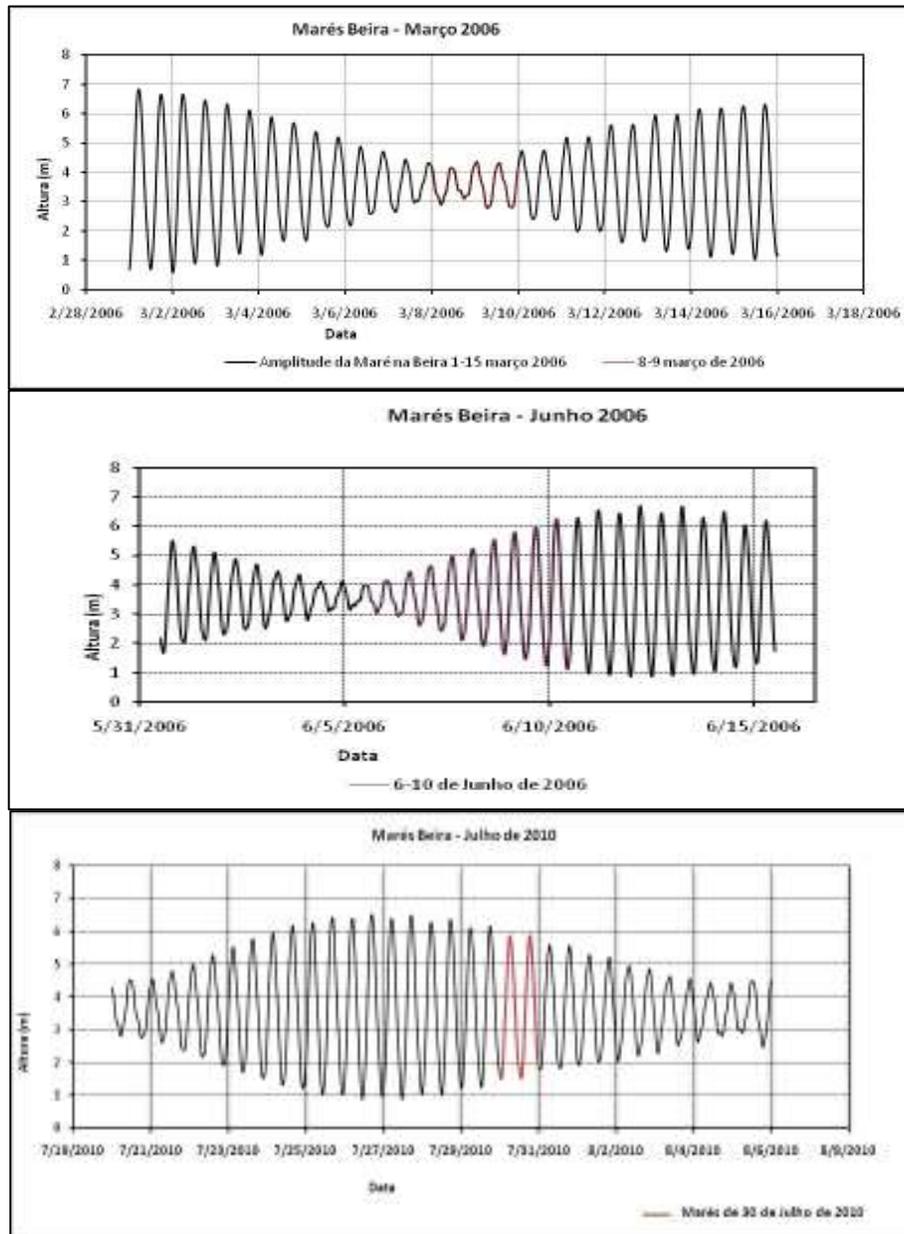
A **Figura 22** a seguir, mostra a variação da maré no porto da Beira, durante o período de 1/10/1999 a 31/12/1999. Esse gráfico foi obtido com base numa série de dados de níveis de marés registradas na estação maregráfica do porto da Beira, no ano de 1999. A escolha deste período deve-se ao fato dos dados se mostrarem mais consistentes e apresentarem menos lacunas que os coletados no início do mesmo ano.

A amplitude da maré no Estuário da Beira é superior a 4 m, Aplicando-se o critério de classificação dos estuários segundo a amplitude da maré este estuário é do tipo macro marés.



**Figura 22:** Variação da maré no porto da Beira.

A **Figura 23** mostra a variação da maré típica prevista no período em que foram feitas as medições. Deste modo as medições do dia 08 e 09 de Março de 2006 foram feitas no período de marés de quadratura. As medições do dia 06 a 10 de Junho foram feitas no período de transição de marés de quadratura para marés de sizígia. As medições feitas no dia 10 Julho de 2010 foram feitas no período de transição entre marés de sizígia para a Quadratura.



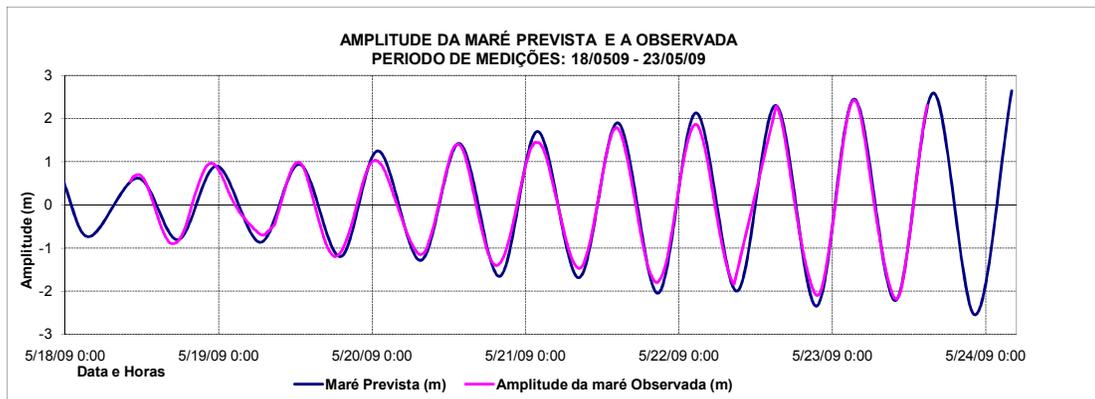
**Figura 23:** Marés previstas nos períodos de medição dos parâmetros físicos no Estuário da Beira.

**Tabela 3:** Constantes harmônicas referentes à estação maregráfica do Porto de Beira para o ano de 1999 - Baía de Sofala.

Constante Harmônica	Período (seg)	Amplitude (m)	Fase (rad)
Mm	2.380.713,365	0,0167	1,320
MSf	1.275.721,423	0,031	0,859
2Q1	100.822,4008	0,0048	5,542
Q1	96.726,0838	0,016	0,062
O1	92.949,6301	0,0512	0,342
K1	86.164,0906	0,0336	0,554
J1	83.154,5163	0,0053	0,384
OO1	80.301,8672	0,0025	0,786
mu2	46.338,3274	0,1548	2,906
N2	45.570,0536	0,3039	1,998
M2	44.714,1643	1,7629	2,169
L2	43.889,8327	0,1099	2,109
S2	43.200,0000	1,0679	2,819
MO3	30.190,6907	0,0012	2,133
M3	29.809,4429	0,0745	5,219
MK3	29.437,7038	0,0005	0,714
SK3	28.773,7400	0,0011	3,619
MN4	22.569,02600	0,0005	5,888
M4	22.357,08220	0,1039	3,768
SN4	22.176,69400	0,0002	2,684
MS4	21.972,02140	0,0789	3,763
S4	21.600,00000	0,0464	4,756
2MK5	17.751,16880	0,0003	5,004
2MN6	14.998,62200	0,0002	2,013
M6	14.904,721400	0,0187	1,168
2MS6	14.732,595100	0,0001	5,093
2SM6	14.564,399000	0,0002	5,540
3MK7	12.706,706900	0,0004	1,973
M8	11.178,541100	0,0748	5,975
2SK5	17.270,543000	0,0003	2,682
alpha1	104.661,59880	0,0009	5,420
MNS2	47.258,1627	0,0108	3,868
KJ2	42.316,2782	0,0147	3,086
KQ1	77.681,6519	0,0022	3,487
M1	89.399,6936	0,0050	5,705

Durante o período de medição dos parâmetros básicos para o estudo da frente salina referente à Maio de 2009, foi possível medir a maré num ponto fixo e próximo da

estação maregráfica com o auxílio do AWAC<sup>5</sup>. A comparação das amplitudes de maré prevista e medida, mostrada na **Figura 24** indicam que neste período, a Baía não sofreu nenhuma influência de marés meteorológicas<sup>6</sup>.



**Figura 24:** Amplitudes de maré prevista e medida pelo AWAC durante o período de medição dos parâmetros físicos na Baía de Sofala.

---

<sup>5</sup> AWAC = Acoustic wave and Current Meter

<sup>6</sup> Marés Meteorológicas = Diferença entre a maré observada e aquela prevista pela Tábua de Marés

## **6. ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÕES SOBRE A FRENTE SALINA DO ESTUÁRIO DA BEIRA**

Nos resultados que se seguem referentes à variação de salinidade e temperatura apresentam-se os perfis transversais e longitudinais da Baía de Sofala, em seguida do rio Púngué e finalmente do rio Búzi.

Importa salientar que se efetuou a ampliação da escala vertical considerando que a profundidade é em metros enquanto que a distância entre estações numa mesma secção é em quilómetros.

A salinidade que é definida como a quantidade total, em gramas, de sais contidos em 1 Kg de água do mar. no presente trabalho a apresentação e análise dos resultados poderá ser em gramas por litro (g/l), ou partes por mil (PPM ou ‰), ou atualmente em Unidades Práticas de Salinidade (PSU).

### **6.1. Perfis Longitudinais de Salinidade e Temperatura em Profundidade na Baía de Sofala para os Períodos: Março e Junho de 2006**

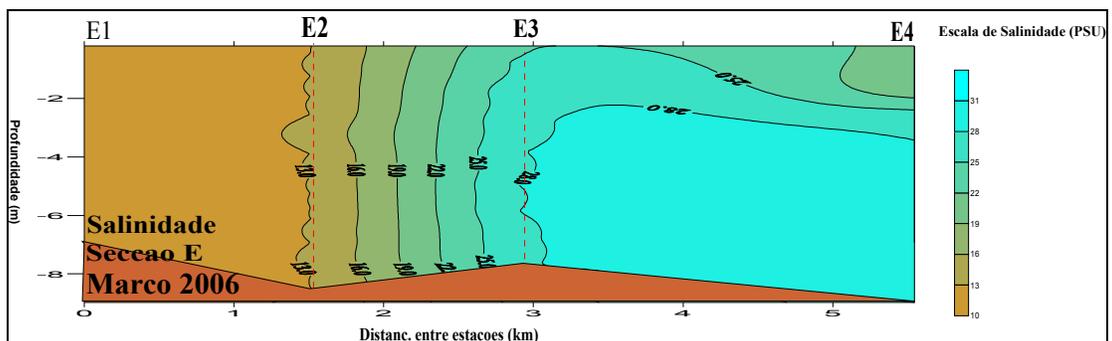
A **Figura 25 e 26** mostram que a distribuição vertical de salinidade ao longo da secção E traçada no sentido longitudinal ao longo da Baía de Sofala, com direção NW-SE, para o período de Março e Junho de 2006.

No verão (mês de Março), período de maré de quadratura, nota-se um gradiente horizontal de salinidade (**Figura 25**) que aumenta de 13,0 para 31,0 PSU entre as estações E1 (Boca do rio Púngué) e E4 (saída da Baía).

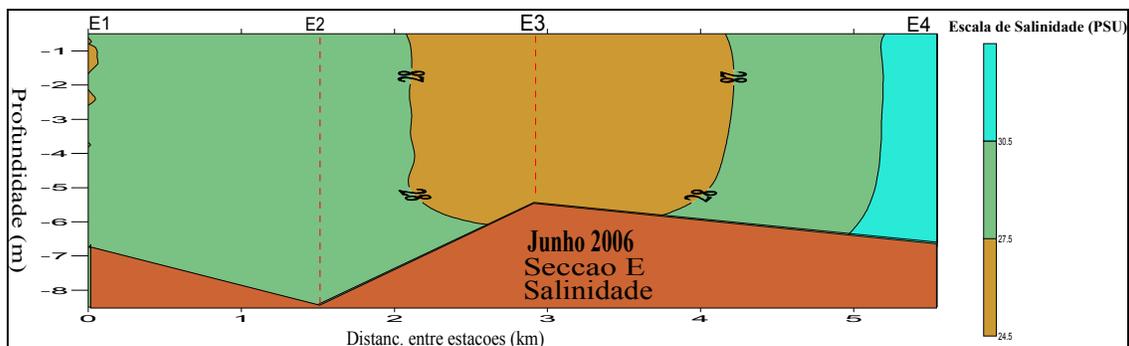
Por outro lado, durante o inverno (mês de Junho), período correspondente à transição da maré de quadratura para sizígia, nota-se que a salinidade é constante na boca do rio

Púngué (estação E1 a E2), com valores médios de 29,0 PSU<sup>7</sup>. Verifica-se uma diminuição de 29,0 em E2 para 28,0 PSU em E3 e depois volta a aumentar de 28,0 em E3 até cerca de 30,5 PSU em E4. No geral esta secção longitudinal apresenta um gradiente horizontal positivo de NW para Este no verão com presença de uma cunha de água doce no centro da secção no inverno (**Figura 26**).

Embora a medição da salinidade tenha ocorrido em diferentes períodos da maré, pode se notar que tanto no verão (Março), como no inverno (Junho), verifica-se um padrão homogêneo de salinidade ao longo da profundidade, mas com valores inferiores no inverno, como consequência da variação sazonal da precipitação e evaporação na Baía de Sofala.



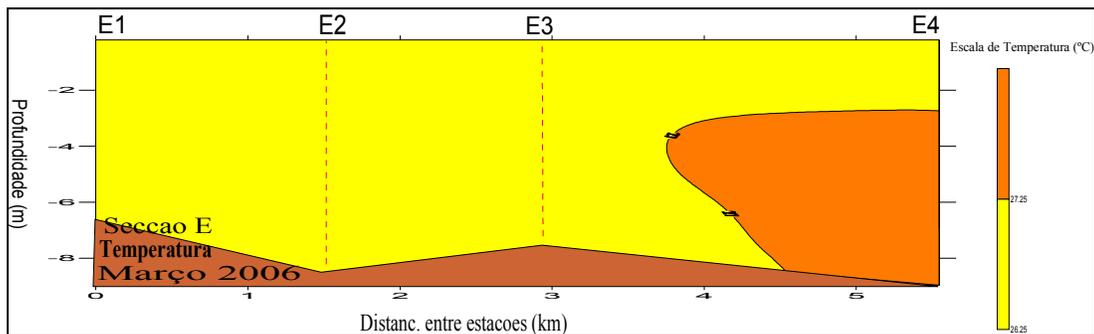
**Figura 25:** Perfil longitudinal da variação de salinidade na Baía de Sofala, Março 2006.



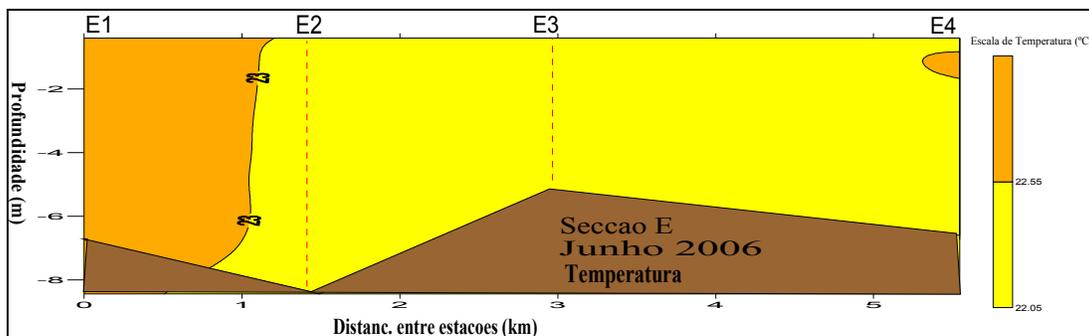
**Figura 26:** Perfil longitudinal da variação de salinidade na Baía de Sofala Junho de 2006.

<sup>7</sup> PSU – Unidades Práticas de Salinidade, do Inglês Practical Salinity Units

A distribuição de temperatura na Baía de Sofala, apresentada na **Figura 27 e 28** mostra que existe uma variação sazonal da mesma. O gradiente horizontal é positivo de NW no verão, isto é, a temperatura aumenta de 26,2 °C a montante (E1) para 27,2 °C a jusante (E4), no inverno (junho de 2006) a situação se inverte, sendo que a temperatura no ponto (E1) de 23,0 diminui para 22,5 °C no ponto E4. A temperatura média da água nos dois períodos de medição (inverno e verão) na Baía de Sofala é de 22,5 °C e 27,0 °C, respectivamente.



**Figura 27:** Perfil longitudinal da variação de temperatura na Baía de Sofala em Março de 2006.

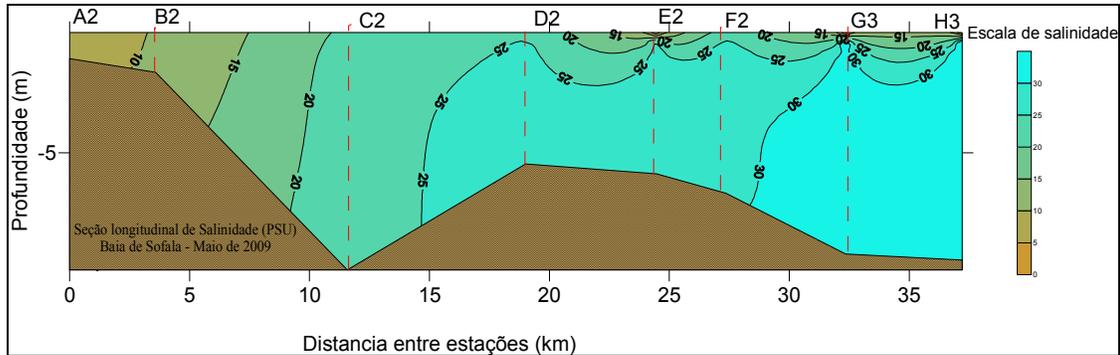


**Figura 28:** Perfil longitudinal da variação de temperatura na Baía de Sofala em Junho de 2006.

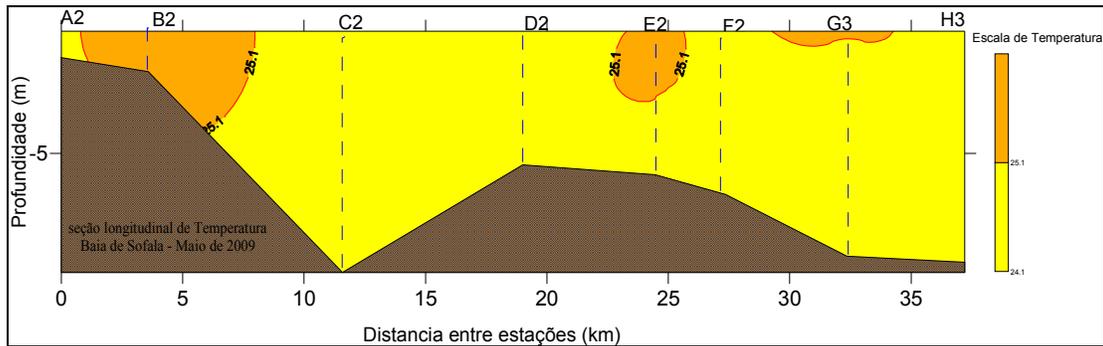
## 6.2. Perfil Longitudinal de Salinidade e Temperatura em Profundidade do Rio Púngué e Baía de Sofala (Maio de 2009)

Analisando a distribuição longitudinal (estação A2 a H3) de salinidade observada em 2009 ao longo da baía de Sofala e a 20 km da boca do rio Púngué, mostrada na **Figura 29**, constatou-se que os valores de salinidade variam longitudinalmente entre 10,0 PSU a montante do rio Púngué a 30,0 PSU a jusante (zona oceânica). Nota se uma cunha de água com maior salinidade entrando no estuário e que esta se misturando com a água

de menor densidade tanto na horizontal como na vertical (**Figura 29**). Os valores de temperatura variam em torno de 24,7 °C a jusante do rio Púngué (estação A2) a 25,1 °C a montante deste (estação H3), como mostrado na **Figura 30**.



**Figura 29:** Seção longitudinal de salinidade no estuário de Púngué (Maio de 2009).



**Figura 30:** Seção longitudinal de temperatura no estuário de Púngué (Maio de 2009).

### 6.3. Perfil Longitudinal de Salinidade e Temperatura em Profundidade do Rio Búzi (Julho de 2010)

As distribuições de salinidade ao longo da profundidade nas 8 estações demarcadas ao longo do rio Búzi, apresentadas na **Figura 31**, mostram que o rio é bem misturado.

As medições foram realizadas durante o período seco do rio, na transição da maré de sizígia para a quadratura, com altura de maré de aproximadamente 4,5m, na enchente e próximo do estofó. Nestas condições o perfil longitudinal de salinidade mostra um gradiente horizontal no qual a salinidade varia de 30,0 PSU (Estação A) a 3,0 PSU a 28 km da foz (estação H), como mostrado na **Figura 31**.

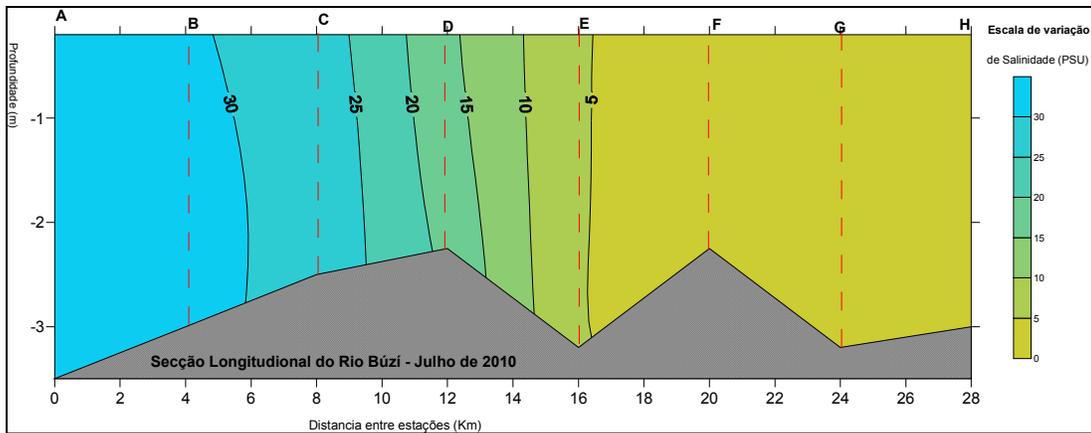


Figura 31: Secção longitudinal de salinidade do rio Búzi (julho de 2010).

A temperatura observada é menor a montante do rio (estação H), onde foi registrada uma mínima de 12,5 °C, enquanto que a jusante se registrou uma temperatura de 23,0°C, como mostrado na **Figura 32**.

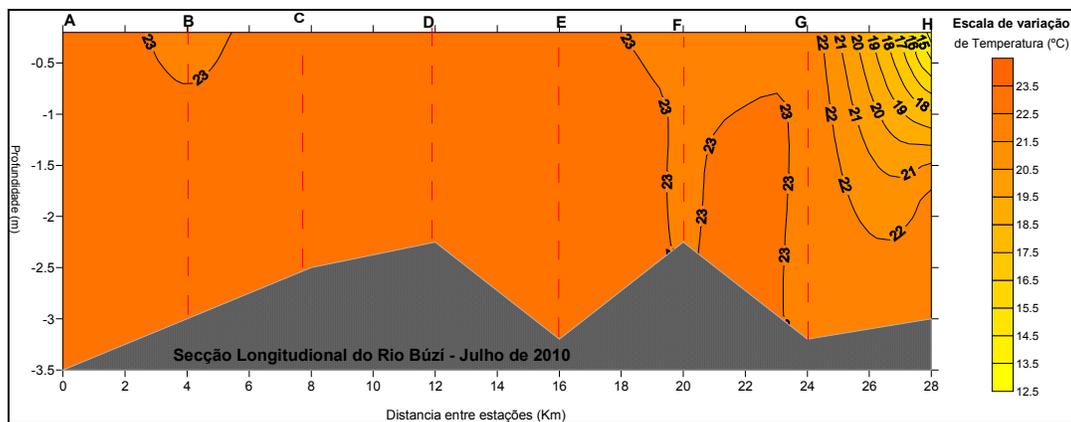


Figura 32: Secção longitudinal de temperatura do rio Búzi (julho de 2010).

#### 6.4. Perfis Transversais de Salinidade e Temperatura em Profundidade no rio Púngué (Maio de 2009)

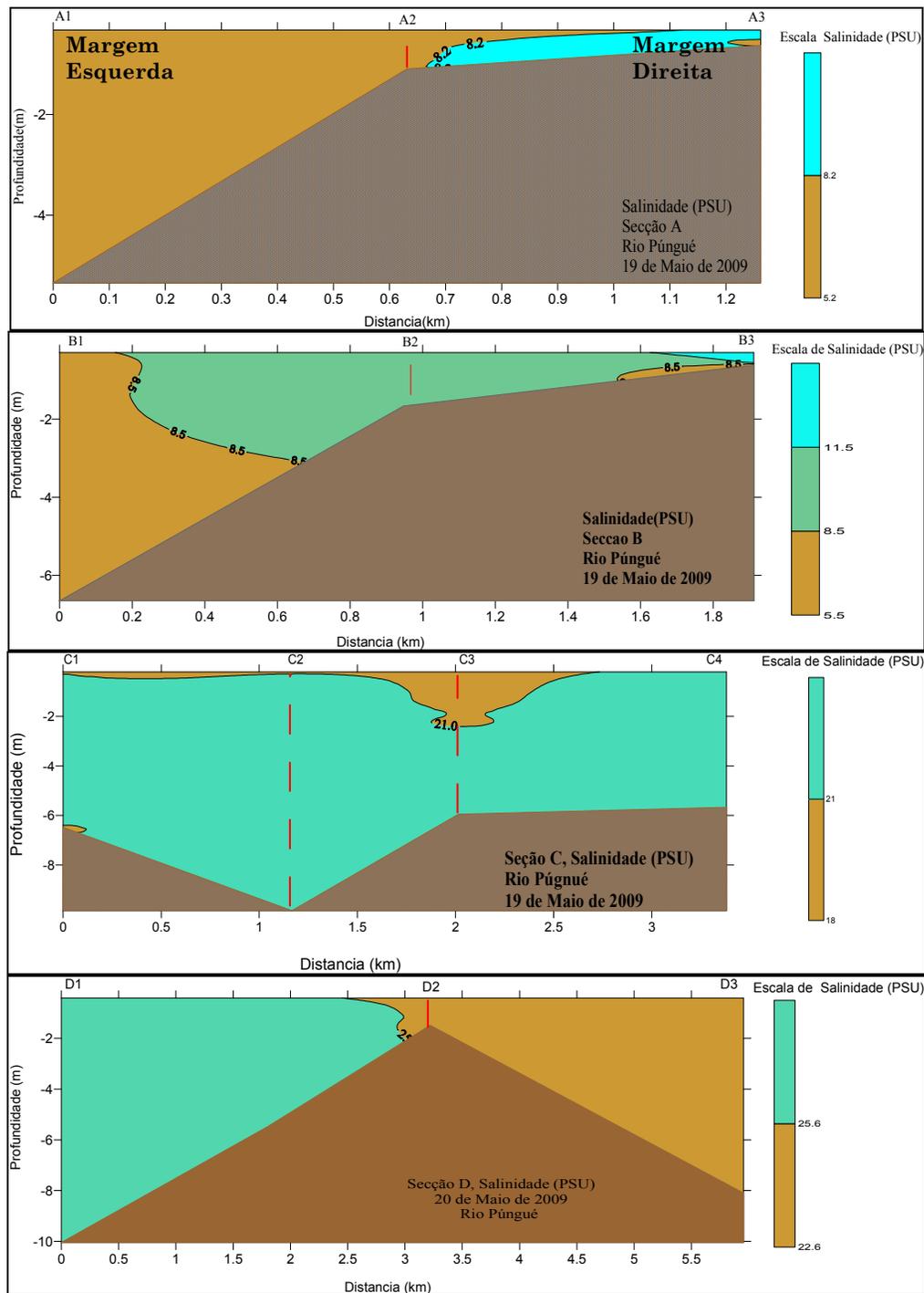
São apresentados na **Figura 33** os resultados referentes à variação de salinidade e temperatura dos perfis transversais do rio Púngué e em seguida da Baía de Sofala. A secção A corresponde à região a montante do rio Púngué, sendo que a secção D corresponde à boca do rio. Nos perfis transversais, esta se olhando para o oceano, portanto o porto da Beira esta na margem esquerda deste.

Observa-se a salinidade decrescente de montante (seção A) para jusante (seção D). Comparando as salinidades entre as duas margens, observa-se que a salinidade na margem esquerda no trecho inferior, constituída pelos pontos C1 e D1 (**Figura 33**), é maior que da direita, com valores típicos de 26,8 PSU e 23,0 PSU respectivamente.

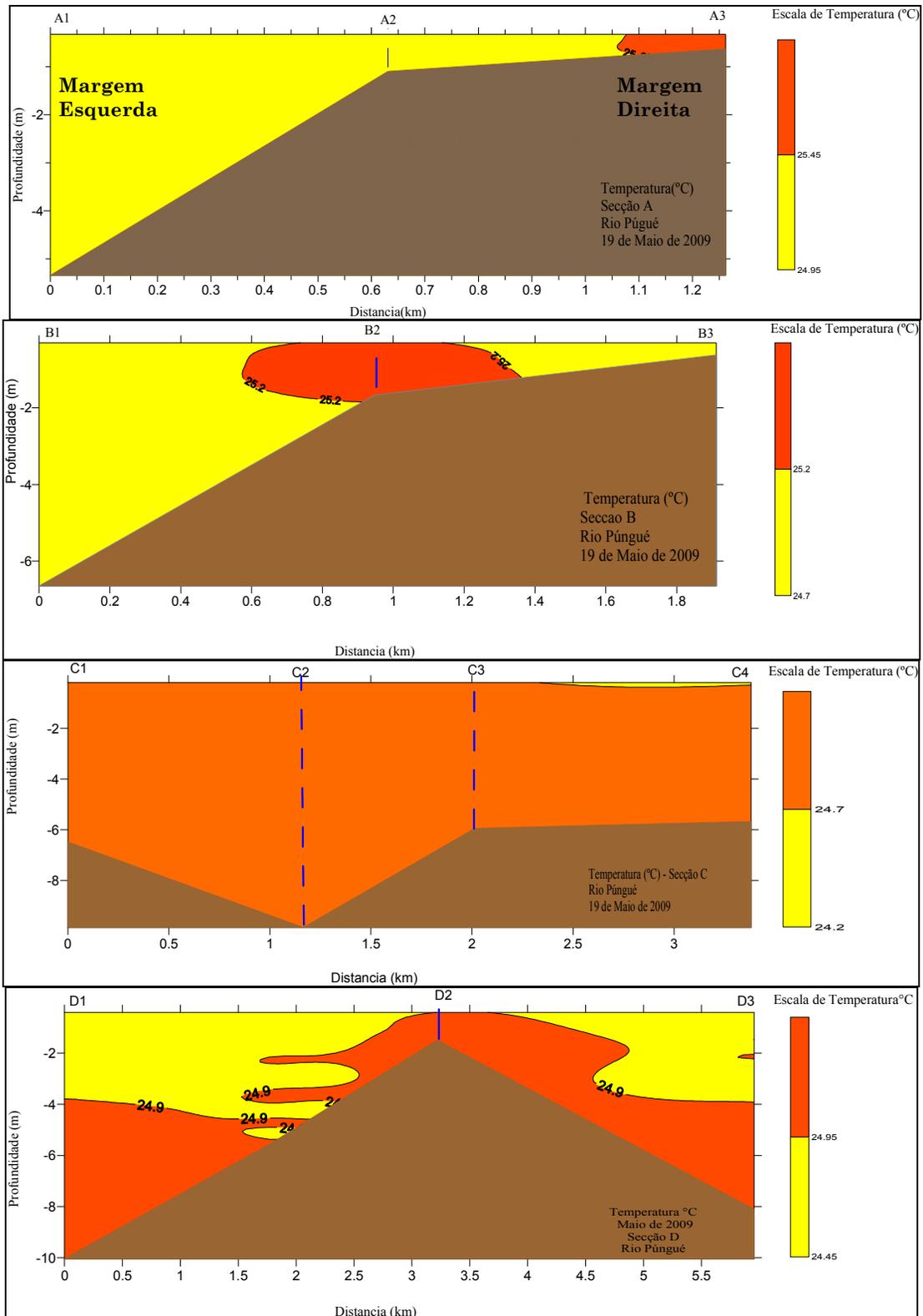
Por outro lado, na região mais fluvial, entre as seções C e A, a situação se inverte, com salinidades maiores na margem direita. Isto mostra que durante a enchente, período em que foram feitas às medições, a existência de um banco de areia na boca do rio Púngué separa o fluxo de enchente fazendo com que na margem esquerda predomine o fluxo mais salino.

O comportamento descrito acima se deve ao acréscimo de água doce proveniente da foz do rio Búzi na margem direita, tornando a menos salina. Observa-se que o fluxo de água esta sendo dominado pela maré de enchente que atinge a margem direita do rio Púngué.

No que concerne à temperatura, verifica se que ao longo de todos os perfis este parâmetro não variou significativamente, como mostrado na **Figura 34** A média da temperatura da água no inverno é de 25,0°C.



**Figura 33:** Perfis transversais da variação de salinidade no rio Púngué, medições realizadas durante a quadratura em maio de 2009 (estação seca).



**Figura 34:** Perfis transversais da variação de temperatura no rio Púngué, Maio de 2009.

### **6.5. Perfis Transversais de Salinidade e Temperatura na Baía de Sofala**

A análise dos perfis transversais de salinidade e temperatura tem em conta o mesmo referencial usado para análise das secções transversais do rio Púngué, onde a margem esquerda corresponde à jusante. Para a Baía foram traçadas as secções E, F, G e H. Que são analisadas em seguida:

**Secção E** - Nesta secção nota-se a presença de água menos salina na zona central da secção E próximo da superfície, entretanto do fundo até a superfície verifica-se o decréscimo dos valores de Salinidade. Isto mostra que a cunha de água oceânica esta presente no fundo da secção enquanto que, a água fluvial esta presente próximo da superfície embora exista uma mistura parcial (**Figura 35**).

**Secção F** - Nesta secção verifica a presença de água mais salina na margem esquerda (ponto F1, observando para jusante do rio Púngué). Nesta margem verifica-se que existe água misturada do rio Búzi e água Oceânica, com valores baixos de Salinidade quando comparados com os valores da margem esquerda (Ponto F1) (**Figura 35**).

**Secção G** - Nesta secção verifica-se a presença de água mais salina na margem direita da secção, olhando para a jusante do rio Púngué (estação G3) e água menos salina na superfície e ao longo do perfil vertical da margem esquerda da secção (**Figura 35**).

Nesta secção verifica se que a água oceânica esta presente no fundo atingindo valores máximos de salinidade em toda a Baía de Sofala e que variam entre 34 a 35 PSU. Na zona superficial e partindo da margem direita da Baía de Sofala observa-se que a salinidade é baixa, o que denota a existência de água fluvial parcialmente misturada (**Figura 35**).

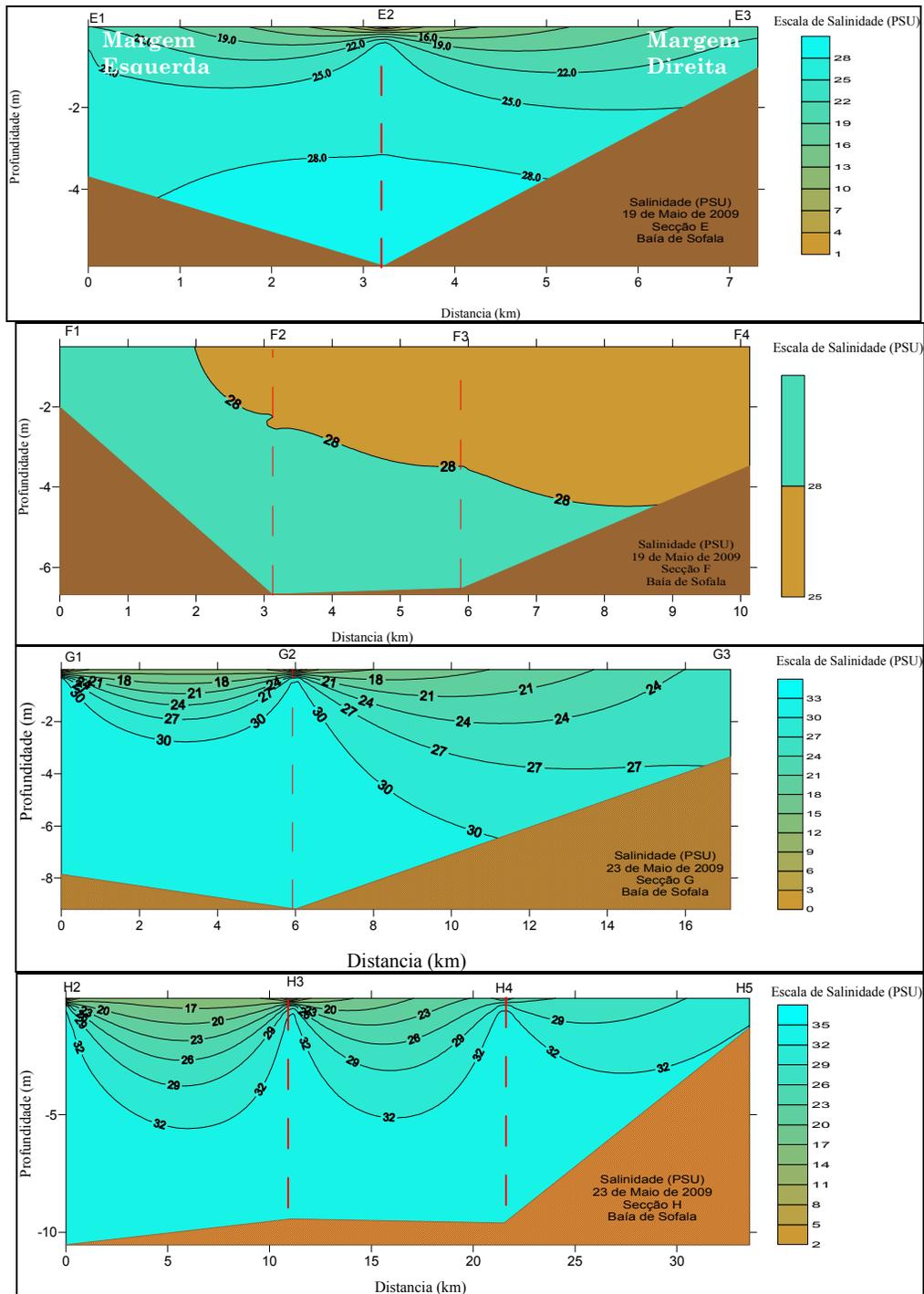
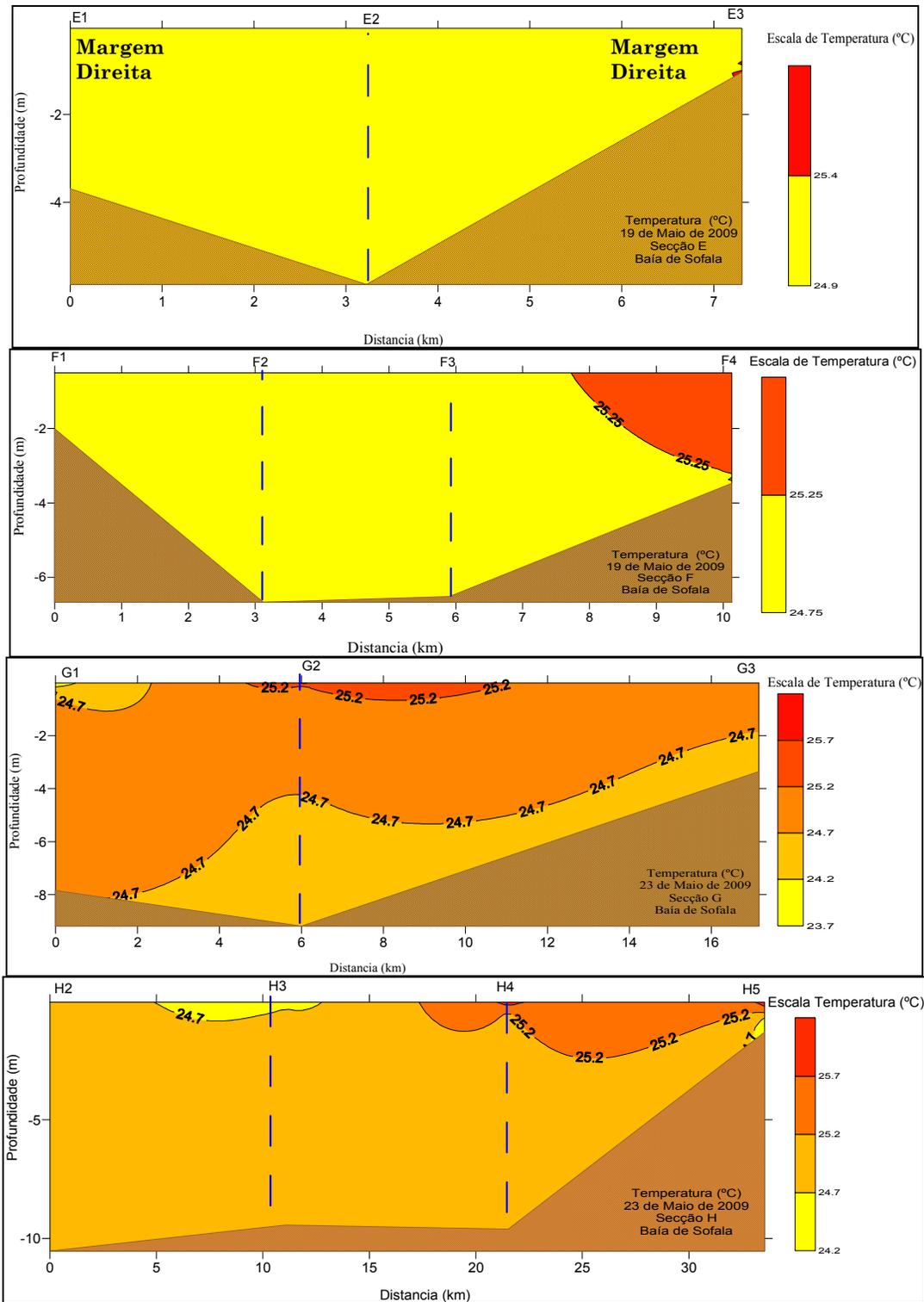


Figura 35: Perfis transversais da variação de salinidade na Baía de Sofala, Maio de 2009.

No que concerne à temperatura, observa-se que, em todos os perfis transversais junto ao fundo ela é ligeiramente baixa e na superfície é ligeiramente alta (Figura 36). A temperatura média em toda a Baía durante o inverno (Maio) é de 25°C.



**Figura 36:** Perfis transversais da variação de temperatura na Baía de Sofala, Maio de 2009.

## **6.6. Discussão de Resultados de Salinidade e da Intrusão Salina no Estuário da Beira.**

Observando o perfil longitudinal de variação de salinidade ao longo do rio Búzi (**Figura 31**) nota-se que a intrusão salina no período de estiagem e de marés de sizígia atinge uma distância aproximada de 24 km a montante de rio. Neste estuário observa-se um comportamento semelhante ao do estuário do rio Púngué, com perfis homogêneos.

Os resultados encontrados no presente estudo justificam este fato dado que a variação longitudinal de salinidade mostra a existência de um aumento gradual dos valores de salinidade da montante até a boca dos dois rios (Púngué e Búzi), e ao longo da profundidade no geral em cada ponto de medição os valores de salinidade mantêm-se constantes.

Em particular nas medições de março de 2006, quando ocorreram vazões fluviais correspondentes à estação chuvosa e mares de quadratura o que favoreceria a formação de estratificação salina, foi observada uma coluna d'água homogênea. As baixas profundidades observadas e as amplitudes de maré relativamente altas, inclusive na quadratura, podem explicar este comportamento.

Considerando os critérios de classificação elaborados por Duxbury (1997), Kjerfve et al. (2002), em que usam como base de distinção dos estuários o tipo de circulação e distribuição espacial de salinidade, se referindo que quando ao longo de cada perfil vertical a salinidade apresentar uma estratificação moderada ao longo da profundidade e ao longo do perfil longitudinal os seus valores diminuem do oceano para montante do rio. Dos quatro tipos de estuários propostos por estes autores, o Estuário da Beira, dadas as suas características enquadra-se no tipo bem misturado.

## 7. MEDIÇÕES DE CORRENTES DE MARÉS NA BAÍA DE SOFALA

Neste capítulo são apresentadas as medições de correntes realizadas, seguindo o método euleriano de medição, em pontos fixos e em diferentes profundidades.

Os níveis de marés foram previstas com base em constantes harmônicas determinadas a partir de um registro de maré (marégrafo AOTT R20) no porto da Beira, tendo como referencial o zero hidrográfico estabelecido neste porto, através das marcas de nivelamento que constam na Tabela de Mares do ano 2009 (INAHINA, 2009). Estes dados foram comparados com os registrados durante o período das medições.

### 7.1. Equipamento e Material Usado na Pesquisa

Na **Figura 37** se apresenta o perfilador de correntes AWAC usado. A ancoragem do AWAC no mar consistiu na conexão de um conjunto de equipamentos ligados em série, tais como: bóias, cabos de aço, pesos e uma estrutura metálica inox para sustentar o aparelho. A ancoragem foi efetuada com auxílio de mergulhador, embarcação de apoio e técnicos destacados para esta atividade (Anexo C).



**Figura 37:** Correntometro AWAC e modo de ancoramento

O AWAC é um instrumento que usa o efeito Doppler para medir a velocidade da corrente. O equipamento utilizado tem uma frequência de 600 kHz. Nas medições são especificadas as condições de operação, como por exemplo, a profundidade média em que o instrumento irá efetuar as medições, o intervalo de tempo que ira usar para a aquisição de dados e a distancia entre as células de medição ao longo da profundidade, descritas na **Tabela 4**.

Os dados de corrente fornecidos pelo AWAC apresentaram-se em três componentes ortogonais (u, v e w). Sendo que, **u** representava a componente da velocidade na direção **x** (E-W), **v** representa a componente da velocidade na direção **y** (N-S) e **w** representa a componente da velocidade na direção **z**. Os dados foram medidos pelo AWAC de 5 em 5 minutos e foram processados nos programas Matlab e Excel.

**Tabela 4:** Especificações do AWAC para a medição de corrente e marés no Estuário da Beira.

Intervalo de medições (s)	300
Numero de células	20
Intervalo médio (s)	120
Tamanho de células (m)	1.00
Distância Neutra (m)	0.5
Salinidade (PPM)	35
Duração de Medição (days)	15
Carga da bateria consumida (%)	20
Nível de carga da Bateria (V)	13.8
Precisão da velocidade vertical (cm/s)	0.7
Precisão da velocidade horizontal (cm/s)	2.3

## 7.2. Localização das Estações de Medição de Correntes

As correntes de maré foram medidas entre os dias 15 a 24 de Maio de 2009, em quatro pontos nas proximidades do canal de acesso ao porto da Beira conforme mostra a **Tabela 5** e **Figura 38**.

**Tabela 5:** Coordenadas das estações de medição das correntes e marés.

Estações	Data de Medição	Dias de Dados	Coordenadas geográficas	
			Longitude	Latitude
Ponto 1	15-18/05/2009	3	34°49'03" E	19°50'39" S
Ponto 2	18-19/05/2009	1	34°50'33" E	19°53'33" S
Ponto 3	19-22/05/2009	3	34°51'08" E	19°53'34" S
Ponto 4	22-23/05/2009	1	34°49'38" E	19°49'46" S



**Figura 38:** Estações de medição de correntes realizada em Maio de 2009 (Google Earth, 2010).

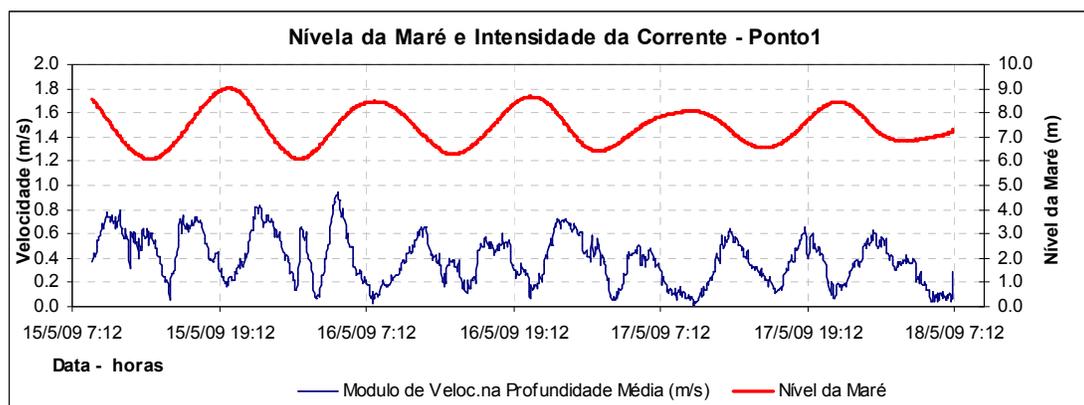
A declinação magnética local na Baía de Sofala era cerca de  $9^{\circ} 51'$  em 1985 e decresce cerca de  $6''$  (segundos) por ano. Feita a correção para o ano 2009, este valor passou para cerca de  $9^{\circ}$ . Para todos os dados de direção de correntes registradas pelo AWAC devesse ter em conta a adição deste valor para que haja concordância com os valores medidos e referidos ao norte geográfico. Ou seja, os dados apresentados a seguir, são referentes ao norte magnético.

### 7.3. Correntes de Marés Medidas no Ponto 1

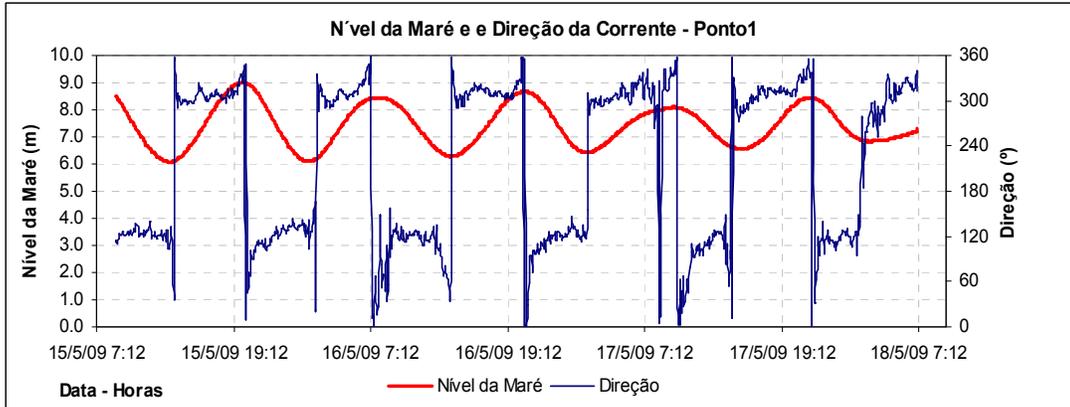
Na **Figura 39**, é mostrada a intensidade da corrente medida no ponto 1, na profundidade média, junto com o nível d água medido pelo instrumento neste ponto. As medições neste ponto correspondem ao início da maré de quadratura (amplitude da maré máxima no período foi de 2,5m). A intensidade de corrente máxima obtida neste ponto foi de aproximadamente 1 m/s e ocorreu na meia maré de vazante e de enchente.

A corrente ao longo da profundidade não apresenta variações significativas, dado que a intensidade de corrente que se verifica na profundidade média é aproximadamente igual a que se verifica na superfície e a 1.2 m do fundo.

A **Figura 40** mostra a direção das correntes, também junto com o nível d água. A direção predominante da corrente de enchente é de 310 ° a 320 °, enquanto que, na vazante é de 70 ° a 120 °.

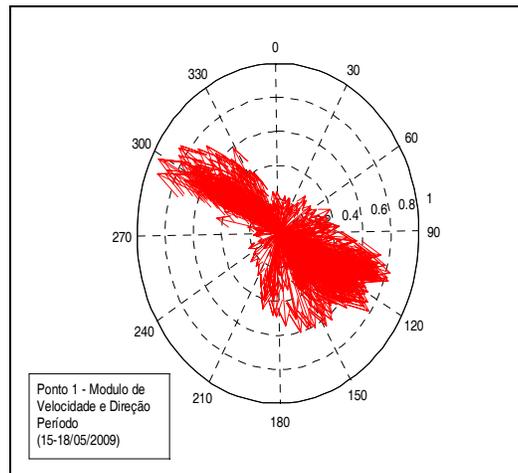


**Figura 39:** Intensidade de corrente na profundidade média e nível d água no ponto 1.



**Figura 40:** Direção da corrente na profundidade média e nível d água no ponto 1.

A **Figura 41** mostra a relação existente entre as intensidades de corrente de marés e a direção, onde se observa as duas direções predominantes de enchente e vazante. A intensidade da corrente de enchente é maior que a de vazante, com valores típicos de 0.95 a 0.80 m/s respectivamente.

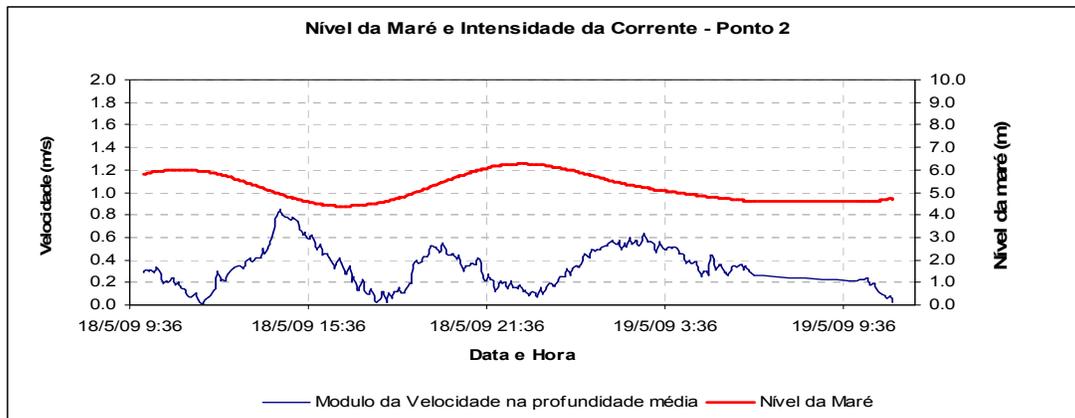


**Figura 41:** Diagrama polar das correntes medidas, na profundidade média no ponto 1.

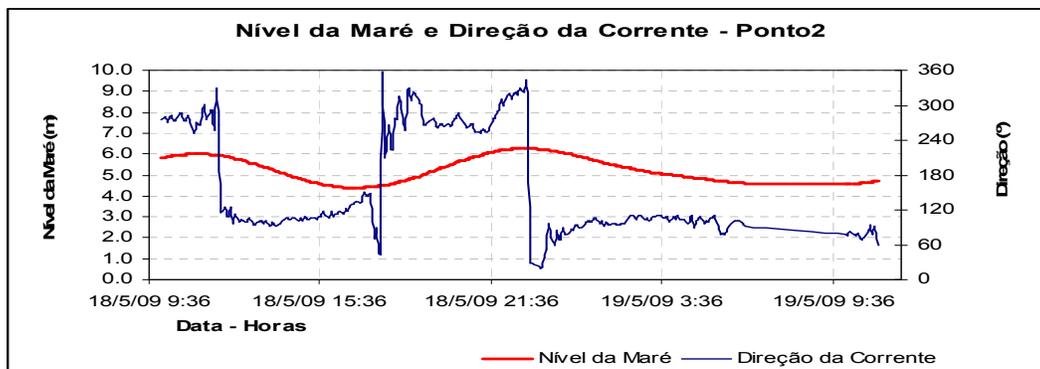
#### 7.4. Correntes de Marés Medidas no Ponto 2

No ponto 2 as medições foram feitas no período de marés de quadratura em que se observou uma maré com amplitude próxima de 2.0 m e uma intensidade máxima que foi de 0.72 m/s conforme mostra a **Figura 42**. Na **Figura 43** são mostradas as direções

das correntes, sendo que a direção da corrente a vazante é de 70° a 100°, enquanto que na enchente é de 250° a 300°.

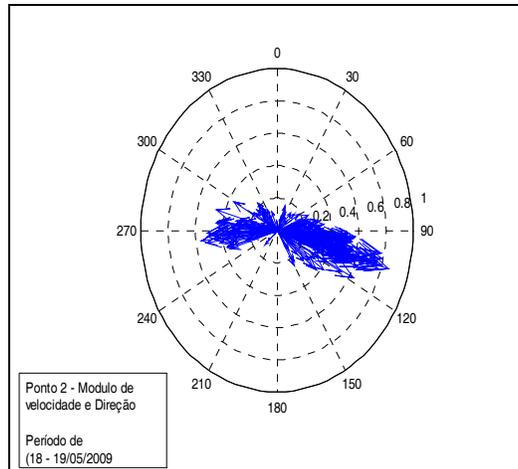


**Figura 42:** Intensidade de corrente na profundidade média e nível d água no ponto 2.



**Figura 43:** Direção da corrente na profundidade média e nível d água no ponto 2.

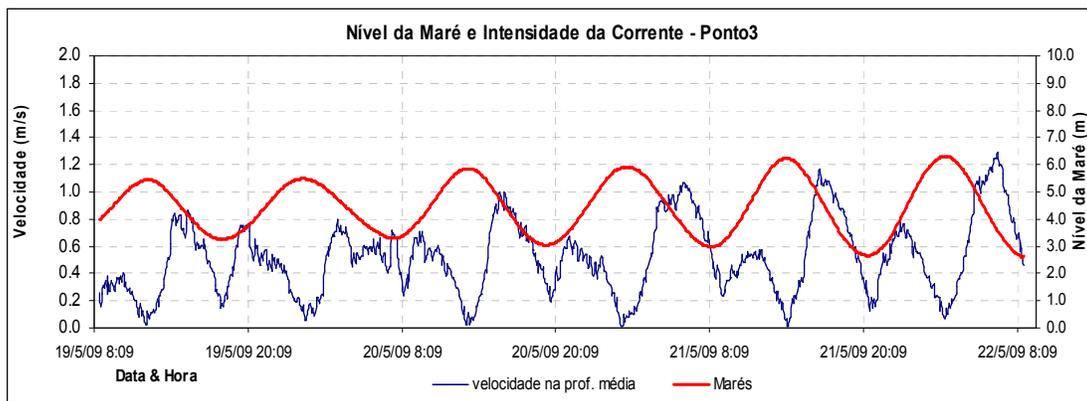
O diagrama polar da intensidade de corrente e a direção mostra que neste ponto de medição, existem duas direções predominantes da corrente, porém com maior dispersão, na direção norte, com correntes de menor intensidade. Neste caso não é clara a direção predominante das correntes mais intensas, sendo, num ciclo de maré, a corrente de vazante ligeiramente mais intensa que a de enchente, e no próximo ciclo, o contrário (**Figura 44**).



**Figura 44:** Diagrama polar das correntes medidas, na profundidade média no ponto 2.

### 7.5. Correntes de Marés Medidas no Ponto 3

As medições de correntes no ponto 3, representadas na **Figura 45**, já na transição de marés de quadratura para sizígia, a intensidade máxima de corrente registrada no período foi de 1.3 m/s. A **Figura 46**, mostra que a direção da corrente foi de 300 a 330 ° na enchente e 130 à 150° na vazante.



**Figura 45:** Intensidade da corrente na profundidade média e nível d água no ponto 3.

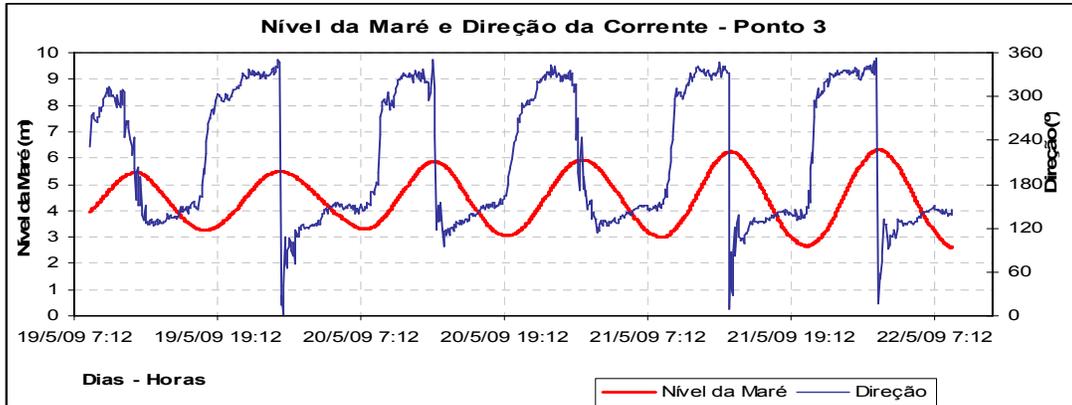


Figura 46: Direção da corrente na profundidade média e nível d água no ponto 3.

A Figura 47 mostra o diagrama polar da intensidade e direção da corrente. Neste ponto observam-se correntes de vazante sensivelmente mais intensas, máxima de 1.25 m/s, e na enchente com valores em torno de 0.65 m/s.

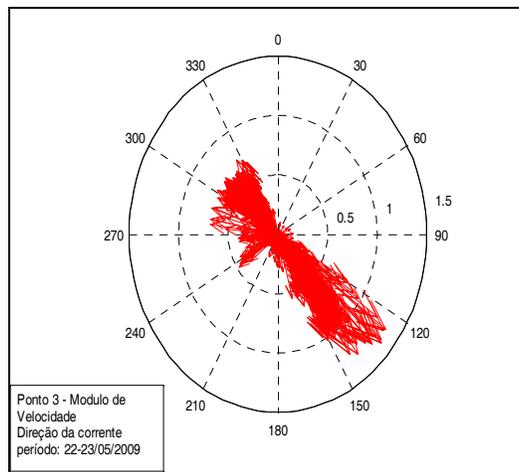


Figura 47: Diagrama polar das correntes medidas, na profundidade média no ponto 3.

## 7.6. Correntes de Marés Medidas no Ponto 4

A Figura 48, mostra que no ponto 4, localizado nas proximidades do rio Púngué, a intensidade máxima de corrente foi de 1,45 m/s e a amplitude máxima da maré foi de 4.60 m,. A Figura 49, mostra que a direção da corrente na enchente oscila entre 5 a 40° e na vazante oscila entre 190 à 220°.

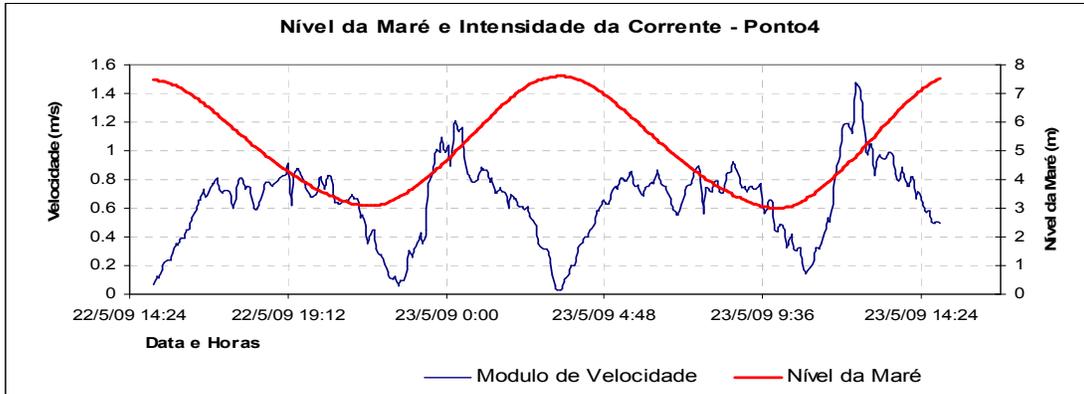


Figura 48: Intensidade da corrente na profundidade média e nível d'água no ponto 4.

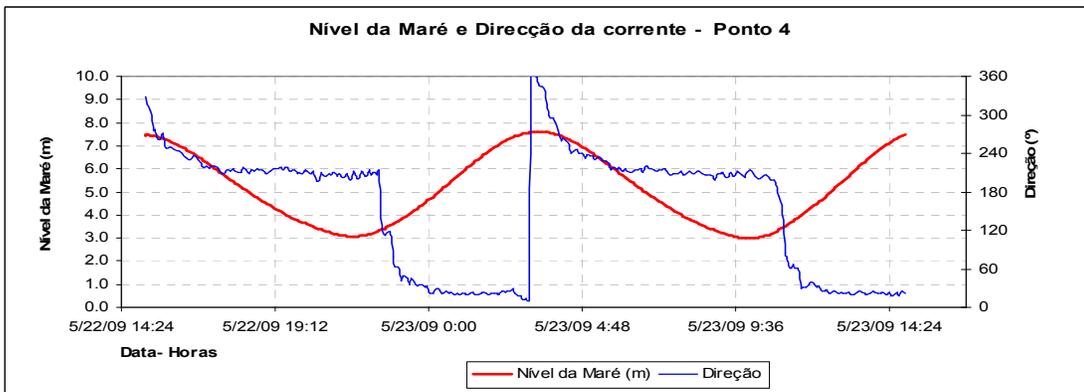


Figura 49: Direção da corrente na profundidade média e nível d água no ponto 4.

O diagrama polar da intensidade e direção da corrente, representada na **Figura 50**, mostra que as correntes de enchente, com direções de 20 a 40 °, apresentam maiores intensidades com cerca de 1.5 m/s, e 0.9 m/s a vazante.

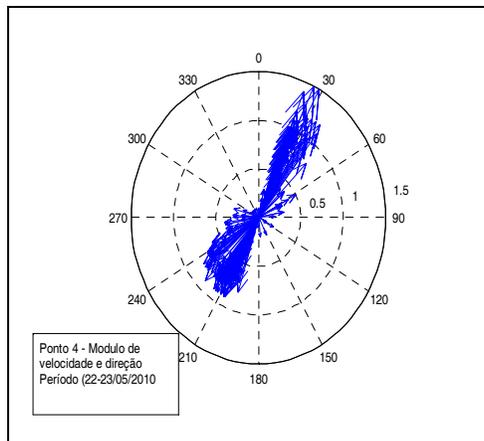
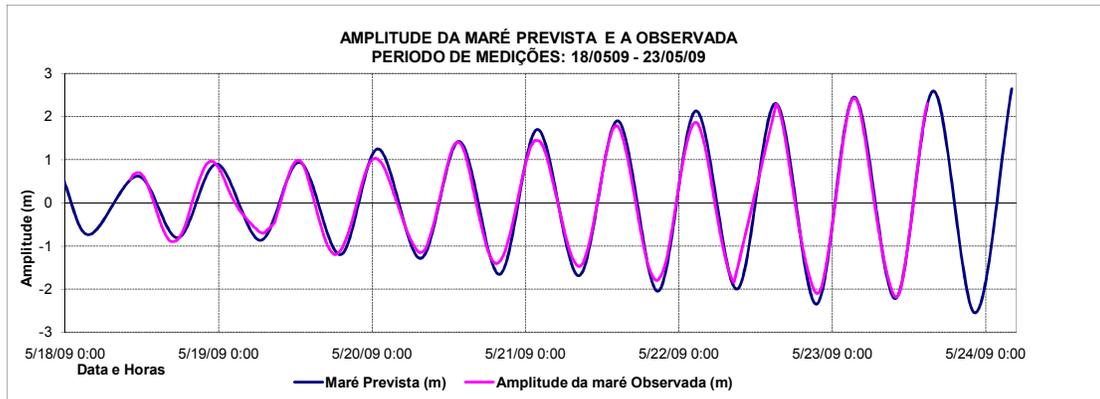


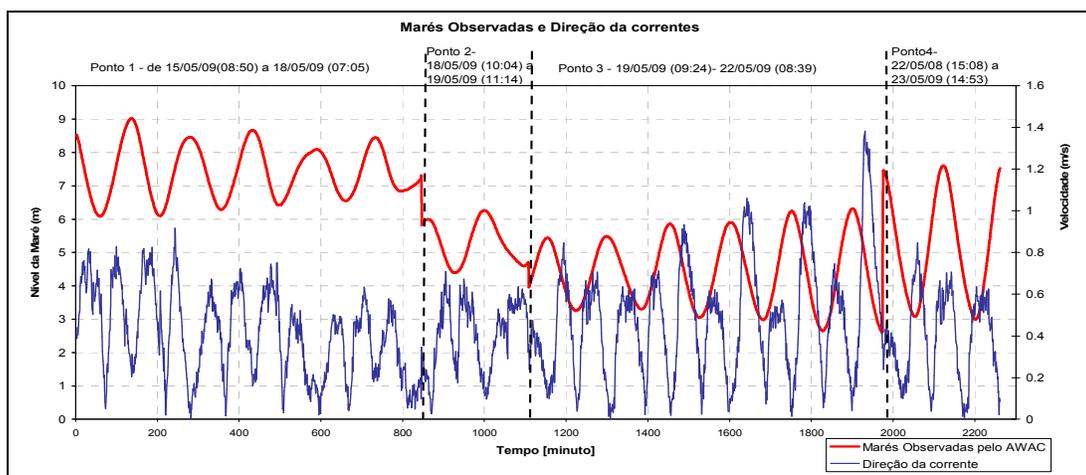
Figura 50: Diagrama polar das correntes medidas, na profundidade média no ponto 4.

Na **Figura 51** são comparados os níveis de maré que constam na tabela de previsões do INAHINA, 2009, e os que foram medidos pelo AWAC no mesmo período. Nota-se pouca diferença nas amplitudes, e uma ligeira diferença de fase de acordo com a localização das estações de medição.



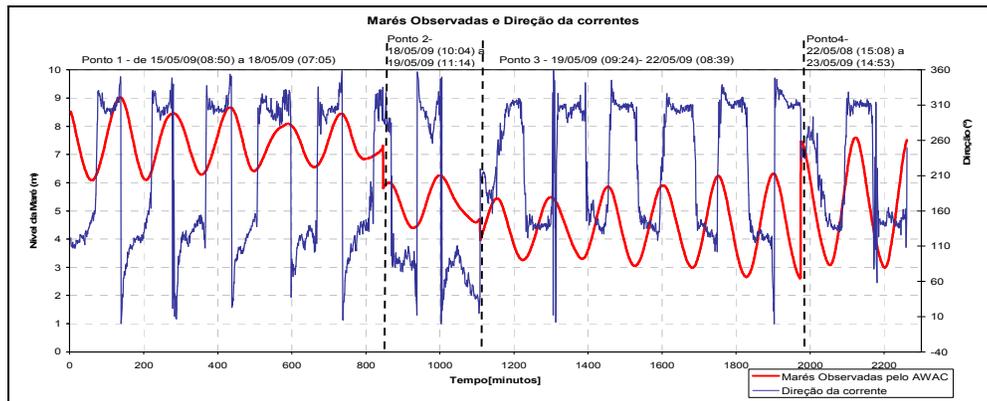
**Figura 51:** Sobreposição de maré prevista para o porto da Beira e da maré observada pelo AWAC.

Na **Figura 52** são mostradas as intensidades e os níveis d'água das quatro estações de medição, com início na maré de quadratura e fim na maré de sizígia. Observa-se que, quanto maior for a amplitude da maré, maior é a intensidade da corrente. A intensidade máxima de correntes verificada neste período de medição, sem atingir a máxima amplitude de maré na sizígia, foi de 1.45 m/s.



**Figura 52:** Sobreposição de maré prevista para o porto da Beira e intensidade da corrente observada pelo AWAC nos pontos (1, 2, 3 e 4).

A **Figura 53** mostra as direções das correntes, também para as quatro estações de medição, onde se observa que a direção da corrente muda em geral durante os estofos da maré, indicando uma maré aproximadamente estacionária, o que é explicado pela direção de incidência da onda de maré na região. O comportamento da onda de forma mais progressiva ocorre no ponto 4, onde a onda de maré estaria se propagando na direção do Estuário do Púngué.



**Figura 53:** Níveis de maré e direções da corrente na profundidade média nos quatro pontos de medições.

## 8. CORRENTES DE MARÉ E CANAL DE ACESSO AO PORTO DA BEIRA

### 8.1. Comparação das Correntes Medidas em 2009 com dados prévios e resultados de modelo hidrodinâmico.

Dada a relação que existe entre o nível d'água e as correntes de maré, verifica-se que no Estuário da Beira a onda de maré incide de leste para oeste induzindo uma maré quase estacionária na região externa. No ponto 4 na **Figura 48** a maré se comporta de forma mais progressiva sendo que a onda de maré está se propagando para montante do Rio Púngué. Isto é verificado nesta figura onde observa-se a fase entre o nível e a velocidade.

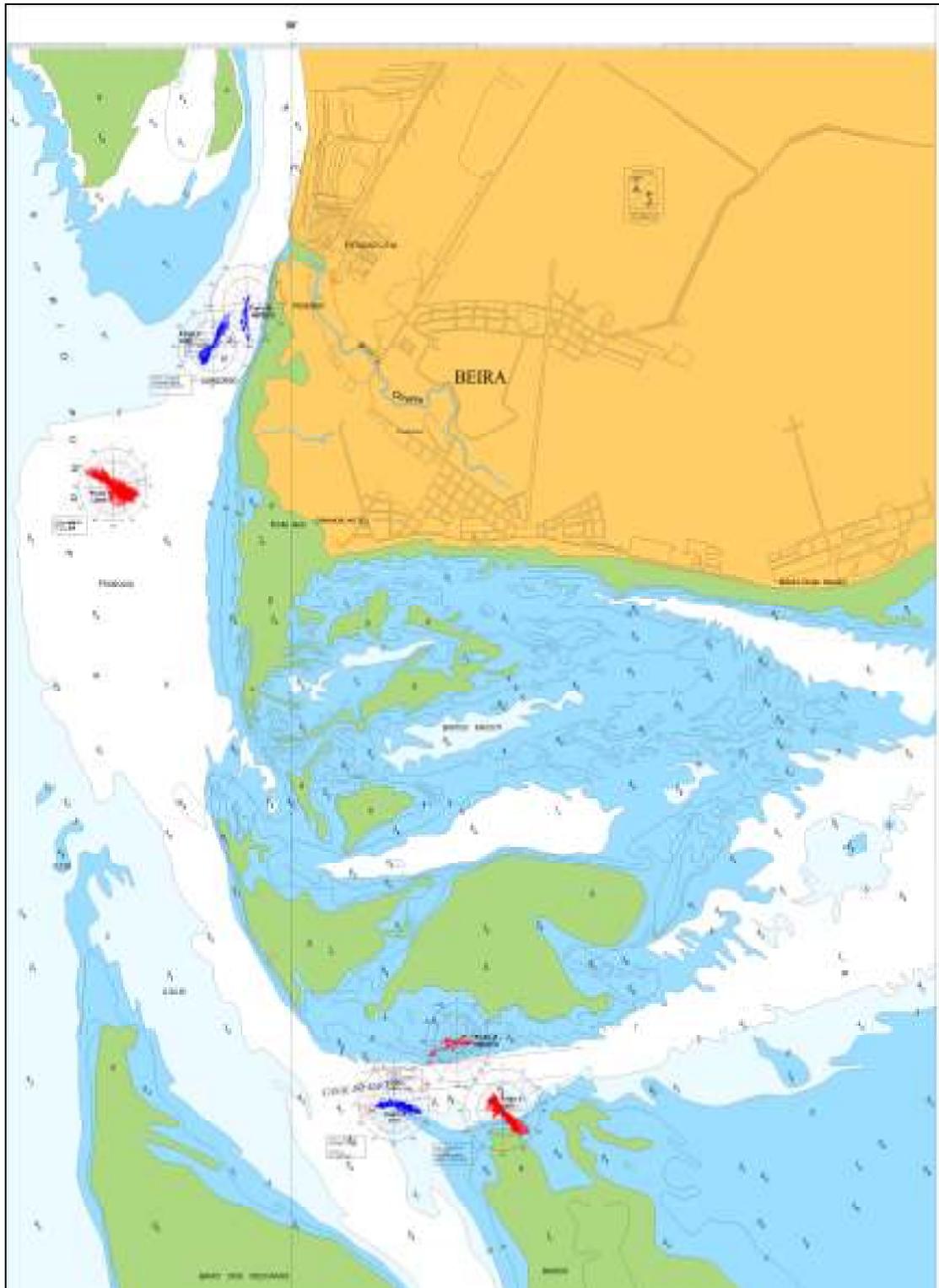
Os diagramas polares de correntes (**Figuras 41, 44, 47 e 50**) foram implantados na carta náutica referente à aproximação ao porto da Beira (**Figura 54**). Em relação à direção da corrente, observa-se que nos pontos 2 e 4 a corrente acompanha as feições do fundo nesta carta náutica enquanto que nos pontos 1 e 3 ela é oblíqua. É interessante notar que a direção da corrente observada no ponto 1, é semelhante aquela observada nas proximidades da bóia 11, mostrada na **Figura 9**, nos estudos realizados pela Missão Hidrográfica de Moçambique, em 1956/58. Nestas medições não foram realizadas medições no atual canal de Macuti, que, de acordo com a **Figura 10**, não apresentava um canal naturalmente aberto. Nesta missão o foco do desenvolvimento foi o canal Rambler.

A intensidade e direção das correntes medidas pela NEDECO no ano 1982 (no período chuvoso e marés de sizígia) em locais próximos dos pontos em que foram efetuadas as medições do ano 2009 são mostradas na **Figura 54**. Importa realçar que tanto nas medições de 1982 e 2009, mesmo com as dragagens de manutenção do canal para manter as profundidades requeridas e seguras para a navegação, às correntes tenderiam a seguir as respectivas feições de fundo.

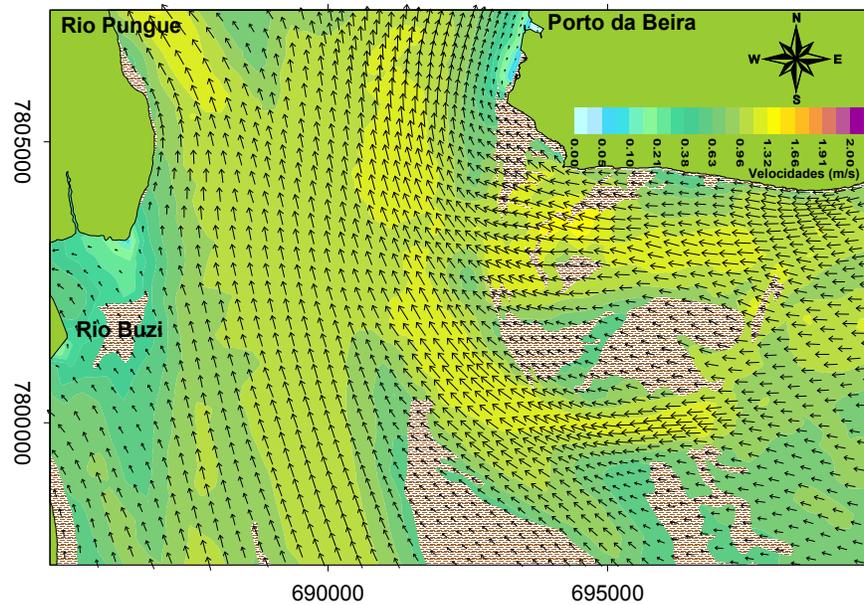
Desta forma em concordância com os resultados de correntes obtidos em Maio de 2009, embora a topografia de fundo se tenha alterado consideravelmente ao longo dos anos e os períodos de medição correspondam a diferentes estações do ano é de destacar que o alinhamento do canal e a configuração do fundo alterou-se, o que pressupõe que a deriva do canal tem a ver com a tendência deste se adaptar a dinâmica das correntes que se registram nesta Baía.

A **Figura 55 e 56**, mostram os resultados do modelo 2D de correntes elaborado por NZUALO (2010), onde foi representado um fundo fixo baseado na carta náutica de 1986 e as correntes que naturalmente se alinham com a batimetria do estuário.

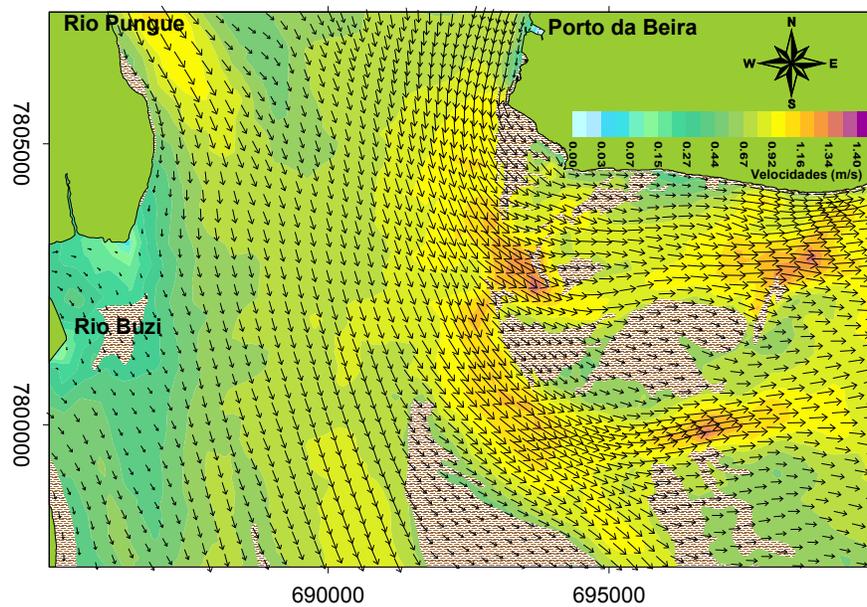
As feições gerais das correntes do modelo estão de acordo com os valores medidos em 2009, pelo que, as diferenças que possam surgir poderão ter origem nas mudanças de batimetria ocorridas desde o levantamento batimétrico correspondente àquela carta náutica e a data das medições de correntes (Maio 2009).



**Figura 54:** Elipses de correntes do Ano 2009, 1982 (NEDECO) e traçado do canal de acesso ao Porto da Beira (Fonte: INAHINA, 2010).



**Figura 55:** Padrão de correntes 2DH na meia maré enchente de sizígia do período de inverno no Estuário da Beira (de Nzualo, 2010).



**Figura 56:** Padrão de correntes 2DH na meia maré vazante de sizígia do período de inverno no Estuário da Beira (de Nzualo, 2010).

Observando os resultados das intensidades, direções predominantes nos diagramas polares de correntes das estações de medição ao longo do canal de acesso e o respectivo alinhamento do canal (**Figura 54**), nota-se que nos pontos 2 e 4 a direção da corrente tem tendência a ser paralela ao alinhamento do canal enquanto que nas

estações 1 e 3 verifica-se que as correntes medidas são oblíquas ao alinhamento do canal.

Aplicando as equações de FREDSE *et al.* (1999), no qual formulam a relação que existe entre o ângulo de incidência da corrente fora do canal em relação a este e as profundidades existentes fora e dentro do canal (Formulas 7 e 9), foi possível calcular as velocidades da corrente no interior do canal portuário nos quatro pontos de medição feitas com o AWAC (**Tabela 6**).

**Tabela 6:** Velocidades das correntes de marés no interior do canal calculadas para a vazante e enchente.

Medições com o AWAC						Veloc. calculada dentro do canal	
Ponto	Profundidade (m)	Veloc. média Enchente (m/s)	Veloc. média Vazante (m/s)	Tipo de incidência no Canal	Profundidade no canal (m)	Enchente (m/s)	(Vazante m/s)
1	6.5	0.95	0.80	Obliqua	6.8	0.91	0.76
2	3.2	0.60	0.82	Paralela	5.9	0.81	1,11
3	3.5	0.53	1.25	Obliqua	5.0	0.37	0.88
4	6.0	1.53	0.90	Paralela	6.9	1.64	0.97

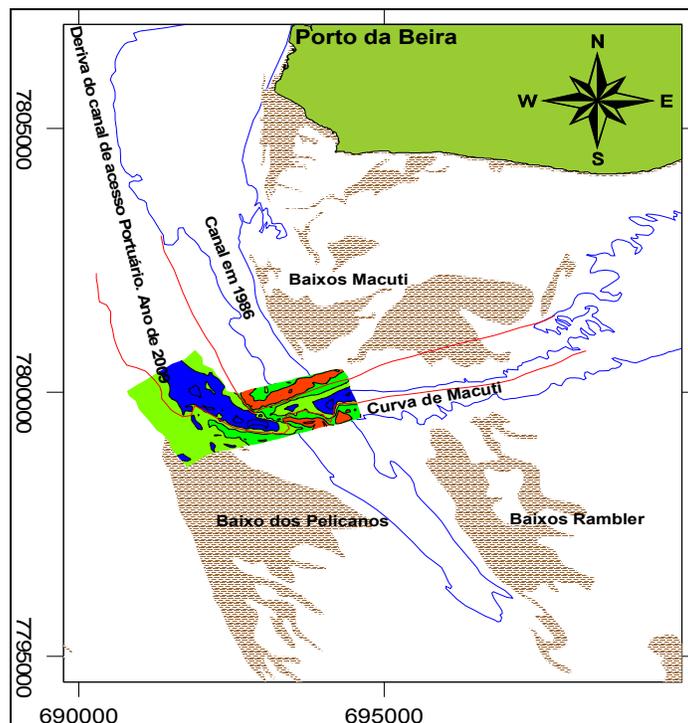
Nesta tabela verifica-se que nos pontos 4 e 2 onde a corrente fora do canal é paralela ao seu alinhamento, a intensidade da corrente é maior no seu interior, tanto na vazante como na enchente e, portanto ocorrer maior capacidade de transporte de sedimentos. Por outro lado, quando a velocidade dentro do canal for menor que a registrada fora do mesmo ocorre deposição de sedimentos.

Os resultados de correntes observadas indicam que nos pontos 1 e 4 as correntes de enchente são mais intensas do que as de vazante, enquanto que nos pontos 2 e 3 a corrente de vazante é mais intensa que a de enchente. As correntes de enchente mais intensas no interior do estuário podem ser um fator importante na retenção dos sedimentos oriundos dos rios Púngué e Búzi. Já nas estações localizadas na parte externa, onde há presença de bancos, haverá maior transporte de sedimentos em suspensão na vazante em direção ao oceano, promovendo a redistribuição dos sedimentos, predominantemente aportados pelo transporte litorâneo, ao longo da costa proveniente do leste. É possível que as correntes nas áreas rasas dos bancos sejam mais

fortes durante a enchente, como sugerido por FERNANDES, 2010, porém não há informação que possa verificar esta hipótese. A medição da NEDECO (ponto VI) no ponto próximo a medição de 2009 (ponto 3) indica uma predominância de enchente. A combinação destas assimetrias de correntes de enchente e vazante daria como resultado a migração dos bancos observada nos estudos de 1956/58 (**Figura 11**).

No levantamento batimétrico e de correntes de 1958 (**Figura 10**) as correntes se apresentam alinhadas aos canais naturais, porem o canal Macuti apresentava segmentos com assoreamentos, sendo então nessa época o canal de navegação definido ao longo do canal Rambler.

Analisando as transformações de fundo que o Canal de acesso ao Porto da Beira sofreu de 1931 a 1981 (**Figura 11**) e o levantamento batimétrico realizado em 2009, mostrado na **Figura 57**, observa se uma descontinuidade “natural” do canal na área que se situa entre os bancos de Macuti, Pelicanos e Rambler.



**Figura 57:** Deriva do canal portuário para Oeste, de contorno a azul do ano de 1986 para o contorno a vermelho ilustrando o canal do ano de 2009 (Fonte: Nzualo 2010).

## **9. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

### **9.1. Frente Salina no Estuário da Beira**

- O presente trabalho teve como um dos objetivos específicos caracterizar a frente salina no Estuário da Beira. Feita a análise dos perfis longitudinais e transversais das seções demarcadas ao longo desta unidade fisiográfica concluiu-se que:

- O sentido de circulação da água no estuário é horário, influenciado pela entrada de água salina para a montante dos rios Púngué e Búzí com uma variabilidade do lado Este a SW (margem direita), quando se observa de montante para a jusante do rio Púngué e pela saída de água dos dois rios com salinidade baixa pelo lado NW a Norte (a esquerda do rio Púngué).

- A salinidade apresenta uma variação sazonal considerável ao longo do estuário e em particular na Baía de Sofala. As seções longitudinais do trecho analisado, mostram que no verão registram-se níveis de salinidade que oscilam entre 10 PSU a montante do estuário e 28,5 PSU à jusante do mesmo. No inverno a salinidade atinge valores maiores neste trecho, sendo que a montante foi registrada o valor médio de 12,5 PSU, enquanto que a jusante foi de 32,5 PSU, o que é justificado pelo período seco em que existe menor vazão de água fluvial.

- A temperatura da água no estuário é em média 23°C no inverno (período seco) e 27°C no verão (período chuvoso).

- Embora exista uma variação sazonal da temperatura, verifica-se que ao longo das seções transversais a temperatura na Baía de Sofala aumenta de NE para SW, de acordo com o regime de circulação que introduz água morna e menos salina proveniente da montante dos rios Púngué e Búzí para o Oceano Índico. Do lado E a SE nota-se o transporte de água fria e salina do Oceano Índico para dentro do estuário pela margem direita da Baía.

## 9.2. Correntes de Marés no Canal de Acesso ao Porto da Beira

- No acesso à foz do rio Púngué as correntes de maré são fortes. Observou-se a partir das medições que próximo da maré de sizígia, no período seco, quando o nível da água no rio é baixo, a velocidade da corrente de enchente atinge 1,5 m/s. A velocidade da corrente de vazante é cerca de 0,9 m/s.

Comparando-se as direções e intensidades de correntes medidos em 1982 pela NEDECO e 2009 com o instrumento AWAC pelo autor desta dissertação, destaca-se que as direções das correntes, nos dois pontos a montante da Baía há uma concordância em direção embora as intensidades sejam diferentes devido à sazonalidade do período em que foram feitas as medições.

Ao longo da curva de Macuti já não acontece o mesmo. Neste ponto as direções das correntes medidas pela NEDECO são paralelas em alguns trechos do canal enquanto que os dados recentemente medidos mostram um cenário diferente em que no ponto 3 as correntes são perpendiculares ao alinhamento do canal. Isto pode ser devido a mudanças batimétricas ocorridas ao longo do tempo transcorrido entre as duas medições.

## 9.3. Movimento dos Bancos de Areia

Baseado nas evidências constatadas por DALRYMPLE e CHOI (2007), os bancos de maré alongados migram lateralmente, isto é, transversalmente às correntes dominantes o que vai de encontro com o cenário que se observa nos bancos existentes no Estuário da Beira, sobretudo na curva de Macuti. Uma evidência adicional que sustenta esta afirmação apresenta-se na **Figura 11**, que mostra os bancos de Macuti migrando para a direção Sudoeste.

#### **9.4. Recomendações**

A necessidade de ter dados de qualidade e em quantidade que mostrem a dinâmica destes bancos é evidente. Normalmente são realizadas batimetrias de alta resolução com a finalidade de estabelecer as profundidades navegáveis, posição do canal e quantidade de material a ser dragado. Porém, para a compreensão da movimentação dos bancos e da causa do assoreamento dos canais, são necessárias batimetrias abrangentes.

Recomenda-se que em trabalhos futuros possam se dispor de dados de vento, ondas e correntes em locais de interesse para o estudo da dinâmica sedimentar para auxiliar no processo de análise e elaboração de resultados.

Ao longo da elaboração da presente dissertação constatou-se que a falta de uma base de dados hidrográficos e hidrológicos, limitou as discussões e Conclusões sobre o tema. Sendo um problema que existe em instituições ligadas a área de investigação e prestação de serviços em Moçambique, recomenda-se a criação de um banco de dados oceanográficos que possa responder as solicitações dos diversos utilizadores que queiram desenvolver estudos relacionados com a evolução das condições ambientais do Estuário da Beira.

## 10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOWDEN, (1983), *Physical Oceanography of coastal waters*.

CAMERON, W. M. e PRITCHARD, D. W., (1963), *Estuaries*. The sea interscience. New York, USA, pp. 306-324.

CHEMANE, D.A.; MOTTA, H.B.; ACHIMO, M.C.; (1997). *Vulnerability of Coastal Resources to Climate Changes in Mozambique: A Call for Integrated Coastal Zone Management*, Maputo, Moçambique, V.37, pp 64 - 83.

CONSULTEC, (2007), *Estudo Ambiental Simplificado da Dragagem do Canal de Acesso ao Porto da Beira*. Relatório Final. Maputo, Moçambique.

DALRYMPLE, R.W. e CHOI, K, (2007). *Morphologic and facies trends through the fluvial-marine transition in tide-dominated depositional systems: A schematic framework for environmental and sequence-stratigraphic interpretation*. Earth- Science Reviews. 81 (2007), pp. 135-174.

DA SILVA<sup>1</sup>, J.C.B., NEW<sup>2</sup>, A.L. e MAGALHÃES<sup>1</sup>, J.M., (2009), *internal solitary waves in the Mozambique Channel: Observations and interpretation*.

<sup>1</sup> Institute of Oceanography and Department of Geographic Engineering, Geophysics and Energy, University of Lisbon, Portugal.

<sup>2</sup> *Ocean Modelling and Forecasting Group*, National Oceanography Centre, Southampton, UK.

DAVIES, L.J., 1964, *A morphogenic approach to the worlds' shorelines*. Zeitschrift für Geomorphologie, No. 8: pp. 127-142.

DYER, K. R., (1997), *Estuaries: A Physical Introduction*. 2nd. Baffins Lane, Chichester, England, John Wiley & Sons Ltd, 140p.

DYER, K.R. e HUNTLEY, D.A., (1999). *The origin, classification and modelling of sand banks and ridges*. *Continental Shelf Research*, V. 19, pp. 1285-1330.

DIRECÇÃO PRINCIPAL DE NAVEGAÇÃO E OCEANOGRAFIA DO MINISTÉRIO DA DEFESA DA URSS, (1986), *Roteiro da costa da Republica Popular de Moçambique*. 1ª edição 1986. 83 p. Maputo, Moçambique.

DIRECÇÃO PRINCIPAL DE NAVEGAÇÃO E OCEANOGRAFIA DO MINISTÉRIO DA DEFESA DA URSS, (1986), *Carta Náutica do Porto da Beira e os seus Acessos*. N 49638-M. Maputo, Moçambique.

FERNANDES R.D., (2010). *Formação e evolução dos bancos de areia da foz do Rio Amazonas*. Tese de Doutorado em Engenharia Costeira e Oceânica. UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

FERNANDES J. B., (1958). *Relatório da Campanha Hidrográfica de 1956 a 1958*, Missão Hidrográfica de Moçambique, (1956) PP. 1 - 112; (1957) PP. 1-34.

GASPAR A., FIGUEIREDO J.A.F.,(1993). *Introdução à Oceanografia Física*, Escola Naval, Portugal.

GRAAS S.; SAVENIJE, H.H.G., (2005), *Salinity and Tides in Alluvial Estuaries*. Delft, Holanda, pp. 2524 - 2542.

HAYES, M.O. *Morphology of sand accumulation in estuaries*. Estuarine Research. Academic Press, New York, vol. 2.

INAHINA, (2010). *Carta Náutica de aproximação ao Porto da Beira*. Maputo. Moçambique.

INAHINA, (2010). *Tabela de Marés 2006*. Maputo. Moçambique.

INAM, (2006). *Dados da Estação Meteorologica da Beira*. Maputo, Moçambique.

JENSEN, J. H.; MADSEN, E. e. FREDSOE, J.; (1999). *Oblique Flow Over Dredged Channels. I: Flow description*. Journal of Hydraulic Engineering, Lyngby, Dinamarca, V. 125 pp. 1181-1189.

LOBO, J.J., (2004), *Aspectos Da Circulação Oceânica Na Margem Continental Portuguesa Revelados Por Observações Cronométricas*. Dissertação de mestrado em Oceanografia Física, Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Portugal.

MUCHANGOS; A.D., (1994) *Cidade da Beira. Aspectos geográficos*. Editora escolar, Maputo, Moçambique.

MIRANDA, L.B.D.; CASTRO, B.M.D.; KIJERFVE, B.; (2002), *Princípios de oceanografia física de estuários*. Ed.USP. 411. São Paulo, Brasil.

MUSSA A., (2002). *Sediment and Geochemistry of the recent sediments in Maputo bay, Mozambique*. Tese de doutorado em Geologia Física pela. Universidade de Estocolmo, Suécia.

NEDECO. (1982). *Final Report of Bathymetric Surveys and Hydraulic Measurements. Beira Port Study*, Caminhos de Ferro de Moçambique Centro, Maputo, Moçambique.

**NORTEK AS**, (2004). *Acoustic Wave and Current Meter (Awac)*. User Guide, Doc. No N3000-126, . Vangkroken 2. NO-1351 RUD Norway.

NZUALO, T.N.M., (2010). *Estudo hidrodinâmico e ambiental do Estuário da Beira – Moçambique*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Costeira e Oceânica. UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

PERILLO, G.M, SEQUEIRA E. e MARIO E., (1989), *Geomorphologic and sediment transport characteristics of the Middle Reach of the Bahia Blanca Estuary. (Argentina)*.

PICKARD, G.L; WILLIAM J.L., (1983). *Descriptive Physical Oceanography. An Introduction*. UNS.

SWECO & Associates, (2004), *Anexo VI, Qualidade da Água e Transporte de Sedimentos*, Maputo, Moçambique.

VIEIRA DA SILVA, R. C. e WILSON-JR., G. (2005). *Hidráulica Fluvial*, Volume II, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

### **Websites**

<http://www.google.com> - Púngué River - Wikipedia, the free encyclopedia. mht. Extraído em 16/11/2010.

<http://www.google.com> - Imagens do Estuario da Beira. Extraído em 2009 e 2010.

<http://www.ine.gov.mz/censo2007/rdcenso09/Sofala/pts/q2> - INE, (2009), Instituto Nacional de Estatística. *Censo 2009*. Extraído em 21 de Janeiro de 2010.

<http://www.springerlink.com/content/m0232n> - *Encyclopedia of Coastal Science*. Washington, WA, USA, Springer, pp. 987 - 996. Extraído em: 20 julho de 2008.

## **11. Anexos**

### **Anexo A**

Coordenadas das estações de medição dos levantamentos de 2006, 2009, e 2010.

**Tabela A.7:** Coordenadas das estações de medição de condutividade temperatura e pressão na Baía de Sofala (Março de 2006).

Secção	Estação	Latitude (S)	Longitude (E)	Hora da Medição	Data
A	A1	19°49'26.00"	34°49'51.36"	08:23	8/3/2006
	A2	19°49'53.00"	34°49'01.00"	08:38	
	A3	19°50'12.00"	34°48'52.00"	08:53	
	A4	19°50'24.00"	34°47'58.00"	08:59	
	A5	19°50'52.00"	34°47'30.00"	09:08	
	A6	19°50'56.00"	34°47'12.00"	09:17	
B	B1	19°50'34.00"	34°49'38.00"	10:50	
	B2	19°50'38.00"	34°49'25.00"	10:45	
	B3	19°50'54.00"	34°48'52.00"	10:32	
	B4	19°51'13.00"	34°48'24.00"	10:30	
	B5	19°51'26.00"	34°47'56.00"	10:23	
	B6	19°51'32.00"	34°47'37.00"	10:17	
	B7	19°52'02.00"	34°46'45.00"	10:00	
C	C1	19°51'08.00"	34°49'40.00"	12:20	9/3/2006
	C2	19°51'23.00"	34°49'9.00"	12:14	
	C3	19°51'39.00"	34°48'42.00"	12:10	
	C4	19°51'52.00"	34°48'15.00"	12:04	
	C5	19°52'04.00"	34°47'54.00"	11:56	
	C6	19°52'28.00"	34°47'07.00"	11:46	
	C7	19°52'57.00"	34°46'11.00"	11:22	
D	D1	19°51'43.00"	34°51'42.00"	09:20	
	D2	19°52'17.00"	34°50'32.00"	09:33	
	D3	19°52'38.00"	34°49'51.00"	09:43	
	D4	19°52'56.00"	34°48'25.00"	10:03	
	D5	19°53'41.82"	34°46'52.17"	10:43	
	D6	19°53'51.60"	34°46'28.37"	10:52	
	D7	19°54'07.34"	34°45'56.75"	11:03	
E	E1	19°50'12.00"	34°48'52.00"	08:53	8/3/2006
	E2	19°50'54.00"	34°48'52.00"	10:32	8/3/2006
	E3	19°51'39.00"	34°48'42.00"	12:10	9/3/2006
	E4	19°52'38.00"	34°49'51.00"	09:43	9/3/2006

**Tabela A.8:** Coordenadas das estações de medição de condutividade, temperatura e pressão na Baía de Sofala (Junho de 2006).

Seção	Estação	Latitude (S)	Longitude (E)	Hora de Medição	Data
A	A1	19°49'26.00"	34°49'51.36"	13:15	10/6/06
	A2	19°49'53.00"	34°49'01.00"	14:43	
	A3	19°50'12.00"	34°48'52.00"	14:00	
	A4	19°50'24.00"	34°47'58.00"	14:09	
	A5	19°50'52.00"	34°47'30.00"	14:17	
	A6	19°50'56.00"	34°47'12.00"	14:22	
B	B1	19°50'34.00"	34°49'38.00"	15:28	06/8/06
	B2	19°50'38.00"	34°49'25.00"	15:48	
	B3	19°50'54.00"	34°48'52.00"	15:58	
	B4	19°51'13.00"	34°48'24.00"	16:10	
	B5	19°51'26.00"	34°47'56.00"	16:19	
	B6	19°51'32.00"	34°47'37.00"	16:23	
	B7	19°52'02.00"	34°46'45.00"	16:44	
C	C1	19°51'08.00"	34°49'40.00"	11:04	06/8/06
	C2	19°51'23.00"	34°49'09.00"	11:18	
	C3	19°51'39.00"	34°48'42.00"	11:36	
	C4	19°51'52.00"	34°48'15.00"	11:42	
	C5	19°52'04.00"	34°47'54.00"	12:10	
	C6	19°52'28.00"	34°47'07.00"	12:24	
	C7	19°52'57.00"	34°46'11.00"	12:36	
D	D1	19°51'43.00"	34°51'42.00"	14:00	08/6/06
	D2	19°52'17.00"	34°50'32.00"	14:20	
	D3	19°52'38.00"	34°49'51.00"	14:40	
	D4	19°52'56.00"	34°48'25.00"	15:01	
	D5	19°53'41.82"	34°46'52.17"	15:20	
	D6	19°53'51.60"	34°46'28.37"	15:25	
	D7	19°54'07.34"	34°45'56.75"	15:30	
E	E1	19°50'12.00"	34°48'52.00"	14:00	10/6/06
	E2	19°50'54.00"	34°48'52.00"	15:58	09/6/06
	E3	19°51'39.00"	34°48'42.00"	11:36	08/6/06
	E4	19°52'38.00"	34°49'51.00"	14:40	08/6/06

**Tabela A.9:** Coordenadas das estações de medição de condutividade, temperatura e pressão, na Baía de Sofala (Maio de 2009).

Secção	Estação	Latitude (S)	Longitude (E)	Hora de Medição	Data
A	A1	19°41'34,52 "	34°41'26,27"	16:56	19/05/09
	A2	19°41'42,87 "	34°41'07,04"	17:02	
	A3	19°41'31,31 "	34°40'48,38"	17:08	
B	B1	19°43'32,13 "	34°41'46,99"	17:32	19/05/09
	B2	19°43'47,08 "	34°41'18,10"	17:39	
	B3	19°44'02,28 "	34°40'49,20"	17:44	
C	C1	19°44'57,76 "	34°46'08,96"	12:59	20/05/09
	C2	19°45'17,28 "	34°45'34,92"	13:13	
	C3	19°45'33,25 "	34°45'10,97"	13:26	
	C4	19°45'59,23 "	34°44'32,71"	13:40	
D	D1	19°48'02,07 "	34°49'40,06"	14:59	20/05/09
	D2	19°48'25,00 "	34°48'43,41"	15:16	
	D3	19°48'47,33 "	34°48'00,44"	15:32	
	D4	19°49'18,71 "	34°46'32,34"	15:55	
E	E1	19°50'38,99 "	34°49'45,13"	11:36	19/05/09
	E2	19°51'14,43 "	34°48'03,10"	11:16	
	E3	19°51'55,02 "	34°46'05,94"	10:51	
F	F1	19°51'10,16 "	34°51'13,45"	9:33	19/05/09
	F2	19°51'46,58 "	34°49'32,98"	9:54	
	F3	19°52'16,67 "	34°48'02,57"	10:13	
	F4	19°53'07,75 "	34°45'47,09"	10:41	

G	G1	19°50'40,22 "	34°55'13,32"	14:05	23/05/0 9
	G2	19°53'20,37 "	34°52'16,17"	13:16	
	G3	19°55'28,52 "	34°46'48,09"	11:47	
H	H1	19°47'00,46 "	35°03'03,94"	11:25	22/05/0 9
	H2	19°50'55,58 "	34°58'13,02"	13:05	
	H3	19°54'35,84 "	34°53'38,99"	14:06	
	H4	19°59'43,17 "	34°47'07,51"	10:57	

**Tabela A.10:** Coordenadas das estações de medição de temperatura salinidade e profundidade com o salinometro no rio Búzi (Julho de 2010).

Estações	Data	Hora	Lat. (S)	Long. (E)	Profundidade. (m)
A-1	7 <sup>30/0</sup>	6:00	19°51,668'	34°45,969'	3,0
			19°51,668'	34°45,969'	1,5
			19°51,668'	34°45,969'	0,2
B-2	7 <sup>30/0</sup>	6:17	19°52,823'	34°44,460'	3,0
			19°52,823'	34°44,460'	1,5
			19°52,823'	34°44,460'	0,2
C-3	7 <sup>30/0</sup>	6:43	19°53,938'	34°43,568'	2,6
			19°53,938'	34°43,568'	1,3
			19°53,938'	34°43,568'	0,2
D-4	7 <sup>30/0</sup>	6:58	19°53,592'	34°41,109'	3,0
			19°53,592'	34°41,109'	1,5
			19°53,592'	34°41,109'	0,2
E-5	7 <sup>30/0</sup>	7:11	19°54,886'	34°40,154'	2,9
			19°54,886'	34°40,154'	1,5
			19°54,886'	34°40,154'	0,2
F-6	7 <sup>30/0</sup>	7:22	19°54,742'	34°38,435'	3,5
			19°54,742'	34°38,435'	1,75
			19°54,742'	34°38,435'	0,2
G-7	7 <sup>30/0</sup>	7:35	19°53,592'	34°36,677'	3,0
			19°53,592'	34°36,677'	1,5
			19°53,592'	34°36,677'	0,2
H-8	7 <sup>30/0</sup>	7:46	19°52,974'	34°35,238'	3,5
			19°52,974'	34°35,238'	1,7
			19°52,974'	34°35,238'	0,2

## **Anexo B**

Processos Erosivos observados ao longo da costa Noroeste do Estuário da Beira



Figuras B.1: Destruição de habitações



Figuras. B. 2: Destruição das praias



Figuras. B.3: Destruição de quebra correntes.



Figuras B.4: Extração de areias, na zona de deposição de sedimentos (Clube Palmeiras da Beira).



Figuras B.5: Extração de areias, na zona de deposição de sedimentos (Clube Palmeiras da Beira) para fins de construção e aterros nos arrozais.



Figuras B.6: Devastação dos manguezais para fins comerciais.



Figuras B.7: Exploração do metal existente nas barreiras criadas para a proteção costeira, para fins de construção e venda respectivamente.

## **Anexo C**

Equipamento usado durante a campanha e equipa técnica.

**Equipamento usado e técnicos que participaram no levantamento Oceanográfico de 2009.**



Montagem do AWAC no suporte para o ancoramento



Embarcações usadas durante a campanha.



Mergulhador de serviço, CTD e Mestre de embarcação.



Mergulhador e equipa técnica.



Bóia de Sinalização do AWAC ancorado (vermelha) e do Canal de acesso ao Porto da Beira (verde).



Operador de GPS e CTD