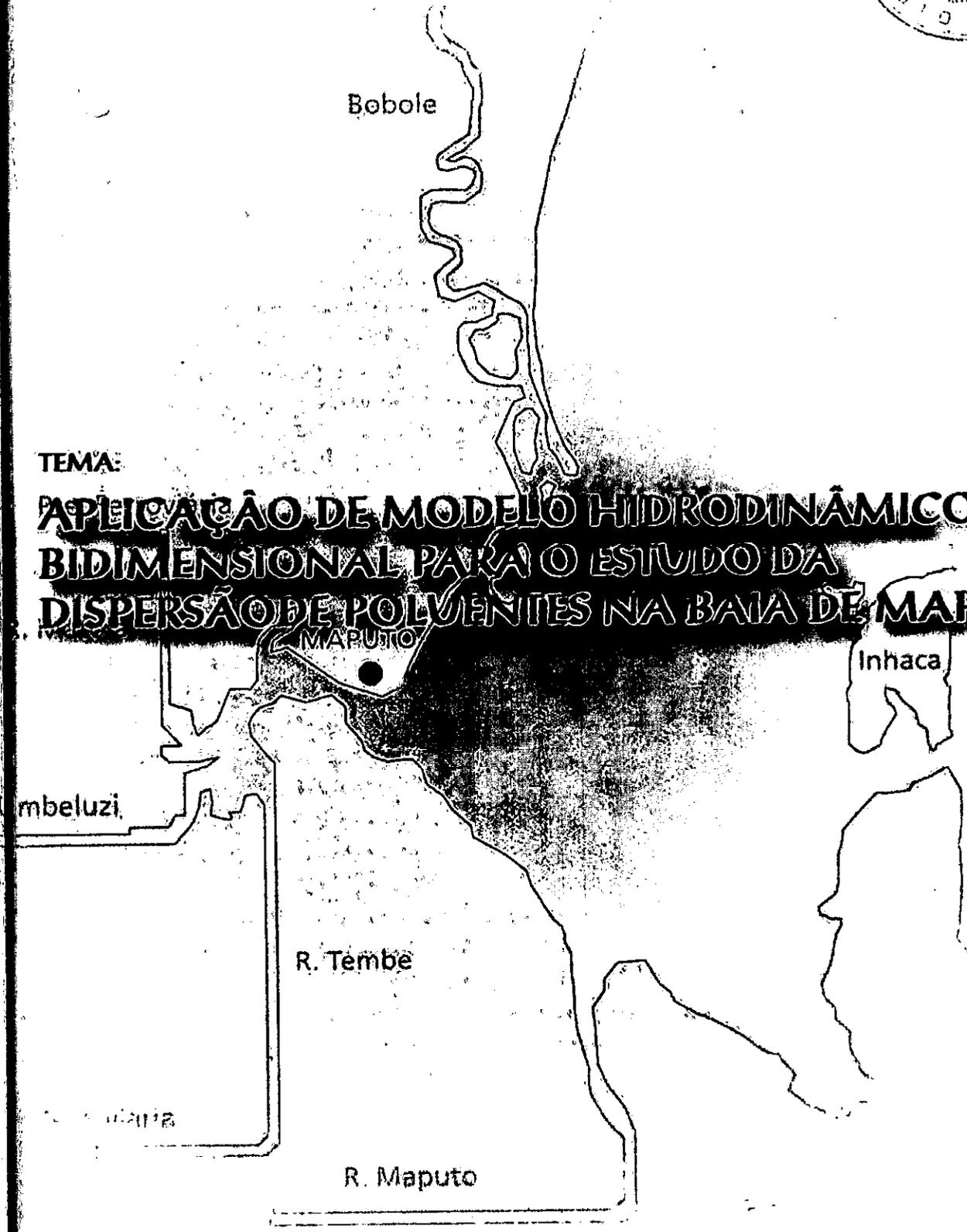




TRABALHO DE LICENCIATURA

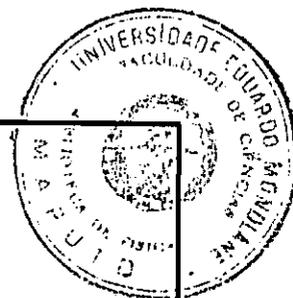
TEMA:
**APLICAÇÃO DE MODELO HIDRODINÂMICO
BIDIMENSIONAL PARA O ESTUDO DA
DISPERSÃO DE POLVENTES NA BAIJA DE MAPUTO**



AUTOR:
ALBERTO MANUEL WAITE MAGALHÃES



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA



Trabalho de Licenciatura

APLICAÇÃO DE MODELO HIDRODINÂMICO
BIDIMENSIONAL PARA O ESTUDO DA
DISPERSÃO DE POLUENTES
NA BAÍA DE MAPUTO

Autor:

Alberto M. W. Magalhães

Curso: Oceanografia

Supervisor:

Dr. Fernando Víctor Saíde

Co-Supervisor:

Dr. Sinibaldo Canhanga

Maputo, Maio de 2005

AGRADECIMENTOS

- Em primeiro lugar, agradeço à Deus, meu guia e protector!
- Um obrigado muito especial aos meus supervisores, *Dr. Fernando Víctor Saíde* e *Dr. Sinibaldo Canhanga*, pelo suporte material e moral em todas as etapas do trabalho e pelo empenho por eles dado.
- Agradecimento especial vai à Cátedra de Ciências Marinhas e Oceanografia, pelo apoio material colocado à minha disposição.
- Aos docentes do departamento de Física, e em particular aos do curso de Oceanografia, e muito especialmente ao *Dr. Mavume* por todo apoio prestado.
- Ao pessoal do *IMAF* - Instituto Nacional do Mar e Fronteiras, e em particular ao *Eng^o Eugénio J. Muianga*, o meu muito obrigado pelo suporte moral e material e pelas valiosas ideias e sugestões.
- À todos colegas desta caminhada, desde o começo no *BUSCEP*, aqui vai o meu grande apreço.
- Um obrigado muito especial ao *Armindo da Silva* do Departamento de Geografia da *UEM*, e ao *Edmundo Cândido* da faculdade de Arquitectura da *UEM*, pela colaboração.
- Aos amigos e colegas, em especial ao *Fernando Chiluvane* e *Fialho Nehama*, vai um obrigado especial pelo suporte material por eles prestado.
- À minha mãe, *Maria Virgínia Magalhães* e à minha avô *Julieta*, pela presença constante em todos os momentos.
- Aos meus irmãos *Hélder* e *Cidália*, tios e primos, *o vosso amor não tem preço!*
- Aos meus amigos, *Joel, Alves, Gisela, Olga, Cícera, Regina*, e outros que não pude mencionar os nomes, que sempre me deram força e vontade de andar para a frente, o meu *obrigado pela força!*
- À todos que directa ou indirectamente estiveram envolvidos nas várias fases do trabalho, dizer que não encontro palavras para expressar minha gratidão.

Alberto Manuel Waite Magalhães

DEDICATÓRIA

*Às memórias do meu pai Manuel Waite Condes,
do meu avô Alberto J. Magalhães,
e de meus tios José Manuel Magalhães
e Maria Fernanda Magalhães.*

DECLARAÇÃO DE HONRA

O presente trabalho foi realizado com base no material que ao longo do mesmo se faz referência. Todas ideias originais nele contidas, são da inteira responsabilidade do autor.

Maputo, Maio de 2005

O autor

ALBERTO MANUEL WAITE MAGALHÃES

(Alberto Manuel Waite Magalhães)

RESUMO

Neste trabalho foi analisado o fenómeno da dispersão de partículas passivas emitidas a partir de zonas seleccionadas da Baía de Maputo, considerando em simultâneo a acção forçadora dos ventos predominantes, dos caudais dos rios e das marés registadas na Baía, com o objectivo de contribuir para o conhecimento da trajectória e do destino das partículas depositadas ao longo da Baía.

O trabalho consistiu na aplicação de um modelo hidrodinâmico bidimensional desenvolvido por *J. J. Leendertse e E. C. Grifon (1971)*, e acoplou-se ao modelo um módulo Lagrangeano de transporte de partículas.

Efectuou-se a simulação pelo uso do modelo em duas fases, considerando as estações de Verão e Inverno, num período de 15 dias de simulações para cada fase. Foram utilizados dados de caudais, ventos e níveis de água para o ano de 2002. Considerou-se o mês de Fevereiro para representar a estação de Verão, onde foram considerados os forçadores para este período, e o mês de Junho como representante da estação de Inverno.

Determinou-se a trajectória das partículas a partir de cinco zonas seleccionadas para emissão de tais partículas, e foi analisado o comportamento da evolução da sua trajectória.

Os resultados indicam que, no ciclo da maré de aproximadamente 12 horas quase todas as partículas ainda continuavam dentro da Baía, pressupondo-se que durante a vazante as partículas são transportadas para o exterior da Baía e na enchente para o interior da Baía.

Observou-se que para uma escala temporal superior ao ciclo da maré, o fenómeno da dispersão é mais significativo no centro da Baía, na zona do estuário do Espírito Santo e nas zonas próximas à foz dos rios.

Lista de Abreviaturas Usadas

<i>ADI</i>	Alternating Direction Implicit.
<i>DNA</i>	Direcção Nacional de Águas.
<i>IIP</i>	Instituto de Investigação pesqueira.
<i>INAHINA</i>	Instituto Nacional de Hidrografia e Navegação.
<i>INAM</i>	Instituto Nacional de Meteorologia.
<i>NE</i>	Nordeste (exemplo: Vento de Nordeste).
<i>SE</i>	Sudeste (exemplo: Vento de Sudeste).
<i>UEM</i>	Universidade Eduardo Mondlane.

ÍNDICE

I. INTRODUÇÃO E OBJECTIVOS	1
1.1. Introdução	1
1.2. Objectivos	4
1.3. Caracterização da Área de Estudo	4
II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1. Modelação matemática de processos físicos	11
2.1.1. Componentes de um modelo	11
2.1.2. Algumas bases para a construção de um modelo	12
2.2. Equações hidrodinâmicas fundamentais	13
2.2.1. Aproximação hidrostática	16
2.2.2. Aproximação de águas pouco profundas	17
2.3. Formulação matemática do modelo hidrodinâmico bidimensional	17
2.3.1. O modelo Utilizado	18
2.4. Transporte Lagrangeano de Partículas	19
2.4.1. O módulo Lagrangeano de trajectória de partículas	19
III. DADOS	21
3.1. Dados de caudais	21
3.2. Dados de ventos	23
3.3. Dados de marés	24
IV. METODOLOGIA	26
4.1. Calibração do modelo	27
4.2. Zonas de emissão de partículas	28
4.3. Condições de fronteira	28

V. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
5.1. Padrão da trajectória das partículas.....	30
VI. CONCLUSÕES	36
VII. RECOMENDAÇÕES	37
VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

I. INTRODUÇÃO E OBJECTIVOS

1.1. Introdução

As zonas costeiras são regiões sensíveis à mudanças morfológicas e muito vulneráveis a processos costeiros. O homem tem procurado explorar os recursos costeiros cada vez mais intensamente, provocando a degradação da qualidade destas áreas.

Estas zonas são importantes porque actuam como “ponte” de ligação no transporte de substâncias entre a terra e o oceano. Também são zonas importantes do ponto de vista económico, pela diversidade de recursos marinhos.

Os sistemas costeiros desempenham um papel fundamental ao nível da ecologia, através dos complexos processos físicos que ocorrem, proporcionando elevada produtividade biológica e abrigo para muitas espécies. Existe cada vez mais uma maior consciencialização dos impactos negativos sobre esses ecossistemas provocados pela introdução de substâncias que possam alterar o seu funcionamento normal, e também do potencial toxicológico que a contaminação provocada por essas substâncias representa para as espécies marinhas e também para os humanos. Ao longo das últimas décadas a comunidade internacional tem virado a atenção para o problema crítico, em termos de qualidade de água, que representa a entrada de poluentes de origem industrial, agrícola ou urbana nas bacias e os mecanismos que influenciam a sua circulação nestes meios. Muitos destes sistemas encontram-se sujeitos a contaminações crónicas, devido a descargas contínuas ao longo de décadas. Este tipo de contaminação não apresenta geralmente efeitos visíveis, mas, por ser tão disseminado e por ocorrer de forma regular, pode ser mais importante numa escala global e/ou a longo prazo do que outros eventos de poluição, mais visíveis e com mortalidades localizadas (Boeker e Van Groendle, 1995).

A Baía de Maputo (*figura 1*) faz parte de um dos mais importantes sistemas costeiros da zona Sul de Moçambique. Tem uma importância económica e histórica relevante, e localiza-se nas proximidades das cidades de Maputo e Matola, a maior cidade e a maior zona industrial de Moçambique, respectivamente.

A Baía é uma região com elevada produtividade, suportando importantes pescarias (*Barata et al, 2000*). Esta produtividade pode estar associada ao facto de nela desembocarem três grandes rios, o Incomáti à Norte, o Umbeluzi à Oeste que, em conjunto com os afluentes Tembe e Matola, se juntam no Estuário do Espírito Santo, e o rio Maputo à Sul. Algumas espécies de camarão, que é o recurso de maior importância económica explorado na Baía de Maputo, têm um ciclo de vida que depende dos fluxos e da qualidade da água dos rios que desaguam na área de sua concentração (*Hoguane et al, 2002*).

O desenvolvimento industrial, urbano e turístico à volta da Baía de Maputo tem resultado em problemas ambientais, sendo um deles, a poluição das suas águas.

As principais causas da poluição na Baía de Maputo, estão relacionadas com o desenvolvimento industrial cada vez crescente nas áreas circunvizinhas da Baía, a formação de grandes aglomerados urbanos nas áreas de Maputo, Matola e Machava, a prática de actividades agro-pecuárias nas áreas próximas aos rios Maputo, Incomáti, Umbeluzi, Matola e Tembe.

A Baía de Maputo também apresenta indícios de poluição de origem portuária motivada por várias actividades nas suas águas e principalmente pelas actividades levadas a cabo na zona portuária, como o manuseamento de combustíveis, óleos e outras substâncias que podem contribuir para baixar a qualidade da água.

Neste estudo pretende-se fazer uma abordagem sobre os poluentes em termos da sua evolução espaço-temporal para estudar a sua dispersão nas águas da Baía de Maputo. Os poluentes em causa podem resultar das várias actividades realizadas nas proximidades da Baía, e faz-se uma avaliação da trajectória de partículas passivas a partir de locais seleccionados como zonas de emissão de partículas. Para isso, utiliza-se um modelo hidrodinâmico bidimensional integrado na vertical, ao qual acopla-se um módulo Lagrangeano de trajectória de partículas.

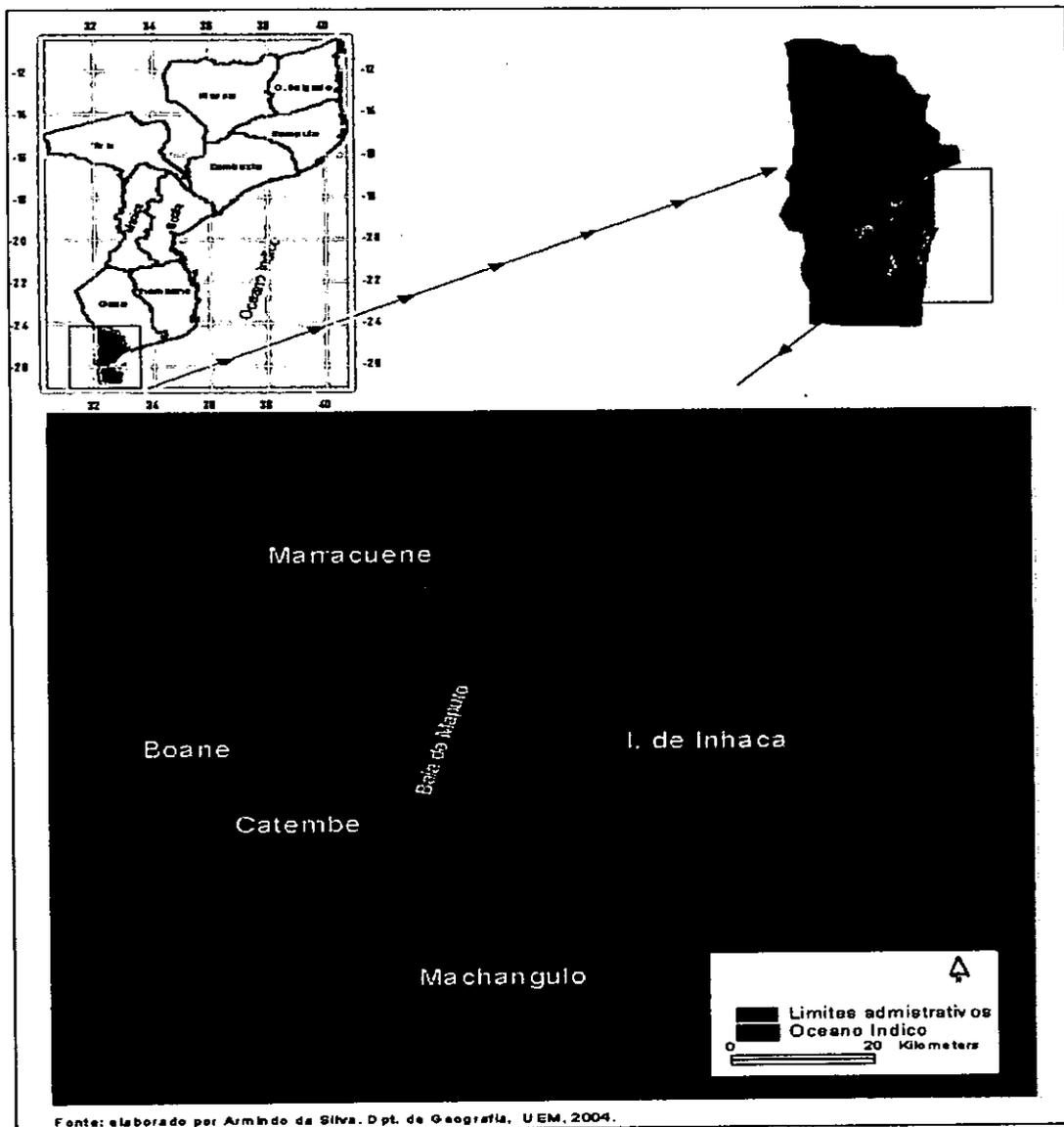


Figura 1: Localização da Baía de Maputo.

1.2. Objectivos

Este trabalho tem como objectivo geral a aplicação de um modelo hidrodinâmico bidimensional para estudar o fenómeno da dispersão de poluentes conservativos na Baía de Maputo.

E tem como objectivos específicos:

- Identificar os forçadores da hidrodinâmica da Baía de Maputo.
- Compreender a influência simultânea dos forçadores na trajectória de partículas poluentes na Baía.
- Prever o destino das partículas poluentes a partir das zonas de emissão.

1.3. Caracterização da área de estudo

O estudo realiza-se na Baía de Maputo (*figura 1*). A Baía é um ambiente costeiro relativamente complexo e muito rico em ecossistemas marinhos e importante para pescaria, turismo, recreação e navegação. Pequenos rios fornecem água doce à Baía e as marés são semidiurnas (*Hoguane e Nhapulo, 2002*).

Localização

A Baía encontra-se na parte sul de Moçambique, entre as latitudes 25° 55' S e 26° 10' S e as longitudes 32° 40' E e 32° 55' E (*Hoguane e Nhapulo, 2002*). Tem uma área de cerca de 1875 km² (75 km de comprimento e 25 km de largura), conectando-se com o Oceano Índico do lado Norte. Está limitada do lado Leste pelas Ilhas dos Portugueses e da Inhaca e pela Península de Machangulo. Estas ilhas constituem uma barreira natural que protege a Baía do oceano.

Clima

A Baía está situada numa região com clima subtropical, caracterizado por duas estações, chuvosa e seca (Kalk, 1995). A estação chuvosa vai desde Outubro a Março, enquanto que a estação seca ocorre de Abril a Setembro. A média anual de precipitação é de cerca de 1100 mm (Hoguane et al, 2002). A temperatura média anual é cerca de 31° C, no Verão e 24° C, no Inverno. A temperatura atmosférica mais alta registada num período de 30 anos foi de cerca de 44° C (Janeiro de 1980) e a mais baixa foi 8.6° C (Junho de 1984) (Hoguane et al, 2002).

Neste trabalho considerou-se a estação de Verão como estando compreendida de Outubro a Março, e o Inverno de Abril a Setembro.

Topografia e Hidrologia da Baía

De um modo geral, a Baía é pouco profunda, somente 1/5 da sua área tem profundidade maior do que 10 m (medida à maré baixa) (Kalk, 1995). A metade do Sul da Baía tem menos do que 5 m de profundidade. Existem vários bancos de areia e canais; o fundo é arenoso do lado Leste onde liga ao mar, e lodoso do lado Oeste (Hoguane et al, 2002).

Circulação da Baía de Maputo

O padrão de circulação da Baía é horário. Portanto, as águas do lado Ocidental não se propagam facilmente para o lado Oriental, o que ajuda a distinguir as duas massas de água. Segundo *Hoguane et al* (2002), foram identificadas duas massas distintas na Baía:

- águas estuarinas, no lado Ocidental;
- águas oceânicas, no lado Oriental.

(a) *Os Caudais dos rios*

Na Baía de Maputo drenam 5 rios (*Figura 2*), no lado Norte o rio Incomáti, no lado Noroeste o Umbelúzi, Tembe e Matola, e no lado Sudeste o rio Maputo. Os rios Umbelúzi, Tembe e Matola juntam-se no Estuário do Espírito Santo antes de alcançar a Baía. Os rios com caudais relativamente mais altos são: Maputo, Incomáti e Umbelúzi. A média mensal da descarga dos rios varia de 10 m³/s até 800 m³/s onde a descarga mais elevada ocorre no Incomáti, enquanto que a mais baixa ocorre no rio Umbelúzi.

Existem ainda pequenos rios, canais, pântanos e mangais. Em condições normais os maiores caudais têm-se verificado no verão.

Existem dados sobre os caudais médios mensais dos rios para o período compreendido entre 1931 a 1960. A *tabela I* e o *gráfico I*, mostram o comportamento dos caudais médios mensais dos rios ao longo desse período.

Tabela 1 – Caudais médios mensais nas fozes dos rios (m³/s) no período de 1931-1960.

Mês (1931-1960)	Caudais (m ³ /s)				
	Maputo	Tembe	Umbeluzi	Matola	Incomáti
Janeiro	188.96	6.16	30.0	3.26	197.13
Fevereiro	242.95	8.13	37.0	4.19	260.19
Março	134.97	4.29	21.0	2.33	137.40
Abril	80.98	2.70	11.5	1.40	86.42
Maio	60.74	2.00	9.0	1.05	64.16
Junho	43.87	1.47	6.7	0.76	47.16
Julho	40.49	1.39	6.0	0.70	44.32
Agosto	37.12	1.28	5.5	0.64	40.96
Setembro	33.74	1.93	5.0	0.58	61.73
Outubro	47.24	2.05	7.7	0.81	65.71
Novembro	67.49	2.70	11.0	1.16	86.42
Dezembro	134.97	4.29	22.3	2.33	137.40

Fonte: HIDROPROJECTO (IIP, 2000)

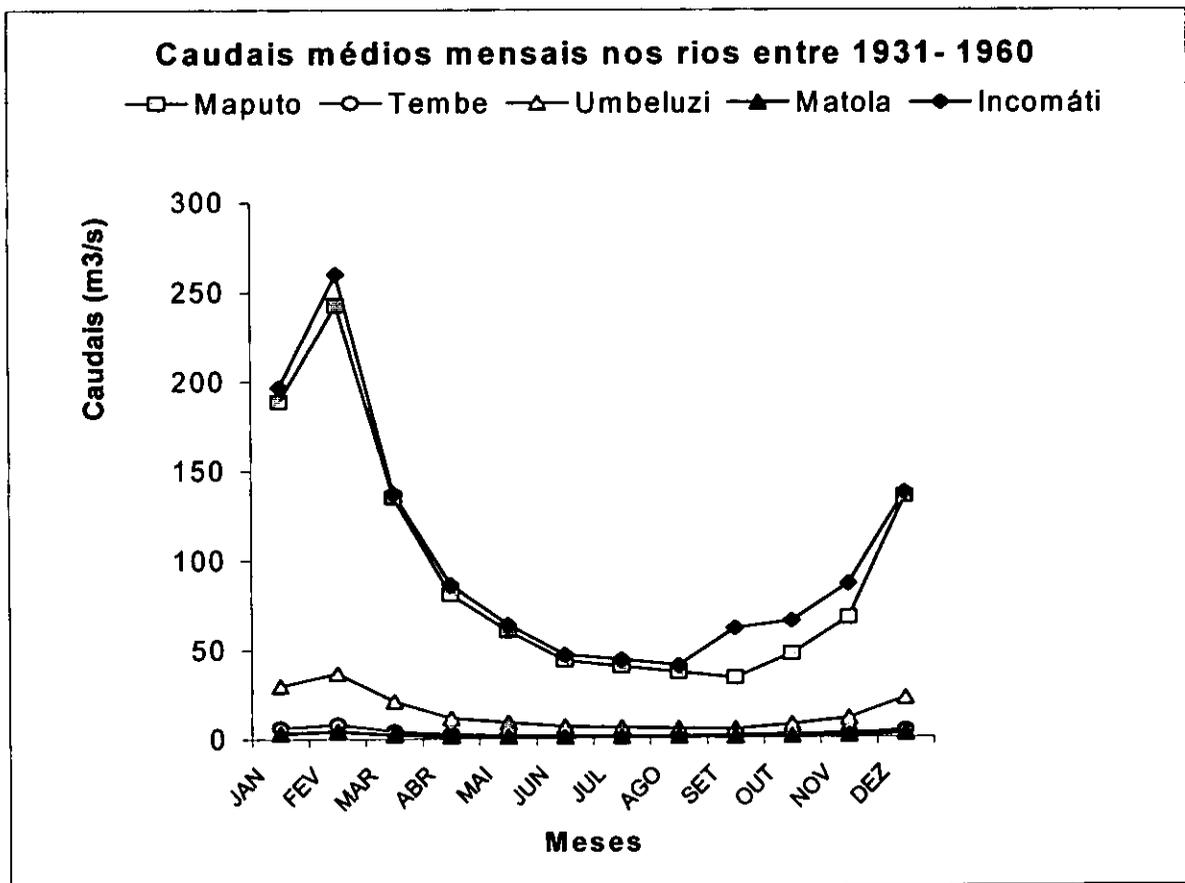


Gráfico 1: Caudais médios mensais nas fozes dos rios (m^3/s) no período de 1931-1960.

A variabilidade das precipitações determina em grande medida os caudais nos rios (*Matarira e Unganai, 1994*).

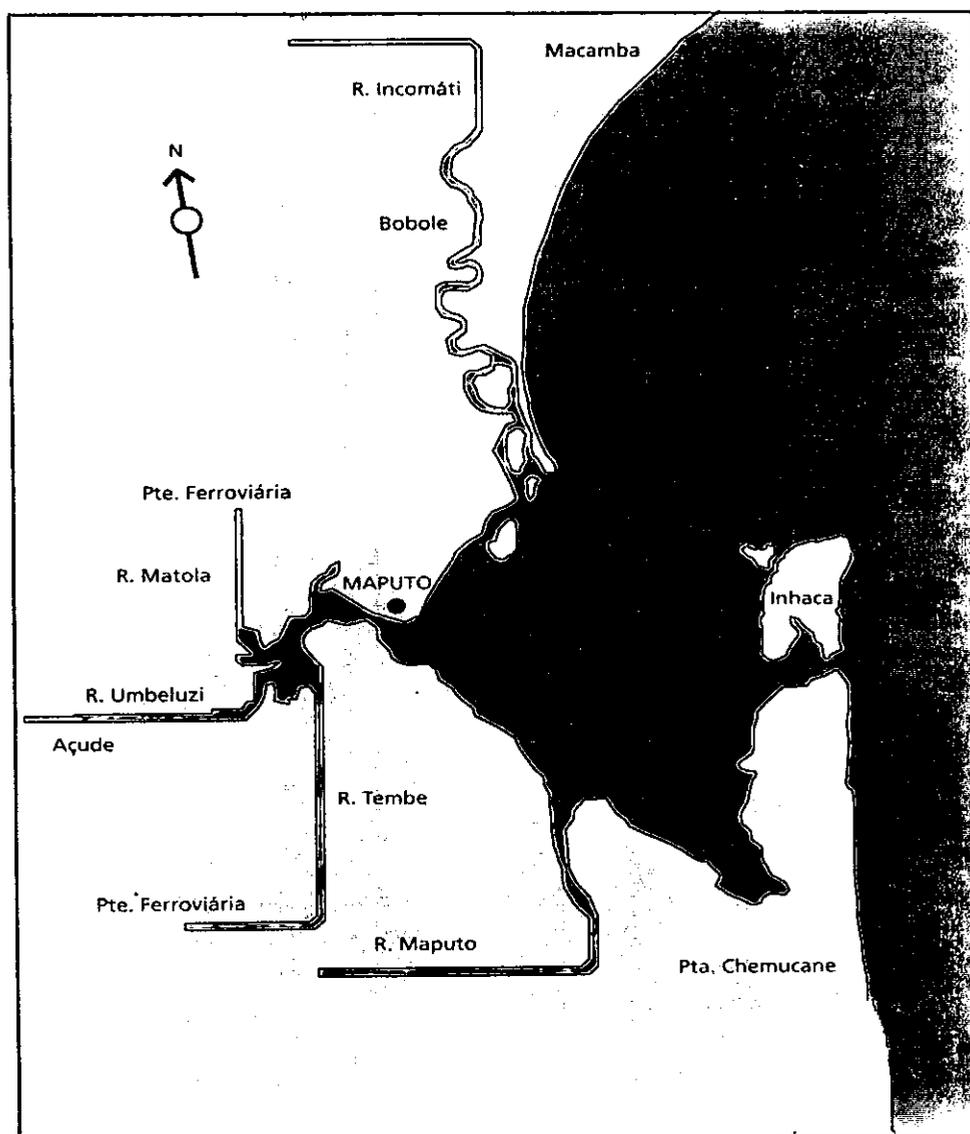


Figura 2: Os rios que drenam na Baía de Maputo.

(b) Os ventos

O sistema de ventos na Baía responsável pelas correntes à superfície do mar, juntamente com outros factores como marés, influenciam a circulação da Baía e pode determinar o transporte e distribuição de diferentes espécies marinhas. Os ventos predominantes são os de Sudeste (SE), ocorrendo também os de Nordeste (NE). A média mensal da velocidade do vento é de

cerca de 2 m/s, no Inverno e 4 m/s, no Verão. Os ventos são fracos entre os meses de Março e Julho (*Hoguane et al, 2002*).

Os ventos do quadrante Sul, os mais predominantes na Baía, deslocam a água para o lado Ocidental da Baía, fazendo aumentar o nível de água neste lado, a força de pressão resultante origina a deslocação de água para o lado Oriental (*Hoguane et al, 2002*).

A intensidade, frequência e direcção dos ventos podem ser obtidos através de registos climatológicos feitos na Estação de Maputo e podem constituir informação de base para o conhecimento sobre as condições de vento à superfície.

Na *tabela 2* podem ser vistos, a frequência e as intensidades médias dos ventos em Maputo no período compreendido entre 1931 a 1960.

Tabela 2 – Frequência e intensidade médias anuais dos ventos em Maputo (1931-1960)

Rumo	Frequência (%)	Intensidade (km/h)
N	11.58	15.7
NE	17.46	15.8
E	21.43	14.2
SE	13.28	15.2
S	16.26	17.8
SW	9.55	14.4
W	3.18	9.5
NW	6.20	13.4
CALMAS	1.06	-

Fonte: HIDROPROJECTO (IIP, 2000).

Os dados da *tabela 2* foram registados por um período de 30 anos e pode-se observar que os ventos de Leste (*E*) foram os mais frequentes neste mesmo período, com uma frequência de 21.43% e intensidade na ordem dos 14.2 km/h e seguidos dos ventos de Nordeste (*NE*) com uma frequência de 17.46% e intensidade na ordem dos 15.8 km/h.

Estes constituem dados históricos (climatológicos) de um dado período e podem ajudar a fazer uma análise comparativa com outros valores obtidos num certo período, por exemplo, com os de 2002 como no presente caso, de modo a verificar se esses valores encontram-se dentro do intervalo dos valores típicos.

(c) *As Marés*

As marés que ocorrem na Baía de Maputo são semi-diurnas e as componentes de maré mais importantes para essa região são as semidiurnas, nomeadamente M_2 e S_2 (Nehama, 2004). Geralmente na maré viva a elevação atinge cerca de 3 metros enquanto que na maré morta a elevação atinge valores por volta dos 2.3 metros. É também de levar em consideração que o período entre duas marés vivas ou mortas é de aproximadamente 15 dias e o período entre a maré viva e a morta consecutivamente é de aproximadamente 7 dias.

De acordo com a descrição feita sobre as características hidrológicas e morfológicas da Baía de Maputo, concluiu-se que a maior parte dela é pouco profunda, com profundidades que variam entre 1 e 35 metros (Canhanga, 2004). Estudos recentes realizados na Baía de Maputo, revelaram que de acordo com os padrões de salinidade e temperatura a Baía poderá ser considerada como verticalmente homogénea e que horizontalmente, em épocas chuvosas como também em anos com prolongada estação chuvosa, ou ainda em anos de ocorrência de cheias, são notáveis gradientes horizontais de salinidade e temperatura que dividem a Baía em duas áreas distintas: uma estuarina, e outra com características oceânicas.

Assim, a caracterização da área de estudo permitiu identificar os principais forçadores da hidrodinâmica da Baía de Maputo e ditou a utilização de um modelo hidrodinâmico bidimensional integrado verticalmente. Deste modo, foram identificados como forçadores mais importantes da hidrodinâmica da Baía de Maputo, os caudais dos rios, a intensidade e direcção dos ventos e as marés, e os mesmos foram utilizados como as variáveis forçadoras para o modelo.

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Modelação matemática de processos físicos

O estudo e desenvolvimento da modelação matemática em águas pouco profundas tem vindo a ser nos últimos tempos assunto de interesse. Dada à complexidade dos processos envolvidos tem-se verificado uma tendência cada vez crescente de investigação nessa área com o objectivo de se atingir um nível maior de compreensão. Há modelos que já atingiram um nível bastante apreciável de compreensão e utilização, como é o caso dos modelos bidimensionais verticalmente integrados (*2DH*). Os modelos bidimensionais podem ser utilizados como uma importante ferramenta para o estudo da hidrodinâmica em ambientes costeiros (*Cheng e Walters, 1982*).

Uma das mais importantes considerações na modelação é a identificação das escalas temporais e espaciais do fenómeno que se pretende estudar. Outra consideração importante é a compatibilidade que deve existir entre a modelação e as medições.

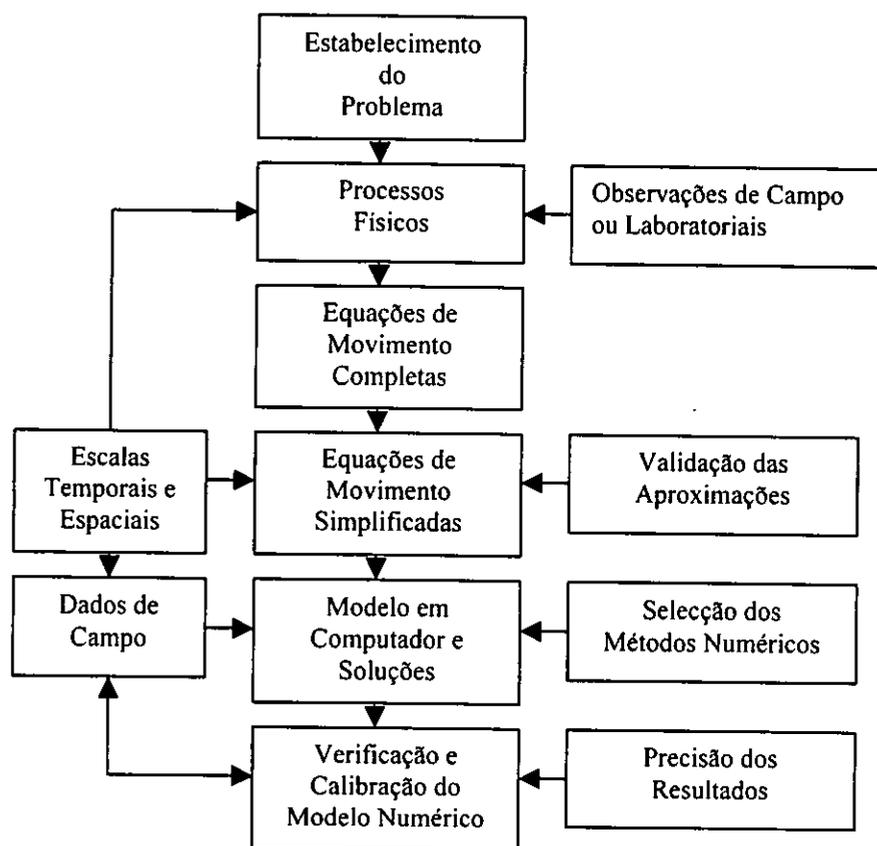
2.1.1. Componentes de um modelo

Em geral, um modelo possui as seguintes componentes:

- *Variáveis de estado*: que descrevem o estado do sistema num determinado instante.
- *Parâmetros*: constantes que sumarizam uma parte do sistema sem o modelarem explicitamente.
- *Fluxos*: representam as entradas e saídas de quantidade de variável estado por unidade de tempo.
- *Condições iniciais e de fronteira*: as condições iniciais definem o estado inicial das variáveis de estado; as condições de fronteira traçam limites ao comportamento do modelo.
- *Funções forçadoras*: funções que influenciam o modelo sem serem elas próprias influenciadas, isto é, processos fora do âmbito delineado.

2.1.2. Algumas bases para a construção de um modelo

Antes de se entrar em qualquer estudo de modelação é importante definir a natureza do problema e os objectivos do estudo de forma clara e concisa. Após a examinação do problema, delineiam-se os processos primários e secundários. Segundo *Cheng e Walters* (1982), uma maneira fácil de identificar os processos é classificar todos os mecanismos usados através das suas escalas temporais e espaciais, de acordo com o esquema apresentado no quadro 1.



Quadro 1: Esquema de desenvolvimento de um modelo em computador.

No estabelecimento das equações, começa-se por indicar os princípios de conservação de massa, de momento, e energia que constituem as equações básicas para descrever o problema hidrodinâmico que se pretende modelar, e depois estabelecer as escalas temporais e espaciais, bem como a validação das aproximações.

Depois segue-se a simulação do modelo em computador. Deve-se ter em conta que um modelo matemático constitui uma reconstrução aproximada dos fenómenos reais. As

aproximações e simplificações assumidas nas equações gerais, geram diferenças entre os resultados reais e computacionais, e para tornar o modelo mais próximo da realidade deve-se fazer a calibração. A calibração de um modelo é feita com o objectivo de investigar e melhorar a precisão dos resultados computacionais por comparação com os resultados observados.

2.2. Equações hidrodinâmicas fundamentais

O estudo do movimento da água em rios, lagos e estuários é de grande importância para a compreensão de muitos problemas ambientais porque muitos fenómenos ligados ao transporte são dependentes duma descrição exacta dos processos hidrodinâmicos. Há alguns anos, nos estudos em hidrodinâmica têm sido utilizados modelos em computador para ajudar a compreender processos hidrodinâmicos complicados. Os resultados de um modelo de computador consistem em soluções numéricas usando aproximações para as equações básicas do movimento para o escoamento do fluido (*Ferzig e Peric, 1999*).

As equações hidrodinâmicas que se pretendem descrever referem-se às ondas gravíticas de longo período, e para simplificação das equações, são feitas as seguintes assumções:

- O fluido é incompressível (a densidade da água do mar é constante, isto é, $\rho = \text{const.}$);
- O fluido é Newtoniano e anisotrópico;
- As acelerações e velocidades verticais são desprezíveis (ver em 2.2.1.);
- O equilíbrio é hidrostático (o balanço é dado entre a força de gravidade e o gradiente vertical de pressão).

No estudo da hidrodinâmica dos oceanos toma-se como base o estudo do movimento de uma camada fina de fluido estratificado que se encontra sobre a superfície da terra em rotação.

As principais leis físicas que governam este movimento são: lei de conservação de massa, lei de conservação de momento linear, equação de estado e leis termodinâmicas.

A conservação da massa é dada pela seguinte relação:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0 \quad (1)$$

A conservação do momento linear é representada da seguinte forma:

$$\frac{du}{dt} = -2\Omega(w \cos \varphi - v \sin \varphi) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{dv}{dt} = -2\Omega(u \sin \varphi) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\frac{dw}{dt} = 2\Omega(u \cos \varphi) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - g \quad (4)$$

Onde $\bar{u} = (u, v, w)$; ν é o coeficiente de viscosidade cinemática e φ é a latitude.

A densidade da água do mar tem relação com a pressão, temperatura e salinidade, e é dada pela equação de estado que tem a seguinte forma:

$$\rho = \rho(p, T, S) \quad (5)$$

A incompressibilidade do fluido, traduz-se na seguinte equação:

$$0 = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} \quad (6)$$

Assim, a equação de conservação da massa toma a seguinte forma:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

ou dizemos que:

$$\text{div}(\vec{u}) = 0 \quad (8)$$

Nas equações de conservação de momento linear podem ser operadas algumas simplificações, tomando em conta o domínio de aplicação a ser considerado.

O termo $2\Omega(w\cos\varphi)$ pode ser desprezado, nas latitudes médias, dado que a componente da velocidade vertical é muito pequena comparada com as componentes da velocidade horizontal.

As simplificações descritas para as equações de conservação do momento linear conduzem a um novo conjunto de equações, designadas equações de *Navier-Stokes*, que são representadas da seguinte forma:

$$\frac{du}{dt} = fv - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (9)$$

$$\frac{dv}{dt} = -fu - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (10)$$

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - g \quad (11)$$

Onde $f=2\Omega(\sin\varphi)$ é o parâmetro de Coriolis.

As equações acima descrevem a propagação da onda de maré, e as principais forças que são aplicadas a uma partícula de água são as forças de gravidade e de gradiente de pressão. O efeito da rotação da terra sobre a partícula também é considerado.

O termo de atrito, deve-se à presença da viscosidade da água, e representa os efeitos da tensão do vento à superfície e do atrito no fundo, e ainda os efeitos das fricções laterais.

2.2.1. Aproximação hidrostática

Na teoria da circulação costeira considera-se que a extensão da superfície livre é muito grande que o movimento vertical de uma partícula de água associada à maré pode ser desprezado face aos movimentos horizontais (Koutitas, 1988); assim, em alguns casos de estudos de circulação costeira, os termos que contenham w na equação de *Navier-Stokes* podem ser desprezados. A importância relativa de cada um dos termos da equação (11) é estimada pela análise de escala.

Segundo as deduções feitas por Canhanga (2004) para um domínio que representa a Baía de Maputo, a ordem de grandeza dos principais parâmetros descritos anteriormente é a seguinte:

- As dimensões horizontais nas direcções xx e yy variam entre 10^4 e 10^5 metros respectivamente, correspondendo à escala horizontal típica da Baía.
- As velocidades horizontais apresentam um intervalo de variação desde 10^{-1} m/s a 1 m/s.
- As profundidades típicas no domínio são da ordem de grandeza de 10 m no interior e na zona central da Baía e 1000 m na zona exterior.
- A frequência do constituinte mais importante da maré (M_2) é da ordem de grandeza de 10^{-5} s⁻¹, consequentemente, a escala temporal típica do processo em estudo é da ordem de 10^5 s.

Deste modo, os valores típicos para efectuar a análise de escala de um fenómeno como a propagação da onda da maré na Baía de Maputo são os seguintes:

$$L_y \approx 10^5 \text{ m}, L_x \approx 10^4 \text{ m}, H \approx 10 \text{ m}$$

$$V \approx 1 \text{ m/s}, U \approx 10^{-1} \text{ m/s}, T \approx 10^5 \text{ s}$$

Partindo das deduções anteriormente efectuadas e de acordo com a análise de escala efectuada (ver *anexo III*), as equações de *Navier-Stokes* terão a seguinte forma:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = fv - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (12)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -fu - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (13)$$

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \quad (14)$$

2.2.2. Aproximação de águas pouco profundas

Devido à sua ordem de grandeza, os termos de atrito horizontal podem ser desprezados quando comparados com outros termos da equação de movimento. Na integração vertical destes termos é efectuada a aproximação de águas pouco profundas. Nesta aproximação assume-se que as velocidades horizontais são quase constantes ao longo da direcção vertical, e considera-se também que o movimento é barotrópico, o que significa que a estratificação vertical da densidade é desprezível.

Estas assumpções conduziram à formulação matemática do modelo hidrodinâmico bidimensional descrito na secção 2.3.

2.3. Formulação matemática do modelo hidrodinâmico bidimensional

Para descrever o escoamento hidrodinâmico são utilizadas as equações para águas pouco profundas integradas na vertical, que podem ser escritas na sua forma Euleriana. Considerando a aproximação de águas pouco profundas descrita na secção 2.2.2, incluindo os termos do atrito horizontal de acordo com as deduções efectuadas por *Canhanga* (2004) e considerando que as variações espaciais da pressão atmosférica podem ser desprezadas, as equações hidrodinâmicas em águas pouco profundas expressam-se pelas relações:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [HU]}{\partial x} + \frac{\partial [HV]}{\partial y} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + fV + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + g \frac{U(U^2 + V^2)^{1/2}}{C^2 H^2} - \frac{1}{\rho H} \tau_x^s + A_h \nabla^2 U = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + g \frac{V(U^2 + V^2)^{1/2}}{C^2 H^2} - \frac{1}{\rho H} \tau_y^s + A_h \nabla^2 V = 0 \quad (17)$$

Onde ζ é elevação da superfície; U e V são as componentes da velocidade nas direcções x e y , integradas verticalmente; H é a altura total da coluna de água; C é o coeficiente de Chézy; f é o parâmetro de Coriolis; ρ é a densidade do fluido; τ_x^s e τ_y^s são as componentes da tensão do vento; A_h é o coeficiente de viscosidade.

Nas equações (16) e (17), o 1º termo representa a aceleração do movimento, o 2º e 3º termos representam a advecção, o 4º é o termo de Coriolis, o 5º é o termo da pressão, o 6º representa o atrito no fundo, o 7º é o termo que representa a tensão do vento e o 8º termo representa o atrito horizontal.

2.3.1. O modelo Utilizado (*J. J. Leendertse & E. C. Grifon, 1971*)

O modelo simula a variação da altura da coluna da água e da velocidade média da corrente num domínio bidimensional. É constituído pelas equações de *Navier-Stokes* e da continuidade do volume, numa formulação bidimensional no plano horizontal e pelas leis que traduzem a variação das condições de fronteira oceânicas (marés, ventos ou correntes induzidas pelas ondas) e lagunares (caudais). O modelo inclui também a possibilidade de introduzir diversas descargas ou tomadas de água.

O método numérico de resolução dos sistemas de equações é de diferenças finitas, semi-implícito, de duplo varrimento e de direcções alternantes (*ADI*), segundo o algoritmo de *Leendertse*, onde são utilizadas malhas deslocadas no espaço e no tempo.

O modelo bidimensional de *Leendertse* é um dos modelos matemáticos mais completos, pois retém muitos termos que figuram nas equações gerais, simulando também a variação temporal das fronteiras na zona de espraiados de maré (*Barata et al, 2000*).

2.4. Transporte Lagrangeano de Partículas

Ao modelo hidrodinâmico acoplou-se um módulo Lagrangeano, cuja aplicação constitui uma alternativa à descrição Euleriana do campo da velocidade, isto é, resolvendo a equação de advecção num domínio, rectangular, por um método numérico. O módulo Lagrangeano recorre a métodos que simulam a evolução espácio-temporal de uma distribuição de partículas a deslocar-se num meio em movimento.

Na sua versão conservativa, o módulo Lagrangeano é comparável ao cálculo de excursões de maré, constituindo uma aproximação ao transporte de poluentes conservativos, particularmente adequado ao transporte de gorduras ou manchas de óleo (*Barata et al*, 2000). Considerando um derrame pontual e instantâneo de uma massa de óleo ou outro poluente, este pode ser dividido num número de partículas de igual massa. Inicialmente a evolução da mancha de óleo é fortemente determinada por dispersão inicial associada à tensão superficial e pela evaporação.

A componente da velocidade responsável pela advecção das partículas é fornecida pelo modelo de hidrodinâmica anteriormente descrito. Para o óleo à superfície considera-se não só o efeito da corrente, mas também a acção do vento. A dispersão turbulenta é simulada por um passeio aleatório ("Random Walk").

As trajectórias das partículas são calculadas através da integração do campo da velocidade. Cada nova posição de uma partícula é calculada à custa da posição anterior e da velocidade total que se faz igual à soma de uma velocidade de deriva, devido à corrente e ao vento e de uma velocidade dispersiva.

Embora não fazendo parte dos objectivos deste trabalho, o módulo inclui as hipóteses de lançamento em contínuo ou instantâneo, a partir de locais seleccionados pelo utilizador.

2.4.1. O módulo Lagrangeano de trajectória de partículas

Muitas vezes é difícil interpretar os campos de velocidade Euleriana em termos de processos de transporte inerentemente Lagrangeano (*Canhanga*, 2004). Contudo, é possível recuperar a informação Lagrangeana, a partir do conhecimento dos campos de correntes de Euler.

Partindo de campos de velocidade Euleriana, obtidos de um modelo bidimensional, pode-se determinar a trajectória da partícula Lagrangiana integrando a seguinte equação:

$$\frac{d\bar{X}_i^n}{dt} = \bar{u}_i(\bar{X}_i^n, t) \quad (15)$$

Onde $\bar{u}_i(\bar{X}_i^n, t)$ representa o campo de velocidade Euleriana da partícula i ;

\bar{X}_i^n representa o vector da trajectória Lagrangeana da partícula i .

A trajectória bidimensional da partícula é calculada usando a aproximação Lagrangeana, resolvendo para cada incremento temporal, a seguinte equação:

$$\bar{X}_i^{n+1}(x_0, y_0) = \bar{X}_i^n(x_0, y_0) + \int_{t_0+n\Delta t}^{t_0+(n+1)\Delta t} \bar{u}_i(x_0, y_0) dt \quad (16)$$

$\bar{X}_i^{n+1}(x_0, y_0)$ é a posição no instante $n+1$ da partícula libertada no ponto (x_0, y_0) e no instante t_0 .

As trajectórias calculadas dependem dos detalhes dos algoritmos usados para a realização da integração; os procedimentos usados para a integração são referidos em *Canhanga* (2004) onde o passo temporal é calculado recorrendo a um esquema de *Runge-Kutta* de quarta ordem.

As partículas podem se mover tanto por advecção, difusão, dissolução, deposição, bem como por outros processos adicionais próprios da dinâmica costeira. Neste estudo assumiu-se que a distribuição das partículas é imposta por advecção passiva das partículas dentro do fluxo do campo gerado pelo modelo bidimensional (*Koutitas*, 1988).

III. DADOS

Neste trabalho pretendia-se considerar o período após as cheias do ano 2000 de modo a avaliar a situação particular deste período, e em princípio foram seleccionados para a análise os anos de 2001, 2002 e 2003. Foram utilizados dados dos caudais dos rios que desaguam na Baía, dos ventos e marés, sendo neste caso os caudais que ditaram a escolha do período de estudo. Dos anos seleccionados, houve muita falta de informação disponibilizada pela DNA, sobre os caudais dos rios para os anos 2001 e 2003, e somente o ano de 2002 apresentou-se com maior disponibilidade de dados.

Deste modo, foram utilizados dados de caudais dos rios, das intensidades e direcções dos ventos predominantes, e das marés, referentes ao ano de 2002, e considerou-se duas situações diferentes, uma de Verão (em Fevereiro) e a outra de Inverno (em Junho).

3.1. Dados de caudais

Os caudais foram identificados a partir de uma série de dados, considerando os rios que drenam na Baía, para um período compreendido entre 2001 a 2003.

Destes dados, somente os de 2002 apresentaram uma série completa, e os dos outros anos (2001 e 2003) apresentaram muitas falhas de valores mensais o que tornou impossível a sua utilização, dado o facto de não se conhecer o comportamento dos caudais nesses períodos em questão. Efectuou-se um teste para achar a correlação entre os dados de caudais correspondentes a cada um dos rios em anos diferentes e consecutivos, na tentativa de reconstruir os valores em falta através de uma equação de regressão linear. Por exemplo, testou-se a correlação entre os valores mensais dos caudais do rio Incomáti no ano de 2001 e os correspondentes mensais dos caudais do mesmo no ano 2002. A *tabela 3*, mostra os coeficientes de correlação encontrados:

Tabela 3 – Coeficientes de correlação entre os dados dos anos de 2001 e 2002 para os diferentes rios.

Rios	Coefficiente de Correlação (r)
Incomáti	0.48
Maputo	0.50
Umbelúzi	0.35

Os valores dos coeficientes de correlação apresentados na *tabela 3* mostram que em todos os casos a correlação entre os caudais nos períodos considerados foi positiva mas, não suficientemente boa para se achar a equação de regressão. Os mesmos procedimentos foram utilizados para os dados dos anos 2002 e 2003 e os resultados também mostraram que a correlação não foi boa. Deste modo, optou-se pela utilização dos valores de caudais correspondentes ao ano de 2002 (na *tabela 4*) e os mesmos serviram para as simulações feitas através do modelo.

Em 2002, os caudais registados pela *DNA*, para os principais rios que drenam na Baía de Maputo forneceram as médias mensais, de acordo com a *tabela 4* e *gráfico 2*.

Tabela 4 – Caudais médios mensais na foz dos rios (m³/s) em 2002.

Mês (2002)	Caudais (m ³ /s)		
	Incomáti	Maputo	Umbelúzi
Janeiro	113.75	63.58	2.27
Fevereiro	81.57	111.79	2.37
Março	36.54	66.07	2.42
Abril	59.11	36.21	1.88
Maió	52.68	25.32	2.11
Junho	59.28	19.08	1.69
Julho	116.9	57.24	1.48
Agosto	114.19	22.95	1.83
Setembro	110.93	17.74	1.47
Outubro	100.22	12.05	1.03
Novembro	107.51	17.52	1.05
Dezembro	83.68	24.54	1.12

Fonte: DNA (Moçambique), 2004.

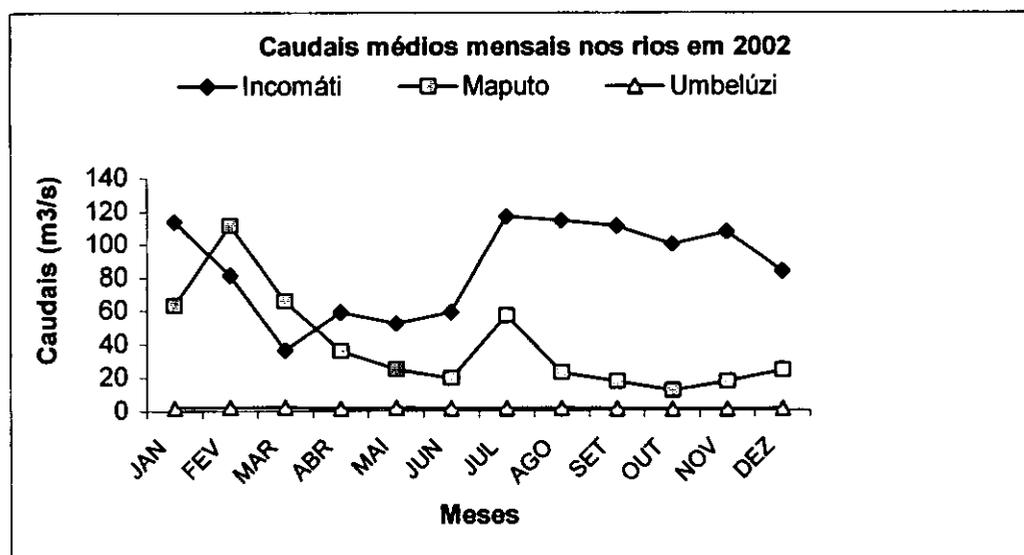


Gráfico 2: Caudais médios mensais (m³/s) nos rios em 2002.

Como pode-se observar no gráfico, ao longo do ano 2002, os rios Incomáti e Maputo apresentaram caudais relativamente maiores, enquanto que o rio Umbelúzi apresentou caudais menores, tendo sido verificado para o caso particular do rio Maputo, caudais máximos no mês de Fevereiro, e mínimos no mês de Junho.

A existência de barragens no rio Umbelúzi, altera significativamente o regime de caudais e pode ser uma das razões que faz com que os caudais neste rio apresentem valores baixos.

3.2. Dados de ventos

Os dados de intensidade e direcção dos ventos foram fornecidos pelo *INAM* e referem-se à estação de Maputo.

Em 2002, foram obtidos médias mensais e as respectivas direcções que podem ser vistos na *tabela 5*.

Tabela 5 – Intensidade média mensal do vento e as respectivas direcções predominantes

em Maputo no ano de 2002.

Mês (2002)	Parâmetro	
	Intensidade (km/h)	Direcção Predominante
Janeiro	17.4	SE
Fevereiro	15.4	E
Março	26.2	E
Abril	15.7	E
Maio	12.5	E
Junho	17.2	NE
Julho	10.1	NE
Agosto	11.9	N
Setembro	19.5	E
Outubro	14.9	E
Novembro	4.7	E
Dezembro	17.8	E

Fonte: INAM (Moçambique), 2004.

Os ventos predominantes neste ano foram os de Leste e Nordeste com intensidades na mesma ordem de grandeza.

3.3. Dados de marés

Para as marés, foi utilizado o programa T_TIDE^1 (desenvolvido em *MATLAB* por Pawlowicz *et al*, 2002), e o mesmo serviu para a análise harmónica das séries temporais das alturas da maré no Porto de Maputo (ver *anexo I*). Foram reproduzidas séries de marés através do T_TIDE para a fronteira aberta, correspondentes aos meses de Fevereiro e Junho de 2002, utilizando-se para tal alguns constituintes de maré (ver tabela no *anexo II*). Para caracterizar as amplitudes da maré, foram utilizados dados do marégrafo do Porto de Maputo. Foram obtidas duas séries temporais de maré para os dois períodos considerados, neste caso, para os meses de Fevereiro e Junho, representando cada um deles, as estações de Verão e de Inverno, respectivamente.

⁽¹⁾ Um programa escrito em *MATLAB*, usado para a realização da análise harmónica de séries temporais das alturas ou das componentes da velocidade da maré, bem como para a respectiva previsão.

O programa *T_TIDE* forneceu séries temporais de marés correspondentes a um mês, e neste caso, para os meses de Fevereiro e Junho. As séries temporais usadas no modelo são ilustradas nos *gráficos 3 e 4*.

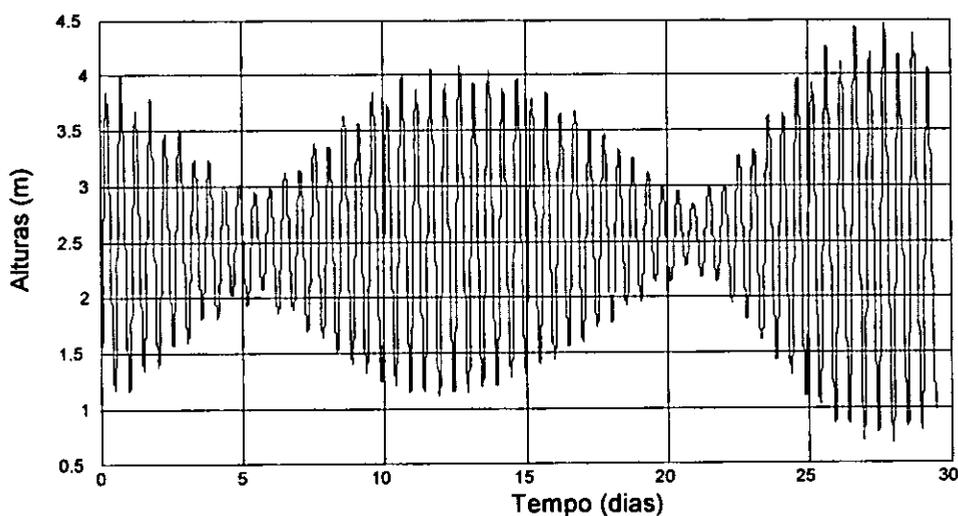


Gráfico 3: Série temporal da maré observada em Fevereiro de 2002, extrapolada do Porto de Maputo para a fronteira aberta, em intervalos de tempo de uma hora.

O mês de Junho representa nestas simulações a estação de Inverno, e no ano de 2002, foi obtida a série temporal representativa desta época, e a mesma pode ser observada no *gráfico 4*, para os intervalos de tempo de 1 hora.

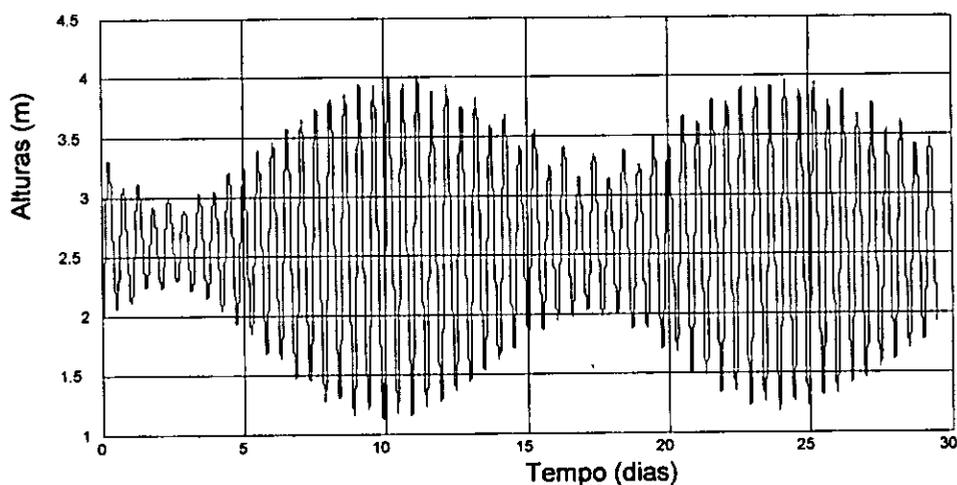


Gráfico 4: Série temporal da maré observada em Junho, extrapolada do Porto de Maputo para a fronteira aberta, em intervalo de tempo de uma hora.

IV. METODOLOGIA

Neste trabalho utilizou-se um modelo hidrodinâmico bidimensional no qual foi acoplado um módulo Lagrangeano de trajectória de partículas para simular a trajectória de partículas poluentes. Utilizando subrotinas relativas ao transporte Lagrangeano, foi possível efectuar uma análise da advecção de massas de água, representadas como partículas passivas. Algumas partículas foram emitidas na foz dos principais rios, no Porto de Maputo e em locais considerados de maior risco no caso de eventual ocorrência de eventos de poluição.

Foram ainda utilizados dados correspondentes aos caudais dos rios que desaguam na Baía, intensidade e direcção dos ventos na área de Maputo, e séries temporais de marés extrapoladas do Porto de Maputo para a fronteira aberta.

O trabalho realizado compreendeu as seguintes fases: fase de recolha de dados, fase de actualização e introdução das condições de fronteira no ficheiro de entrada, fase de simulações, e por último a fase de construção das imagens do padrão da trajectória de partículas.

Na fase de recolha de dados fez-se o pedido dos dados de caudais dos rios à *DNA*, os dados da intensidade e direcção dos ventos foram cedidos pelo *INAM* e as informações e dados sobre as marés foram cedidas pelo *INAHINA*.

Na fase de introdução das condições de fronteira no ficheiro de entrada, foram utilizados os dados referentes aos caudais, ventos e marés, e várias outras informações que o modelo necessita para a simulação, como os coeficientes de *Chézy*, de *Manning*, coordenadas geográficas dos locais de medição dos caudais dos rios, os níveis de água, entre outras variáveis. Os dados foram introduzidos num ficheiro de entrada localizado num dos directórios do computador, onde também se localizava o programa principal.

Seguiu-se a fase de simulação cujo objectivo foi de produzir através do modelo resultados que permitiram tirar-se algumas conclusões sobre a trajectória de partículas passivas na Baía de Maputo. Relativamente ao módulo Lagrangeano, foram efectuadas duas simulações para o

ano de 2002, uma na época de Verão (em Fevereiro) que corresponde ao mês de maior caudal, e a outra na época de Inverno (em Junho), que corresponde ao mês de menor caudal. Os ficheiros obtidos na simulação foram utilizados para o processamento dos resultados através do programa *MATLAB* e construindo as figuras que permitiram conhecer a trajectória das partículas emitidas a partir dos locais seleccionados como zonas de emissão.

O parâmetro de Coriolis foi definido em função da latitude, onde 25.9° Sul é a latitude média do domínio, correspondente para a Baía de Maputo.

Identificou-se o coeficiente de *Chézy*, a partir dos valores da altura de água e dos valores do coeficiente de *Manning* (ver *anexo IV*) onde os valores do coeficiente de *Manning* variam ao longo da malha computacional, tendo o valor de 0.021 nas células cujas abcissas são inferiores à coordenada numérica 160, e 0.033 nas restantes células. O coeficiente de viscosidade utilizado é de 20 m²/s.

Foram definidas a aceleração de gravidade, densidade do ar e densidade da água do mar.

O passo temporal é de 60 segundos, sendo o tempo de inicialização do modelo, designado por vezes por período de aquecimento, de 3 dias.

4.1. Calibração do modelo

Este modelo já foi anteriormente calibrado para estudos similares, e para a calibração, foram utilizados séries temporais da elevação da superfície livre observadas na estação do Porto de Maputo e Ilha dos Portugueses, bem como séries temporais das componentes da velocidade e correntes de marés observadas nas estações da Ilha dos Portugueses e do Baixo Ribeiro (Canhanga, 2004).

De acordo com a calibração efectuada, verificou-se a existência de um bom ajuste entre os valores observados e simulados. Os valores observados e simulados correspondentes às séries temporais das elevações da superfície livre da água foram sujeitos a um tratamento estatístico, o que permitiu o cálculo do desvio quadrático médio dos valores simulados em relação aos valores observados, sendo este igual a 0.013 metros. As velocidades e as correntes de marés também foram sujeitas a um tratamento estatístico, e o desvio quadrático

médio da simulação em relação aos dados observados das componentes U e V da velocidade nas estações da Ilha dos Portugueses e do Baixo Ribeiro foram iguais a 7.5 cm/s, 8.3 cm/s, 10.8 cm/s e 10.8 cm/s, respectivamente. O desvio quadrático médio dos valores simulados em relação aos dados observados de corrente de maré nas estações da Ilha dos Portugueses e Baixo Ribeiro foram iguais a 7.9 cm/s e 10.83 cm/s, respectivamente.

4.2. Zonas de emissão de partículas

As "partículas Lagrangeanas", são utilizadas neste trabalho como traçadores passivos, ou seja, como se fossem partículas com uma taxa de decaimento quase nula, de modo que o volume da partícula não aumentasse nem diminuísse.

Deste modo, a Baía foi dividida em cinco partes tendo em conta as possíveis proveniências das partículas. Nas fronteiras abertas, impuseram-se os caudais dos rios, séries temporais da maré e os ventos predominantes. Na fronteira aberta "Rio-Baía" impuseram-se os caudais de todos os rios em simultâneo, e os ventos predominantes. Na fronteira aberta "Oceano-Baía", foi imposta a série temporal da maré. Em cada célula do domínio computacional emitiu-se uma partícula no início da vazante na fronteira aberta, e após um período inicial de aquecimento de 3 dias.

Neste trabalho, as partículas de cor azul "escuro" representam partículas emitidas na zona da fronteira aberta "Baía-Oceano"; as de cor azul "claro" as emitidas numa zona próxima à foz do rio Incomáti e rio Maputo; as de cor violeta foram emitidas numa zona próxima ao Porto de Maputo; as partículas de cor encarnada foram emitidas numa zona localizada à Nordeste do rio Maputo, e as de cor verde numa zona ao Sul da Ilha da Inhaca.

4.3. Condições de fronteira

Fronteiras móveis

Neste modelo foi usado o coeficiente de Chézy (C) para definir os pontos "terra" e os pontos "água". Nos pontos "terra", o valor do coeficiente de Chézy (C) é nulo e nos pontos "água" é diferente de zero.

A dinâmica da maré conduz a que ao longo da sua evolução temporal alguns pontos que foram "terra" sejam preenchidos por água ou vice-versa (fronteira móvel), havendo necessidade de definir as fronteiras móveis.

De modo a tornar possível a determinação de novas fronteiras terra-água, definiu-se no modelo uma variável, relacionada com o volume de água numa dada célula. Se num ponto particular do domínio de cálculo o valor do nível diminuir de maneira a que o volume seja negativo, então esta célula será retirada do cálculo.

Fronteiras fixas e condições iniciais

Considerou-se a fronteira do lado Este e algumas células da fronteira do lado Oeste (que são correspondentes à foz dos diferentes rios que fazem parte do domínio) como sendo abertas. As restantes fronteiras foram consideradas fechadas e os valores da velocidade nestes pontos foram igualados a zero.

Na fronteira aberta do lado Este foram especificados os valores dos níveis da maré de 6 em 6 minutos.

Na batimetria numérica da Baía de Maputo, os pontos terra são representados por - 88.0, e os restantes pontos são representados pelas respectivas profundidades, em metros.

V. RESULTADOS E DISCUSSÃO

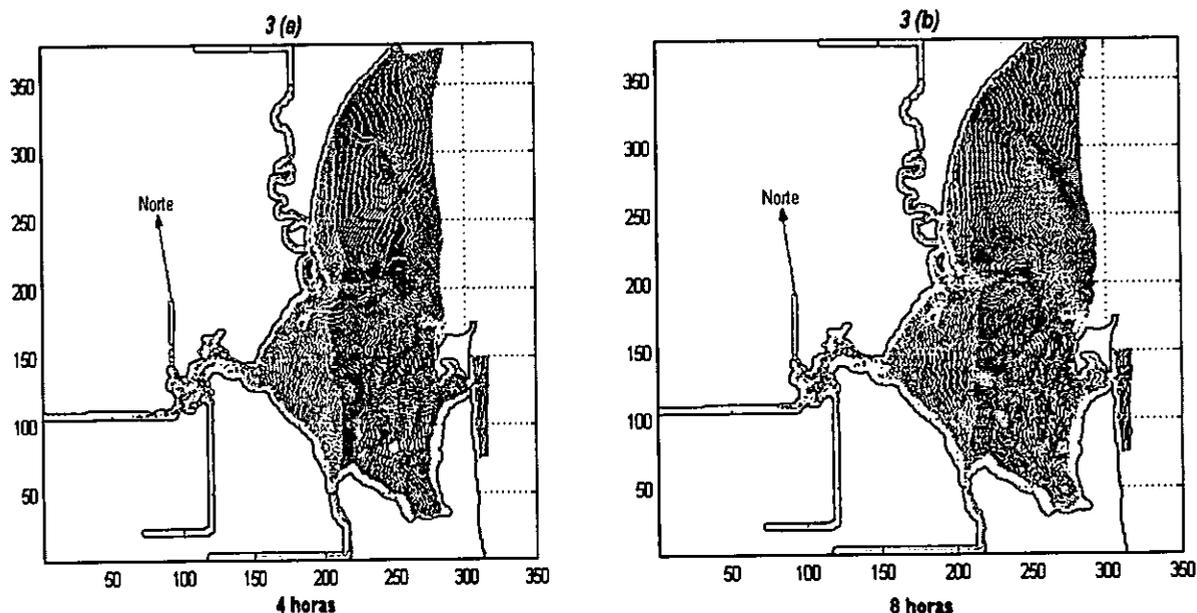
5.1. Padrão da trajetória das partículas

No estudo da trajetória de partículas foi possível obter algumas ideias sobre o transporte de substâncias com grau de degradação relativamente baixo, e tal foi possível, acoplado ao modelo hidrodinâmico, o módulo Lagrangeano de trajetória de partículas.

A sequência da evolução temporal da posição das partículas para as duas fases de simulações consideradas, está representada nas figuras 3(a) à 3(f), para o período de Verão, e nas figuras 4(a) à 4(f) para o Inverno.

Verão

Para o Verão, foi possível observar a evolução temporal da posição das partículas libertadas na Baía. As figuras 3(a), 3(b), 3(c) e 3(d), mostram respectivamente, a posição das partículas 4, 8, 12 e 16 horas após o início da vazante na fronteira aberta e as figuras 3(e) e 3(f) referem-se à posição das partículas, 7 e 15 dias após o início das simulações, respectivamente.



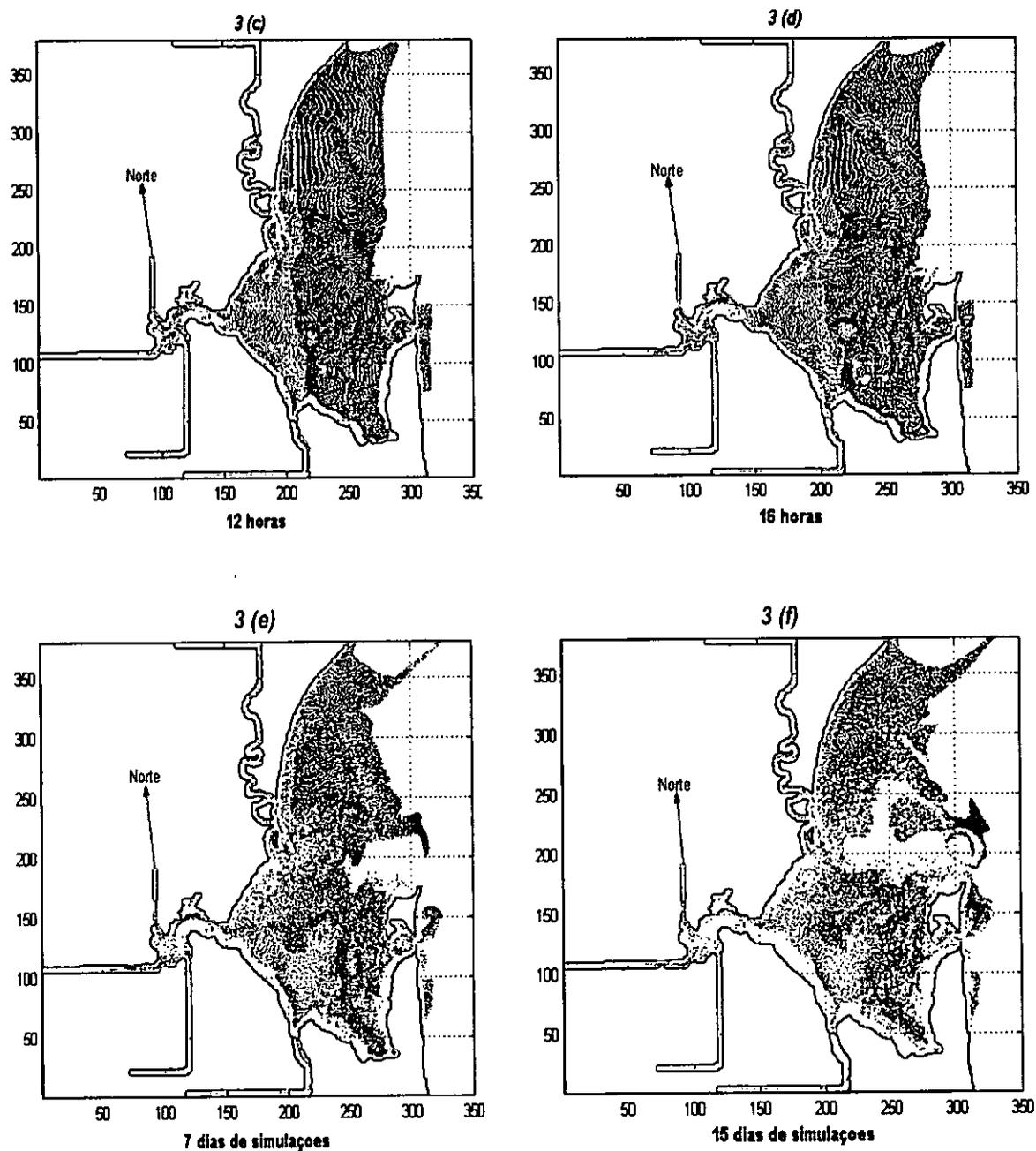


Fig. 3.: Sequência da evolução temporal da posição das partículas libertadas 4 [3(a)], 8 [3(b)], 12 [3(c)] e 16 [3(d)] horas após o início da vazante na fronteira aberta, e 7 [3(e)] e 15 [3(f)] dias após o início das simulações, para o Verão.

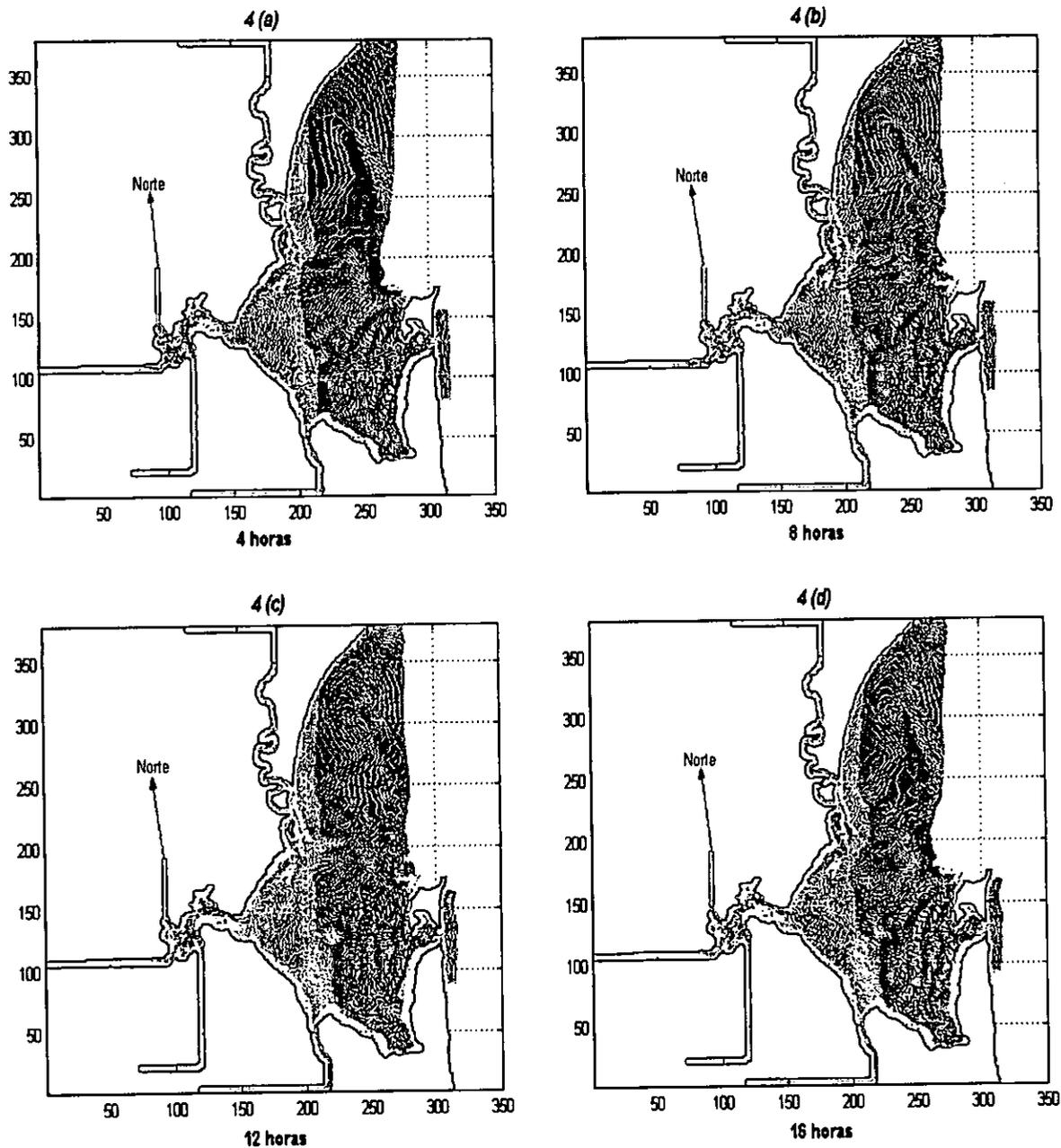
Nas figuras 3(a) a 3(d), onde se retrata o primeiro ciclo de maré cuja duração foi de aproximadamente 12 horas após o início da vazante, foi possível observar-se que quase todas as partículas ainda continuavam dentro da Baía, dando indicações de que durante a vazante as partículas são transportadas para o exterior da Baía. Ainda neste ciclo foi possível observar que as velocidades de deslocamento das partículas são relativamente baixas, e em consequência disso as partículas terão um deslocamento menor relativamente ao comprimento da Baía, e neste caso, as partículas dificilmente poderão sair da Baía durante a vazante.

Por sua vez, os resultados obtidos para os períodos correspondentes a sete e quinze dias após o início das simulações (Figuras 3(e) e 3(f)), mostram que as partículas permaneceram próximo das zonas onde foram libertadas, e mostram ainda que na zona central da Baía, nas zonas próximas à foz dos rios Maputo e Incomáti, e na zona do Estuário do Espírito Santo, dificilmente as partículas permaneceram próximo das zonas onde foram libertadas. Foi possível notar uma tendência de ocorrer mistura entre as partículas na zona central da Baía.

Observou-se que as partículas emitidas na zona central da Baía são afectadas em grande medida pelos processos de mistura e dispersão, relativamente às partículas emitidas em outras zonas da Baía. Esses fenómenos de mistura e dispersão podem ser observados nas figuras correspondentes a 7 e 15 dias de simulações. Por um lado, observando a figura 3(e), nota-se que na zona central da Baía há uma tendência de mistura entre partículas “azul-claras” e “azul-escuras”, e por outro lado observando a figura 3(f) pode notar-se que ainda na zona central a tendência é de espalhar partículas. Esta tendência pode ser um indicador da existência nessa zona de boas condições de renovação da água.

Inverno

Analogamente para o Inverno, também foi possível observar a evolução temporal da posição das partículas libertadas na Baía. As figuras 4(a), 4(b), 4(c) e 4(d), mostram respectivamente, a posição das partículas 4, 8, 12 e 16 horas após o início da vazante na fronteira aberta e completam o primeiro ciclo da maré. As figuras 4(e) e 4(f) referem-se à posição das partículas, 7 e 15 dias após o início das simulações, respectivamente.



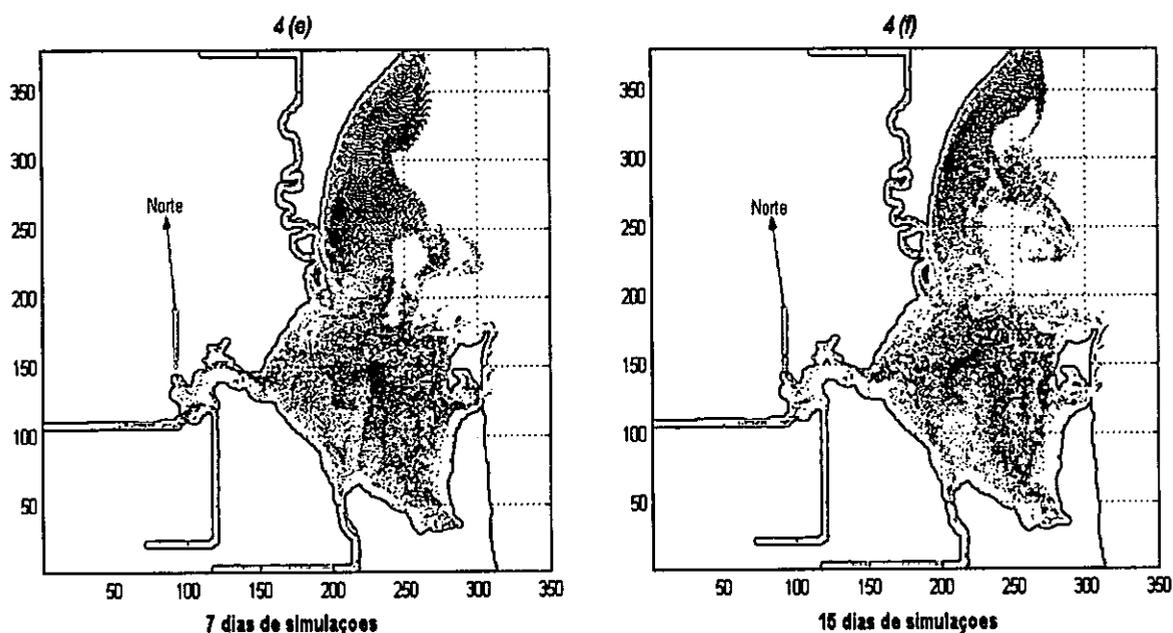


Fig. 4.: Sequência da evolução temporal da posição das partículas libertadas 4 [4(a)], 8 [4(b)], 12 [4(c)] e 16 [4(d)] horas após o início da vazante na fronteira aberta, e 7 [4(e)] e 15 [4(f)] dias após o início das simulações, para o Inverno.

Nas figuras 4(e) e 4(f), na zona central da Baía nota-se uma tendência de ocorrência de mistura entre partículas de todas as cores, e este facto leva-nos a concluir que os fenómenos de mistura e dispersão foram mais notáveis no Verão. No caso da zona central da Baía, o espalhamento das partículas pode significar a existência de uma maior dispersão.

Observou-se também que o padrão de trajectória das partículas emitidas ao sul da Ilha da Inhaca é tal que elas tendem a escapar-se através da abertura em forma de um “canal” localizado no sul da Ilha e que a separa da zona continental e as mesmas tendem a dirigir-se em direcção ao oceano. Este padrão da trajectória das partículas de cor “verde”, apresenta duas características distintas de acordo com a estação considerada.

No Verão notou-se que estas partículas dirigiram-se para o oceano juntamente com outras de cor “vermelha” (figuras 3(e) e 3(f)). No Inverno foi possível notar que as mesmas partículas “saíram” através do “canal” em direcção ao oceano e contornaram a Ilha em direcção ao Norte entrando novamente para a Baía. Os resultados obtidos nesta zona podem revelar a

existência de boas condições de renovação de água, e retorno de poluentes para a zona Norte da Baía de Maputo.

As partículas emitidas nas zonas próximas à foz dos rios permitiram verificar que no primeiro ciclo da maré é notável que nestas zonas há uma tendência das partículas permanecerem nelas. As partículas não permanecem nestas mesmas zonas após 7 e 15 dias de simulações e à medida que o tempo de simulações aumentava o número de partículas que permaneceram foi cada vez mais reduzido.

Constatou-se que no primeiro ciclo da maré a influência dos forçadores na dispersão de partículas é menos significativo relativamente aos outros períodos considerados para analisar a evolução, isto é, em 7 e 15 dias após o início das simulações, o que leva a concluir que a dispersão de poluentes na Baía é um processo de escala temporal longa.

É necessário referir que em todos os casos os padrões das trajectórias das partículas emitidas tiveram influência da posição inicial de emissão.

Após o 15º dia de simulações, as partículas emitidas na zona do Porto de Maputo tenderam a sair do Estuário do Espírito Santo. As partículas emitidas ao Sul da Ilha da Inhaca também tiveram trajectórias influenciadas pelos forçadores hidrodinâmicos. No Verão, inicialmente estas partículas permaneceram próximo da zona de emissão e após o 7º e 15º dias elas tiveram uma trajectória que as levou a dirigirem-se para o exterior da Baía em direcção a Leste. No Inverno, durante o primeiro ciclo, o comportamento da trajectória das partículas foi análogo ao do Verão, mas após o 7º e 15º dias elas tiveram uma trajectória que as levou a dirigirem-se para o exterior da Baía em direcção a Nordeste e voltando depois, para o interior da Baía.

VI. CONCLUSÕES

É possível aplicar o modelo hidrodinâmico bidimensional integrado verticalmente para estudar o fenómeno de dispersão de poluentes na Baía de Maputo, considerando para tal, escalas temporais longas.

O levantamento das características hidrológicas e morfológicas da Baía de Maputo mostrou que os principais forçadores da hidrodinâmica da Baía, são as marés, os caudais dos rios que desaguam na Baía de Maputo, e os ventos predominantes na área da Baía.

A influência simultânea dos forçadores hidrodinâmicos (marés, caudais dos rios e ventos) é notável após o primeiro ciclo da maré, e neste caso, o fenómeno da dispersão é mais significativo dependente da escala temporal considerada.

O destino das partículas emitidas depende da posição inicial de emissão e dos forçadores impostos. Em geral, a trajectória das partículas é tal que durante a vazante elas deslocam-se em direcção ao exterior da Baía e na enchente deslocam-se para o interior da Baía.

No Verão, durante o primeiro ciclo as partículas quase permanecem próximo das zonas onde foram libertadas, e na zona central da Baía, o espalhamento de partículas indica uma dispersão rápida, o que demonstra que se trata de uma zona com boas condições de renovação de água. No Inverno, logo após o primeiro ciclo as partículas dirigem-se para o exterior da Baía em direcção à Nordeste e retornam novamente para o seu interior.

VII. RECOMENDAÇÕES

A dispersão de poluentes na Baía de Maputo é um processo de escala temporal longa, e podem interagir neste processo outros forçadores da hidrodinâmica.

Deste modo, em trabalhos futuros recomenda-se:

- Que sejam considerados períodos de simulação relativamente mais longos, por exemplo, de 20, 30 dias, ou mais, para melhor “visualizar” os processos de dispersão de poluentes.
- Que seja considerado um outro forçador, que é o caso do movimento de massas de água devido à diferença de densidade dado que na Baía de Maputo é possível distinguir duas massas de água diferentes, em situações pontuais como de ocorrência de cheias ou de prolongamento da estação chuvosa.
- Que seja estudado o tempo de residência das partículas, principalmente na zona central da Baía, dado que há indicações de existirem nesta zona boas condições de renovação de água.

VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barata, A.; Teles, M.; Silva, R. P. (2000). Sistema de Modelos Matemáticos para a Gestão Integrada da Baía de Maputo. Instituto de Investigação Pesqueira (IIP); Maputo, República de Moçambique.

Boeker, E.; Van Groendle, R. (1995). Environmental Physics. John Wiley & Sons, USA.

Canhanga, S. J. V. (2004). Modelação Hidrodinâmica da Baía de Maputo. Tese de mestrado apresentada à Faculdade de Ciências da Universidade de Aveiro, Portugal.

Cheng, R. T.; Walters, R. A. (1982). Modelling of Estuarine Hydrodynamics and Field Data Requirements. John Wiley & Sons, USA.

Encyclopedia of Environmental Science and Engineering. (1992). McGraw Hill, USA.

Ferziger, Joel H.; Peric, Milovan. (1999). Computational Methods For Fluid Dynamics (Second edition). Springer, Germany.

Hoguane, A. M.; Dove, V. F.; Nhapulo, C. I. S. (2002). Water Masses and Circulation of Maputo Bay. Maputo, Mozambique.

Hoguane, A. M.; Nhapulo, C. I. S. (2002). Circulação Geral e Distribuição de Poluentes na Baía de Maputo. Maputo, Moçambique.

Kalk, M. (1995). A Natural History of Inhaca Island, Mozambique. Witwatersrand University Press; Johannesburg, South Africa.

- Koutitas, C. G.** (1988). Mathematical Models in Coastal Engineering. Pentech Press, London, UK.
- Leendertse, J. J.; Nelson, A. B.** (1978). A Water-Quality Simulation Model for Well Mixed Estuaries and Coastal Seas: Volume IX, The Computer Program. Rand Corporation, Santa Monica, USA.
- Matarira, C. H.; Unganai, L. S.** (1994). A Rainfall Prediction Model For Southern Africa Based On the Southern Oscillation Phenomena. SADC/FAO Early Warning System, Harare, Zimbabwe.
- Monteith, J. L.; Unsworth, M. H.** (1993). Principles of Environmental Physics. Edward Arnold, USA.
- Nehama, F. P. J.** (2004). Previsão de Marés na Estação Biológica da Inhaca. Tese de Licenciatura apresentada ao Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade Eduardo Mondlane; Maputo, República de Moçambique.
- ☪ **Nhapulo, C. I. S.** (2000). Correntes de Marés e Circulação Geral da Baía de Maputo. Tese de Licenciatura apresentada ao Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade Eduardo Mondlane; Maputo, República de Moçambique.
- Pawlowicz, R.; Beardsley, B.; Lentz, S.** (2002). Classical Tidal Harmonic analysis Including errors Estimates in Matlab Using T Tide. Journal of Computers and Geosciences.
- Walker, Henry M.** (1980). Problems For Computer Solutions Using Fortran. Winthrop Publishers, Cambridge, Massachusetts, USA.

ANEXOS

ANEXO I

Programa em *MATLAB* usado para a análise harmónica das séries temporais das alturas da maré no Porto de Maputo.

```
clear,close all;

%load file06_pmvf1.txt;
%r1=file06_pmvf1;
load file6_pm.txt;
r1=file6_pm;

% return

%horas=7.8:6/60:24*44+8.9
%tim=datenum(1993,4,1,horas,0,0);

%[tidedestruc,yout]=t_tide(file6_pm);
%[yout]=t_predic(tim,tidedestruc)

teste074_aux; % so se quiser usar todas as constituintes
tidedestruc.name=TIDESTRUC.name; % se quiser usar todas as
constituintes
% tidedestruc.name=['M2';'S2'];%e para determinar a previsao so
com as duas componentes
%tidedestruc.name=['M2']; % SO PRA M2
%tidedestruc.name=['S2']; % SO PRA S2
%return
tidedestruc.freq=r1(:,1);% se quiser usar todas as constituintes
% tidedestruc.freq=[r1(30,1);r1(34,1)]; % %e para determinar a
previsao so com as duas componentes
%tidedestruc.freq=[r1(30,1)];% so pra M2
% tidedestruc.freq=[r1(34,1)];% so pra S2

%return
tidedestruc.tidecon=r1(:,2:5); % se quiser usar todas as
constituintes
% tidedestruc.tidecon=[r1(30,2:5);r1(34,2:5)]; % %e para
determinar a previsao so com as duas componentes
%tidedestruc.tidecon=[r1(30,2:5)]; % so pra M2
%tidedestruc.tidecon=[r1(34,2:5)]; % so pra S2

%horas=0:6/60:24*65;
```

```

horas=12:6/60:24*30;      % horas do residual (00:ate 18*24
com espacamento de 6 minutos

%tim=datenum(2002,12,26,horas,00,0);
tim=datenum(2002,06,01,horas,00,0); % so para setembro pra ver
se diga de rebentar
%tim=datenum(2002,09,08,horas,00,0); % para outros meses
impos-se o inicio no dia 08 de cada mes

%[yout] = t_predic(tim,tidestruc);
[yout] = t_predic(tim,tidestruc);
%youtf = (yout'+2.57)*0.8;
youtf = (yout'+2.57)*0.8; % para m2s2 juntas

plot(yout+2.57);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
x = 1:length(youtf);
y = youtf';
z = 11.5*ones(size(youtf'));
M=[x;y;z];
fid2=fopen('sexta_residual.dat','w');
fprintf(fid2,'%9.2f\n',youtf);
fclose(fid2);
fid = fopen('01062002_12.dat','w');% expfvf e a ultima versao
do domingo!!!!
fprintf(fid,'%s\n','FUCK');
fprintf(fid,'%5d %6.2f %7.1f\n',M);
fclose(fid);
load sexta_residual.dat;
f1=sexta_residual;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%horas=7:24*45;
%start=datenum(2002,12,26,00,00,00);

return
start=datenum(2004,11,22,0,0,0);

lat=-25.96;
%
t_tide(f1,'interval',6/60,'start_time',start,'latitude',lat,'o
utput','prev_mod_residual.dat');

%return
%save 'prev_pm.dat' youtf -ASCII -TABS;

```

ANEXO II

Resultados de T-tide. Fases e amplitudes calculadas com 95% de intervalo de confiança. SNR é o quadrado da razão entre a amplitude e o erro da amplitude.

<i>Const.</i>	<i>Frequênc</i>	<i>Amplit.</i>	<i>Err_Amp.</i>	<i>Fase</i>	<i>Erro_Fase</i>	<i>SNR</i>
SSA	0.0002282	0.0375	0.031	111.16	45.06	1.5
MSM	0.0013098	0.0376	0.033	263.74	49.01	1.3
MM	0.0015122	0.0187	0.028	276.37	104.26	0.43
MSF	0.0028219	0.0158	0.026	162.78	131.02	0.37
MF	0.0030501	0.0205	0.026	340.71	87.94	0.6
ALP1	0.0343966	0.0027	0.005	286.37	136.45	0.24
2Q1	0.0357064	0.0012	0.005	244.38	207.72	0.069
SIG1	0.0359087	0.0013	0.005	267.66	191.99	0.076
*Q1	0.0372185	0.0111	0.006	264.32	40.25	3
RHO1	0.0374209	0.0023	0.005	7.08	147.39	0.23
*O1	0.0387307	0.0236	0.007	314.08	15.44	11
TAU1	0.0389588	0.0017	0.004	183.23	154.45	0.17
BET1	0.0400404	0.0035	0.006	13.92	125.85	0.35
*NO1	0.0402686	0.0140	0.008	97.26	29.50	3.3
CHI1	0.0404710	0.0048	0.006	338.61	72.34	0.62
*P1	0.0415526	0.0108	0.006	330.66	30.11	3.1
*K1	0.0417807	0.0624	0.007	178.37	5.97	81
PHI1	0.0420089	0.0052	0.006	342.75	67.97	0.8
THE1	0.0430905	0.0032	0.006	204.11	114.42	0.34
J1	0.0432929	0.0057	0.007	193.71	74.23	0.66
SO1	0.0446027	0.0019	0.005	251.17	143.85	0.15
OO1	0.0448308	0.0050	0.007	289.40	114.10	0.48
UPS1	0.0463430	0.0065	0.009	75.67	76.24	0.51
OQ2	0.0759749	0.0054	0.011	329.06	162.74	0.24
EPS2	0.0761773	0.0183	0.016	95.64	59.08	1.3
2N2	0.0774871	0.0116	0.015	41.22	88.03	0.58
*MU2	0.0776895	0.0576	0.018	104.08	18.79	11
*N2	0.0789992	0.1566	0.018	49.81	7.25	74
*NU2	0.0792016	0.0295	0.015	35.23	34.81	3.7
*M2	0.0805114	0.9435	0.017	72.51	1.03	2.9e+003
*MKS2	0.0807396	0.0346	0.023	112.71	33.75	2.2
LDA2	0.0818212	0.0232	0.017	60.82	41.11	1.8
*L2	0.0820236	0.0360	0.016	76.32	24.17	5
*S2	0.0833333	0.5396	0.020	136.99	1.88	7.2e+002
*K2	0.0835615	0.1622	0.020	140.41	7.90	66
MSN2	0.0848455	0.0172	0.015	309.60	62.33	1.3
ETA2	0.0850736	0.0079	0.018	115.10	167.00	0.2

*MO3	0.1192421	0.0069	0.004	68.47	32.34	3.3
*M3	0.1207671	0.0074	0.003	156.42	23.70	6.1
*SO3	0.1220640	0.0059	0.003	216.25	34.57	3.2
MK3	0.1222921	0.0009	0.003	259.74	159.44	0.12
*SK3	0.1251141	0.0073	0.004	326.79	29.16	3.9
MN4	0.1595106	0.0017	0.003	150.15	100.97	0.34
*M4	0.1610228	0.0103	0.003	106.17	17.49	14
SN4	0.1623326	0.0022	0.003	183.91	88.18	0.63
*MS4	0.1638447	0.0122	0.003	199.99	16.09	15
MK4	0.1640729	0.0026	0.003	273.01	84.16	0.57
S4	0.1666667	0.0012	0.003	327.09	140.92	0.17
SK4	0.1668948	0.0012	0.003	276.75	170.23	0.16
2MK5	0.2028035	0.0018	0.002	20.85	64.25	1.1
2SK5	0.2084474	0.0006	0.002	50.80	164.30	0.15
*2MN6	0.2400221	0.0043	0.003	237.97	33.58	2.7
*M6	0.2415342	0.0091	0.002	275.07	16.38	14
*2MS6	0.2443561	0.0198	0.003	333.68	8.53	50
*2MK6	0.2445843	0.0063	0.003	338.94	26.18	5
*2SM6	0.2471781	0.0080	0.003	40.20	17.97	9.2
*MSK6	0.2474062	0.0051	0.003	49.15	34.40	3.6
3MK7	0.2833149	0.0004	0.001	146.09	137.09	0.14
*M8	0.3220456	0.0013	0.001	132.29	44.76	2.2

ANEXO III

Análise de escala da velocidade vertical estimada em função da equação de continuidade, para os valores típicos descritos na secção 2.2.1.

Dados os valores típicos seguintes:

$$L_y \approx 10^5 \text{ m}, L_x \approx 10^4 \text{ m}, H \approx 10 \text{ m}$$

$$V \approx 1 \text{ m/s}, U \approx 10^{-1} \text{ m/s}, T \approx 10^5 \text{ s}$$

A escala da velocidade vertical é estimada pela equação de continuidade, quer dizer:

$$\frac{W}{H} \approx \frac{U}{L_x} \oplus \frac{V}{L_y}$$

E obtém-se para a escala da velocidade vertical, o seguinte:

$$W \approx \frac{HU}{L_x} \oplus \frac{HV}{L_y} \approx \frac{1}{10^4} + \frac{10}{10^5} \approx 10^{-4} \text{ m/s}$$

Ainda segundo as deduções feitas por *Canhanga* (2004), os valores do coeficiente de viscosidade variam de 1 a $10^3 \text{ m}^2/\text{s}$ (coeficientes de viscosidade horizontal) e de 10^{-4} a $10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ (coeficientes de viscosidade vertical), e considera ainda os valores máximos para se obter o efeito máximo do termo de atrito.

Então, a equação (11), de movimento na direcção vertical tem a ordem de grandeza seguinte:

$$\frac{W}{T} \oplus \frac{UW}{L_x} \oplus \frac{VW}{L_y} \oplus \frac{W^2}{H} \oplus 10 = O\left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}\right) \oplus 10^3 \frac{W}{L_x^2} \oplus 10^3 \frac{W}{L_y^2} \oplus 10^{-1} \frac{W}{H^2}$$

Ou ainda poderemos obter:

$$10^{-9} \oplus 10^{-9} \oplus 10^{-9} \oplus 10 = O\left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}\right) \oplus 10^{-5} \oplus 10^{-6} \oplus 10^{-6}$$

Da análise de escala efectuada, verificou-se que o termo que contém o gradiente de pressão é balanceado com o termo que contém a aceleração de gravidade, pois os restantes termos têm ordens de grandeza inferiores. Deste modo, a equação do movimento é reduzida à expressão seguinte:

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g.$$

ANEXO IV

Formulação de Chézy-Manning:

A partir de estudos teóricos e experimentais, o engenheiro Francês *Antoine Chézy* desenvolveu, em 1769, uma equação para o cálculo de escoamento tanto em tubulações pressurizadas como em canais abertos. Na equação proposta por *Chézy*, os parâmetros do escoamento eram relacionados através da constante experimental *C*, denominada *Coefficiente de Chézy*.

Em 1889, *Manning* determinou o valor do coeficiente *C* da equação de *Chézy* para o cálculo de escoamento uniforme livre em canais. Actualmente, a equação de *Manning* é uma das metodologias de cálculo mais utilizadas.

Neste trabalho foi usada a equação de *Manning* para águas pouco profundas, que é dada pela expressão:

$$C = \frac{gn^2}{H^{1/3}}$$

Onde:

C – representa o Coeficiente de *Chézy* (m²/s);

Neste trabalho o coeficiente de viscosidade de *Chézy* usado é de 20 m²/s.

g – a aceleração de gravidade (m/s²);

n – é o coeficiente de *Manning*;

H – a profundidade do local (m);

Esta equação apresenta a relação entre o coeficiente de *Chézy*, o coeficiente de *Manning* e a profundidade, e neste trabalho os valores do coeficiente de *Manning* variaram ao longo da malha computacional.