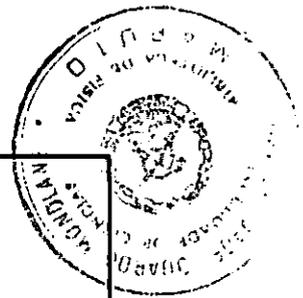


FIS.11



**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

Trabalho de Licenciatura

**Grau de Estratificação da Coluna
de Água na Baía de Maputo**



Autora:

Dália Jacob Elias Ibraimo



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

Trabalho de Licenciatura

**Grau de Estratificação da Coluna
de Água na Baía de Maputo**

Autora: Dália Jacob Elias Ibraimo

Supervisor: Prof. Dr. António Mubango Hogueane

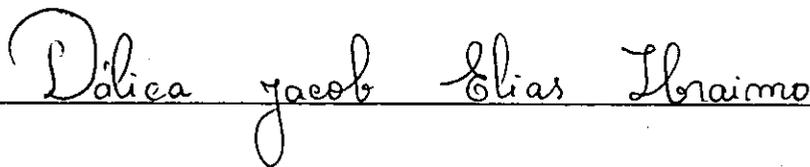
Maputo, Outubro de 2004

DECLARAÇÃO DE HONRA

Declaro por minha honra que o trabalho aqui apresentado é de minha inteira responsabilidade e é o resultado do meu empenho e dedicação, e tem como finalidade a obtenção do grau de Licenciatura em Oceanografia.

Maputo, Outubro de 2004

A autora:



(Dália Jacob Elias Ibraimo)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais

Jacob A. Ibraimo e Isaura I. E. A. Ibraimo

Aos meus irmãos

Amirali, Chabir, Danilo, Abiba e Naila

À minha avô Perei

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho tornou-se possível fundamentalmente pela extrema dedicação, paciência e acompanhamento do meu supervisor Prof. Doutor António Mubango Hogueane. A ele vai o meu muito obrigado.

Aos meus amigos e colegas que me acompanharam nos bons e maus momentos destes longos anos de batalha, em especial à turma que ingressou à Universidade para o Departamento de Física no ano 2000.

Agradeço também aos professores e funcionários deste Departamento, em especial à Dona Otilia.

Ao Dr Bowers da Universidade de Wales, Inglaterra, Dr J. Lencart, dr. Cláudio da UEM, Dr Canhanga do Inahina, Dr Emídio do IIP, ao Celso do INAM, Sr. Santos do DNA e ao Carlos estudante de Biologia/UEM pela especial atenção e ajuda na obtenção de dados e fontes bibliográficas.

À Naila e Odete, a quem devo a minha profunda gratidão pelo amparo, protecção, companheirismo e força nestes espinhosos anos de aprendizagem.

Quero igualmente agradecer a pequena mas grande equipe que me rodeia, Fialho, Kátia, Jaten, Saima, Neide, Manuel, Arcélio, Valentina, Clousa, Sónia e sem deixar de mencionar alguém que foi e tem sido como um pai, o Irmão Cristiano.

E por último, mas não os menos importantes porque são eles o combustível do meu produto, os meus pais e irmãos. Obrigada pelo incentivo e moral.

A todos estes e para muitos outros que aqui não foram mencionados vão os meus sinceros agradecimentos.

TÉRMINOS TÉCNICOS E ABREVIATURAS

CTD	Conductivity, Temperature and Depth
DNA	Direcção Nacional de Águas
GPS	Global Positioning System
HS	Hemisfério Sul
INAM	Instituto Nacional de Meteorologia
SE	Sudeste
NE	Nordeste
cm	centímetro
J	Joules
Km	Quilómetro
m	metro
s	segundo
Out	Outubro
Nov	Novembro
Dez	Dezembro
Jan	Janeiro
Fev	Fevereiro
Mar	Março
Abr	Abril
Mai	Maio
Jun	Junho
Jul	Julho
Fig	Figura

LISTA DAS FIGURAS

Figura	Página
Fig.1a) Coluna de água estratificada	3
Fig.1b) Coluna de água misturada	3
Fig. 2: Esquema relativo aos contribuintes para a estratificação e mistura	4
Fig. 3: Distribuição da anomalia ao longo da coluna de água	8
Fig. 4: Localização da área de estudo	11
Fig. 5: Baía de Maputo. Representação das estações	13
Fig. 6: CTD (SBE 19plus SEACAT)	15
Fig. 7: Receptor de GPS	16

Distribuição da anomalia em profundidade

Figura	Página
Fig. 8: Outubro 2003	18
Fig. 9: Novembro 2003	19
Fig. 10: Dezembro 2003	19
Fig. 11: Janeiro 2004	20
Fig. 12: Junho 2004	21
Fig. 13: Julho 2004	22
Fig. 14: Fevereiro 2004	22
Fig. 15: Março 2004	23
Fig. 16: Abril 2004	24
Fig. 17: Maio 2004	24

Distribuição mensal da anomalia

Figura	Página
Fig. 18: Outubro 2003 a Julho 2004	26
Fig. 19: Esquema representativo do quão longe a energia está para ser misturada	29

LISTA DAS TABELAS

Tabela 1: Localização das estações	13
Tabela 2: Quantificação da anomalia	24
Tabela 3: Velocidade média dos ventos e da radiação solar	26
Tabela 4: Caudais dos rios	27

RESUMO

O presente trabalho consistiu na determinação da anomalia de energia potencial ao longo da secção A na Baía de Maputo como forma de avaliar a energia necessária para misturar completamente a coluna de água, mistura essa que se torna condição importante para a dinâmica e produtividade primária¹ na Baía.

A energia potencial foi determinada com base nos dados de densidade de água colhidos na secção em estudo, num período de dez meses (iniciando em Outubro de 2003) abrangendo as épocas de Inverno e Verão.

Os resultados indicaram que a Baía esteve, na maior parte do período de estudo, misturada, com um défice de energia de 7.3%. A época do ano em que se verificou maior estratificação foi a dos últimos meses de Verão (Fevereiro e Março) e o primeiro mês de Inverno (Abril).

A mistura deve-se a pouca profundidade da baía, reduzidas forças de sustentação e correntes de marés relativamente fortes, enquanto que a estratificação é promovida principalmente pela descarga de água doce.

Considerando as marés como único contribuinte para a mistura da coluna de água, a energia mínima necessária para misturar toda a coluna de água foi de 138.5 J m^{-3} .

¹ Produtividade primária é a base de sustentação da cadeia alimentar dos organismos que vivem no mar.

ÍNDICE	Pag
1. Introdução.....	1
1.1 Introdução.....	1
1.2 Objectivos.....	2
2. Conceitos básicos de estratificação e mistura numa coluna de água.....	3
2.1 Estratificação.....	4
2.2 Mistura.....	6
2.3 Frentes.....	6
2.4 Anomalia de energia potencial.....	7
3. Metodologia.....	11
3.1 Descrição geral da zona de estudo.....	11
3.2 Equipamentos usados.....	14
3.3 Recolha de dados.....	16
3.4 Tratamento e análise de dados.....	16
4. Resultados.....	18
4.1 Distribuição da anomalia em profundidade.....	18
4.2 Quantificação da anomalia numa coluna de água e a época de valores mais elevados.....	24
5. Discussão dos resultados.....	26
6. Conclusões e recomendações.....	29
6.1 Conclusões.....	29
6.2 Recomendações.....	29
7. Referências bibliográficas.....	30
Anexo 1.....	32

1. INTRODUÇÃO

1.1 Introdução

Muitos processos biológicos importantes são influenciados pelos processos físicos que ocorrem no mar (Mann e Lazier, 1996). A produtividade primária (que é a parte biológica) é um dos resultados desses processos que por sua vez dependem de várias forças físicas que actuam nas zonas costeiras, tais como força de coriolis, de fricção, ventos, marés, ondas, densidade da água.

A decomposição e liberação de nutrientes têm lugar no fundo do mar e como há a necessidade de os trazer para a zona eufótica, é imperioso que haja a ocorrência de movimentos verticais na coluna de água, isto é processos de turbulência e mistura. Nas zonas costeiras, estes processos são o resultado da acção de ventos sobre a superfície da água ou das marés pela fricção com o fundo. Quando a água estiver misturada, estarão criadas condições de ascensão de nutrientes do fundo para a zona eufótica e de disponibilidade de alimento para os peixes em toda a coluna de água.

Em locais onde existe estratificação da coluna de água, o fitoplâncton, zooplâncton, sedimentos ou poluentes, encontram obstáculo na migração de uma camada para outra devido a diferença de densidades existente. Esse obstáculo pode trazer consequências negativas, como por exemplo o excesso de nutrientes à superfície devido a entrada de água doce e de efluentes domésticos em certas zonas da costa e dificuldade no curso normal da cadeia alimentar, e consequências positivas, como a retenção de poluentes à superfície do mar. O tempo de permanência da estratificação depende das condições sazonais e varia de local para local. A radiação solar é um contribuinte importante para a acentuação da estratificação (Mann e Lazier, 1996).

As frentes oceânicas, como zonas de transição de águas misturadas para águas estratificadas, são importantes devido a alta actividade biológica que lá se gera. A camada de água recém estratificada atrás da frente, conterá nutrientes da anterior água misturada. Observações dos nutrientes através das suas características, mostram que as concentrações de nutrientes tendem a ser maiores na região misturada que nas camadas superiores estratificadas, onde presumivelmente elas esgotam-se pela actividade biológica.

Surge daí a relevância em determinar a energia proveniente dos factores contribuintes para a ocorrência dos fenómenos de estratificação e mistura. Deste modo, é possível caracterizar locais e

períodos de maior ou menor energia necessária para misturar ou manter a estratificação numa coluna de água.

O presente trabalho realizou-se na Baía de Maputo, que é uma das regiões da zona costeira que contribui para a pesca em Moçambique. Esta região é influenciada a Este e Sul pela água doce proveniente dos rios Incomáti, Umbelúzi, Maputo e ainda em pequena percentagem pelos rios Matota e Tembe. Por outro lado, esta mesma região é influenciada pelas marés através da ligação ao Norte com o Oceano Índico.

1.2 Objectivos

Geral

Determinação do grau de estratificação da coluna de água e sua variação sazonal na Baía de Maputo.

Específicos

- ◆ Estudar a distribuição de energia potencial em profundidade;
- ◆ Identificar a época do ano de maior estratificação da coluna de água;
- ◆ Determinar o valor mínimo de energia necessária para misturar uma coluna de água.

2. CONCEITOS BÁSICOS DE ESTRATIFICAÇÃO E MISTURA DUMA COLUNA DE ÁGUA

As condições oceanográficas das águas costeiras diferem das do mar alto em muitos aspectos, tais como a turbidez da água, profundidade, densidade, temperatura, salinidade, etc. Entre outros factores responsáveis por esta diferença, estão as descargas fluviais, as correntes de maré e efeitos da costa sobre a circulação (Pickard, 1974). Estes por sua vez podem causar a ocorrência da estratificação ou mistura da coluna de água que no seu interface originam as frentes.

Um dos parâmetros oceanográficos que identifica fielmente os processos de mistura e estratificação é a densidade, tida como sendo a quantidade de massa de água existente numa determinada unidade de volume. A densidade varia ao longo da coluna de água, sendo directamente proporcional a salinidade e inversamente proporcional a temperatura (Lalli e Parsons, 1997).

Como a água é quase incompressível, a densidade da água do mar é sempre próxima a 1000 Kg m^{-3} mesmo nas proximidades do fundo do oceano, onde a pressão é maior. A densidade da água do mar é normalmente representada por σ_t , que é tida como um desvio dos 1000 Kg m^{-3} ($\rho - 1000$). Densidade potencial ρ_t , é a densidade com que a água do mar à uma determinada salinidade e temperatura terá a uma pressão da água igual a zero, ou a densidade à pressão atmosférica na superfície do mar (Hartmann, 1994).

Se tivermos uma coluna de água composta de duas camadas com fluidos imiscíveis ou de parâmetros diferentes, por exemplo, a camada de cima com densidade constante ρ_1 , deslocando com velocidade média constante V_1 a uma profundidade de equilíbrio h_1 e a camada de baixo com densidade constante ρ_2 , deslocando com velocidade média constante V_2 , e a uma profundidade h_2 , estaremos na presença de estratificação como ilustra a Fig. 1 a).

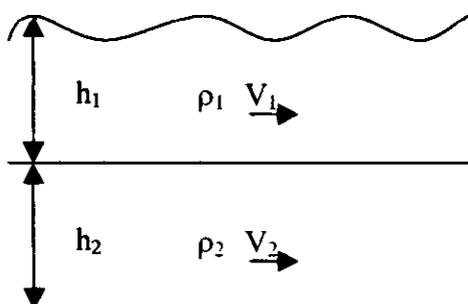


Fig. 1 a) Coluna de água estratificada

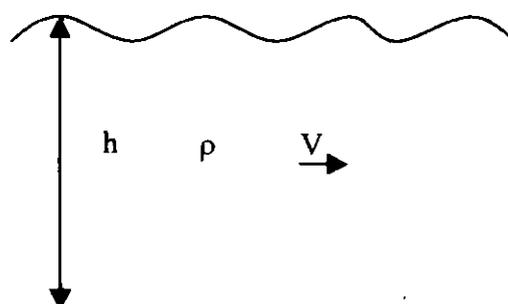


Fig. 1 b) Coluna de água misturada

Se uma força é aplicada ao sistema e este passa a ter uma densidade uniforme ρ ao longo de toda a profundidade h e com a mesma velocidade média V , a esta coluna de água diz-se estar misturada (Fig. 1 b) (Cushman-Roisin, 1994).

Em águas costeiras, a estratificação pode ser causada pelo fluxo de entrada de água doce com baixa salinidade em relação a da água do mar. Por outro lado, o aquecimento superficial pelo Sol pode ser suficiente para reduzir a densidade das águas próximas à superfície, deixando simultaneamente frias as águas profundas e com maior densidade. Quanto a mistura, esta pode ser causada no fundo pelas marés e a superfície pela acção dos ventos induzindo o movimento vertical (Lewis, 1997).

Em suma, temos dois contribuintes essenciais que promovem a estratificação da coluna de água que são o aquecimento solar e os rios; e dois que contribuem para a ocorrência de mistura que são as marés e os ventos, ver Fig. 2).

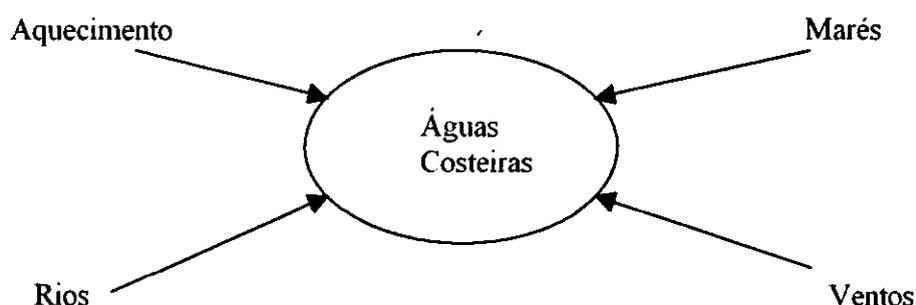


Fig. 2: Esquema relativo aos contribuintes para a estratificação e mistura

2.1 Estratificação

Segundo Cushman-Roisin (1994), estratificação surge por causa de fluxos que ocorrem naturalmente envolvendo fluidos de densidades tipicamente diferentes. A estratificação de uma coluna de água é um sistema do qual as águas profundas acarretam maior densidade em relação às superficiais.

Se sobre uma massa de água que se encontra em equilíbrio na camada inferior for aplicada uma força e levada para a camada superior e a densidade dessa massa de água for maior que as águas em redor, actuará sobre ela a força de gravidade no sentido de restaurar a sua posição de equilíbrio. O

mesmo acontecerá para o caso inverso em que se aplica uma força a uma massa de água que esteja na camada de cima e é levada para baixo. Actuará sobre ela uma força de sustentação que a induzirá a sua posição inicial. A este sistema é denominado de firmemente estratificado.

Quanto mais acentuado for o gradiente da densidade, maior será a força restauradora, conseqüentemente, quanto maior for o grau de estratificação, menor será a tendência para a ocorrência dos movimentos verticais.

Se a diferença de densidades entre as duas camadas for menos acentuada que na situação acima descrita, se considera que o sistema está parcialmente estratificado. Esta condição pode igualmente impedir os movimentos verticais (Lewis, 1997).

As causas directas da estratificação dividem-se em duas: o aquecimento à superfície e a entrada de água doce.

Estratificação devido ao aquecimento à superfície

Simpson e Hunter (1974), Fearnhed (1975) citado por Lewis (1997) dizem que um simples modelo pode ser utilizado para estimar a razão da mudança da densidade na camada próxima à superfície devido à da radiação solar. Supõe-se que o calor fornecido pelo Sol é absorvido no topo dos primeiros metros da coluna de água e a distribuição da temperatura torna-se uniforme pela mistura através dos ventos e acção das ondas. Quanto mais calor é fornecido, a temperatura dessa camada misturada aumenta e causa a sua expansão, alterando a densidade inicial. O volume da camada aumenta e o espaçamento entre as partículas aumenta, diminuindo assim a densidade. Ela será tanto menor, quanto maior for o acréscimo da temperatura.

Estratificação devido a entrada de água dos rios

As águas costeiras estão sujeitas à influência de água doce, proveniente na sua maior parte de rios, produzindo uma zona de água de baixa salinidade que se mistura gradualmente pelo oceano adentro (Bowden, 1983).

Porque a densidade da água do rio é baixa comparativamente com a do oceano, a água ao desaguar no oceano tenderá a ficar por cima misturando-se com a água lá existente, isto é, diminui a densidade da camada superior resultando num aumento da estratificação da coluna de água.

2.2 Mistura

Para misturar uma coluna de água estratificada é necessário a mobilização de energia para vencer as forças de sustentação. Essa energia pode resultar das correntes de maré no fundo e dos ventos à superfície.

Mistura induzida pelos ventos

A influência dos ventos para misturar uma coluna de água depende da sua direcção e magnitude (Simpson, 1996). O vento sobre a água causa uma corrente superficial na mesma direcção. A fricção entre a água em movimento e a água estacionária gera mistura vertical turbulenta, trazendo alguma água profunda para a superfície. O vento pode ainda causar arrefecimento da água a superfície tornando-a mais densa que a da camada sub superficial e assim causar o seu afundamento, por outro lado, empurra a água superficial originando assim a ressurgência da água da camada inferior.

Mistura induzida pelas marés

O efeito de mistura das águas pelas marés depende da sua velocidade, da profundidade da água e do grau de estabilidade da estratificação térmica produzida pela radiação solar ou pela água doce dos rios (Barnes e Mann, 1980).

A fonte principal de energia das marés é originária da dinâmica do sistema Terra – Lua. Devido a fricção, em águas rasas, com o fundo uma parte desta energia é convertida em energia cinética turbulenta que contribui para misturar verticalmente a coluna de água.

2.3 Frentes

A transição de uma região verticalmente bem misturada para uma onde ocorre a estratificação é normalmente marcada por uma zona onde existe um gradiente horizontal da temperatura (frentes térmicas) ou da salinidade (frente halina), daí da densidade. A esta região de transição denomina-se

de frente. Em alguns casos a termoclina é acompanhada pela estratificação de salinidade e a frente é também marcada por um intenso gradiente horizontal da salinidade. As frentes podem ser claramente visíveis em fotografias infravermelhas de satélites devido ao seu acentuado gradiente horizontal da temperatura (Bowden, 1983).

Existem três tipos básicos de frentes que ocorrem em função dos processos dinâmicos que as causam: frentes de marés misturadas, frentes de pluma e frentes de cisalhamento.

As frentes de marés misturadas ocorrem na fronteira entre águas que estão bem misturadas pelas marés e águas que não sustentam suficientemente turbulência para impedir a estratificação pelo aquecimento solar. Pode-se estimar a ocorrência destas frentes fazendo um balanço das energias das marés e do aquecimento. Este tipo de frentes é só aplicável em zonas costeiras em que a influência das águas doces é insignificante.

As frentes de pluma são aquelas que se formam quando uma camada fina de água flutuante escora sobre a camada de água mais salina. Similarmente à dinâmica desta frente está a frente de intrusão de maré que ocorre quando a água mais densa se move por baixo de água relativamente menos densa e mete-se em direcção a elas como uma cunha salina.

As frentes de cisalhamento são produzidas na enchente de maré num estuário, quando a fricção com os bancos resulta na variação lateral da velocidade da corrente (Lewis, 1997).

2.4 Anomalia de energia potencial

O grau de estratificação da coluna de água num dado espaço e tempo, no caso em que esta é causada por aquecimento superficial, pode ser expresso pela diferença de temperatura ΔT ou pela diferença de densidade $\Delta \rho$ entre a superfície e o fundo. Isso incluindo o efeito da estratificação da salinidade, se presente. A diferença ΔT ou $\Delta \rho$ não leva em conta a espessura da camada vertical a misturar, por isso uma melhor maneira de determinar a estratificação é através da anomalia de energia potencial ϕ (Bowden, 1983). Considerando a profundidade negativa, o ϕ é dado por:

$$\phi = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 [\hat{\rho} - \rho(z)] g z dz \quad (1)$$

onde $\bar{\rho}$ é expresso da seguinte maneira:

$$\bar{\rho} = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 \rho(z) dz \quad (2)$$

e

g = aceleração de gravidade

z = profundidade

h = máxima profundidade da coluna de água

$\bar{\rho}$ = densidade média da coluna de água

ρ = densidade a uma determinada profundidade

Segundo Simpson *et al.* (1990), citado por Rippeth e Simpson (1996), a anomalia de energia potencial representa a quantidade de energia requerida para misturar completamente uma coluna de água.

Se a anomalia de energia potencial for igual a zero, então está-se na presença de uma mistura completa da coluna de água (Fig. 3). Se for tanto positiva como negativa, existirá a estratificação e o módulo dos seus valores determinarão o quão próximo pode estar para ser misturada.

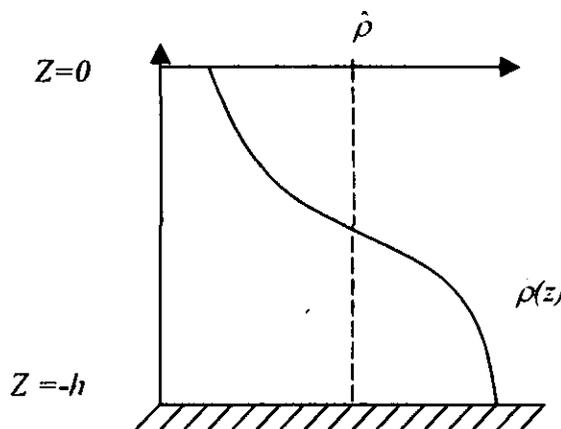


Fig. 3: Distribuição da anomalia ao longo da coluna de água

O parâmetro ϕ ($J m^{-3}$) é a média em profundidade do défice de energia potencial devido a estratificação, comparada com a energia potencial de uma coluna de água completamente misturada (Bowden, 1983).

$$\phi = \frac{1}{h} \left\{ \int_{-h}^0 \hat{\rho} g z dz - \int_{-h}^0 \rho(z) g z dz \right\} \quad (3)$$

A fórmula (3), que é um desenvolvimento da fórmula (1), representa a anomalia em termos do défice de energias, em que o primeiro termo que se encontra dentro de chavetas indica a energia potencial para misturar uma coluna de água e o segundo termo indica a energia potencial existente.

A taxa de energia necessária para misturar uma coluna de água num intervalo de tempo devido ao aquecimento na superfície do mar é dada por:

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\alpha g Q}{2C_p} \quad (4)$$

onde : Q é dado por:

$$Q = C_p \rho h \frac{dT}{dt} \quad (5)$$

e

α = coeficiente de expansão térmica da água do mar

C_p = calor específico da água do mar

T = temperatura média em profundidade

t = tempo

A taxa de energia necessária para misturar uma coluna de água num intervalo de tempo devido a acção dos ventos à superfície é dada por:

$$\frac{d\phi}{dt} = \delta k \rho \frac{W^3}{h} \quad (6)$$

onde: δ = proporção de energia cinética do vento usada para misturar

k = coeficiente de arrasto à superfície

W = velocidade do vento

A taxa de energia necessária para misturar uma coluna de água num intervalo de tempo devido a acção das marés no fundo é dada por:

$$\frac{d\phi}{dt} = \varepsilon k_b \rho \frac{|\hat{u}|^3}{h} \quad (7)$$

onde: \hat{u} é dado por:

$$|\hat{u}|^3 = \frac{4}{3\pi} u_a^3 \quad (8)$$

e

\hat{u} = velocidade integrada na vertical

u_a = amplitude da velocidade de uma maré M_2

ε = porção de energia cinética de maré usada para misturar

k_b = coeficiente de arrasto no fundo

A taxa de energia necessária para misturar uma coluna de água incluindo os três parâmetros:

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\alpha g Q}{2C_p} - \varepsilon k_b \rho \frac{W^3}{h} - \varepsilon k_b \rho \frac{|\hat{u}|^3}{h} \quad (9)$$

3. METODOLOGIA

3.1 Descrição geral da zona de estudo

O estudo foi realizado na Baía de Maputo, que segundo Hogueane *et al.* (2002), localiza-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. Tem cerca de 30 Km de largura e 40 Km de comprimento, cobrindo uma área de cerca de 1200 Km². Liga-se ao Norte com o Oceano Índico através de uma boca aberta, a Este pelas Ilhas dos Portugueses e Inhaca, e pela Península de Machangulo, a Sul e Oeste pelo continente. As Ilhas formam barreiras que protegem a baía de tempestades do mar aberto, (Fig. 4).

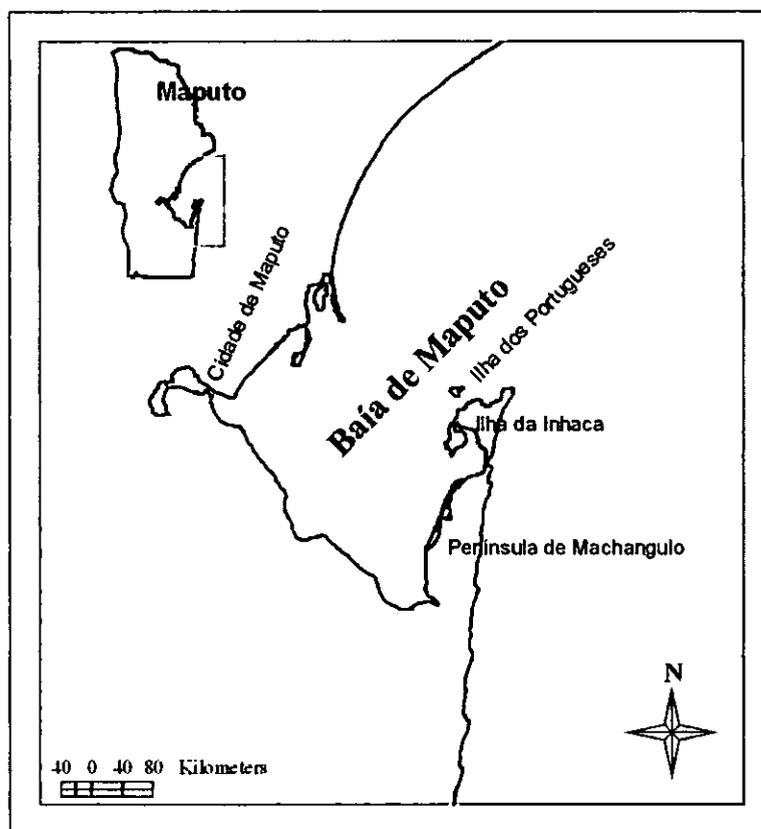


Fig. 4: Localização da área de estudo

Segundo Kalk (1995) citado por Hogueane e Dove (2000), a Baía de Maputo situa-se numa região com clima subtropical com transição para temperado quente. Caracteriza-se por apresentar duas

estações nomeadamente, húmida e seca. A estação seca estende-se de Abril a Setembro e a estação húmida de Outubro a Março. A média de precipitação total anual é cerca de 1100 mm.

As águas da Baía são quentes durante o Verão e frias durante o Inverno comparadas com as do alto mar. A temperatura média diária é cerca de 17°C à 27°C no Inverno e Verão respectivamente (Hoguane, 1996). Os ventos predominantes na Baía são de SE, sendo os mais frequentes os de NE. Os ventos de SE têm uma velocidade média mensal de 2 m s⁻¹ no Inverno e cerca de 4 m s⁻¹ no Verão.

Na Baía confluem cinco principais rios, Incomati a Norte, Umbelúzi, Tembe e Matola a Oeste e o rio Maputo a Sul. Os rios Umbelúzi, Tembe e Matola juntam-se no estuário de Espírito Santo antes de drenar suas águas para a Baía. Existem ainda rios pequenos, canais e pântanos de mangais (Hoguane e Dove, 2000).

Segundo Hoguane (1996), as marés na Baía são semi-diurnas com uma desigualdade diurna visível. A extensão da maré é de cerca de 3 m durante as marés vivas. As correntes de maré têm uma amplitude que varia em média de 50 cm s⁻¹ à 75 cm s⁻¹.

Para a realização da pesquisa fez-se a colheita mensal de dados na secção A, para cada estação (Tabela 1) da área em estudo (Fig. 5), num período de dez meses englobando desse modo as estações de Inverno e Verão. Estes foram colhidos na época de marés vivas de cada mês, porque nesse período pode-se constatar energias elevadas. Após a sua colheita, foram passados para o computador e convertidos para um formato possível de utilizar no programa considerado.

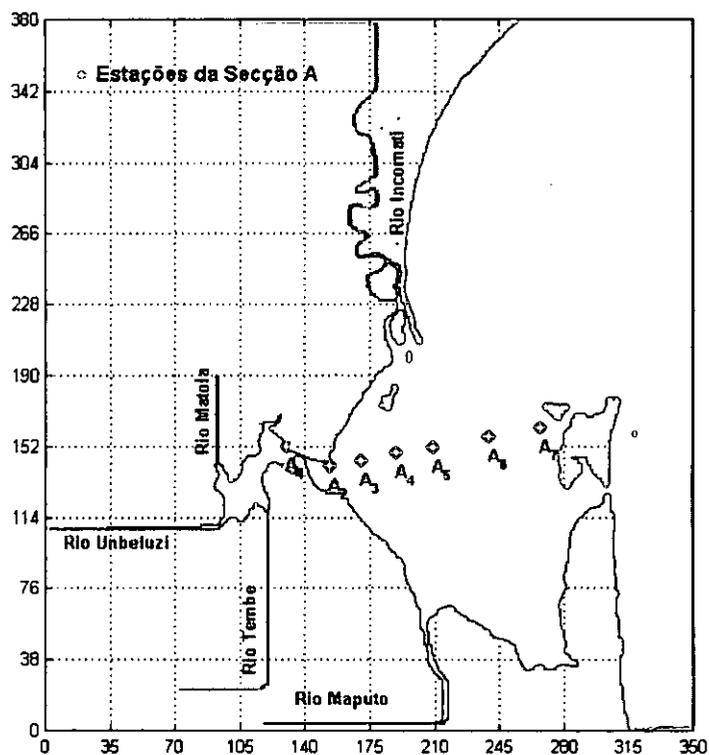


Fig. 5: Baía de Maputo. Representação das estações

Tabela 1: Localização das estações

Área	Estação	Latitude	Longitude
Baía de Maputo	A1	25,57.7	32,31.9
Baía de Maputo	A2	25,59.4	32,35.5
Baía de Maputo	A3	25,59.4	32,38.0
Baía de Maputo	A4	25,59.4	32,41.0
Baía de Maputo	A5	25,59.4	32,44.0
Baía de Maputo	A6	25,59.4	32,48.6
Baía de Maputo	A7	25,59.4	32,52.9

3.2 Equipamentos Usados

Para a realização deste trabalho foram necessários os seguintes instrumentos e acessórios:

- ◆ CTD
- ◆ Computador
- ◆ Barco
- ◆ Receptor de GPS
- ◆ Cabo
- ◆ *Softwares*
 - Seaterm
 - Excel
 - Surfer 7

CTD

O CTD usado neste trabalho tem a referência SBE 19plus SEACAT (Fig. 6) e é usado para medir a condutividade, temperatura e pressão em ambientes marinhos ou de água doce a profundidades inferiores a 7 000 m equivalente a 22.900 pés. A temperatura é medida por um dispositivo semi-condutor, a condutividade por indução e a profundidade é determinada indirectamente pela pressão que por sua vez é medida por um cristal de quartzo.

Pode-se acoplar sensores para a medição do oxigénio dissolvido, PH, turbidez, fluorescência, etc. Tem uma memória de 8 Mbytes e é suportado por 9 baterias alcalinas do tamanho D capazes de providenciar operações de 60 horas seguidas. Possui uma precisão na temperatura no intervalo de 0.005 °C à 0.01 °C, na condutividade no intervalo de 0.0005 psu à 0.001 psu e na profundidade no intervalo de 0.1% à 0.25%.

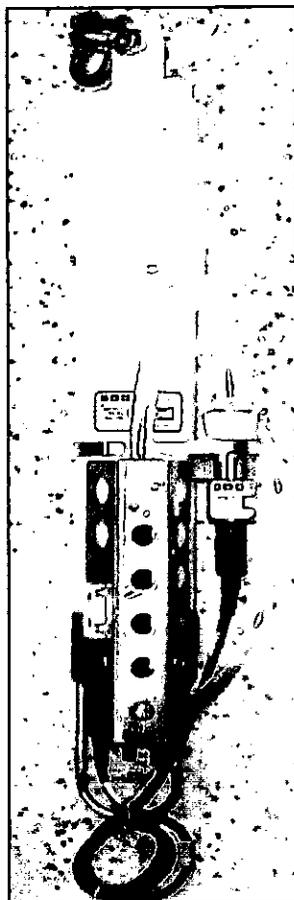


Fig. 6: CTD (SBE 19plus SEACAT)

GPS

GPS (Fig. 7) é um aparelho que mede a posição usando uma rede de satélites que continuamente transmitem informação codificada tornando possível a localização de objectos na Terra por medição da sua distância em relação ao satélite. É constituído por 24 satélites a 20 200 Km de altitude que dão volta à Terra duas vezes por dia tornando visível em cada ponto no mínimo 4 satélites. A sua aplicação tem vários fins tais como o levantamento topográfico, nos aviões para a determinação da sua rota, correcção de imagens etc, e para o caso em questão ajuda na localização das estações requeridas para as medições.

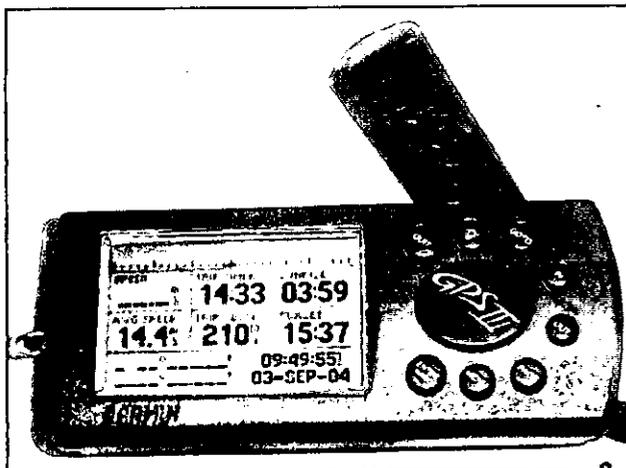


Fig. 7: Receptor de GPS

3.3 Recolha de dados

De acordo com o dia previsto, fez-se a saída ao campo. Antes porém, fez-se a inicialização do instrumento (CTD), isto é, foi ligado ao computador e através de um programa apropriado marcou-se a data, intervalos de medição, etc.

No local, com a ajuda do GPS previamente programado com as coordenadas necessárias, identificou-se as estações requeridas. Para cada estação, fez-se as medições. Em seguida atou-se uma corda ao instrumento e depois de o activar foi mergulhado superficialmente durante uns 3 minutos para que este pudesse se ambientalizar com o meio. Retirou-se e tornou-se a mergulhar lentamente até este tocar o fundo. De regresso à superfície, teve que tomar uma velocidade aproximada com a que foi introduzido. E assim sucessivamente para as restantes estações.

3.4 Tratamento e análise de dados

Os dados ao passarem do instrumento para o computador encontravam-se no formato ilegível que não poderiam ser facilmente reconhecidos pelo utilizador, sendo assim foi necessário fazer a sua conversão com o auxílio do software Seaterm.

Desta conversão, tomou lugar a validação dos dados no software Excel, verificando e eliminando os parâmetros fora dos padrões normais de temperatura, salinidade e densidade. Os dados foram organizados em ficheiros onde a profundidade variasse num intervalo aproximado de 0.25 m. A efectuação dos cálculos foi feita no mesmo software Excel (anexo 1) usando as seguintes fórmulas:

Energia potencial necessária para estratificar a água numa determinada profundidade (EP_s)

$$EP_s = \rho g z \quad (9)$$

Energia potencial necessária para misturar a água numa determinada profundidade (EP_m)

$$EP_m = \hat{\rho} g z \quad (10)$$

Anomalia em cada profundidade (ϕ_z)

$$\phi_z = EP_m - EP_s \quad (11)$$

A anomalia de toda a coluna de água (ϕ)

$$\phi = \frac{dz}{h} \sum_{z=-h} \phi_z \quad (12)$$

ou

$$\phi = \frac{\sum_{z=-h} \phi_z}{N} \quad (12 a)$$

e que corresponde a resolução numérica da integral dada pela fórmula (1) no capítulo 2; onde:

N = número total de medições;

A especificação dos termos em falta poderá ser encontrada no capítulo 2.

Para a análise dos resultados foi necessário a sua representação no Surfer 7, fazendo a interpretação dos mesmos com a ajuda dos dados teóricos.

4. RESULTADOS

4.1 Distribuição da anomalia em profundidade

Os resultados da variação da anomalia em profundidade para cada mês, desde Outubro de 2003 até Julho de 2004 são apresentados nas figuras 8 a 17. Os valores mínimos e máximos da anomalia para cada profundidade obtidos em todos os meses foram de aproximadamente -15 e 51 J m^{-3} respectivamente.

Nos meses de Outubro a Janeiro, figuras 8, 9, 10 e 11 respectivamente, e nos meses de Junho e Julho, figuras 12 e 13 respectivamente, os valores da anomalia variaram de -5 a 15 J m^{-3} . Estes valores foram muito baixos em comparação com os valores mínimos e máximos verificados, sugerindo haver mistura. Todavia eles apresentam diferentes graus de mistura, e assim, classificou-se os meses de Outubro, Junho e Julho de pouco misturado, Novembro de misturado, Dezembro e Janeiro de muito misturado.

No mês de Outubro, verificou-se valores mais elevados na estação 7 a uma profundidade de aproximadamente 13 m em que a anomalia de energia era de 14 J m^{-3} . Nas restantes estações, os valores da anomalia não excederam a 4 J m^{-3} .

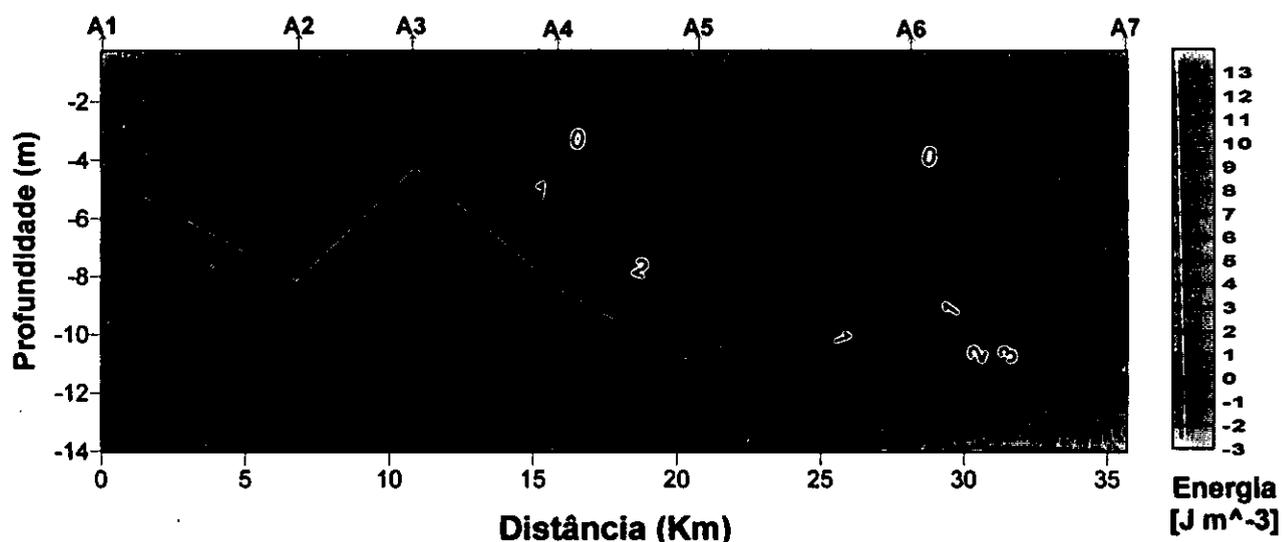


Fig. 8: Distribuição das Isolinhas da anomalia de energia potencial em J m^{-3} em função da profundidade ao longo da secção A na Baía de Maputo no mês de Outubro de 2003, Verão no H S.

Para o mês de Novembro, o valor mais elevado verificou-se na estação 5 a uma profundidade de aproximadamente 10 m em que a anomalia de energia era de 10 J m^{-3} . Nas restantes estações não excederam 6 J m^{-3} .

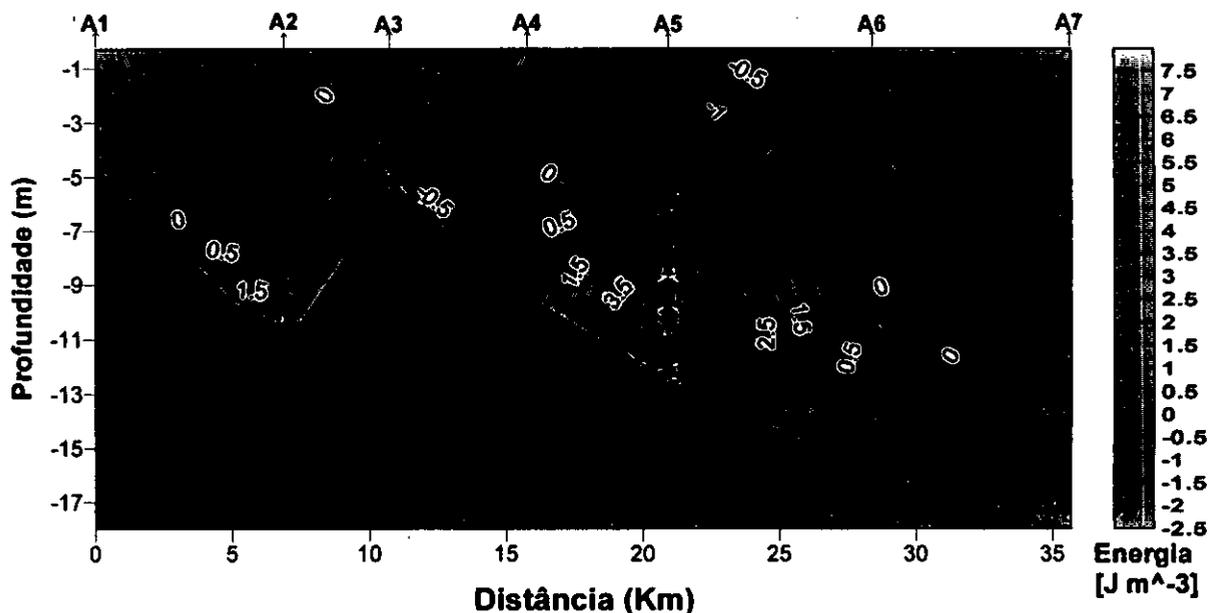


Fig. 9: Distribuição das Isolinhas da anomalia de energia potencial em J m^{-3} em função da profundidade ao longo da secção A na Baía de Maputo no mês de Novembro de 2003, Verão no H S.

No mês de Dezembro, o valor mais elevado da anomalia verificou-se na estação 2 a uma profundidade de aproximadamente 11 m e era de 2.4 J m^{-3} .

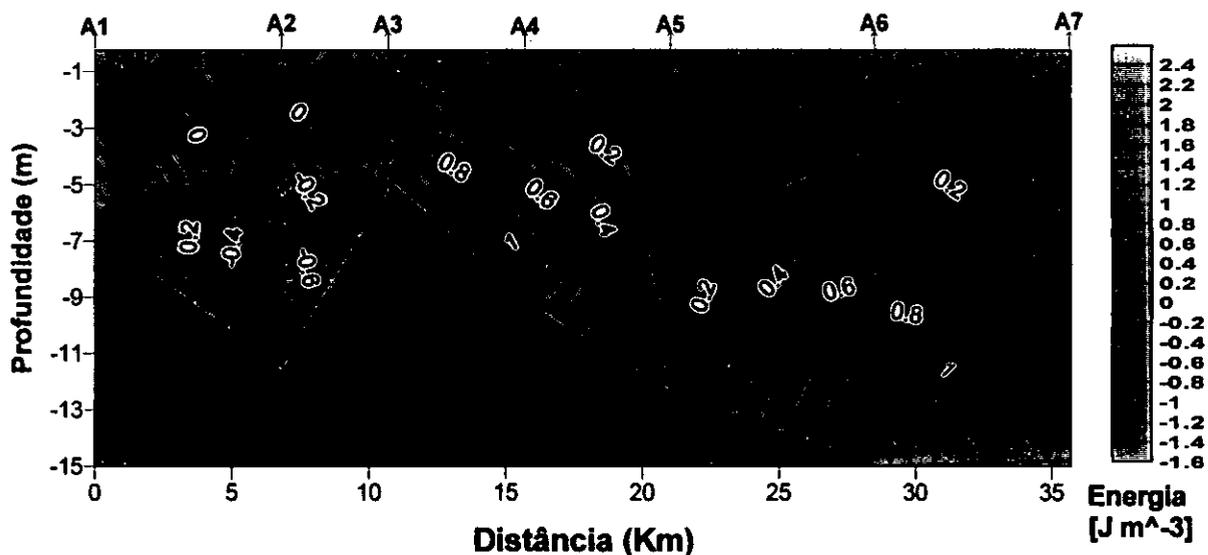


Fig. 10: Distribuição das Isolinhas da anomalia de energia potencial em J m^{-3} em função da profundidade ao longo da secção A na Baía de Maputo no mês de Dezembro de 2003, Verão no H S.

Em Janeiro, constatou-se que o valor da anomalia mais elevado foi de 4 J m^{-3} em certas profundidades tais como 6 m na estação A3, 13 m na estação A5 e 16 m na estação A7.

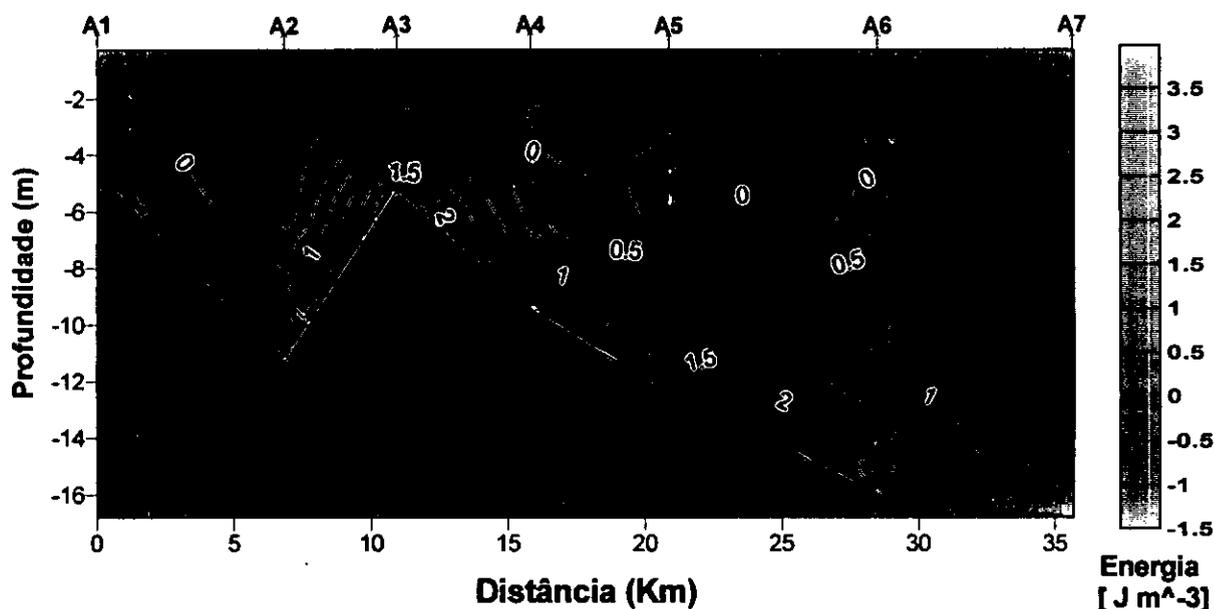


Fig. 11: Distribuição das Isolinhas da anomalia de energia potencial em J m^{-3} em função da profundidade ao longo da secção A na Baía de Maputo no mês de Janeiro de 2004, Verão no H S.

Para o mês de Junho, o valor mais elevado da anomalia verificou-se a uma profundidade de 7 m na estação A7, e era de aproximadamente 14 J m^{-3} .

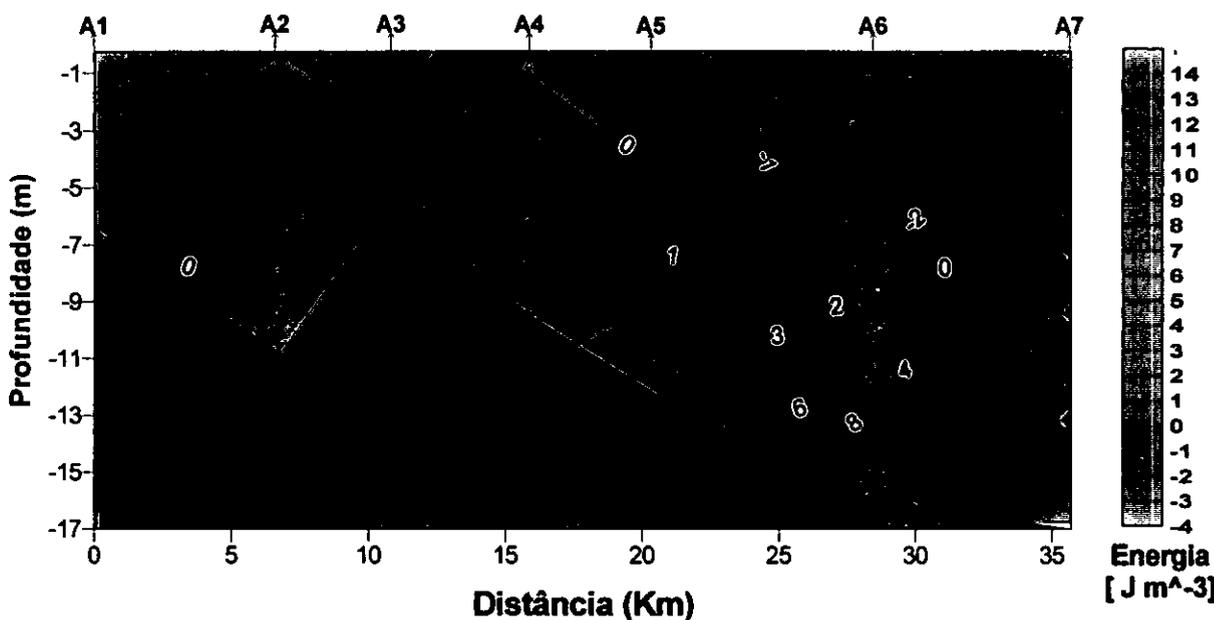


Fig. 12: Distribuição das Isolinhas da anomalia de energia potencial em J m^{-3} em função da profundidade ao longo da secção A na Baía de Maputo no mês de Junho de 2004, Inverno no H S.

No mês de Julho, os valores mais elevados encontravam-se na estação 1 e 7. Na estação 1, o valor da anomalia foi de 14 J m^{-3} a uma profundidade de 6 m e na estação 7, o valor da anomalia foi de 8 J m^{-3} a uma profundidade de 14 a 16 m.

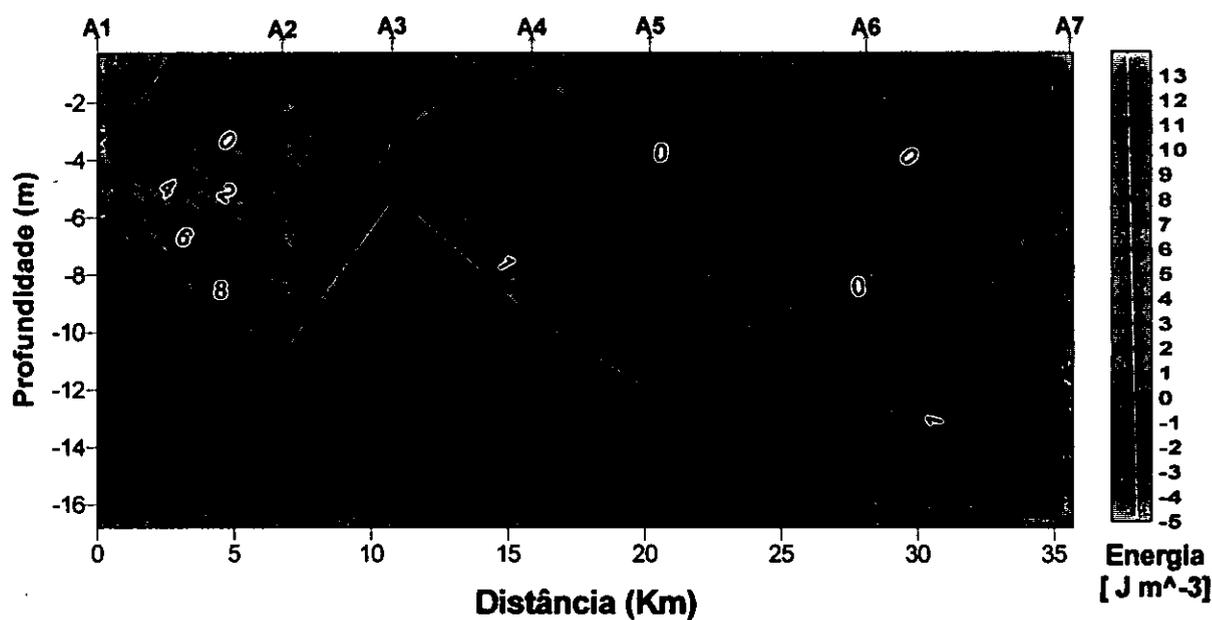


Fig. 13: Distribuição das Isolinhas da anomalia de energia potencial em J m^{-3} em função da profundidade ao longo da secção A na Baía de Maputo no mês de Julho de 2004, Inverno no H S.

Nos meses que se seguem, como mostram as figuras 14, 15, 16 e 17 referentes aos meses de Fevereiro, Março, Abril e Maio verificou-se valores bastante elevados da anomalia, onde o mínimo correspondia a -15 J m^{-3} e o máximo a 51 J m^{-3} . Estes valores permitem avaliar o período de muito estratificado. No entanto, os resultados obtidos indicaram ter havido diferentes graus de estratificação ao longo dos meses. Assim, classificou-se o mês de Fevereiro de muito estratificado, Março e Abril de estratificado e Maio de pouco estratificado.

Para o mês de Fevereiro, o valor mais elevado da anomalia verificou-se a uma profundidade de 13 m na estação 5 e era de 51 J m^{-3} .

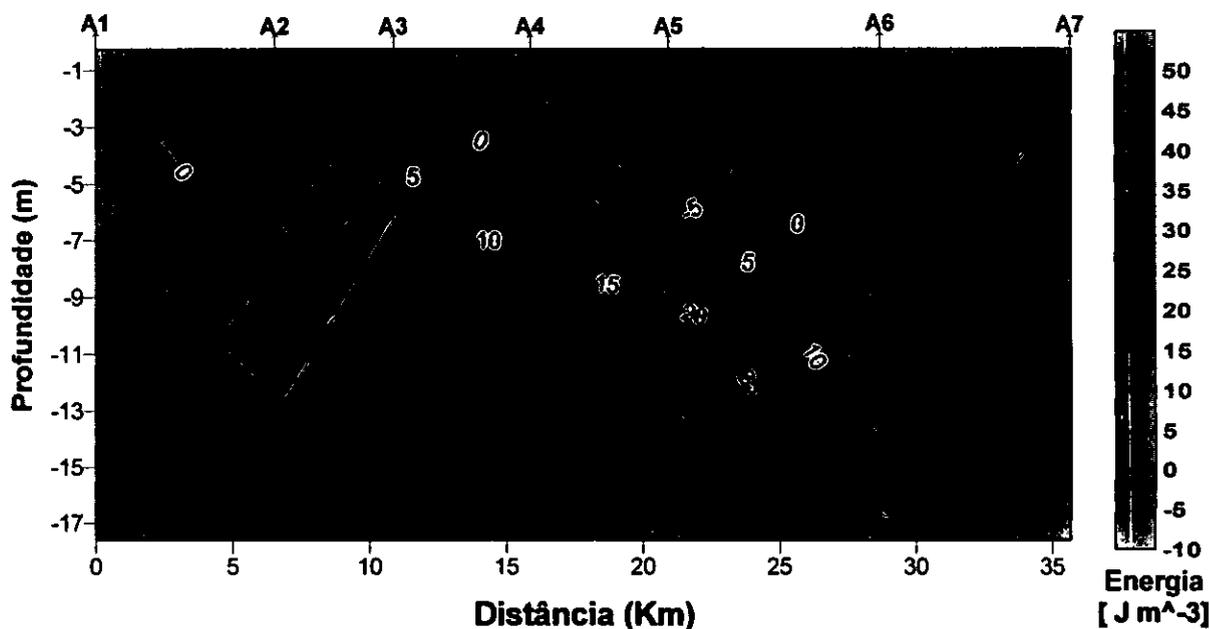


Fig. 14: Distribuição das Isolinhas da anomalia de energia potencial em $J m^{-3}$ em função da profundidade ao longo da secção A na Baía de Maputo no mês de Fevereiro de 2004, Verão no H S.

No mês de Março, os valores mais elevados verificaram-se nas estações 4 e 7 e eram de $33 J m^{-3}$ e $44 J m^{-3}$, a uma profundidade de 11 e 14 m respectivamente.

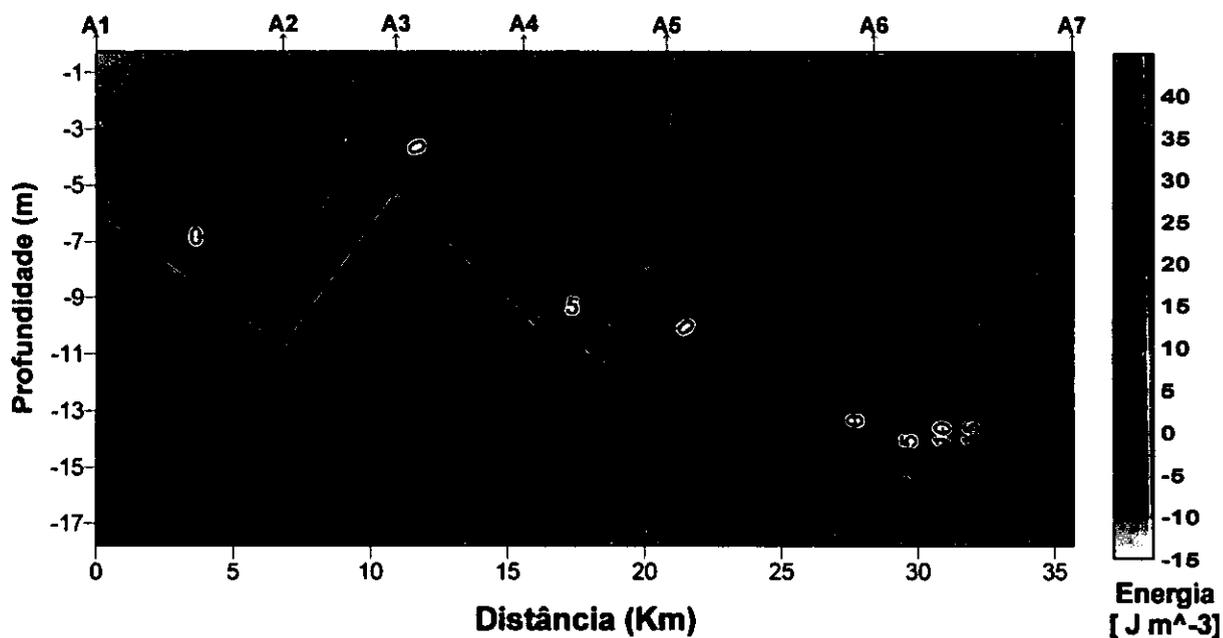


Fig. 15: Distribuição das Isolinhas da anomalia de energia potencial em $J m^{-3}$ em função da profundidade ao longo da secção A na Baía de Maputo no mês de Março de 2004, Verão no H S.

No mês de Abril, as estações 4 e 7 apresentaram valores mais elevados da anomalia, tendo para a estação 4 a uma profundidade de 9 m o valor de 31 J m^{-3} e para a estação 7 a uma profundidade de 17 m, o valor de 50 J m^{-3} .

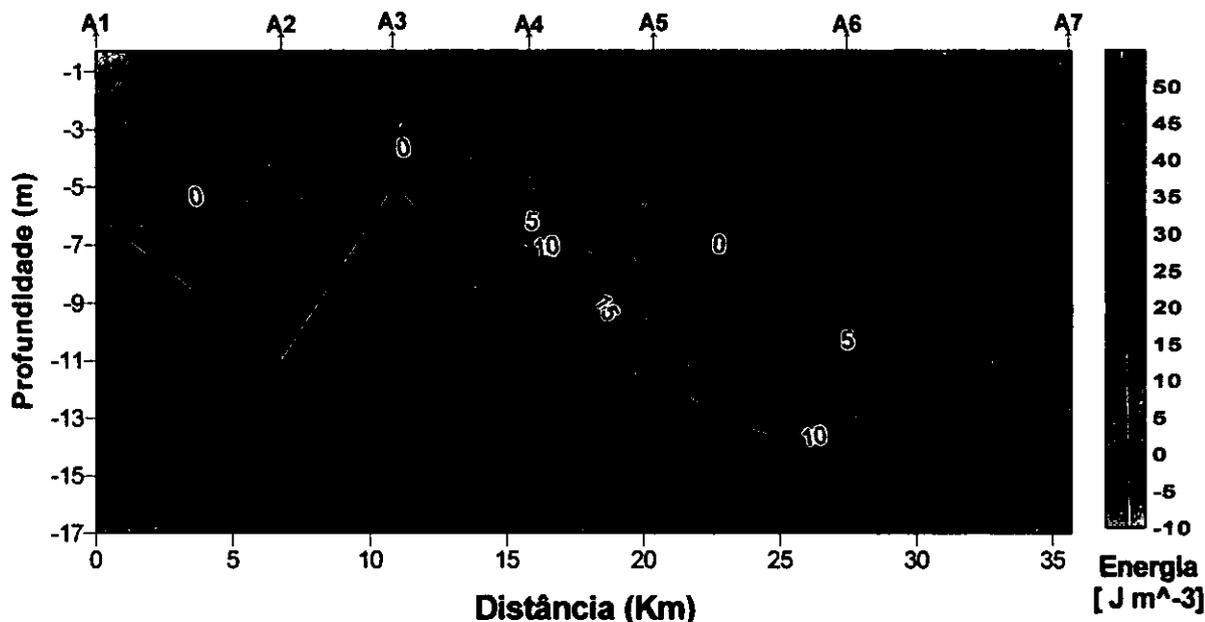


Fig. 16: Distribuição das Isolinhas da anomalia de energia potencial em J m^{-3} em função da profundidade ao longo da secção A na Baía de Maputo no mês de Abril de 2004, Inverno no H S.

Para Maio, o valor da anomalia mais elevado verificou-se a uma profundidade de 17 m na estação 7 e era de 33 J m^{-3} .

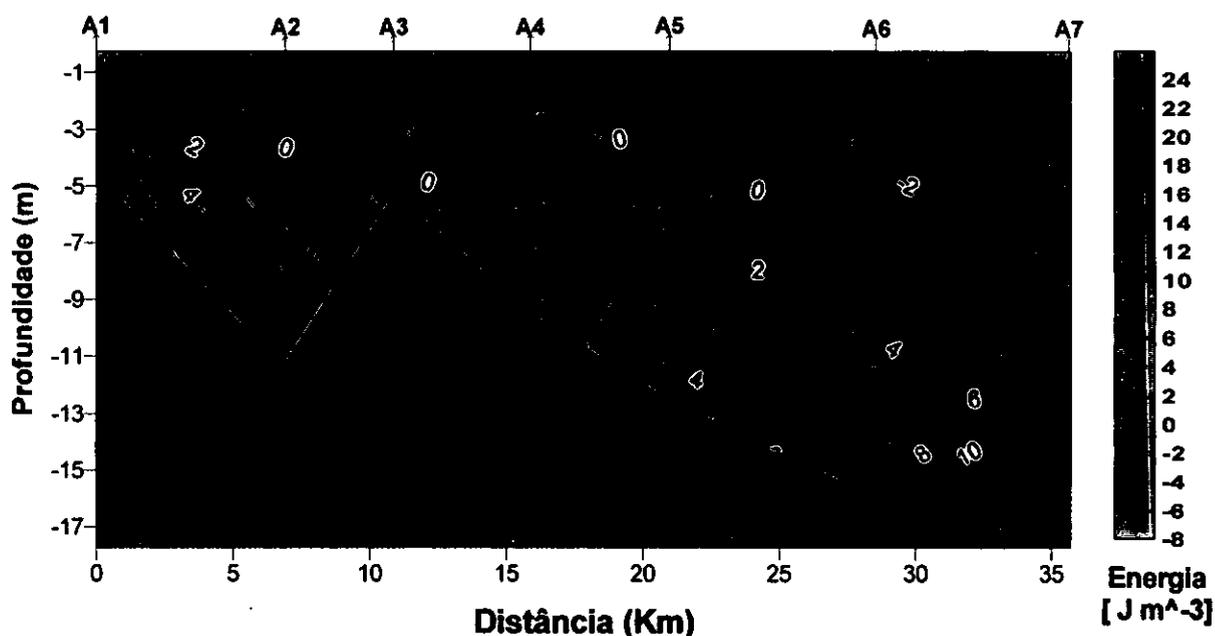


Fig. 17: Distribuição das Isolinhas da anomalia de energia potencial em J m^{-3} em função da profundidade ao longo da secção A na Baía de Maputo no mês de Maio de 2004, Inverno no H S.

4.2 Quantificação da anomalia numa coluna de água e a época de valores mais elevados

A anomalia de energia potencial da coluna de água não esteve uniformemente distribuída em toda a secção A da Baía de Maputo e variou mensalmente como ilustra a Tabela 2 e figura 18. Os meses com maior estratificação foram Fevereiro, Março e Abril, onde o mês de Março apresentou o valor máximo (cerca de $10,10 \text{ J m}^{-3}$) na estação 7. Os restantes meses apresentaram anomalias relativamente baixas, sendo Dezembro o mês que apresentou o valor mais baixo (cerca de $-0,47 \text{ J m}^{-3}$) na estação 2.

Tabela 2: Valores da anomalia de energia potencial em J m^{-3} de toda a coluna de água para cada estação da secção A na Baía de Maputo, desde Outubro de 2003 a Julho de 2004.

Estação	Anomalia (J m^{-3})									
	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul
A1	0,13	-0,16	0,83	0,36	1,75	-0,15	-0,33	2,60	-0,14	2,30
A2	0,29	0,44	-0,47	0,31	2,87	0,32	0,37	0,77	-0,08	1,18
A3	0,42	0,58	0,48	0,80	2,02	0,17	0,04	-0,02	-0,20	0,10
A4	0,71	0,15	0,53	0,51	5,71	1,87	4,32	0,12	0,51	0,39
A5	0,91	1,58	0,10	0,53	8,95	0,28	2,32	1,31	f	0,05
A6	0,46	-0,05	0,64	0,69	1,83	0,36	3,10	1,75	2,38	0,25
A7	2,90	0,55	0,16	-0,05	0,47	10,10	8,16	4,83	1,67	1,02

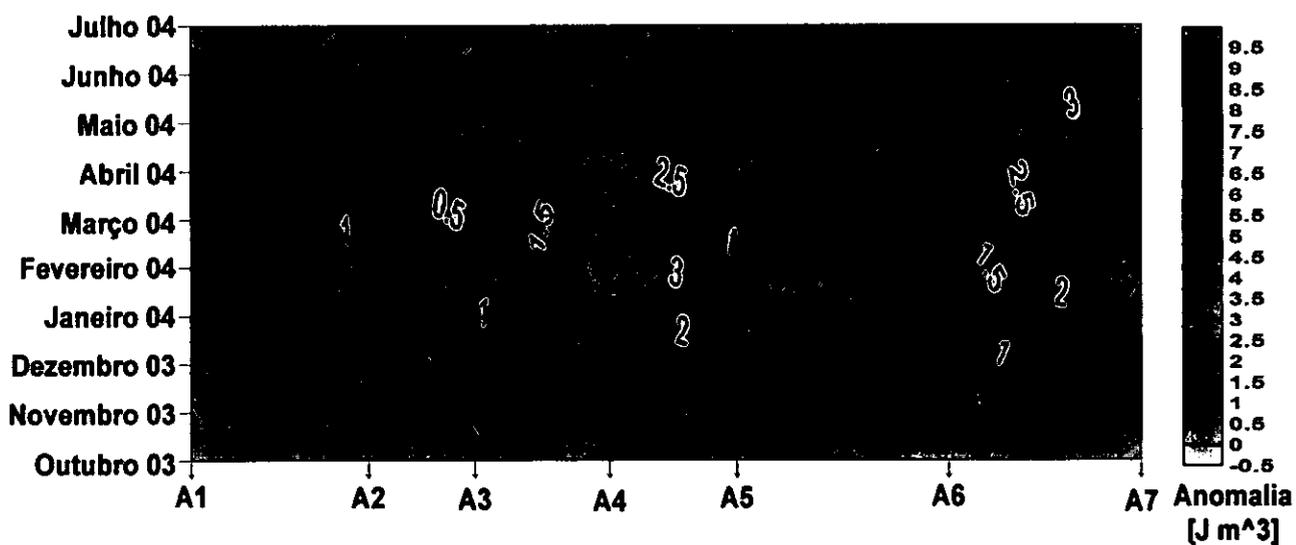


Fig. 18: Isolinhas da anomalia de energia potencial em $J m^{-3}$ da coluna de água para cada estação no período de Outubro de 2003 a Julho de 2004 que inclui as duas estações do ano, Inverno e Verão.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Distribuição da anomalia de energia potencial

Na Baía de Maputo, durante o período em estudo, constatou-se que a água se encontrava misturada nos meses de Outubro, Novembro e Dezembro de 2003 e Janeiro, Junho e Julho de 2004, e estratificada nos meses de Fevereiro, Março, Abril e Maio de 2004.

Como a mistura da coluna de água depende da energia disponibilizada pelos ventos e pelas marés, o facto de a água ter estado misturada nos primeiros quatro meses, poderia ter sido pela acção dos ventos cujos valores nesse período encontravam-se relativamente elevados em relação aos restantes meses conforme mostra a Tabela 3. Nota-se ainda que a energia imposta pelos rios para estratificar (Tabela 4) mostra valores baixos dos caudais nesse mesmo período, o que justifica desse modo a existência da mistura.

Tabela 3: Velocidade média dos ventos e radiação solar média. Fonte: INAM

Meses	Velocidade do Vento (m s^{-1})	Radiação Solar (J m^{-2})
Outubro 03	4,4	$1,9 * 10^7$
Novembro 03	4,3	$2,1 * 10^7$
Dezembro 03	4,5	$2,4 * 10^7$
Janeiro 04	4,2	$2,3 * 10^7$
Fevereiro 04	3,7	$2,2 * 10^7$
Março 04	3,6	$1,8 * 10^7$
Abril 04	3,2	$1,7 * 10^7$
Mai 04	2,5	$1,5 * 10^7$
Junho 04	2,6	$1,4 * 10^7$
Julho 04	3,2	$1,1 * 10^7$

Nos meses de Junho e Julho, apesar da velocidade dos ventos ser relativamente baixa em relação aos meses de Outubro a Janeiro, a radiação solar era relativamente baixa proporcionando assim, condições favoráveis de mistura da coluna de água.

A época do ano de maior estratificação foi no fim de Verão e início de Inverno, nos meses de Fevereiro a Abril. Nesses meses os valores dos caudais dos rios eram elevados comparativamente aos restantes (Tabela 4), e porque a água doce é um dos contribuintes para a ocorrência da estratificação, presume-se que este seja o principal factor responsável pela estratificação verificada uma vez que o outro factor, a radiação solar, apresentava valores baixos nesse mesmo período.

Tabela 4: Caudais médios mensais dos três rios principais que desaguam na Baía de Maputo. A letra f representa dados em falta porque ainda não se encontram disponíveis. Fonte: DNA

Meses	Caudais dos Rios ($m^3 s^{-1}$)			
	Rio Umbeluzi	Rio Incomati	Rio Maputo	Total
Outubro 2003	1,95	93,35	30,77	126,07
Novembro 2003	2,02	94,03	18,81	114,86
Dezembro 2003	2,08	82,66	14,53	99,27
Janeiro 2004	2,47	129,51	51,39	183,37
Fevereiro 2004	2,54	82,56	55,73	140,83
Março 2004	2,71	117,05	128,35	248,11
Abril 2004	2,93	84,12	67,24	154,29
Mai 2004	2,58	41,8	21,73	66,11
Junho 2004	2,56	f	f	
Julho 2004	2,59	f	f	

Energia mínima necessária para misturar uma coluna de água na Baía de Maputo

Se o módulo da anomalia de energia potencial for elevado, significa que as forças que promovem a mistura não são efectivas. Em particular, se esta for negativa, significa que a acção dos ventos não se faz sentir com intensidade suficiente para misturar totalmente a coluna de água, e se for positiva, significa que a quantidade de energia disponível gerada pelas marés não é suficiente para misturar a coluna de água. Para uma melhor compreensão veja a Figura 19.

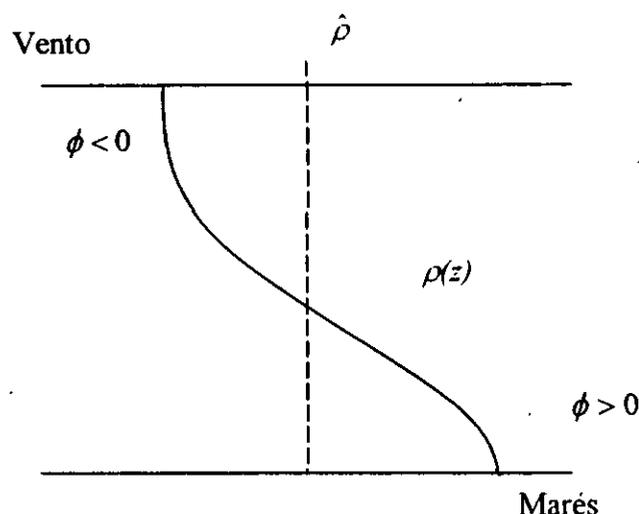


Fig. 19: Esquema representativo do quão longe a energia está para originar uma mistura efectiva da coluna de água

O déficit de energia para misturar toda a coluna de água no período em que se observou a maior estratificação (Março) foi de 10.10 J m^{-3} . Na altura da observação a velocidade de marés era cerca de 50 a 75 cm s^{-1} o que significa que a energia disponível para misturar era de 128.4 J m^{-3} , considerando o limite inferior. Assim a energia total necessária para misturar toda a coluna de água era de 138.5 J m^{-3} , isto se se considerar que as marés eram o único contribuinte para a mistura.

O déficit de energia é de apenas 7.3% , o que quer dizer que a Baía esteve quase sempre misturada. Para tal, pesa o facto de a Baía ser pouco profunda, fazendo com que a difusão de calor em profundidade seja efectiva, criando deste modo a homogeneidade térmica. Assim, as marés e os ventos puderam misturar efectivamente toda a coluna de água. Mais ainda, essa mistura é devida em parte pela reduzida descarga dos rios na Baía de Maputo pelo facto destes estarem regulados a montante.

Como as amplitudes das correntes de marés na Baía variam de cerca de 50 a 75 cm s^{-1} , seria necessário aumentar a velocidade de maré em 14 cm s^{-1} para que haja mistura, o que corresponde a um acréscimo de cerca de 28% da velocidade de marés observada naquele período.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 Conclusões

- ◆ A Baía de Maputo encontra-se na maior parte do tempo misturada com um défice de energia de 7.3%.
- ◆ A principal razão para a mistura observada reside na pouca profundidade da baía, reduzidas forças de sustentação e correntes de marés relativamente fortes.
- ◆ A época do ano em que se verificou maior estratificação foi a dos últimos meses de Verão (Fevereiro e Março) e o primeiro mês de Inverno (Abril).
- ◆ A estratificação é devida principalmente à descarga de água doce.
- ◆ O valor mínimo necessário para misturar uma coluna de água é de 138.5 J m^{-3} .
- ◆ O estado de mistura da Baía favorece a re-supensão de nutrientes, condição necessária para a produção primária.

6.2 Recomendações

Recomenda-se:

- A extensão deste estudo para toda a área da Baía de modo a se obter na sua totalidade o comportamento da estratificação na região.
- Que estudos deste género sejam feitos para outras zonas de modo a desenvolver a ciência nesta área, uma vez que grande importância tem para a produtividade primária e conseqüentemente para a pesca que é uma indispensável fonte de rendimento económico.
- A determinação da influência dos factores contribuintes para a estratificação e mistura. Para tal, poder-se-ia usar a fórmula deduzida por Simpson apresentada neste trabalho como fórmula (9).
- A criação pela Universidade de uma base de dados com laboratório de análise que facilite nas pesquisas futuras.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barnes, R. S. K. e K. H. Mann (1980). Fundamentals of Aquatic Ecosystems. 229 pp, Oxford, Blackwell Scientific Publications.
- Bowden, K. F. (1983). Physical Oceanography of Coastal Waters. 302 pp, Great – Britain, Ellis Horwood Ltd.
- Cushman-Roisin, B. (1994). Introduction to Geophysical Fluid Dynamics. 320 pp, New Jersey, Prentice-Hall, Inc.
- Hartmann, D. L. (1994). Global Physical Climatology. 411 pp, California, Academic Press, Inc.
- Hoguane, A. M. (1996). Hidroynamics, Temperature and Salinity in Mangrove Swamps in Mozambique. In PH. D., Bangor, University of Wales.
- Hoguane, A. M. e V. F. Dove (2000). Condições Oceanográficas da Baía de Maputo. Relatório de Estudos Ambientais. 4 pp, Maputo. IIP.
- Hoguane, A. M., V. F. Dove e C. I. Sete (2002). Water Masses and Circulation of Maputo Bay. In: Hoguane A. M., H. Motta e M. A. M. Pereira (eds). Proceedings of the II National Conference on Coastal Zone Research. 9-16 pp, Maputo, 27-29 September 2000. CDS-ZC/MICOA/SEACAM/UEM.
- Lalli, C. M. e T. R. Parsons (1997). Biological Oceanography – An Introduction, 2nd edition. Great – Britain, The Open University.
- Lewis, R. (1997). Dispersion in Estuaries and Coastal Waters. 312 pp, England, Jhon Wiley & Sons Ltd.
- Mann, K. H. e J. R. N. Lazier (1996). Dynamics of Marine Ecosystems – Biological-Physical Interaction in the Oceans, second edition. 394 pp, USA, Blackwell Science, Inc.

Pickard, G. L. (1974). Oceanografia Física Descritiva, 2ª edição. 180 pp, Brasil, Carioca Ltda.

Rippeth, T. P. e J. H. Simpson (1996). The Frequency and Duration of Episodes of Complete Vertical Mixing in the Clyde Sea, Vol. 16, Nº. 7. 933 – 947 pp, Great Britain, Elsevier Science Ltd.

Simpson, J. H. (1996). Physical Processes in the Rofis Regime. 3-15 pp, England, Journal of Marine Systems.

ANEXO 1

Tabela de cálculo da anomalia da energia potencial para a estação 1 do mês de Outubro

Estação	Data	Prof. (m)	Dens. (Kg/m ³)	Dens Média (Kg/m ³)	Gravidade (m/s ²)	Ener Estrat. (J/m ³)	Ener Mist. (J/m ³)	Anomalia em prof. (J/m ³)
A1	25 de Out 2003	0,254	23,8935	23,96939444	9,81	59,53638969	59,72549891	-0,189109223
A1	25 de Out 2003	0,513	23,9675	23,96939444	9,81	120,6171628	120,6266966	-0,009533826
A1	25 de Out 2003	0,744	23,9667	23,96939444	9,81	174,9243153	174,943981	-0,019665748
A1	25 de Out 2003	1,032	23,9693	23,96939444	9,81	242,6632757	242,6642318	-0,000956103
A1	25 de Out 2003	1,32	23,9709	23,96939444	9,81	310,4039783	310,3844825	0,019495798
A1	25 de Out 2003	1,493	23,9708	23,96939444	9,81	351,0842472	351,0636609	0,020586296
A1	25 de Out 2003	1,848	23,9735	23,96939444	9,81	434,6127047	434,5382755	0,074429205
A1	25 de Out 2003	2,003	23,9711	23,96939444	9,81	471,0184515	470,9849382	0,033513282
A1	25 de Out 2003	2,261	23,9772	23,96939444	9,81	531,8241267	531,6509961	0,173130521
A1	25 de Out 2003	2,485	23,975	23,96939444	9,81	584,4589538	584,3223022	0,136651501
A1	25 de Out 2003	2,768	23,9774	23,96939444	9,81	651,0842378	650,8668542	0,217383617
A1	25 de Out 2003	3,001	23,9746	23,96939444	9,81	705,8076688	705,6544181	0,153250697
A1	25 de Out 2003	3,238	23,975	23,96939444	9,81	761,5606005	761,3825411	0,17805938
A1	25 de Out 2003	3,535	23,9742	23,96939444	9,81	831,3856986	831,2190497	0,166648892
A1	25 de Out 2003	3,742	23,9832	23,96939444	9,81	880,3997685	879,8929799	0,506788578
A1	25 de Out 2003	4,002	23,9742	23,96939444	9,81	941,2179818	941,0293173	0,188664459
A1	25 de Out 2003	4,206	23,9768	23,96939444	9,81	989,303388	988,9978283	0,305559774
A1	25 de Out 2003	4,521	23,9782	23,96939444	9,81	1063,457388	1063,066853	0,39053548
						2,345432579	Anom. da coluna	
						0,129696559		0,13030181