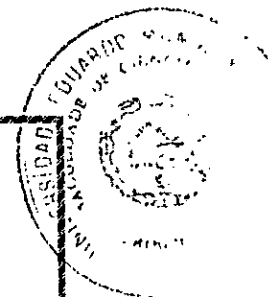


F19-15



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA



Trabalho de Licenciatura

Previsão de Marés na Estação Biológica de Inhaca



Autor: Fialho P. J. Nehama

Maputo, Setembro de 2004



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

Trabalho de Licenciatura

**Previsão de Marés
na Estação Biológica de Inhaca**

Autor:
Fialho P. J. Nehama

Supervisora:
dr.^a Cândida Sete

Co-Supervisor:
Dr. Fernando V. Saíde

Maputo, Setembro de 2004

AGRADECIMENTOS

- Em primeiro lugar, agradeço a Deus que me tem guiado e protegido nestas andanças.
- Em segundo, agradeço aos meus pais, Luciano J. Nehama e Maria Fernanda M. Gelane, a quem eu devo tudo o que sou ou almejo ser um dia.
- Deixo ficar aqui um *obrigado* muito especial a minha supervisora, dr^a. Cândida Sete e ao meu co-supervisor, Dr. Fernando Saide, pela maneira como cada um deu o seu apoio e por tudo quanto fizeram para que este trabalho ficasse pronto.
- Agradeço a Cátedra de Ciências Marinhas e Oceanografia na pessoa do Prof. Doutor António M. Hogueane, por todo o apoio material que têm colocado a minha disposição.
- Sem citar nomes quero agradecer a todos aqueles que directa ou indirectamente estiveram ligados a mim durante todo o meu processo de aprendizagem, desde o BUSCEP, as aulas fora do Depto. de Física até as saídas de campo. Muito obrigado por terem estado lá.
- Ao PhD. D. G. Bowers da Universidade de Wales de Bangor, ao Dr. Momade C. Ibraimo, ao Dr. Sinibaldo Canhanga do INAHINA, à Dr^a. Alice Dabula do WWF, ao Sr. Germano Pires da Faculdade de Ciências Biológicas -UEM, ao Sr. António J. Bond da Geografia. A todos eles vai o meu *muito obrigado!*
- À todo o grupo de estudantes que comigo ingressou e em especial aos que fazem a orientação em Oceanografia eu agradeço e felicito pela óptima companhia de que pude desfrutar.
- Agradeço aos meus colegas da residência e em particular os que dividiram o quarto comigo, por toda força, paciência e amizade, da qual jamais me irei esquecer.
- Aos meus irmãos: Clara, Dália, Odete, Sérgio e Miguel, obrigado por vosso apoio incondicional.

“ Eureka! ”

DEDICATÓRIA

*Ao meu pai, Luciano Juma Nehama
E à minha irmã pequena, Odete*

DECLARAÇÃO DE HONRA

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

Maputo, Setembro de 2004

O autor:

Fialho P. J. Nehama

(Fialho P. J. Nehama)

RESUMO

Neste trabalho foram analisadas as marés que ocorrem na região a frente da Estação de Biologia Marinha da Inhaca, com o objectivo de dar um contributo ao estudo da predição de marés em Moçambique.

O trabalho consistiu em prever marés usando dois métodos que diferem no programa usado. O primeiro método foi o da análise harmónica clássica em pacotes estatísticos (Minitab e MS Excel) e, o segundo método foi o da análise harmónica complexa em T-tide (programa específico de previsão elaborado em *Matlab*).

Com base em registos maregráficos de dois meses, com início em 3-Maio-03, foram modeladas alturas de maré no período das observações, reproduzindo a curva de marés observadas com boa precisão (95% e 98.6%).

Os resultados mostraram que é possível prever as marés e, que o método usado em T-tide é menos preciso que o método usado nos pacotes estatísticos e no entanto, chegou-se a conclusão de que o T-tide é programa mais indicado para prever marés a longo prazo.

Determinou-se em termos percentuais, a importância de cada constituinte de maré analisada neste trabalho e recomendou-se a observância desta relação de importância entre as constituintes.

Concluiu-se que as marés que ocorrem na Inhaca são semi-diurnas e que as componentes de maré mais importantes para região em estudo são também semi-diurnas, M2 e S2.

ÍNDICE

Título	Página
I. INTRODUÇÃO E OBJECTIVOS	1
1.1 Introdução	1
1.2 Objectivos	3
II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Nível do mar	4
2.2 Marés	5
2.2.1 A atracção gravitacional	6
2.2.2 O efeito da forma das bacias oceânicas na água em movimento	9
2.3 Caracterização das marés	9
III. MATERIAL E MÉTODOS	12
3.1 Material	12
3.2 Métodos	13
3.2.1 Predição de marés usando pacotes estatísticos	13
3.2.1.1 O algoritmo em Minitab	13
3.2.2 Predição de marés usando o T-tide	14
3.2.2.1 O algoritmo em T-tide	15
IV. RESULTADOS	16
4.1 Dados observados	16
4.2 Pacotes estatísticos	17
4.3 T-tide	24
4.4 Comparação entre os dois modelos	26
4.5 Comparação de marés modeladas com marés observadas	27

Título	Página
V. DISCUSSÃO	28
5.1. As componentes de marés	28
5.2 O procedimento em pacotes estatísticos e em T-tide	29
5.3 Comparação entre os dois modelos	30
Classificação das Marés na Inhaca	31
5.4 Comparação das marés observadas com as marés tabeladas	31
VI. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	32
6.1 Conclusões	32
6.2 Recomendações	33
VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34
Anexos	36

I. INTRODUÇÃO E OBJECTIVOS

1.1 Introdução

A Ilha da Inhaca (figura 1) situa-se no Oceano Índico, a 26° de latitude Sul, 33° de longitude Este, e está a 32 km a Este da cidade de Maputo. Do ponto mais a Norte (Ponta Mazondue) ao ponto mais a Sul (Ponta Torres) são 12.5 quilómetros de distância, a largura da Ilha é pequena com pouco mais de um quilómetro de distância. A ilha tem 40 km² de área e a maior parte dos organismos lá existentes provém da região Este Indo-Pacífica.

A ilha situa-se numa região de transição de temperaturas quentes para um clima tropical, com Verões quentes e Invernos secos.

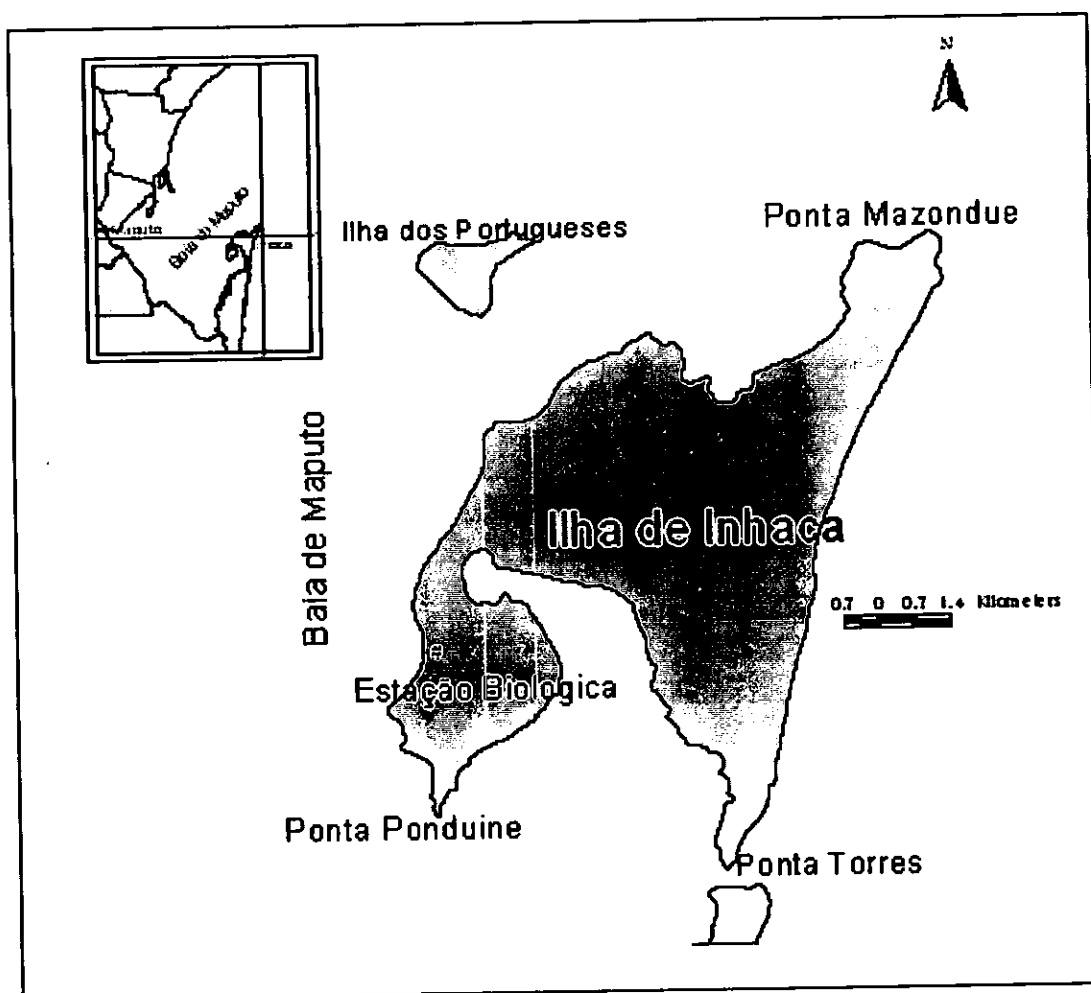


Figura 1.: Ilha da Inhaca

A Baía de Maputo tem uma área cerca de 960 km² e está aberta para o Oceano Índico no lado Norte. Apenas um quinto da Baía tem mais que dez metros de profundidade e há cinco grandes rios que desaguam na Baía, entrando pela fronteira Oeste, depois de percorrerem cerca de 200 km (Kalk, 1995).

Numa parte importante da Ilha, foi construída uma Reserva Natural Protegida, localizada nas imediações da Estação de Biologia Marinha que nos últimos anos se tornou num importante centro de pesquisa internacional. (Kalk, 1995).

A Estação de Biologia Marinha da Inhaca e a Reserva Natural tem sido nos últimos anos, alvos de estudos de várias ordens e nas mais variadas áreas do saber.

Marés são oscilações periódicas do nível do mar provocadas principalmente pelas forças de atracção gravitacional entre a Terra, a Lua e o Sol (INAHINA, 2003). Estas oscilações, diferenciam-se das demais existentes no mar, pelo seu enorme período que pode ser de um dia ou meio dia.

O estudo das marés ao longo do tempo divide-se em três etapas. A primeira etapa acontece no século XVII quando Newton estabeleceu uma teoria do equilíbrio de marés. A segunda etapa acontece um século mais tarde quando vários físicos como Laplace, Bernoulli e Euler desenvolvem uma teoria da dinâmica de marés (Open University Course Team, 1999). E a terceira etapa começa em 1854 quando foram feitas as primeiras observações maregráficas nos Estados Unidos e na França e, desde então vários estudos têm sido feitos no sentido de melhorar os métodos e instrumentos de medição (Nolte, 2004).

Segundo Boer (2000), as marés são um elemento determinante na vida de muitas espécies que habitam a zona *intertidal* (entre-marés) de todas costas, e o seu estudo torna-se extremamente importante, principalmente quando se trata de espécies economicamente importantes.

O estudo da predição das marés é importante para a compreensão e predição das correntes de maré que, por sua vez controlam um número indeterminado de processos oceânicos.

A previsão das marés assume grande importância em qualquer viagem marítima, uma vez que todo marinheiro precisa saber a melhor hora para sair ou entrar no Porto e a melhor direcção em que deve entrar no Porto, para poder fazer uma viagem segura.

O conhecimento da natureza das marés e, a predição das preia-mares, das baixa-mares, das marés vivas e das marés mortas é de importância vital no planeamento de projectos de costa e na monitoria da protecção costeira.

Este estudo constitui um contributo as diversas investigações científicas levadas a cabo no nosso país e em particular na região em causa.

1.2 Objectivos

Este trabalho tem como objectivo geral, o estudo das marés que ocorrem na região a frente da Estação Biológica de Inhaca,

Os objectivos específicos são:

- a) Construir um modelo numérico de predição de marés para Inhaca;
- b) Comparar as marés modeladas (tabeladas) com as marés observadas;
- c) Caracterizar as marés que ocorrem na Estação Biológica de Inhaca.

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Nível do Mar

O nível do mar é a posição em que a superfície do mar se encontra relativamente a um ponto de referência que pode ser o fundo oceânico, o nível médio do mar (nmm) ou o nível a partir do qual se traçam as batimetrias. Mesmo quando aparentemente não há ondas no mar, o nível do mar não se mantém constante ao longo do tempo. Dentre os factores que contribuem para a não constância do nível do mar destacam-se as ondas, as marés, a precipitação e rios.

Uma onda é uma alteração do nível do mar em virtude de haver uma perturbação numa parte do fluido oceânico que é depois transferida para outras partes. Os mais importantes factores naturais que causam esta perturbação são o vento, os abalos sísmicos, diferenças na densidade em camadas adjacentes de água e a atracção entre astros.

As ondas individuais geradas por vento duram pouco tempo (desde fracções de segundos até alguns minutos), propagam-se em direcção à costa e suas características dependem da velocidade do vento que a gerou (Open University Course Team, 1999). Em regiões do globo onde os ventos predominantes são relativamente fortes haverá ondas constantes cujas características serão iguais em todas as ondas.

As marés são ondas longas geradas pela atracção entre os astros e têm período de duração de aproximadamente meio dia ou mesmo um dia. O fenómeno de marés observa-se quando a superfície do mar ou de outra grande massa de água sobre a Terra oscila verticalmente, esta oscilação é causada primeiramente pelas diferenças na atracção gravitacional da Lua e, em menor extensão, do Sol sobre os diversos pontos da Terra (Machado, 1979 e INAHINA, 2003).

As marés diferenciam-se das demais oscilações existentes no mar pelo seu período e pelo seu comprimento de onda que é cerca de 20 000 km.

A queda de precipitação e a água dos rios tendem a elevar o nível do mar mas o efeito destes factores é pequeno quando comparado com o efeito das ondas e das marés. O nível do mar também pode ser alterado por acção de factores meteorológicos como por exemplo a pressão atmosférica, em que baixos valores de pressão tendem a fazer subir o nível do mar (INAHINA, 2003).

2.2 Marés

As marés são movimentos periódicos das águas do mar devido a mudanças nas forças atractivas do Sol e da Lua sobre a Terra em rotação. Há duas teorias que explicam o fenómeno das marés, a teoria de equilíbrio e a teoria da dinâmica de marés.

A teoria do equilíbrio de maré, considera que os movimentos orbitais da Terra e dos outros astros criam uma força centrípeta que é equilibrada pela força de gravitação universal. O equilíbrio destas duas forças (ou *força geradora-de-maré*) constitui a causa principal das marés (Open University Course Team, 1999). O facto dos astros estarem em movimento constante justifica as alterações do nível do mar, num ponto particular do globo.

As forças geradoras-de-marés que actuam nos pontos A e B (Figura 2) têm mesmo módulo e sentido diferente.

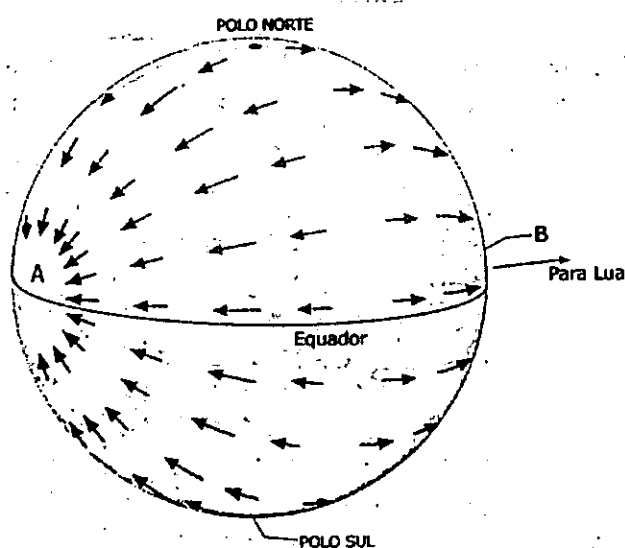


Figura 2.: O modelo de equilíbrio de marés

Em consequência disso, toda água tende a mover-se para esses pontos, criando um equilíbrio em algum ponto entre eles. Daí, o nome de teoria do equilíbrio de marés e, nela não se considera a inércia, a força de *coriolis*, o fundo oceânico e outros factores. Podem-se prever as marés em qualquer lugar e tempo usando modelos analíticos (Apel, 1999).

A teoria da dinâmica de marés aparece para melhorar a teoria de equilíbrio, isto é, nela se considera que as forças atractivas, a inércia e outros factores podem alterar o movimento dum fluido na Terra. Esta teoria resulta em **sistemas anfidrómicos** nos quais uma onda de maré propaga-se no mar aberto descrevendo um círculo. Assim a crista desta onda (ou preia-mar) circula em volta de um **ponto anfidrómico** uma vez em cada ciclo de maré. Nesta teoria podem-se prever as marés usando métodos numéricos que incluem a análise de séries temporais observadas (Open University Course Team, 1999).

2.2.1 A Atracção Gravitacional

Segundo Machado (1979), a atracção gravitacional é exercida por todos os corpos celestes (astros) mas somente a atracção do Sol e da Lua têm efeitos consideráveis no processo de geração das marés e, isto deve-se ao facto de a Lua ser o corpo celeste mais próximo da Terra e de o Sol ser o corpo celeste com maior massa.

A força geradora de marés devido a Lua (F_{GM}) resulta do balanço entre a força gravitacional e a força centrífuga que surge em virtude do movimento rotacional do sistema Terra-Lua. Esta força está relacionada com a distância de separação entre Terra e Lua do seguinte modo (Apel, 1999):

$$F_{GM} = G \frac{M_T M_L 2a}{R^3} \quad (1)$$

Onde a é o raio da Terra, R é a distância entre a Terra e Lua, M_T e M_L são as massas da Terra e Lua respectivamente e G é a constante de gravitação universal. Na dedução desta equação despreza-se o raio da Terra em face da distância Terra-Lua por esta ser muito maior

que o raio da Terra e note-se que a força geradora de marés é inversamente proporcional ao cubo da distância entre os centros da Lua e da Terra (R^3 na equação 1).

A força geradora de marés devido ao Sol têm a mesma forma que a força devido a Lua e sua equação pode ser obtida substituindo a massa da Lua na equação (1) por massa do Sol e R passa a ser a distância Terra-Sol. O facto da força geradora de marés ser inversamente proporcional ao cubo da distância Terra-astro combinado com os movimentos orbitais da Terra e dos astros faz com que se observem diferenças nas marés da Terra.

A trajectória e a periodicidade dos movimentos orbitais da Lua em torno da Terra assim como os movimentos da Lua e da Terra em volta do Sol são completamente previsíveis. Este facto faz com que as marés da Terra possam ser previstas (Open University Course Team, 1999).

A órbita da Lua em volta da Terra é elíptica, faz um certo ângulo com o plano do equador terrestre e repete-se a cada 27,3 dias (Open University Course Team, 1999).

A previsão das marés reais pode ser feita através de métodos numéricos que usam a análise espectral de um campo de ondas (Priestley, 1981 citado por Marone e mesquita, 1997), a análise harmónica de um registo contínuo do nível do mar (Fox, 1971) e também pode ser feita pelo método expedito (ver anexo II).

Na predição de marés pelo método harmónico considera-se que a onda de maré que se observa é resultado da soma de um grande número de ondas parciais, i. e.:

$$\eta_{Obs} = \eta_0 + \eta_1 + \eta_2 + \dots + \eta_n = \eta_0 + \sum_{i=1}^n \eta_i \quad (2)$$

Na equação 2, cada onda parcial η_i tem uma frequência específica (ω_i) que advêm da combinação de somas e diferenças de múltiplos inteiros de seis frequências fundamentais que estão relacionados com movimentos planetários (Pawlowicz et Al., 2002):

♣ ω_1 — representa os efeitos da rotação da Terra (dia lunar de 24.84 horas);

Previsão de Marés na Estação Biológica da Inhaca

- ♣ ω_m — representa a órbita da lua em volta da terra (mês lunar de 27.32 dias);
- ♣ ω_y — representa a órbita da Terra em volta do Sol (ano tropical de 365.24 dias);
- ♣ ω_p — representa a periodicidade da posição do perigeu lunar (8.85 anos);
- ♣ ω_n — representa a periodicidade da inclinação da órbita lunar (18.6 anos);
- ♣ ω_{p1} — representa a periodicidade da posição do periélio (20 942 anos).

A equação 2.b) relaciona estas frequências com os múltiplos inteiros, chamados de *números de Doodson* (n_d) devido a autoria do modelo (Apel, 1999 e Pawlowicz et Al., 2002):

$$\omega_i = n_1\omega_1 + n_2\omega_m + n_3\omega_y + n_4\omega_p + n_5\omega_n + n_6\omega_{p1} \quad 2.b)$$

Tabela 1.: Período e frequência das principais ondas parciais (constituintes de maré) e sua relação com os números de Doodson. Os índices na primeira coluna indicam o número de ciclos por dia solar. (Fontes: Apel, 1999 e Open University Course Team, 1999)

Símbolo	Nome da Constituinte	Período (horas)	Relação com n°s de Doodson	Frequência ω_i (horas ⁻¹)
M2	Principal Lunar	12.42	$2\omega_1$	0.081
S2	Principal Solar	12.00	$2(\omega_1 + \omega_m - \omega_y)$	0.083
N2	Elíptica Lunar Maior	12.66	$2(\omega_1 - \omega_m + \omega_p)$	0.079
K2	Luni-solar semi-diurna	11.97	$2(\omega_1 + \omega_m)$	0.084
K1	Luni-solar Diurna	23.93	$\omega_1 + \omega_m$	0.042
O1	Principal Lunar Diurna	25.82	$\omega_1 - \omega_m$	0.039
P1	Principal Solar Diurna	24.07	$\omega_1 + \omega_m - 2\omega_y$	0.042
Mf	Lunar Quinzenal	327.86	$2\omega_m$	0.003
Mm	Lunar Mensal	661.30	$\omega_1 - \omega_m$	0.002

Cada onda parcial (ou constituinte da maré) na equação (2) pode ser descrita por uma função sinusoidal cuja frequência é conhecida.

$$\eta_i = A_i \cos(\omega_i t - \phi_i) \quad (3)$$

Onde A_i e φ_i são a amplitude e fase inicial da onda parcial. i indica a ordem da constituinte.

2.2.2 O Efeito da Forma das Bacias Oceânicas na Água em Movimento.

As ondas de maré ao se propagarem, geram correntes de maré que são dirigidas para oeste e, a presença dos continentes (alongados de Norte a Sul) e a forma das bacias impede a contínua propagação destas ondas em volta do globo terrestre e dificultam os movimentos das correntes de maré (Open University Course Team, 1999 e Machado, 1979).

A ressonância ou co-oscilação de frequências é um fenómeno próprio de baías e lagoas interiores em que as dimensões são grandes e o fundo (na zona de praia) é muito inclinado. A onda de maré é reflectida no fundo da bacia e, no seu movimento de recuo gera uma onda reflectida que tem o mesmo comprimento de onda e a mesma frequência que a onda incidente. Se a onda reflectida se move com frequência igual a da onda incidente, gera-se uma onda estacionária e tem lugar a ressonância.

Por vezes, a co-oscilação de frequências em bacias oceânicas e mares subsidiários produz alterações consideráveis de algumas componentes das marés e este efeito é predominante nalguns portos do Pacífico e Índico onde, se as marés forem diurnas, perante uma co-oscilação elas se modificam tomando-se semi-diurnas. (Provost et Al., s/d e Machado 1979).

A ressonância pode ser identificada a partir duma comparação entre as amplitudes das ondas incidente e reflectida e também a partir de análises de algumas componentes de marés. Note-se que a ressonância tende a exagerar as componentes diurnas (Machado 1979).

2.3 Caracterização das Marés

Quando a força de atracção da Lua se conjuga com a força de atracção do Sol geram-se na Terra, marés vivas cuja altura é grande e, nesse momento a Lua e o Sol estão em conjunção ou oposição. O contrário acontece quando a Lua e Sol estão em quadratura, em que se

geram marés mortas cuja altura é pequena. Altura de maré é tida como a diferença entre uma crista e o cavado consecutivo. Por causa do período de rotação da Lua em torno da Terra (29.5 dias), as marés vivas e/ou mortas acontecem duas vezes em cada mês. (Vasconcelos, s/d e Open University Course Team 1999).

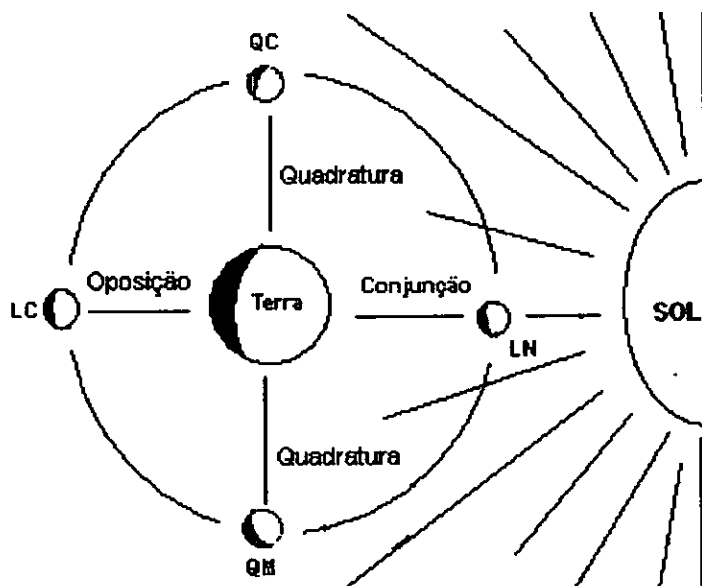


Figura 3: Fases da Lua, marés vivas e mortas

A origem deste fenómeno está relacionada com o movimento de rotação da Terra que faz com que todos os pontos estejam expostos a Lua pelo menos uma vez por dia. (Open University Course Team, 1999).

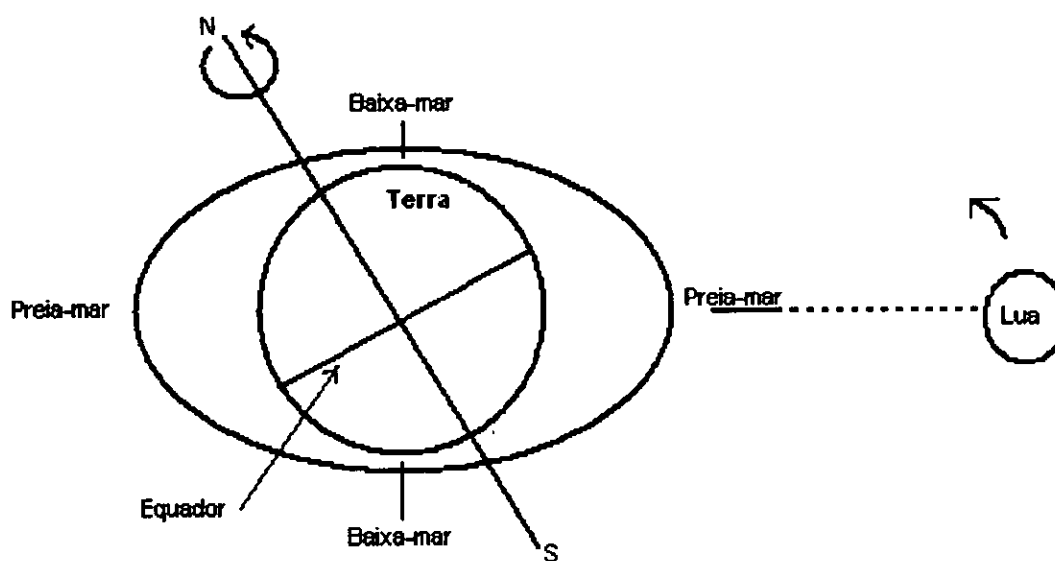


Figura 4: Rotação da Terra, preia-mar e baixa-mar.

Num ponto particular do globo, durante o dia observam-se momentos em que, o nível do mar ou é o mais alto possível ou é o mais baixo possível. A esses níveis extremos são chamados preia-mar e baixa-mar respectivamente, e podem ocorrer uma vez por dia (ciclo diurno) ou duas vezes por dia (ciclo semi-diurno).

Quando as marés são diurnas espera-se que as componentes diurnas sejam maiores que as semi-diurnas e vice-versa. Portanto as marés podem ser classificadas de acordo a razão entre as amplitudes das duas principais componentes diurnas pelas amplitudes das duas principais componentes semi-diurnas segundo a seguinte equação:

$$F = \frac{K1 + O1}{M2 + S2} \quad (4)$$

Onde F é um parâmetro adimensional chamado *factor de forma* (Canhanga, 2004). Com base na definição deste parâmetro, têm sido feitas estimativas sobre a distribuição dos diversos tipos de marés à volta do mundo e, um exemplo é o ilustrado na figura 1 em anexo II.

Dependendo do valor do factor de Forma, podem existir os seguintes casos:

- ⊕ $F < 0.25$ — marés semi-diurnas;
- ⊕ $0.25 < F < 1.5$ — marés semi-diurnas misturadas;
- ⊕ $1.5 < F < 2.5$ — marés diurnas misturadas;
- ⊕ $F > 3$ — marés diurnas.

III. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material

Neste trabalho usaram-se dados de maré que foram disponibilizados pela Cátedra de Ciências Marinhas e Oceanografia da U.E.M. Estes dados foram colhidos a frente da Estação de Biologia Marinha na Inhaca, no Inverno de 2003 e, foram analisados e processados num computador Intel-Celeron 902 MHz.

A amostragem iniciou em 03-Mai-03 as 03h59'55''. Utilizando o marégrafo Hydrotide-2 foram colectados dados referentes a elevação do nível do mar durante quase 57 dias em intervalos de 10 minutos.

Hydrotide é um marégrafo que grava as medições efectuadas e foi desenhado para monitorar durante muito tempo, a actividade de marés em locais distantes. O instrumento tem como base, a medição da variação da pressão na coluna de água. Estas variações são convertidas em elevações do nível do mar e gravadas na memória do instrumento. Tanto o descarregamento dos dados como o pré-estabelecimento do período e do intervalo de registo deve ser efectuado num computador com o sistema operativo MS-DOS, e com o auxílio de um programa apropriado.

Os valores de pressão são registados com precisão de 0.015%. A conversão (pressão-elevação) e o armazenamento dos dados são feitos com precisão de 0.025%. O relógio do instrumento tem precisão de ± 1 segundo por mês.

A base de dados do Hydrotide está programada para fazer medição da pressão em cada 0.75 segundos e depois, determinar a média ao fim do intervalo de amostragem pré-estabelecido. Este processo repete-se durante o período que também é pré-estabelecido.

3.2 Métodos

A predição de marés foi realizada em duas etapas que diferem entre si no programa usado:

- a) Predição de marés usando pacotes estatísticos;
- b) Predição de marés usando o T-tide;

3.2.1 Predição de Marés Usando Pacotes Estatísticos

Nesta etapa, o método usado para predizer as marés foi o “método harmónico clássico” cuja base é a equação (3) combinada a equação (2). Este método foi bem descrito por Fox e Davis (1971), PUGH (1978) e Marone & Mesquita (1997).

A partir dos dados de maré, foram calculadas as amplitudes e fases usando a equação (3) através das quais se construiu o modelo de predição de marés para a Inhaca. Neste modelo foi forçado um ajuste de coeficientes para doze constituintes na seguinte ordem:

1. Constituintes semi-diurnas (M2, S2, N2 e K2),
2. Constituintes diurnas (K1, P1 e O1),
3. Constituintes de período longos (Mf e Mm),
4. Constituintes de águas pouco profundas (M4, M6 e M8).

A análise harmónica foi efectuada num pacote estatístico (*Minitab 12.1 for Windows*) e, os cálculos, os gráficos e sua análise foram efectuados no programa *MS Excel*.

3.2.1.1 O Algoritmo em Minitab

Em Minitab, a análise de regressão é usada para investigar e modelar a relação entre uma variável de resposta e um ou mais “*predictors*”. Usando procedimentos de quadrados mínimos, o programa ajusta coeficientes b_i de modo a acertar a seguinte equação:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_i X_i + \varepsilon \quad (5)$$

Onde Y é a resposta que no modelo representa o valor observado com a média subtraída, X_1 , X_2 , e X_i são os “predictors” modelados como $\text{Sin}(\omega_i t)$ e $\text{Cos}(\omega_i t)$, em que i indica a componente; b_0 , b_1 , b_2 , e b_i são os coeficientes de regressão modelados por $A_i \text{Cos}(\varphi_i)$ e $A_i \text{Sin}(\varphi_i)$, e ε é um termo de erro que tem uma distribuição normal com média zero e desvio padrão σ .

Depois de efectuados os ajustes, calcula-se o desvio padrão populacional (s) e o quadrado da correlação (R^2) entre os valores ajustados e os observados dando assim a possibilidade de avaliar o ajuste realizado em termos percentuais.

3.2.2 Predição de Marés Usando o T-tide

T-tide é um programa específico para predição de marés e das correntes de marés, nele estão incluídos um conjunto de subprogramas escritos em *Matlab* que fazem a análise harmónica clássica com correcções nodais e inferência das constituintes que não podem ser resolvidas devido a semelhança entre elas, e fazem também a predição de marés usando as constituintes analisadas com intervalo de confiança de 95%.

O programa inclui uma lista de 45 constituintes astronómicas e 101 constituintes de águas pouco profundas das quais, dependendo da frequência de cada constituinte (de acordo com o limite de resolução do critério de Rayleigh, $\alpha(n\Delta t)^{-1}$) e do tamanho da amostra, umas são incluídas e outras são excluídas do cálculo.

Para determinar a significância das constituintes usa-se o SNR (*razão sinal-ruído*) que é calculado a partir do quadrado da razão entre a amplitude e o erro que se comete ao determinar a amplitude. No caso em que SNR é maior que unidade ($\text{Rayleigh}=1$), considera-se que a constituinte é significativa.

Foi escrito um programa em *Matlab* (ver anexo I), que tem como *input* (entrada), os dados, a latitude e a data do início da previsão e, em *output* (saída) faz a análise harmónica e predição em T-tide. O programa precisa de um ficheiro que contém os dados observados e só corre num computador que tenha o T-tide instalado.

3.2.2.1 O Algoritmo em T-tide

A base do algoritmo aqui usado é a álgebra complexa relacionada com ajuste de seno e cosseno separadamente, em que a série temporal é expressa por números complexos ($u+iv$). Sendo $y(t)$ a série temporal observada com $t=t_1, t_2, \dots, t_M$, a resposta é modelada de modo:

$$x(t) = b_0 + b_1 t + \sum_{k=1}^N (a_k e^{i\sigma_k t} + a_{-k} e^{-i\sigma_k t}) \quad (6)$$

Onde $x(t)$ é a maré modelada, N é número de componentes e σ é a frequência. O ajuste de mínimos quadrados que é a minimização dos coeficientes b_0, b_1, a_k e a_{-k} é feita de modo:

$$E = \sum_{m=1}^M |x(t_m) - y(t_m)|^2 = \|Ta - y\|^2 \quad (7)$$

Onde: $y(t_m)$ é a maré observada e T é uma matriz de funções lineares e sinusoidais avaliadas no tempo de observação, y é uma matriz de valores observados e a é uma matriz de coeficientes $b_0, b_1, a_1, a_{-1}, a_k$. O programa T-tide estima os erros cometidos durante o ajuste dos coeficientes e faz a computação do intervalo de confiança que permite que se façam comparações quantitativas de análises diferentes.

IV. RESULTADOS

4.1 Dados Observados

Em todos os gráficos que se apresentam nesta secção e na secção 4.2, as datas referem-se a 0:00h do respectivo dia.

Os dados são de boa qualidade uma vez que: (1) não apresentam saltos nem interrupções consideráveis; (2) a menor elevação registada é maior que o nível de referência, onde se situa o instrumento (no gráfico 1 indicado pela linha de elevação igual a zero), (3) o período de amostragem é superior a 28 dias que é o mínimo necessário para se fazer uma boa predição (Machado, 1979).

Na maré viva (MV) a elevação atinge cerca de 3 metros enquanto que na maré morta (MM) o máximo de elevação é cerca de 2.3 metros. Note-se o tempo de quase 15 dias entre duas marés vivas ou mortas e o tempo de 7 dias entre uma maré viva e a maré morta consecutiva.

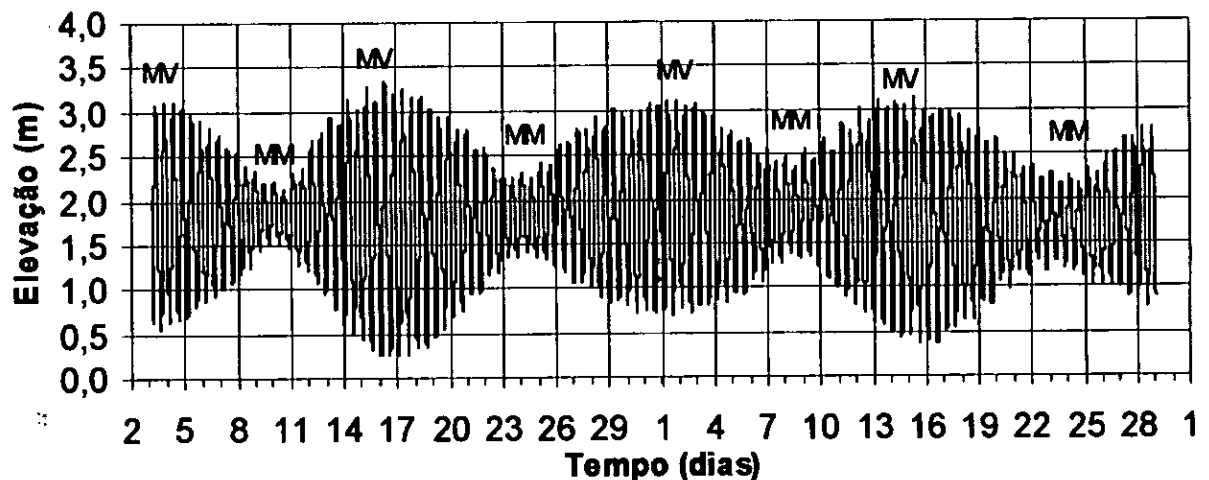


Gráfico 1: Dados observados no intervalo entre 3-Mai-03 a 29-Jun-03.

As marés na Inhaca são semi-diurnas e esta característica pode ser vista no gráfico 2, em que o tempo entre duas preia-mares ou baixa mares consecutivas é de aproximadamente 12 horas.

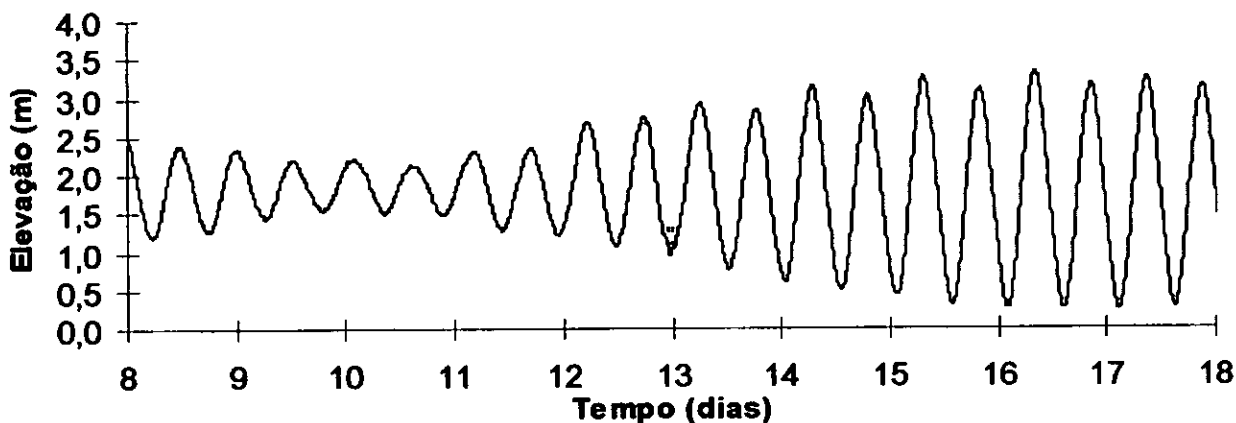


Gráfico 2: Dados observados num intervalo menor, de 8 a 18 de Maio/2003.

4.2 Pacotes Estatísticos

O efeito da principal componente lunar (M2) pode ser visto no gráfico 3, em que durante a maré morta (entre dias 8 e 12), a diferença de fase entre a componente M2 e a maré observada é grande e na maré viva (dias 13 a 18), esta diferença de fase é menor. Na maré morta, a amplitude da componente M2 é maior que a amplitude da maré observada e, na maré viva ocorre o contrário.

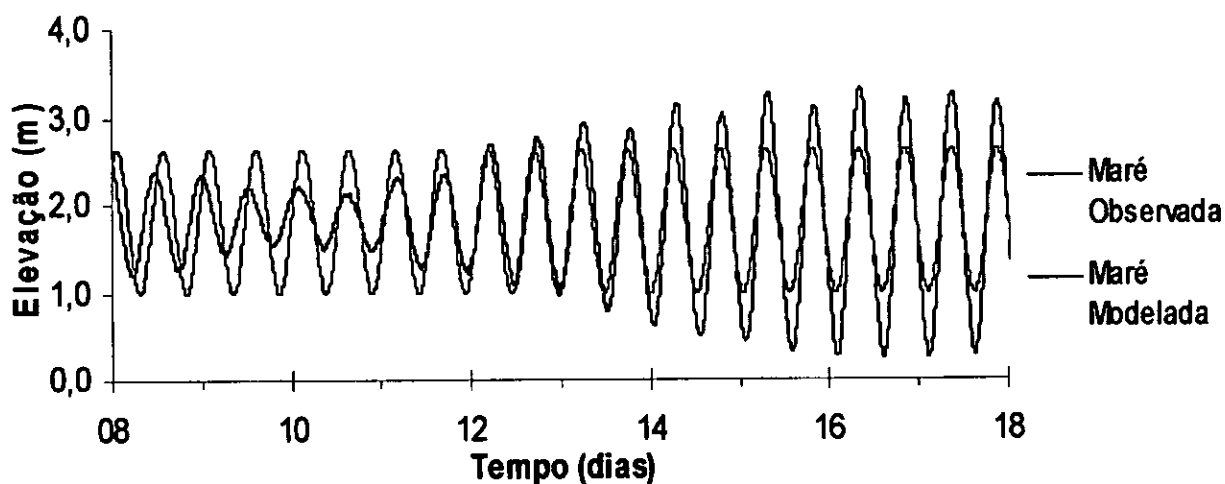


Gráfico 3: Modelação da componente M2, mês de Maio.

A tabela 2 mostra amplitude e fase inicial da onda M2 calculados a partir dos resultados obtidos por regressão em Minitab. R^2 é o quadrado do coeficiente de correlação (secção 3.2.1.1) e s é o desvio padrão relativo à curva modelada.

Tabela 2.: Modelação da componente M2.

	Amplitude (m)	Fase (°)	R^2 (%)	s
M2	0.825	201.01	75.4	0.33

O gráfico 4 obtém-se adicionando as componentes S2, N2 e K2 à curva do gráfico 3. A diferença de fase entre a onda observada e a modelada existente no gráfico 3 é minimizada, mas ainda persistem diferenças na amplitude (Gráfico 4b). As propriedades da onda modelada encontram-se na Tabela 3.

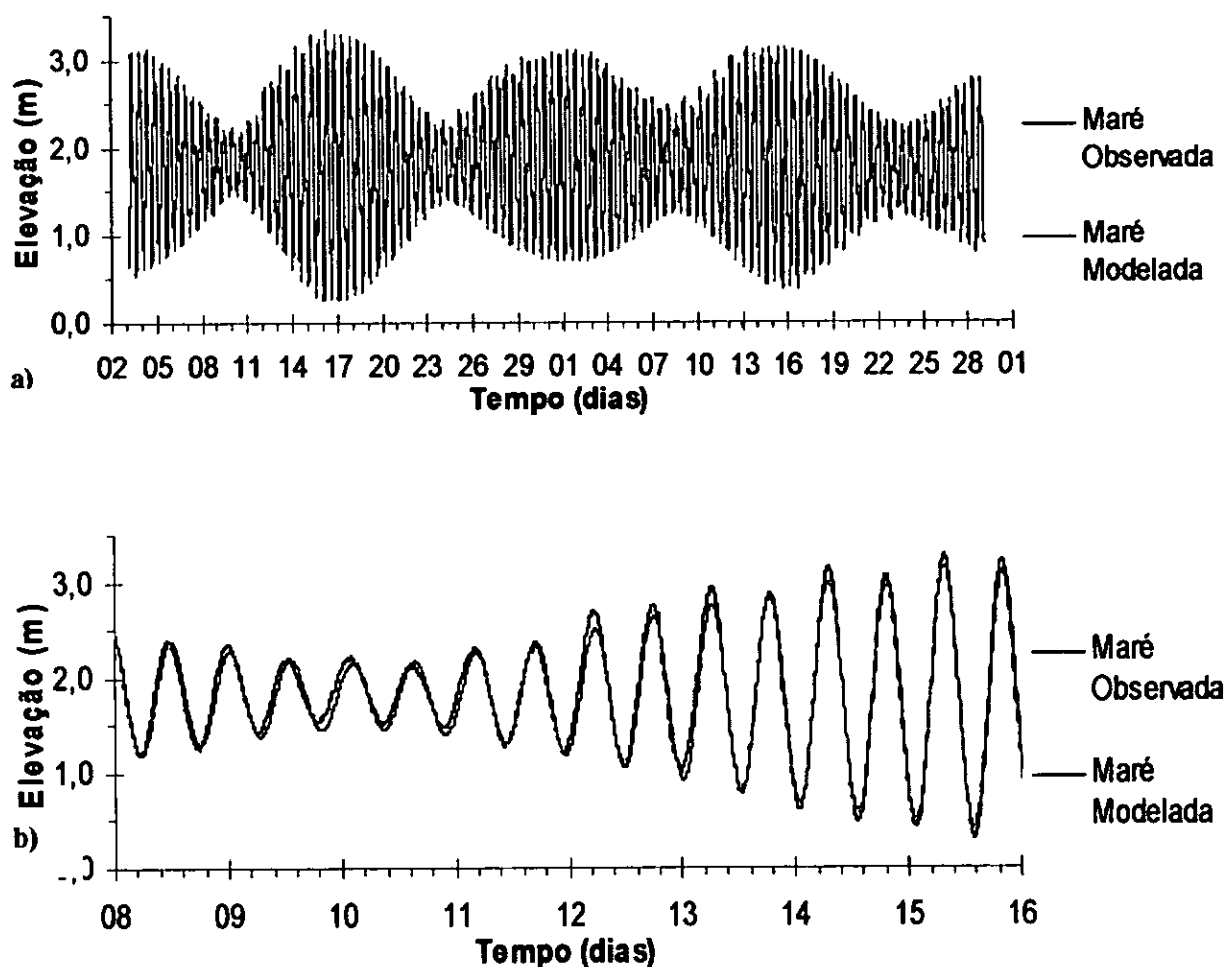


Gráfico 4.: Modelação das componentes semi-diurnas (M2, S2, K2 e N2).

a) de 08 a 13 de Maio de 2003 e b) de 03 de Maio à 29 de Junho/03

Tabela 3.: Modelação das componentes semi-diurnas (M2, S2, K2 e N2).

	Amplitude (m)	Fase (°)	R^2 (%)	s
M2	0.8464	199.93	97.9	0.10
S2	0.4698	196.27		
K2	0.1541	23.18		
N2	0.1689	265.76		

No gráfico 5 observa-se uma onda modelada, cujo ajuste em Minitab foi efectuado para as componentes diurnas e semi-diurnas, isto é: M2, S2, K2, N2, K1, O1 e P1. A adição das constituintes diurnas, reduz a diferença entre duas preia-mares (ou baixa-mares) num mesmo dia.

No gráfico 4b) a altura das preia-mares modelada (entre os dias 12 e 16) aumenta uniformemente enquanto que no gráfico 5, o aumento deixa de ser uniforme, tornando-se mais semelhante ao aumento dos valores observados. No entanto estas diferenças não são significativas. A tabela 4 apresenta as propriedades da onda ajustada para estas componentes.

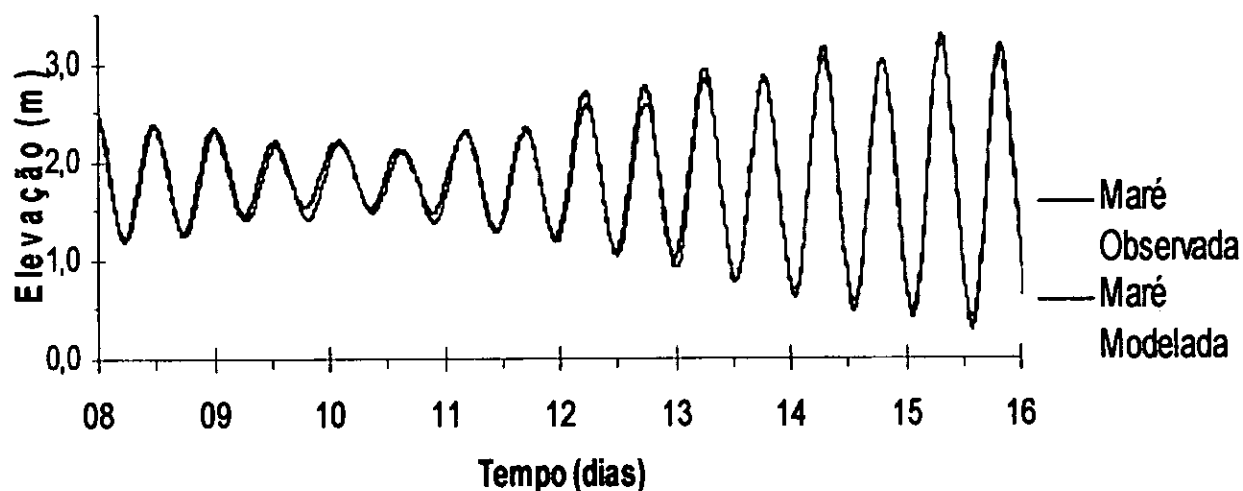


Gráfico 5.: Modelação das componentes semi-diurnas e diurnas (M2, S2, K2, N2, K1, O1 e P1).

Tabela 4.: Modelação das componentes diurnas+Semi-diurnas (M2, S2, K2, N2, K1, O1 e P1).

	Amplitude (m)	Fase (°)	R^2 (%)	s
M2	0.8464	199.94	98.2	0.09
S2	0.4694	196.30		
K2	0.1541	23.14		
N2	0.1685	265.68		
K1	0.0344	292.09		
O1	0.0249	205.36		
P1	0.0221	62.30		

O gráfico 6 mostra a curva modelada para as constituintes M2, S2, K2, N2, K1, O1, P1, Mm e Mf. As propriedades da curva modelada estão na tabela 5. A inclusão das constituintes de períodos longos na modelação, causa influência na amplitude das variações diárias, na fase das variações mensais (marés vivas e mortas) e beneficia às predições feitas para períodos longos (acima de um mês).

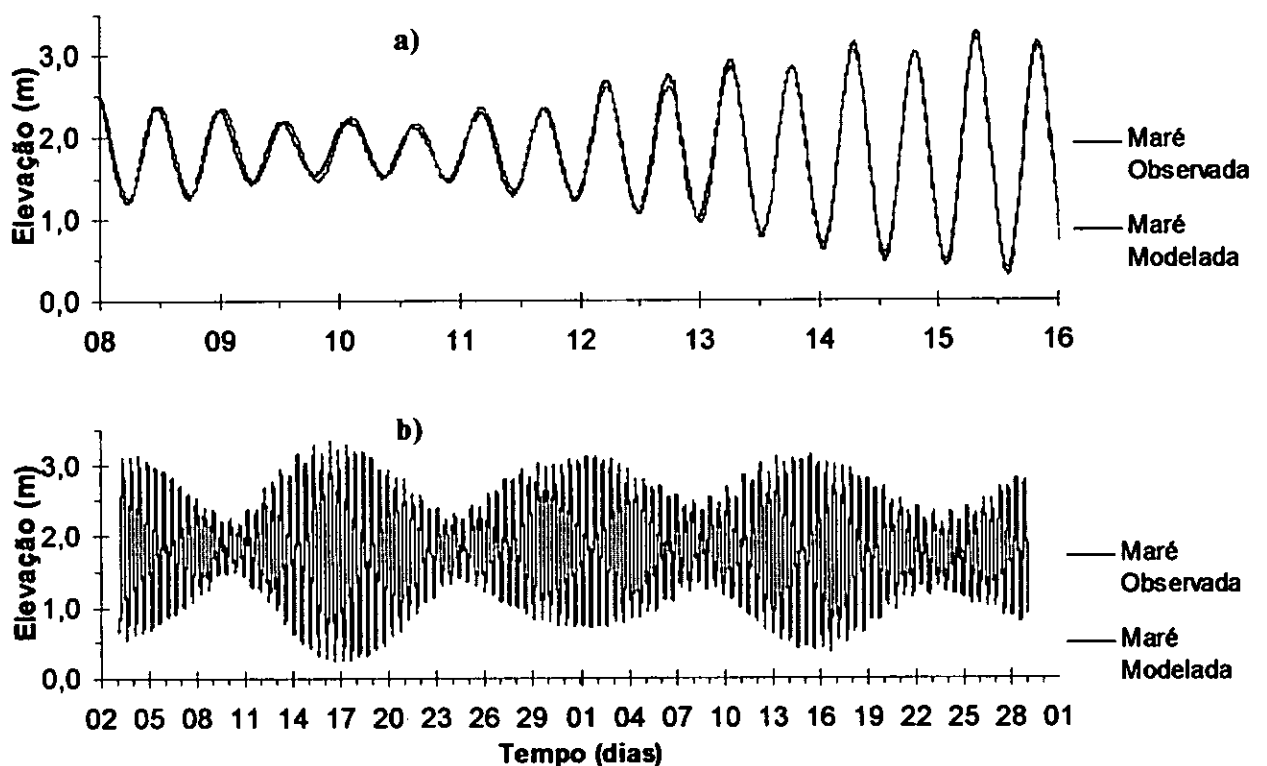


Gráfico 6.: Modelação das componentes diurnas, semi-diurnas e as de período longo a) de 08 à 16 de Maio/03 e b) de 03 de Maio à 29 de Junho/03

Tabela 5.: Modelação das componentes diurnas, semi-diurnas e as de período longo (Mf e Mm).

	Amplitude (m)	Fase (°)	R^2 (%)	s
M2	0.8464	199.94	98.6	0.0796
S2	0.4691	196.28		
K2	0.1542	23.14		
N2	0.1686	265.68		
K1	0.0341	291.31		
O1	0.0247	205.38		
P1	0.0227	61.97		
Mf	0.0252	119.34		
Mm	0.0514	305.52		

O gráfico 7 ilustra uma onda modelada na qual se consideram componentes de água pouco profunda (M4, M6 e M8). As propriedades da onda estão na tabela 5. A adição destas componentes reduz a diferença entre os máximos da curva modelada e os máximos da curva observada.

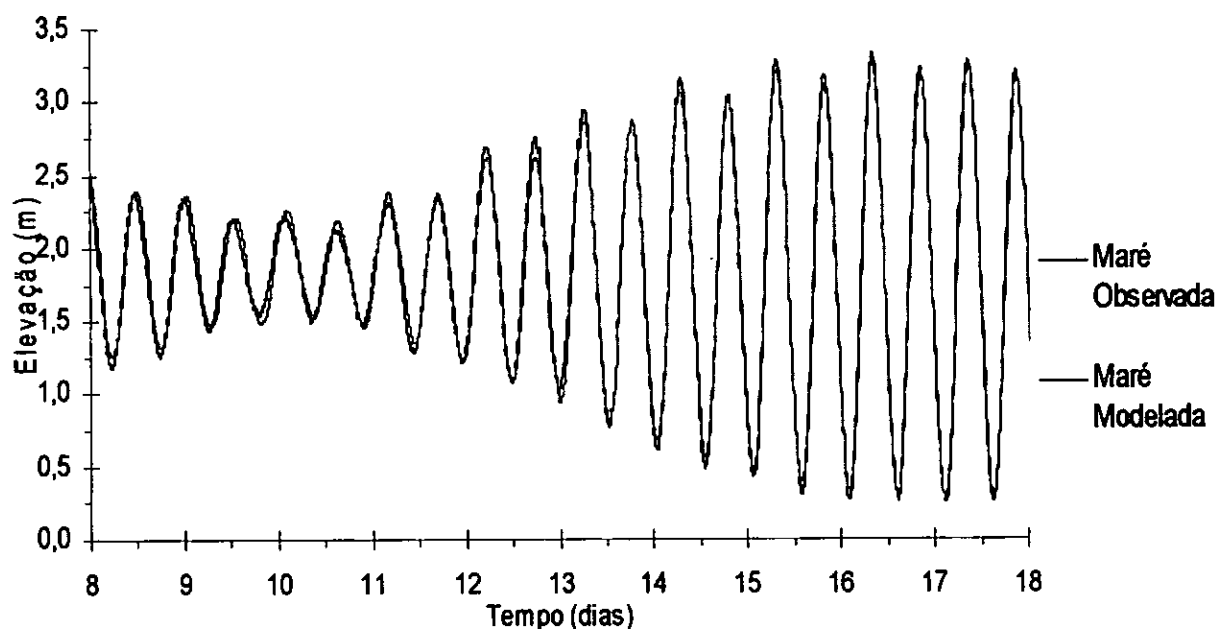


Gráfico 7.: Modelação das componentes semi-diurnas, diurnas, de períodos longos e as de água pouco profunda (M2, S2, K2, N2, K1, O1, P1, Mf, Mm M4, M6 e M8).

Tabela 6.: Modelação das componentes semi-diurnas, diurnas, de períodos longos e as de água pouco profunda (M2, S2, K2, N2, K1, O1, P1, Mf, Mm M4, M6 e M8). R^2 foi obtido adicionando as componentes. O desvio padrão do ajuste das 12 componentes é de 0,0791.

	Amplitude (m)	Fase (°)	R^2 (%)	Amplitude (%) M2=100%
M2	0.8464	199.94	75.4	100
+ S2	0.4690	196.30	94.5	55.4
+ K2	0.1542	23.13	97.2	18.2
+ N2	0.1685	265.57	97.9	19.9
+ K1	0.0341	291.38	98.2	4.0
+ O1	0.0248	205.38	98.2	2.9
+ P1	0.0227	61.77	98.2	2.7
+ Mf	0.0252	119.32	98.6	3.0
+ Mm	0.0514	305.63	98.6	6.1
+ M4	0.0099	83.92	98.6	1.2
+ M6	0.0082	200.52	98.6	1.0
+ M8	0.0013	281.54	98.6	0.6

O gráfico 7 e a tabela 6 constituem o modelo harmónico clássico de predição de marés para a Estação de Biologia Marinha da Inhaca, obtido com o uso de pacotes estatísticos.

As marés vivas/mortas modeladas ocorrem no mesmo instante que as marés observadas (gráfico 8.a) e as preia/baixa-mares modeladas também ocorrem em simultâneo com as observadas (gráfico 8.b).

A diferença entre as marés observadas e as marés modeladas representam resíduos e estão ilustrados no gráfico 8, curva azul.

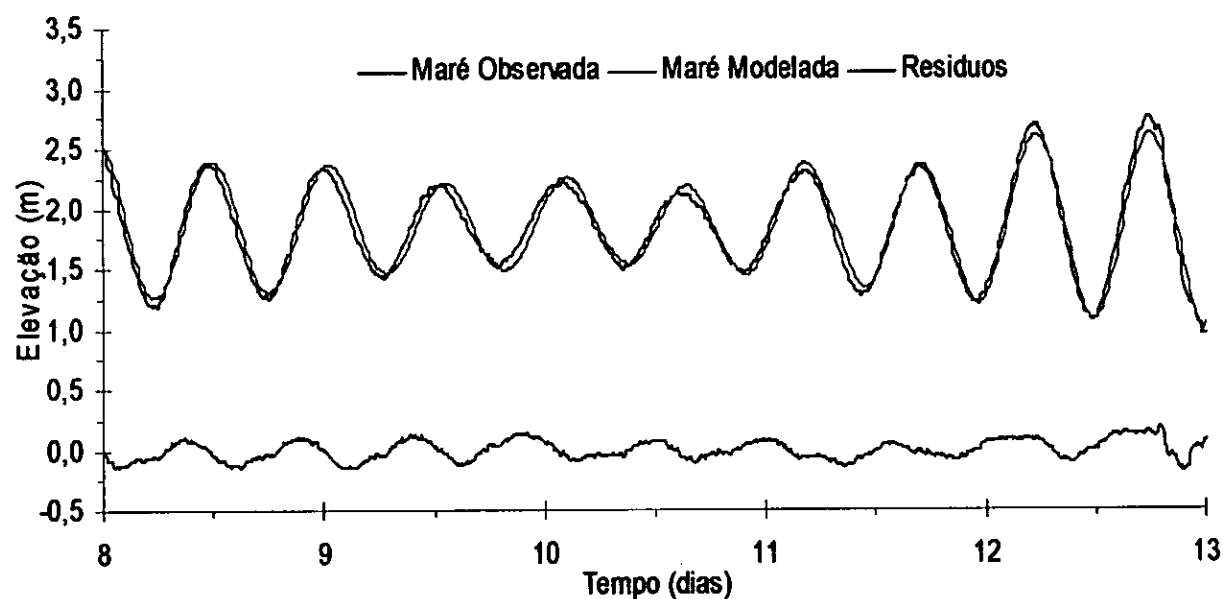
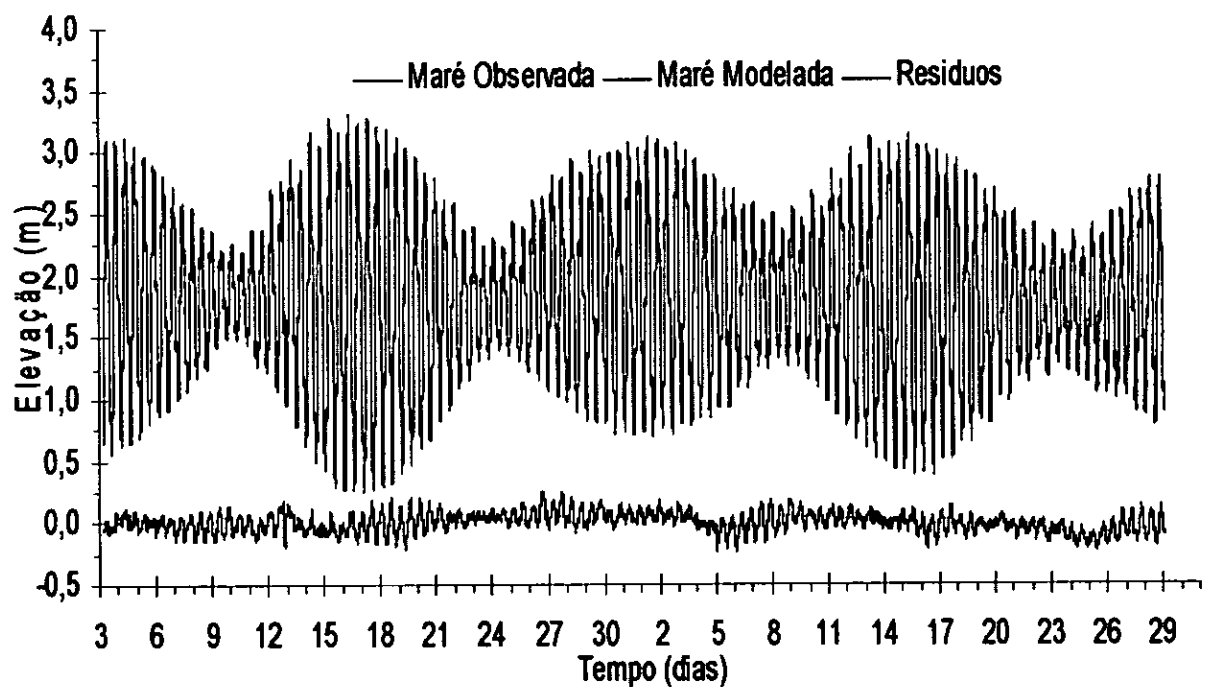


Gráfico 8.: Maré observada e maré modelada para Inhaca usando pacotes estatísticos,
a) de 03 de Maio a 29 de Junho/03 b) de 08 a 13 de Maio/03.

4.3 T-tide

Os resultados da predição de marés usando o programa T-tide estão sumariados no gráfico 10, 11 e na tabela 7. Esta tabela ilustra as constituintes de maré, a frequência, a amplitude, o erro da amplitude, a fase e o erro da fase calculados para cada constituinte. As constituintes mais significantes estão assinaladas com (*).

As datas indicadas nos gráficos seguintes referem-se a 03h59'55'' do respectivo dia.

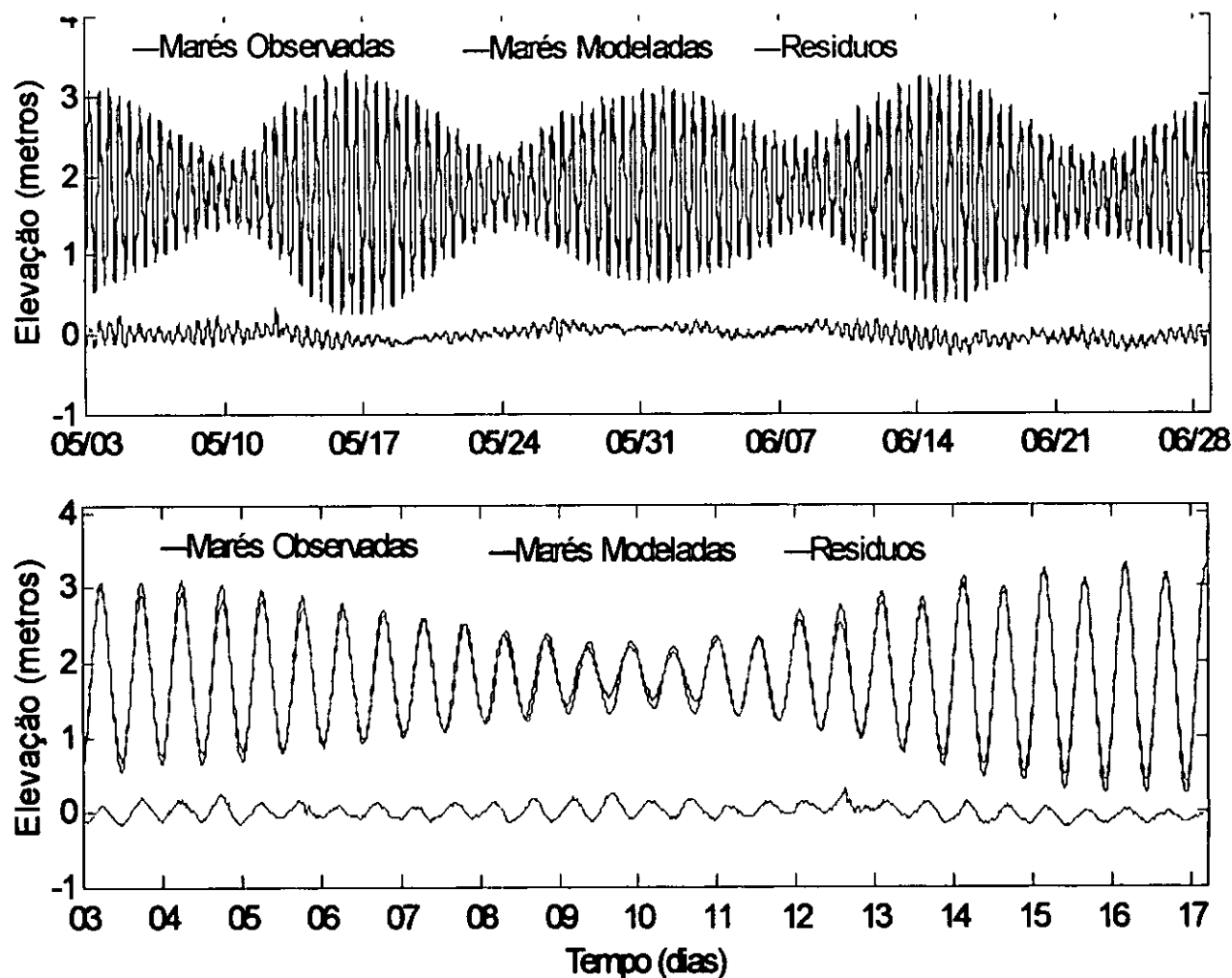


Gráfico 9) Marés modeladas para Inhaca usando T-tide em cima de 03 de Maio à 29/Junho/03, em baixo de 03 à 17/Maio/03

Previsão de Marés na Estação Biológica da Inhaca

Tabela 7.: 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.

#	Comp.	Freq (h ⁻¹)	Ampl (m)	Ampl_erro	Fase (°)	Fase_erro	SNR
1	MM	0.001512	0.0478	0.05	259.32	72.94	0.91
2	MSF	0.002822	0.0201	0.044	248.04	129.79	0.21
3	ALP1	0.034397	0.0009	0.004	101.6	214.86	0.063
4	2Q1	0.035706	0.0013	0.004	295.43	181.36	0.11
5	*Q1	0.037219	0.0135	0.006	13.88	24.73	5.8
6	*O1	0.038731	0.024	0.006	45.19	12.88	18
7	NO1	0.040269	0.0048	0.005	176.8	52.84	1.1
8	*K1	0.041781	0.0413	0.005	227.45	8.35	57
9	J1	0.043293	0.0023	0.004	312.59	125.72	0.29
10	OO1	0.044831	0.0027	0.003	342.04	83.87	0.7
11	UPS1	0.046343	0.0003	0.003	294.46	245.78	0.017
12	EPS2	0.076177	0.0195	0.025	268.39	79.78	0.62
13	*MU2	0.07769	0.049	0.029	281.26	34.31	2.8
14	*N2	0.078999	0.1552	0.031	210.21	10.63	25
15	*M2	0.080511	0.8607	0.031	232.32	1.78	7.50E+02
16	*L2	0.082024	0.0593	0.03	194.51	27.04	4
17	*S2	0.083333	0.4132	0.029	265.08	3.81	2.00E+02
18	ETA2	0.085074	0.0167	0.019	281.62	81.11	0.78
19	MO3	0.119242	0.0021	0.002	304.94	68.54	1.1
20	*M3	0.120767	0.0044	0.003	54.77	39.54	2.1
21	MK3	0.122292	0.0013	0.002	64.02	113.29	0.43
22	*SK3	0.125114	0.0082	0.002	105.38	17.34	14
23	MN4	0.159511	0.0022	0.003	287.75	108.83	0.41
24	*M4	0.161023	0.0113	0.004	58.26	20.26	6.4
25	SN4	0.162333	0.0041	0.004	150.74	56.24	0.94
26	*MS4	0.163845	0.014	0.004	111.18	16.76	13
27	S4	0.166667	0.0014	0.003	119.9	148	0.19
28	2MK5	0.202804	0.0008	0.001	298.9	76.21	0.9
29	*2SK5	0.208447	0.0014	0.001	86.29	33.6	2.3
30	*2MN6	0.240022	0.005	0.003	343.86	29.08	3.6
31	*M6	0.241534	0.0098	0.002	19.66	13.28	16
32	*2MS6	0.244356	0.0138	0.002	42.29	9.77	38
33	*2SM6	0.247178	0.006	0.003	74.89	20.92	5.4
34	3MK7	0.283315	0.0008	0.001	310.62	67.92	1.1
35	*M8	0.322046	0.0014	0.001	15.5	42.43	2

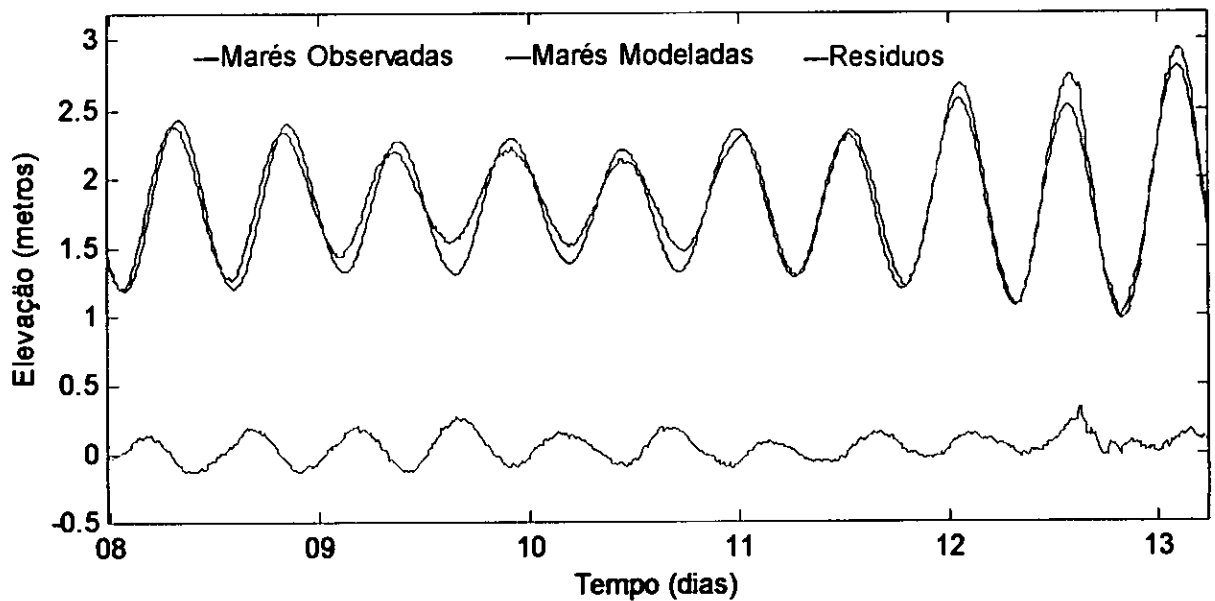


Gráfico 10.: Marés modeladas para Inhaca usando T-tide

4.4 Comparação Entre os Dois Modelos

Um gráfico contendo curvas de cada um dos modelos (modelo clássico feito em pacotes estatísticos e o modelo utilizado em T-tide), não mostrou ser um bom instrumento para comparar os modelos. Para tal, fez-se a comparação dos erros cometidos ao usar cada um dos modelos, ilustrada na tabela 8.

Tabela 8.: Comparação dos erros cometidos nos dois modelos. n é o tamanho da amostra, h representa valores observados, \hat{h} representa valores modelados.

	Pacotes Estatísticos	T-tide
$\frac{1}{n} \sum [h - \hat{h}]$ (m)	-3.5765 e-08	-0.0011
$\frac{1}{n} \sum [h - \hat{h}]^2$ (m)	0.0062	0.0083
Factor de Forma	0.0448	0.0513

4.5 Comparação de Marés Observadas com as Marés Tabeladas

As marés que serão comparadas são as marés modeladas e tabeladas pelo Instituto Nacional de Hidrografia e Navegação (INAHINA, 2002) e as marés observadas em 09 de Maio/2003 na Estação de Biologia Marinha de Inhaca.

As marés tabeladas foram obtidas pelo método de concordância das fases e das amplitudes com o Porto de Maputo e, elas referem-se aos Baixos de Inhaca que é um local próximo a Estação Biológica. Os dados usados pelo INAHINA foram colhidos em 1974.

Tabela 9.: Tempo e altura de marés modeladas e observadas. Fonte: INAHINA (2002).

	Preia-mar		Preia-mar		Baixa-mar		Baixa-mar	
	Manha	Tarde	Manha	Tarde	Manha	Tarde	Manha	Tarde
Maré tabelada	08h11	2.4m	21h05	2.4m	01h59	1.6m	14h39	1.5
Maré observada	08h50	2.2m	21h50	2.2m	02h30	1.4	14h50	1.5

A diferença de fase em média é cerca de 42 minutos na preia-mar e 21 minutos na baixa-mar. Este facto pode ser visto no gráfico 11:

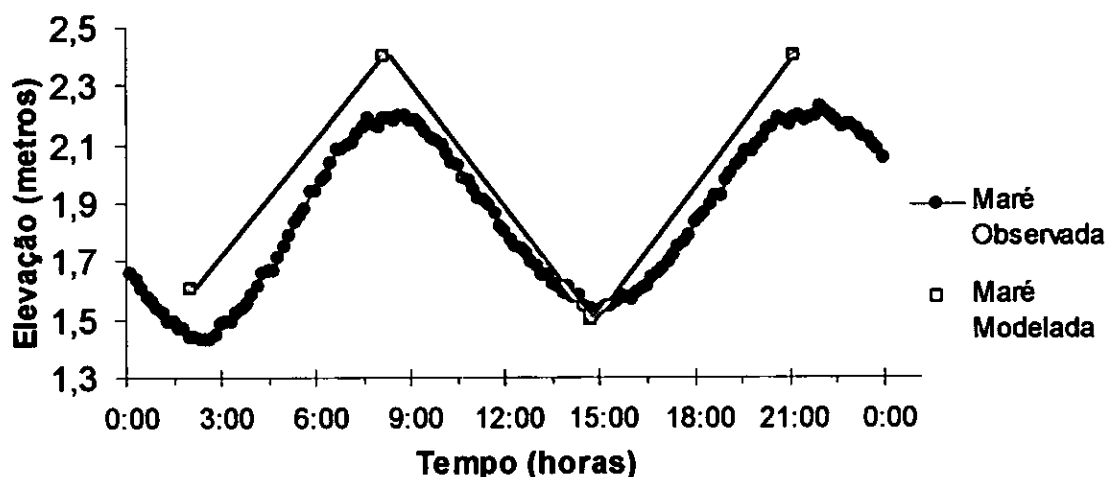


Gráfico 11.: Comparação de marés, dia 9/Maio/03

V. DISCUSSÃO

5.1. As Componentes de Marés

O gráfico 4 indica que as componentes semi-diurnas controlam o ciclo de maré viva e maré morta visto que, o ajuste feito para estas componentes reproduz com grande precisão a variação quinzenal das marés.

A tabela 7, mostra que as componentes semi-diurnas são as que possuem maior SNR (*razão sinal-ruído*), o que significa que para Inhaca, elas são as componentes com maior nível de significância.

De todas as componentes analisadas em T-tide, as diurnas são maiores em número e no entanto são as que tem menor nível de significância. Este facto é confirmado pela análise em nos pacotes estatísticos (ver tabela 6), em que as componentes diurnas têm o mesmo valor de R^2 . Isto significa que para Inhaca, a adição de componentes diurnas nos dois modelos (T-tide e pacotes estatísticos) tem pouca influência no ajuste da curva modelada.

A influência das componentes de períodos longos pode ser vista comparando os gráficos 4, 5 e 6. Nota-se que estas componentes tendem a aproximar as duas curvas, nos ciclos de maré viva à maré morta.

A influência das componentes de água pouco profunda não é claramente visível nos gráficos, entretanto, estas componentes são incluídas nesta análise devido as características topográficas da região em estudo. As tabelas 5 e 6 mostram que o ajuste efectuado (R^2), considerando as componentes de água pouco profunda é exactamente igual ao ajuste efectuado na ausência destas componentes.

A análise em T-tide mostra que os dados em questão, têm grande influência de componentes de água pouco profunda, uma vez que muitas componentes de água profunda na tabela 7 têm SNR maior que unidade.

O facto das duas principais constituintes semi-diurnas serem maiores que as constituintes diurnas mostra que as marés na região em causa não sofrem ressonância apesar de esta relação entre as amplitudes não ser condição suficiente para a identificação de ressonância.

Todas componentes analisadas têm amplitudes e fases não nulas, o que significa que essas componentes foram bem resolvidas (das outras componentes) pelos programas usados.

A análise do gráfico 5.b) e o resultado do cálculo do factor de forma (tabela 8), mostram que as marés que ocorrem na Estação Biológica de Inhaca são semi-diurnas, confirmando a ideia expressa na figura 1 em anexo II.

5.2 O Procedimento em Pacotes estatísticos e em T-tide

Apesar da correlação entre valores observados e valores ajustados (R^2) em alguns casos, manter-se constante, a tabela 6 mostra que o Minitab resolveu com sucesso todas as componentes aqui utilizadas, visto que a amplitude das componentes é um bom indicador da resolução obtida.

As amplitudes e fases foram calculadas a partir dos dados observados daí que ao se usar este modelo deve se ter em conta que:

- ♣ Na equação (2), η_0 refere-se a média das observações (igual a 1.803 m).
- ♣ O tempo inicial ($t=0$) corresponde a data e hora do início da amostragem (03/Maio/03 03H 59' 55" , hora local);
- ♣ O modelo não leva em conta as alterações do nível do mar causadas por efeitos meteorológicos (vento e pressão) e nem as variações que ocorrem de forma não sinusoidal.

- ✦ Nesta etapa do trabalho foram usados períodos de constituintes com precisão de duas casas decimais e, para se evitar a propagação de erros, o modelo não pode ser usado para fazer previsões em tempos muito distantes da data do início da amostragem;

A separação de energia de marés da energia proveniente de outros factores é uma tarefa importante em qualquer análise harmónica de séries temporais. Esta separação de energia está relacionada com a separação das diferentes componentes de marés. Em T-tide esta tarefa é executada com sucesso (tabela 7) e com um nível de significância de 95%.

O programa T-tide não estima directamente as amplitudes e fases nodais, relacionadas com as componentes de período superior a 18.6 anos, isto significa que para um período igual ou superior a 18.6 anos as amplitudes e fases são consideradas como constantes.

5.3 Comparação Entre os Dois Modelos

Uma boa previsão significa em poucas palavras, predizer marés que muito se assemelham a marés que eventualmente serão observadas. O erro cometido ao usar o modelo clássico de análise harmónica é menor que o erro cometido ao usar o programa T-tide (tabela 8).

Os erros tratados no parágrafo anterior são na verdade resíduos que podem resultar da acção de ventos, de ondas e de outros factores cuja análise não é tratada neste trabalho. A média aritmética dos resíduos é negativa em ambas análises (tabela 8), o que significa que em média os valores modelados são maiores que os observados.

A curva residual é gaussiana e não tem correlação com os valores observados (ou modelados) em relação ao tempo.

Tanto no modelo usado em T-tide como no modelo da análise harmónica clássica em pacotes estatísticos, assume-se que as amplitudes e fases são constantes no tempo, o que segundo Provost et Al. (s/d), não é totalmente correcto.

A análise feita em T-tide inclui de certa forma a análise realizada pelos pacotes estatísticos o que significa que parte das limitações da análise harmónica clássica, deixam de o ser quando a análise é realizada em T-tide e, o algoritmo de T-tide foi estabelecido de forma a ultrapassar estas limitações.

Quando se usam os pacotes estatísticos, a curva modelada ajusta-se melhor a curva observada do que quando se usa o T-tide (gráficos 8.b e 10), apesar desse facto, o T-tide é o programa mais indicado para fazer previsões a longo prazo pelos motivos descritos anteriormente, relacionados com a separação da energia de marés das outras energias, a computação dos intervalos de significância e a precisão nas frequências/periódos das componentes.

Classificação das Marés na Inhaca

No gráfico 2 observa-se que em cada dia as marés realizam dois ciclos completos. Este facto aliado ao factor de forma (tabela 8) permite classificar as marés da Inhaca de semi-diurnas. Este resultado também foi também obtido por Boer (2000) e Canhanga (2004).

5.4 Comparação das Marés Observadas com as Marés Tabeladas

As semelhanças encontradas foram o carácter semi-diurno das marés e o intervalo de variação das elevações (gráfico 11). Este facto indica que as marés tabeladas reproduzem com alguma exactidão as marés observadas.

As diferenças encontradas foram os valores exactos das alturas da preia-mar/baixa-mar e o tempo em que elas ocorrem. Apesar de não se tratar do mesmo ponto geográfico, considera-se que a diferença de fase de 42 minutos é muito grande, uma vez que os Baixos da Inhaca e a Estação Biológica são locais muito próximos.

A diferença nos valores de elevação não é relevante uma vez que na elaboração da tabela de marés não foram considerados os efeitos meteorológicos actuando sobre o nível do mar.

A diferença de fase pode estar associada a não constância das amplitudes e fases de maré ou associada a variações do nível médio do mar, uma vez que para elaboração da tabela foram usados dados colhidos a mais de 18.6 anos.

VI. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 Conclusões

O nível do mar na região em estudo é maioritariamente influenciado pela acção das marés lunares, seguindo-se das marés solares e, em menor escala pela topografia do fundo oceânico.

A acção conjunta dos ventos, da pressão atmosférica e outros factores (excluindo as marés) não obedece um padrão bem definido e nem tem correlação com o nível do mar.

A hipótese de Doodson formulada pelas equações 2 e 3, foi mais uma vez confirmada neste trabalho, isto é, é possível representar as marés que se observam em forma duma soma finita de funções sinusoidais de períodos bem definidos.

O modelo numérico de predição de marés, construído em pacotes estatísticos, mostrou que é possível predizer as marés da Estação Biológica de Inhaca com boa precisão ($R^2 = 98.6\%$), usando somente as nove componentes mais importantes.

O programa T-tide é mais eficaz que os pacotes estatísticos e, é também o mais indicado para a realização duma predição visto que, dispõe dentre vários factores, duma grande facilidade de operação e rapidez nos cálculos.

Na Estação Biológica de Inhaca observam-se marés semi-diurnas com factor de forma igual a 0,045. As componentes de maré mais importantes para esta região são as semi-diurnas das quais, a principal lunar (M2) e a principal solar (S2) possuem as maiores amplitudes.

6.2 Recomendações

Actualmente e em alguns lugares do mundo, medições do nível do mar através de satélites durante períodos que ultrapassam 10 anos, mostram que as amplitudes, fases e até período outrora determinados não são constantes, daí que recomendo:

- ❖ A continuação de estudos deste género no sentido de se determinar e compreender melhor a natureza das marés.
- ❖ A actualização dos dados maregráficos através dos quais são elaboradas as tabelas de marés.
- ❖ A realização de estudos desta natureza em diferentes pontos da costa moçambicana onde se pode aproveitar a energia de marés para os mais diversos fins, visto que a maré é um fenómeno que ocorre em todo oceano e é acompanhado de transporte de energia (capaz de misturar espessas camadas de água, etc.).
- ❖ O uso das componentes de maré com maior importância em estudos sobre os mais diversos fenómenos, e para a região em estudo as componentes mais importantes estão nas tabelas 6 e 7.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APEL, John R. Principles of Ocean Physics, 5ª. Edição, Great Britain, St Edmundsbury Press Ltd, 1999.

BOER, W. F. De, Between The Tides-The Impact of Human Exploitation on an Intertidal Ecosystem, Mozambique, 2000.

CANHANGA, Sinibaldo de J.V., Modelação Hidrodinâmica da Baía de Maputo, Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2004.

FOX, William T. And, Richard A. Davis Jr, Fourier Analysis of Weather and Wave Data From Holland, Michigan, July 1970, Technical Report no. 3, Williams College, Massachusetes, 1971.

http://www-aviso.cls.fr/html/applications/marees/marees_M2k1_uk.html

<http://www.mdr.co.nz/wtides/tides.htm>

INAHINA, Tabela de Marés 2003— ANO XVIII, Moçambique, 2002.

INAHINA, Tabela de Marés 2004— ANO XIX, Moçambique, 2003.

KALK, Margaret, A Natural History of Inhaca Island-Mozambique, 3ª Edição, Witwatersrand University Press, 1995.

MACHADO, Frederico, Introdução a Oceanografia, Instituto Universitário dos Açores, 1979.

MARONE, E. & MESQUITA, A. R. De, On Tidal Analyses With Measurements Errors, Bollettino Di Geofisica Teórica e Aplicata, Vol 38 n. 3-4, pp. 229-245, Sep.-Dec. 1997.

NOLTE, Carl, Tides of History, San Francisco, www.sfgate.com, 2004.

PAWLOWICZ, Rich et al., Classical Tidal Harmonic Analysis Including Error Estimates in MATLAB Using T-TIDE, *Computers & Geosciences* 28 pp 929-937, 2002.

PROVOST, Christian Le, et al., Ocean Response to Short-period Atmospheric and Tidal Forcings, www-aviso.cnes.fr/HTML/information/publication/news8/leprovost_fr.html

PUGH, D. T., Tides, Surges and Mean Sea-Level, Wiley, 1987.

VASCONCELOS, Lopo, Manual de Ciências da Terra, Maputo, s/d.

www.hydrosphere.co.uk

www.planet-ocean.co.uk/PDF/Hydrotide

ZERVAS, Chris, Sea Level Variations of the United States 1854-1999, Maryland, 2001.

ANEXO I

```
% Este programa funciona com uma serie harmonica guardada em um arquivo,  
% o progr chama a serie submete-a a uma analise harmónica e predição e compara  
% esta analise com uma feita em minitab 12  
% os códigos que fazem a analise estão em www.ocgy.ubc.ca/~rich search: T_TIDE  
  
clear all  
close all  
load Inhaca_MJ.txt; % ficheiro que contem a serie harmónica  
Alturas=Inhaca_MJ(:,2); %alturas  
M=mean(Alturas);  
  
for i=1:size(Inhaca_MJ,1);  
    if (Alturas(i)==0);  
        Alturas(i)=nan;  
    end  
end  
ano=2003;  
XIN=Alturas;  
INTERVAL=10/60; % tempo de amostragem em minutos  
star=datetime(ano,05,03,03,59,55); %(yy,mm,dd,hh,mm,ss)  
st=datevec(star);  
LAT=-26.033;  
[NAME,FREQ,TIDECON,XOUT]=T_TIDE(XIN,INTERVAL,'START_TIME',st,'LAT  
ITUDE',LAT);  
NrO=Inhaca_MJ(:,3); % Numero de Ordem de observação  
res=Inhaca_MJ(:,2)-(XOUT+M);  
    subplot(411);  
plot(NrO(1:8192),Inhaca_MJ(1:8192,2),'b-'); hold on %observ  
plot(NrO(1:8192),XOUT(1:8192)+M,'r-'); hold on %model
```

```

plot(NrO(1:8192),res(1:8192),'c-');
s0=datenum(ano,05,03,03,59,55);
s2=datestr((((1:1008:8191)-1)/144)+s0),6);
set(gca,'Xlim',[0 8191],'XTick',[1:1008:8191],'XTicklabel',s2);
set(gca,'ylim',[-1 4.1]);
text(1500,3.6,'Marés Observadas','color','b');
text(4500,3.6,'Marés Modeladas','color','r');
text(3000,-0.5,'Marés Observadas menos Modeladas','color','c');
Xlabel('Tempo (dias)');Ylabel('Elevação (metros)');
    subplot(412);
plot(NrO(1:8192),Inhaca_MJ(1:8192,2),'b-'); hold on %observ
plot(NrO(1:8192),XOUT(1:8192)+M,'r-');hold on %model
plot(NrO(1:8192),res(1:8192),'c-');
s5=datestr((((1:144:8191)-1)/144)+s0),'dd');
set(gca,'Xlim',[0 2050],'XTick',[1:144:8191],'XTicklabel',s5);
set(gca,'ylim',[-1 4.1]);
text(350,3.6,'Marés Observadas','color','b');
text(1150,3.6,'Marés Modeladas','color','r');
text(700,-0.5,'Marés Observadas menos Modeladas','color','c');
Xlabel('Tempo (dias)');Ylabel('Elevação (metros)');
    subplot(413);
plot(NrO(1:8192),Inhaca_MJ(1:8192,2),'b'); hold on %observ
plot(NrO(1:8192),XOUT(1:8192)+M,'r-');hold on %model
plot(NrO(1:8192),res(1:8192),'c-');
s3=datestr((((1:144:8191)-1)/144)+s0),7);
set(gca,'Xlim',[720 1475],'XTick',[1:144:8191],'XTicklabel',s3);
set(gca,'ylim',[-1 4.1]);
text(850,3.6,'Marés Observadas','color','b');
text(1150,3.6,'Marés Modeladas','color','r');
text(950,-0.5,'Marés Observadas menos Modeladas','color','c');
Xlabel('Tempo (dias)');Ylabel('Elevação (metros)');

```

```

% Inserir data do inicio da previsao
ano0=2003; mes0=05; dia0=03; hora0=03; min0=59; seg0=55;
f0=datenum(ano0,mes0,dia0,hora0,min0,seg0);
f1=(1/144);

%Inserir data do fim da previsao
ano1=2003; mes1=05; dia1=04; hora1=03; min1=59; seg1=55;
f2=datenum(ano1,mes1,dia1,hora1,min1,seg1);
TIM=[f0:f1:f2];
%TIM=((([0:8191]/144)+s0); %datenum(2004,05,03,03,59,55);
FOUT=T_PREDIC(TIM,NAME,FREQ,TIDECON);

load ficheiro.txt;%file q contem alturas previstas em minitab
ErroMinitab=Inhaca_MJ(1:8192,2)-ficheiro;
ErroMinitab2=(Inhaca_MJ(1:8192,2)-ficheiro).^2;
ErroTtide=Inhaca_MJ(1:8192,2)-XOUT-M;
ErroTtide2=(Inhaca_MJ(1:8192,2)-XOUT-M).^2; % clf
    Subplot(414)
plot(NrO(1:8192),Inhaca_MJ(1:8192,2),'b-'); hold on %observ
plot(NrO(1:8192),ficheiro,'r-'); hold on % from minitab
plot(NrO(1:8192),XOUT(1:8192)+M,'k-');hold on %model
plot(NrO(1:8192),ErroTtide,'k-'); hold on
plot(NrO(1:8192),ErroMinitab,'r-')
ErrorMinitab=mean(ErroMinitab)
ErrorMinitab2=mean(ErroMinitab2)
ErrorT_Tide=mean(ErroTtide)
ErrorT_Tide2=mean(ErroTtide2)
s5=datestr((((([1:288:8191]-1)/144)+s0),'dd');
set(gca,'xlim',[1 8192],'XTick',[1:288:8192],'XTicklabel',s5);
% fim

```

ANEXO II

1. Distribuição das Marés no Mundo

A figura 1 foi construída com auxílio de séries harmónicas sintéticas simuladas a partir da definição do factor de forma:

$$F = \frac{K1 + O1}{M2 + S2}$$

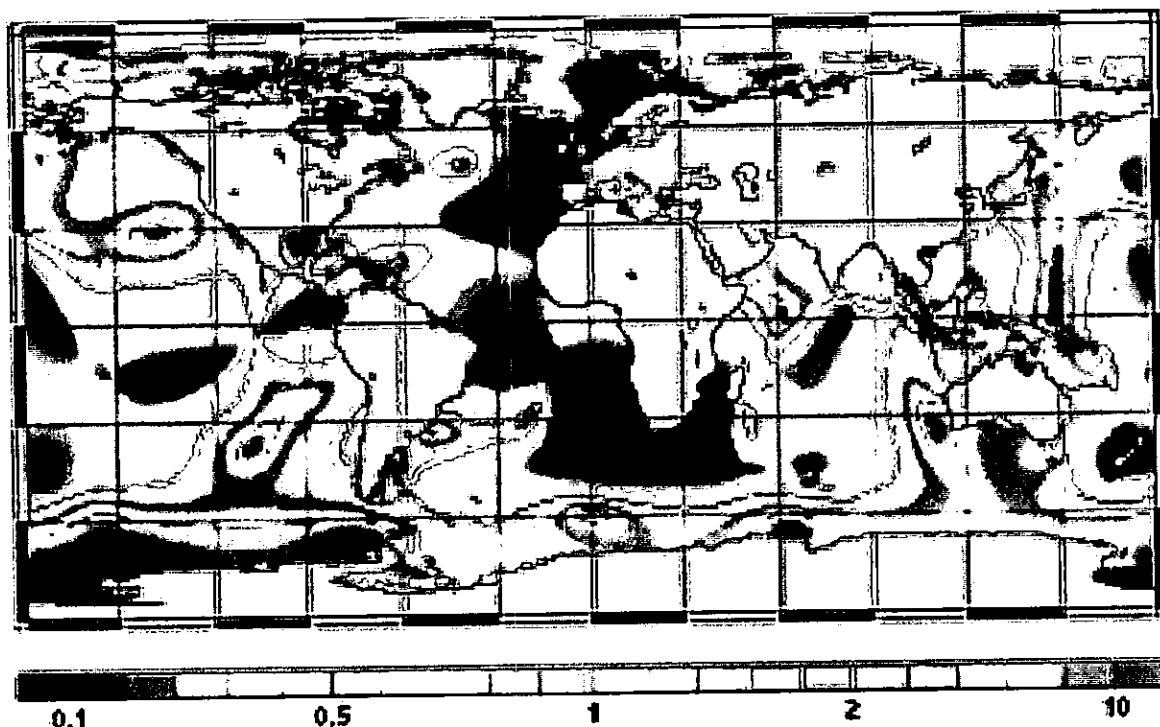


Figura 1.: Distribuição das marés semi-diurnas (Componentes M2 e S2) e diurnas (componentes K1 e O1) a volta do mundo. As zonas em azul indicam que as marés diurnas dominam e zonas vermelhas indicam zonas em que as marés semi-diurnas dominam.
Fonte: http://www-aviso.cls.fr/html/applications/marees/marees_m2k1_uk.html

Alguns Conceitos Sobre as Marés

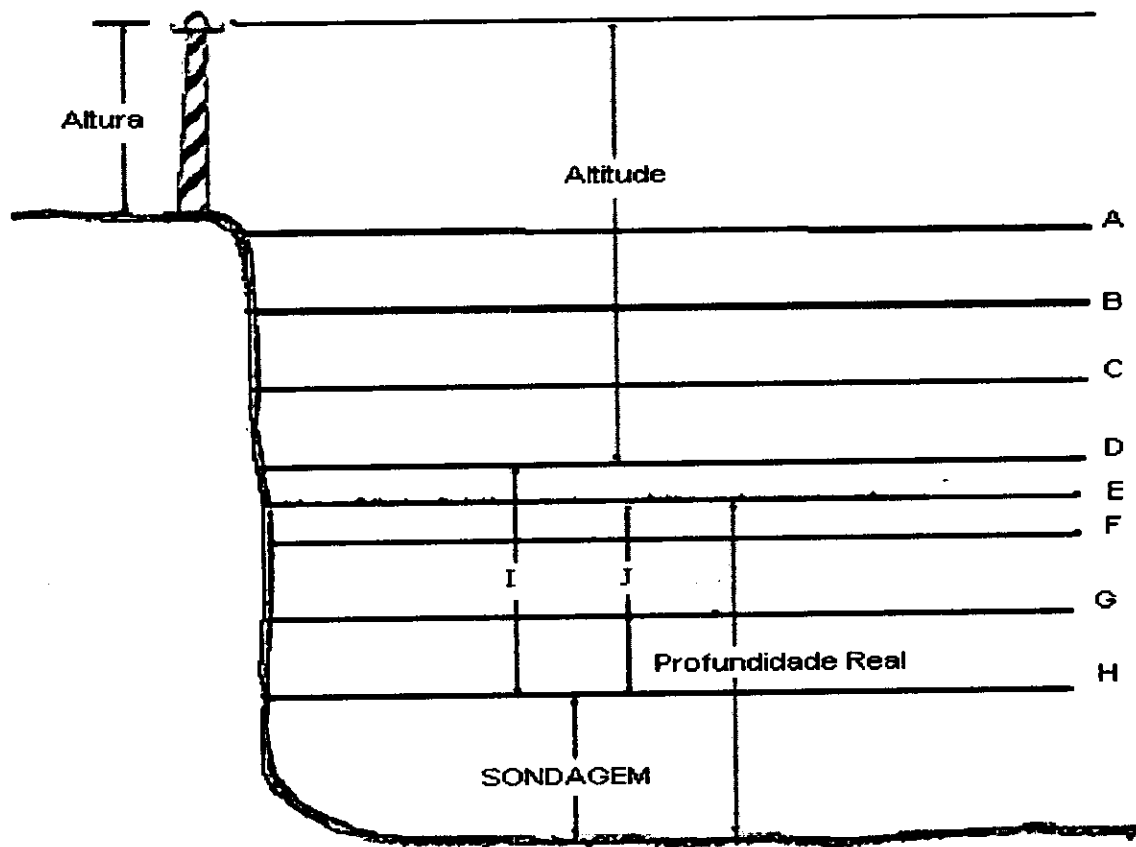


Figura 2: Planos de referências de Marés. 'E' representa o nível do mar num instante qualquer

Nível de Redução (NR): nível a que são referidas as alturas das marés e as sondagens (profundidades representadas nas cartas náuticas). O Nível de Redução normalmente corresponde ao nível médio das baixa-mares de sizigia (MLWS). É um nível abaixo do qual o mar não desce senão raramente.

Nível Médio do Mar (NM): altura média da superfície do mar em todos os estágios de oscilação da maré, observados em um longo período de tempo (maior que 18.6 anos) e considerado como equivalente ao nível que existiria na ausência das forças geradoras das

marés. O Nível Médio é normalmente adoptado como plano de referência para a medida das altitudes (ver nível C na figura 2).

Nível Médio das Marés (MTL ou “MEAN TIDE LEVEL”): valor médio de um certo número de PM e BM. Normalmente, não tem qualquer significado para a navegação.

MHWS (“MEAN HIGH WATER SPRINGS”): média das PM de sizígia ou altura da PM média de sizígia. Altura média, deduzida de uma longa série de observações, das alturas das PM de sizígia (ver nível A na figura 2).

MHWN (“MEAN HIGH WATER NEAPS”) – média das PM de quadratura ou altura da PM média de quadratura. Altura média, deduzida de uma longa série de observações, das alturas das PM de quadratura (ver nível C na figura 2).

MHW (“MEAN HIGH WATER”) – Média das PM ou altura da PM média, isto é, altura média, deduzida de uma longa série de observações, das alturas de todas as PM (ver nível B na figura 2).

Altura da maré – Cota vertical NR – nível do mar, em um determinado instante (ver nível J na figura 2).

MLWN (“MEAN LOW WATER NEAPS”) – média das BM de quadratura ou altura da BM média de quadratura, isto é, altura média, deduzida de uma longa série de observações, das alturas das BM de quadratura (ver nível F na figura 2).

MLW (“MEAN LOW WATER”) – média das baixa-mares ou altura da BM média, isto é, altura média, deduzida de uma longa série de observações, das alturas de todas as BM (ver nível G na figura 2).

MLWS (“MEAN LOW WATER SPRINGS”) – média das BM de sizígia ou altura da BM média de sizígia, isto é, altura média, deduzida de uma longa série de observações,

das alturas das BM de sizígia. Por vezes, em alguns países é adoptado como Nível de Redução (ver nível H na figura 2) .

Sondagem ou profundidade cartografada – distância vertical do NR ao fundo do mar, em um determinado local.

Profundidade real em um determinado instante (ou profundidade do local no instante considerado): soma da sondagem com a altura da maré no instante considerado.

Altitude – Distância vertical entre o ponto considerado e o Nível Médio do mar.

Altura de um objecto: distância vertical entre o seu topo e a sua base (ou o terreno que a circunda).

2. Predição de Marés Pelo Método Expedito

O método expedito de previsão (ou método do estabelecimento do porto), a ser usado para os locais onde não se tenham informações tabuladas de horários e alturas de PM e BM. deve ser utilizado em conjunto com as seguintes informações sobre a maré que ocorre no local de interesse:

1. M.H.W.S., M.H.W.N., M.L.W.N., M.L.W.S. e NM.
2. H.W.F. & C. – Estabelecimento do Porto ou Estabelecimento Vulgar do Porto (“HIGH WATER FULL AND CHANGE”): média dos intervalos de tempo decorridos entre a passagem da Lua pelo meridiano local e a ocorrência da preia-mar (PM), em dias de sizígia.

Na previsão da maré pelo método do estabelecimento do porto é necessário determinar a hora da passagem meridional da Lua.

O método expedito de previsão adopta os seguintes conceitos e suposições básicas:

a) A hora da preia-mar de sizígia é o resultado da soma entre a hora da passagem da Lua pelo meridiano superior do local e o Estabelecimento do Porto naquele local.

b) o dia lunar dura 24 horas e 50 minutos e sendo assim, o intervalo entre duas preia-mares será 12 horas e 25 minutos e entre uma PM e a BM consecutiva o intervalo será de 6 horas e 13 minutos (assim também como entre uma BM e a PM seguinte).

c) considerando-se a duração de uma lunação (intervalo de tempo entre duas conjunções ou oposições da Lua), pode-se admitir que o intervalo de tempo entre duas marés de sizígia sucessivas é de 14 dias e o intervalo entre uma maré de sizígia e a maré de quadratura seguinte é de 7 dias.

d) O método expedito de previsão supõe que as PM e as BM são simétricas em relação ao Nível Médio (NM).

De facto, no método expedito de previsão supõe-se que:

• Em sizígias:

$MHWS - NM = a$ (cota da PM de sizígia acima do NM)

$NM - a = h_1$ (altura da BM de sizígia)

• Em quadraturas:

$MHWN - NM = b$ (cota da PM de quadratura acima do NM)

$NM - b = h_2$ (altura da BM de quadratura)

Pode-se constatar que os resultados encontrados pelo método expedito (ou método do estabelecimento do porto) são razoavelmente precisos, para fins de navegação, quando não se dispõem dos dados de previsão fornecidos nas "Tábuas das Marés". É pertinente que se observe que em virtude dos conceitos e suposições básicas adoptadas, o método do estabelecimento do porto só deve ser empregado nos locais onde a maré for semi-diurna, não se aplicando às marés de desigualdades diurnas e mistas.

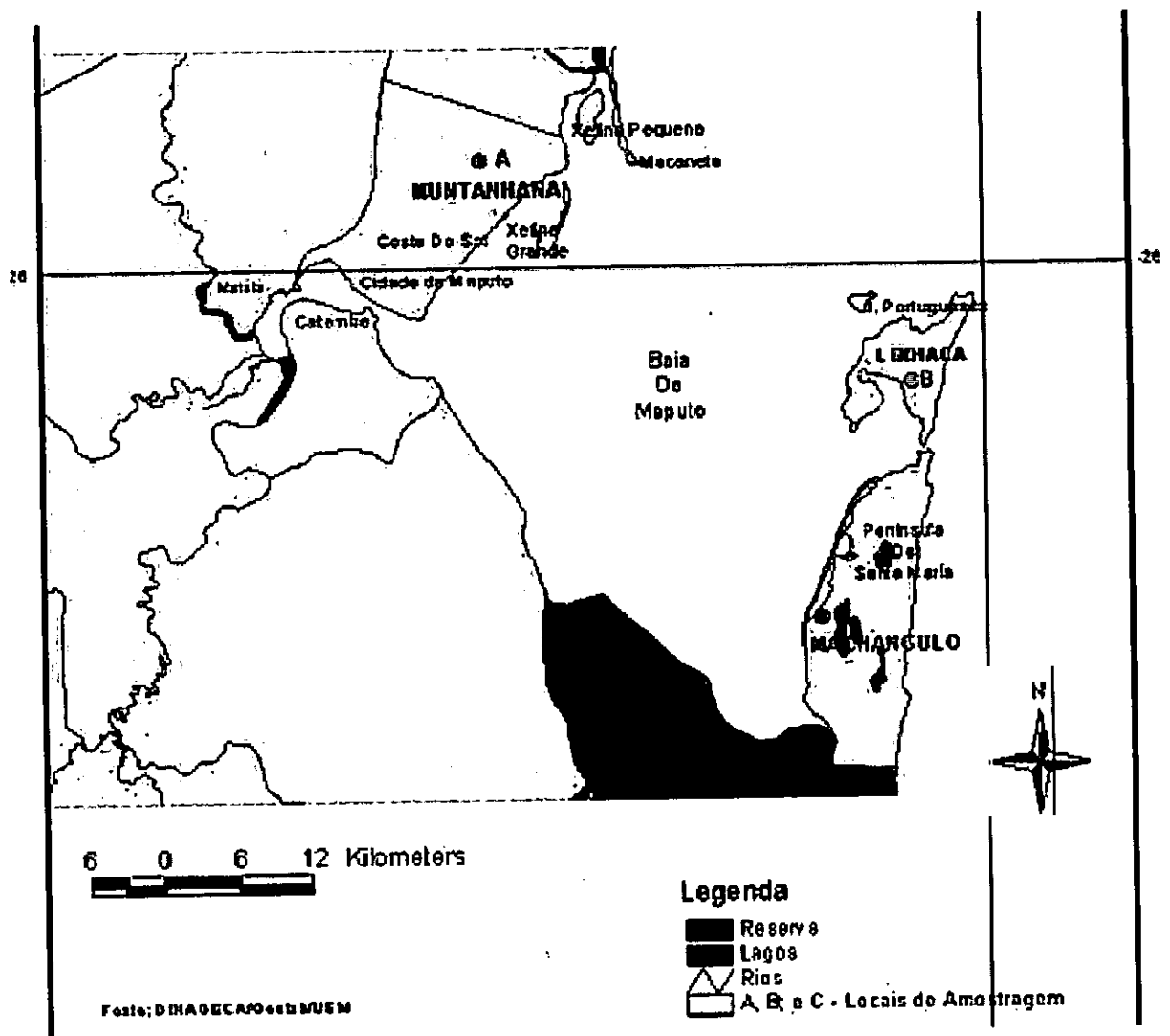


Figura 2.: Baía de Maputo