



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

**FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

Trabalho de Licenciatura

**MODELO DE INTRUSÃO SALINA NO ESTUÁRIO DO
INCOMÁTI BASEADO NA INFLUÊNCIA GEOMÉTRICA
E TOPOGRÁFICA DO ESTUÁRIO**

Autora: Valentina Joaquina Vassele

Dezembro de 2004



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

**FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

Trabalho de Licenciatura

**MODELO DE INTRUSÃO SALINA NO ESTUÁRIO DO
INCOMÁTI BASEADO NA INFLUÊNCIA
GEOMÉTRICA E TOPOGRÁFICA DO ESTUÁRIO**

Autora: Valentina Joaquina Vassele

Supervisor: Prof. Doutor. A. M. Hogueane

Co-Supervisora: dra Verónica F. Dove

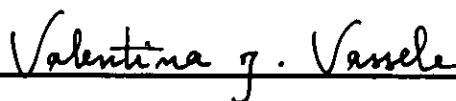
Maputo, Dezembro de 2004

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 na pesquisa e aprendizagem no período da sua elaboração.

Maputo, Dezembro de 2004

A autora:



(Valentina Joaquina Vassele)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à memória do meu pai, Gabriel Vassele, que em vida sempre me incentivou ao estudo

À minha querida mãe

Joaquina Francisco Beleza

E aos meus irmãos

Milvia, Telmo, Vilma, Nay de Vânia e Guibson.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho não se teria tomado realidade se não tivesse existido apoio moral, afectivo e técnico de todos que ao longo deste período me acompanharam. Com isto quero agradecer:

Em especial ao meu supervisor Prof. Doutor António Mubango Hogueane que sempre mostrou disposição e me apoiou durante a elaboração do trabalho.

À minha co-supervisora doutora Verónica F. Dove, que muito me apoiou na elaboração do trabalho.

Ao Dr. Bowers e à Rachel da Universidade de Wales, Inglaterra, pelo apoio que me prestaram.

À todos os professores e funcionários do Departamento de Física, em especial ao doutor Victor Saíde, doutor Gilberto Mahumane e a dona Otilia; ao Sr. Daniel do Instituto de Investigação Pesqueira - IIP, ao Sr. Santos e Sr. Carlos da Direcção Nacional de Águas - DNA; à doutora Cândida Sete e à Clousa.

Ao Estaline dedico a minha imensa gratidão pelo apoio, companheirismo e atenção que me tem prestado.

Aos meus amigos Mazuze, Fialho, Etiena, Edite, Salomão, Paula, Almirante, Dálica, Inês, Tomázia, Odete, Sónia, Ivan, que me ampararam e me apoiaram ao longo desta jornada.

À minha mãe e aos meus irmãos pela força que sempre me deram.

À todos os que me ajudaram e que não foram aqui mencionados o meu muito obrigado.

LISTA DE FIGURAS

	Página
Fig. 2.2: Estuário de planície costeira.....	5
Fig. 2.3: Estuário de Bacia profunda.....	6
Fig. 2.4: Estuário Constituído por barreira.....	6
Fig. 2.5: Estuário bem misturado.....	7
Fig. 2.6: Estuário parcialmente misturado.....	8
Fig. 2.7: Estuário altamente estratificado.....	8
Fig. 2.8: Estuário de cunha salina.....	9
Fig. 2.9: Curvas de Intrusão salina.....	14
Fig. 2.10: Estuário do Incomáti e as estações de observação.....	16
Fig. 3.1: Secção transversal da boca do estuário.....	20
Figs. 4.1, 4.2 e 4.3: Variação vertical e longitudinal da salinidade no Estuário em Março e Agosto de 2003 e Março de 2004.....	23
Figs. 4.4 e 4.5: Variação vertical e longitudinal da salinidade no Estuário nos meses de Abril e Julho de 2004.....	24
Figs. 4.6 e 4.7: Variação vertical e longitudinal da densidade para os meses de Agosto de 2003 e Março de 2004.....	25

Figs. 4.8 e 4.9: Variação vertical e longitudinal da densidade para os meses de Abril e Julho de 2004.....	26
Figs. 4.10 e 4.11: Variação vertical e longitudinal da temperatura para os meses de Março e Agosto de 2003.....	27
Figs. 4.12, 4.13 e 4.14: Variação vertical e longitudinal da temperatura para os meses de Março, Abril e Julho de 2004.....	28
Fig. 4.15: Variação longitudinal da salinidade no período de Verão no Estuário do Incomáti.....	29
Fig. 4.16: Variação longitudinal da salinidade no período de Inverno no Estuário do Incomáti.....	30
Fig. 4.17: Variação Sazonal da salinidade no Estuário do Incomáti.....	31
Fig. 4.18: Probabilidade mensal de ocorrência da Intrusão salina no estuário.....	33
Fig. 4.19: Intrusão salina em função do caudal.....	34
Figuras dos instrumentos usados nos trabalhos de campo (ANEXO).....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Consumo de água na bacia do Incomáti.....	1
Tabela 2: Caracterização do fluxo pelo número de Reynolds.....	13
Tabela 3: Caracterização do fluxo através do número de Richardson.....	13
Tabela 4: Intrusão salina em função do caudal e do coeficiente de mistura.....	32
Tabela 5: Variação do caudal para mínima intrusão em função da salinidade.....	33
Tabela 6: Probabilidade de ocorrência da intrusão salina para cada mês em 21 anos.....	33
Tabela 7: Comportamento das ondas de maré na Baía do Maputo.....	36
Tabela 8: Dados de caudais na estação hidrométrica de Magude no período de 21 anos (em anexo).....	43

RESUMO

O presente trabalho centra-se na determinação da Intrusão salina no Estuário do Incomáti, e também na determinação do caudal que a minimize visto a sua progressão à montante do estuário impulsionada pela redução do caudal do rio, principalmente na época seca. Para tal, usa-se o modelo de intrusão salina que foi aplicado por Cossa (2001) e Macuiane (2003), com a particularidade de neste estudo, o modelo considerar a influência das fronteiras do estuário.

O modelo que está na base desta determinação, a clássica equação de difusão e advecção de sal proposta por Bowden (1983) e Turrel et al. (1996) é aqui apresentada considerando a topografia e geometria do estuário como factores importantes na modelação do processo de Intrusão salina. Considera-se o estágio de equilíbrio dinâmico da maré na boca do estuário.

Este estudo abrange os períodos de Verão e Inverno englobando doze meses desde o ano de 2002 até 2004. Os resultados apontam para uma grande vulnerabilidade do estuário a intrusão salina, principalmente quando os caudais são baixos. Na maior parte dos meses a intrusão salina excede os 20 km à montante do rio, que significa que este processo compromete as actividades agrícolas e o sistema ecológico no geral.

Para a mitigação deste problema é necessário que se estabeleça um caudal que garanta que as terras cultivadas situadas 20 km à montante não sejam afectadas. O caudal determinado neste trabalho tem o valor de $24 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

ÍNDICE	Página
I. INTRODUÇÃO E OBJECTIVOS.....	1
1.1 Introdução.....	1
1.2 Motivações do Estudo.....	2
1.3 Objectivos do Estudo.....	2
II. PROCESSOS ESTUARINOS.....	3
2.1 Características Gerais de um Estuário.....	3
2.2 Fronteiras Dinâmicas de um Estuário.....	4
2.3 Classificação dos Estuários.....	4
2.3.1 Caracterização Topografica dos Estuários.....	5
2.3.2 Caracterização dos Estuários de acordo com a Estrutura salina.....	7
2.4 Conceito de Extensão da Intrusão Salina.....	9
2.5 Efeito da maré.....	9
2.6 Circulação Estuarina.....	10
2.7 O processo de Mistura.....	11
2.8 Caracterização do fluxo.....	12
2.9 Curvas de intrusão salina.....	14
2.10 O Estuário do Incomáti.....	15
III. METODOLOGIA.....	17
3.1 Modelo Usado.....	17
3.2 Área de Secção Transversal da Boca do Estuário.....	20
3.3 Observações de Campo.....	20
3.4 Material Usado.....	21
IV. RESULTADOS.....	22
V. DISCUSSÃO.....	35
VI. CONCLUSÃO.....	38

VII. RECOMENDAÇÕES.....	39
VIII. BIBLIOGRAFIA.....	40
IX. ANEXOS.....	42

I INTRODUÇÃO E OBJECTIVOS

1.1 Introdução

A intrusão salina é definida como sendo a máxima incursão da água salina estuário adentro durante cada estágio de maré. Este processo começa a ser preocupante à medida que esta entrada da água salgada causada principalmente pela redução dos caudais do rio atinge largas extensões ao longo do curso do rio podendo causar sérios problemas ecológicos e afectar a agricultura nas proximidades do seu leito, além da qualidade da água.

Segundo Hogue et al. (2002), a redução dos caudais está muitas vezes associada com a redução da taxa de entrada de sedimentos no estuário podendo criar o processo de erosão na boca do rio e afectar o ecossistema estuarino. Moçambique compartilha a maior parte das suas bacias hidrográficas com países vizinhos e a redução dos caudais dos rios é principalmente causada pelo uso intensivo das águas nesses países. O rio Incomáti, compartilhado por Moçambique, Suazilândia e África do Sul é intensivamente usado na irrigação pela África do Sul (Tabela 1). Sendo Moçambique um país à jusante é vulnerável aos efeitos negativos das actividades efectuadas à montante, caracterizados principalmente pela redução dos caudais do rio e pela entrada de poluentes (Hogue et al., 2002).

Tabela 1: Consumo de água (Mm^3a^{-1}) na bacia do Incomáti, segundo o Tripartite Interim Agreement — TIA, excluindo perdas por evaporação nas barragens (fonte: TIA (2002), citado por Van der Zaag P. e Carmo Vaz Á. (2003).

País	Geração de água	Usos Prioritários	Plantação de árvores exóticas	Irrigação	Transferência entre bacias	Uso total de água	% do uso total	% da água gerada
RSA	2,937	205	475	786	131	1,598	68	54
Swazil.	479	22	46	126	136	329	14	69
Moçamb.	171	19	25	280	88	412	18	241
Total	3,587	246	546	1,192	355	2,339	100	65
% do uso total		11	23	51	15	100		

A zona costeira moçambicana é a mais populosa, devido aos recursos disponíveis e à possibilidade de se poderem desenvolver actividades como a agricultura e a pesca. A má gestão dos recursos hídricos afecta negativamente a vida sócio-económica do país. O vale do Incomáti foi considerado no passado após independência, como sendo uma das zonas prioritárias para o

desenvolvimento agrícola de Moçambique. Na época seca, a redução dos caudais do rio proporciona um avanço das águas salgadas ao longo do rio, dezenas de quilómetros da costa a montante com maior incidência durante as marés vivas (Cossa, 2001).

O estudo do processo da intrusão salina pretende avaliar até que ponto a redução dos caudais do rio Incomáti afecta o ambiente estuarino usando a salinidade como indicador. O modelo a ser usado neste trabalho, na tentativa de melhorar os trabalhos feitos por Cossa (2001) e Macuiane (2003), descreve a intrusão salina como função do caudal do rio, da topografia e da geometria, parâmetros que têm um papel fundamental na modelação deste processo.

1.2 Motivações do Estudo

O facto da maior parte da população moçambicana viver na zona costeira e com isso sofrer directamente com as perturbações ambientais como o caso da intrusão salina constituiu uma grande motivação para dar continuidade a este estudo.

O modelo desenvolvido não só poderá permitir modelar a intrusão e a distribuição da salinidade no estuário em função do caudal do rio, como também contribuirá para a determinação do caudal ecológico mínimo para o Baixo Incomáti. Este estudo poderá servir de referência na modelação de processos de intrusão salina, em outros estuários similares ao longo da vasta costa moçambicana.

1.3 Objectivos do estudo

Geral

Desenvolver um modelo de intrusão salina que se adeque às condições geométricas e topográficas reais do estuário do Incomáti.

Específicos

- Determinar o caudal mínimo para minimizar a intrusão salina.
- Avaliar a extensão da intrusão salina no estuário.
- Determinar a probabilidade de ocorrência da intrusão salina no estuário.

II PROCESSOS ESTUARINOS

2.1 Características Gerais de um Estuário

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

Dyer (1972) define o estuário como sendo uma massa costeira de água semi-fechada, que tem uma livre conexão com o mar aberto, estendendo-se rio adentro até ao limite da influência da maré e dentro da qual a água do mar é mensuravelmente diluída com a água doce proveniente da drenagem terrestre.

Os estuários são *habitats* vitais para milhares de espécies marinhas e é comum serem chamados “viveiros do mar” pelo ambiente protector que oferecem e pela abundância de nutrientes, que proporcionam uma localização ideal para a reprodução peixes e crustáceos. Os estuários são importantes para a saúde dos oceanos pois podem filtrar sedimentos e poluentes da água antes desta fluir para os oceanos. O excesso de nutrientes é removido para pântanos fronteiros resultando na água limpa para as pessoas e organismos marinhos (www.omp.gso.uri.edu).

Os estuários são um meio intermediário entre os oceanos e os continentes. Os estuários têm um grande significado histórico e cultural, e desde muito tempo a comunidade humana tem tendência a fixar-se nas proximidades dos estuários usando-os como fonte de alimentação e rota de transporte.

Kjerfve et al. (1989) divide o sistema estuarino em três regiões:

- a) Zona do rio sujeita à maré, zona fluvial caracterizada pela presença de água doce, mas sujeita à subida e descida da maré;
- b) A zona de mistura (o estuário propriamente dito), caracterizado pela mistura de massas de água e pela existência de elevados gradientes de parâmetros físicos, químicos e bióticos estendendo-se desde a zona do rio sujeita à marés até a boca;
- c) Zona turva costeira, no oceano aberto entre a zona de mistura e a fronteira da pluma de maré na maré baixa.

Para um dado sistema, podem não existir todas as zonas. Por exemplo, um dado sistema estuarino pode não exibir a zona de mistura se a descarga do rio for muito grande.

2.2 Fronteiras Dinâmicas de um Estuário

As fronteiras de um estuário mudam de posição tanto em escalas de tempo de ciclos de marés como em escalas geológicas de tempo. A extensão da zona sujeita à maré move-se rio abaixo com o aumento da descarga de água do rio e em função das variações da amplitude de marés. A interface entre esta zona e a zona de mistura oscila ao longo do ciclo de marés e move-se em direção ao mar com o aumento do escoamento do rio (Day et al., 1989).

A interface entre a zona de mistura e a zona costeira muda lentamente porque as margens continentais mudam em escalas de tempo de milhares de anos. As margens laterais de um estuário são geralmente porções de terra albergando variadas espécies de plantas e ervas marinhas, podendo muitas vezes estar associadas à florestas de mangal.

2.3 Classificação dos Estuários

Pritchard (1952) propôs uma classificação de estuários baseada no balanço de água. Ele apresentou três classes:

- a) Estuários positivos, onde a combinação entre a água doce dos rios, a água subterrânea e a precipitação excedem a evaporação;
- b) Estuários neutros, com um balanço entre evaporação e entrada de água doce;
- c) Estuários negativos, onde a evaporação excede a entrada de água doce.

De um modo geral, a salinidade e a profundidade de um estuário aumentam de forma mais ou menos regular de montante para o mar (Pritchard, 1952).

2.3.1 Caracterização Topográfica dos Estuários

A topografia, o fluxo do rio e a acção das marés são factores importantes na distribuição das características, das taxas e extensões de mistura das águas doce e salgada. Em termos topográficos, Pritchard (1952) e Dyer (1973) distinguiram três tipos principais de estuários, nomeadamente: Estuários de planície costeira, estuários de bacia profunda e estuários constituídos por barreiras (Pickard and Emery, 1982).

Estuários de Planícies Costeiras (Vales fluviais de inundação)

Estes são resultado de uma subsidência da Terra ou de um aumento no nível do mar inundando o vale do rio (Pickard and Emery, 1982). A máxima profundidade nestes estuários raramente alcança os 30 m. A área de secção transversal tende a ser larga e profunda em direcção à boca. O seu fundo é geralmente composto por sedimentos de várias espessuras e lama, tornando-se arenoso em direcção à boca. Uma característica importante é que o aumento da área de secção transversal em direcção à boca é exponencial (Dyer, 1972). O Incomáti, pelas suas características topográficas, enquadra-se neste tipo de estuário.

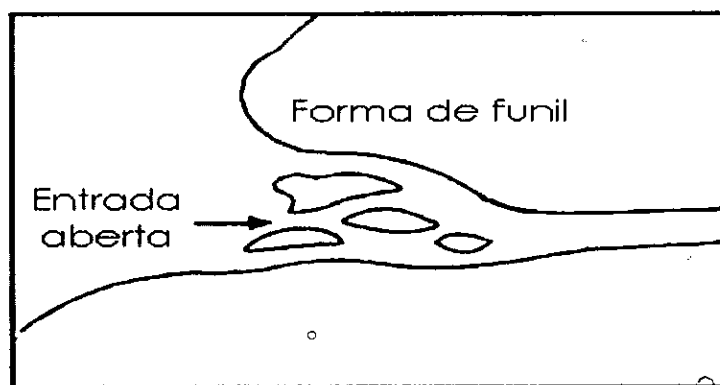


Figura 2.2: Estuário de planície costeira

Estuários de Bacias Profundas (*fjords*)

A maioria destes estuários têm uma duna na região próxima à boca e ao mar adjacente e com isso restringe a troca e mistura da água do fundo (Pickard and Emery, 1982). Estes estuários são geralmente muito profundos, com lados íngremes, e uma área de secção transversal quase rectangular. Estes têm geralmente fundos rochosos ou de finas camadas de sedimentos e a deposição é geralmente restrita à montante do estuário onde o rio principal entra (Dyer, 1972).

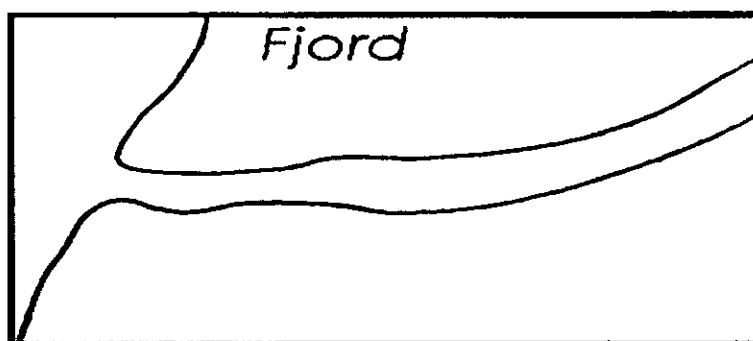


Figura 2.3: Estuário de bacia profunda

Estuários Constituídos por Barreiras

Estes estuários compreendem os estreitos canais entre a costa e uma barreira que se tenha erguido nas suas proximidades por sedimentação ou por acção do vento (Pickard and Emery, 1982). Frequentemente, mais de um rio entra para o estuário. A acção das marés é consideravelmente reduzida nestes estuários. Estes são geralmente rasos sendo a acção do vento o mecanismo mais importante de mistura das águas (Pritchard, 1967)

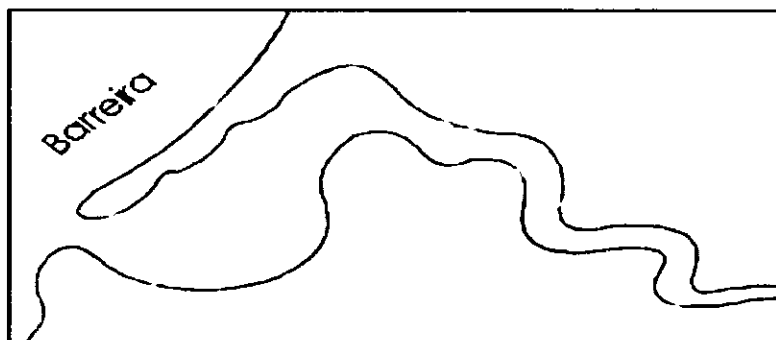


Figura 2.4: Estuário constituído por barreira

2.3.2 Caracterização dos Estuários de Acordo com a Estrutura Salina

Stommel citado por Dyer (1973) classificou os estuários em termos de distribuição das propriedades da água como: verticalmente misturado ou bem misturado, ligeiramente estratificado ou parcialmente misturado, altamente estratificado e estuário de cunha salina.

Estuários bem misturados

São geralmente rasos e a água é misturada verticalmente tornando-se homogêneos da superfície até ao fundo em qualquer local do estuário. A salinidade aumenta com a distância ao longo do estuário de montante para a boca (Pickard and Emery, 1982). A mistura é principalmente causada por ondas de maré com energia suficiente para que o grau de turbulência quebre completamente a estratificação vertical da salinidade (Dyer, 1979). Na época seca o estuário do Incomáti apresenta características de um estuário bem misturado conforme se verá mais adiante através dos perfis de salinidade (Figuras 4.2 e 4.5)

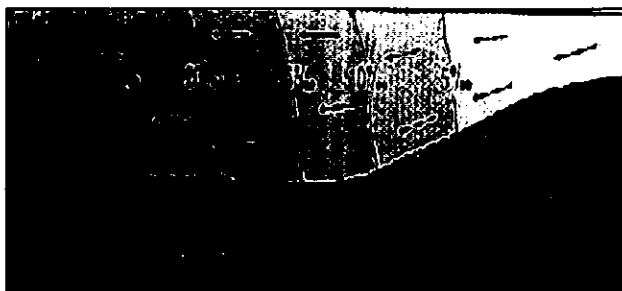


Figura 2.5: Estuário bem misturado. Fonte: Duxbury, 1997

Estuários parcialmente misturados

Estes estuários são também geralmente rasos com a salinidade a aumentar de montante até a boca em todas as profundidades. Formam-se essencialmente duas camadas com a camada superficial menos salina que a camada do fundo em qualquer posição ao longo do estuário, e com uma camada de mistura entre elas. Em ambas camadas existe uma mistura vertical de água doce e água salgada, existindo uma variação longitudinal da salinidade nas duas camadas

(Pickard and Emery, 1982). Quando os caudais do rio Incomáti são relativamente altos, o estuário do Incomáti encontra-se parcialmente misturado.



Figura 2.6: Estuário parcialmente misturado. Fonte: Duxbury (1997)

Estuários altamente estratificados

Nestes estuários, que englobam a maior parte das bacias profundas (*fjords*), a camada superficial aumenta em salinidade, de zero (aproximadamente) à montante do rio até um valor aproximado ao valor de salinidade do mar, na boca. A água profunda tem quase uma salinidade uniforme ao longo do curso do estuário. Nestes estuários existe uma forte haloclina entre a água superficial e a água profunda, particularmente à montante onde podem ocorrer gradientes verticais de salinidade de 10 a 20 psu por metro, no Verão, durante o período de grande escoamento do rio (Pickard and Emery, 1982).

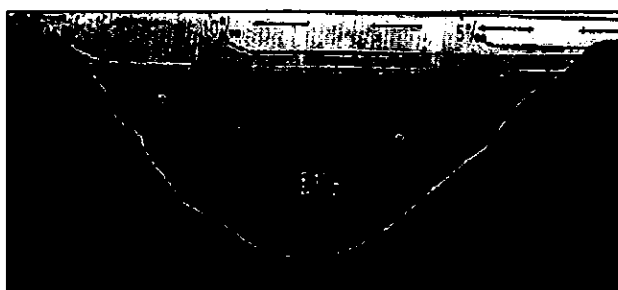


Figura 2.7: Estuário altamente estratificado. Fonte: Duxbury (1997)

Estuários de cunha salina

Como diz o nome, a água salina penetra em forma de cunha por baixo da água do rio. Esta situação é típica de rios com elevados caudais. O estuário de cunha salina tem características

comuns aos estuários estratificados. Existe um gradiente horizontal de salinidade no fundo e um pronunciado gradiente vertical de salinidade. Uma outra característica deste tipo de estuário é que a cunha salina migra estuário acima e estuário abaixo com as enchentes e as vazantes, algumas vezes por muitos quilômetros.



Figura 2.8: Estuário de cunha salina. Fonte: Duxbury (1997)

2.4 Conceito de Extensão da Intrusão Salina

A extensão da intrusão salina ao longo de um estuário é determinada pelo balanço entre o transporte da água salina à montante pelas ondas de maré e o retorno desta pela descarga de água doce. O maior factor que afecta o limite da intrusão salina é o caudal do rio (www.dlwc.nsw.gov.au).

Neste trabalho, assume-se que o limite da intrusão salina é o alcance máximo da isohalina de 1psu (ao longo da secção longitudinal do estuário).

2.5 Efeito da maré

A subida e descida cíclica do nível do mar produz uma onda que se desloca da boca do estuário para montante. O estudo da propagação da onda de maré pode ser usado para estimar as características da geometria do estuário. A propagação da onda de maré depende da geometria do estuário e da descarga das águas do rio.

Em águas pouco profundas, podem se distinguir três tipos de propagação da onda de maré: onda estacionária, progressiva e mista. Nos estuários, a onda de maré é do tipo mista, o que significa que não é puramente estacionária nem progressiva. Uma onda puramente estacionária requer um

corpo de água semi-fechado onde a onda de maré é totalmente reflectida. Uma onda puramente progressiva apenas ocorre num canal profundo e de fricção desprezível. No caso de estuários de planície costeira, a forma de funil do estuário é a causa mais importante da diferença de fase, sendo a fricção a causa de menor efeito. A convergência dos bancos de areia e o fundo causa uma reflexão parcial da onda de maré (De Groen, 1993).

2.6 Circulação Estuarina

A circulação estuarina é um processo físico que afecta e controla muitos processos ecológicos. A energia que governa a circulação estuarina deriva do aquecimento solar, da atracção gravitacional, da descarga dos rios e da circulação das águas oceânicas.

As diferenças no aquecimento solar originam os ventos, a chuva e diferenças na temperatura das águas. A chuva em particular afecta os estuários pela energia e massa associada à descarga dos rios. A circulação é também devida ao stress do vento sobre as águas superficiais. A atracção gravitacional pelo Sol, pela Lua e por outros astros é responsável pela subida e descida regular do nível das águas (Day et al., 1989). A geometria e a topografia são importantes na determinação da circulação.

Nos estuários, existem três formas principais de circulação, nomeadamente:

- a) Circulação gravitacional;
- b) Circulação por marés;
- c) Circulação devida ao vento.

A circulação induzida por diferenças na densidade e elevação entre as massas de água é chamada circulação gravitacional. A água menos densa tem tendência a permanecer na camada superficial do estuário. Neste tipo de circulação o efeito da maré e do vento é de misturar a coluna de água causando uma troca vertical entre a água doce superficial e a água salgada sub-superficial (Day et al., 1989). Na ausência de gradientes de densidade e tensão do vento, a circulação estuarina é devida à correntes de maré. Como a topografia estuarina é variável, a interacção entre as correntes de maré e a topografia varia de local para local ao longo do estuário. Isso é manifestado por pequenas diferenças na corrente e na duração dos fluxos de

maré enchente e vazante. A circulação devida às marés é particularmente pronunciada em estuários de baixa profundidade e longo alcance de maré (Day et al., 1989).

Com o aumento do fluxo do rio durante as marés mortas, a extensão da intrusão de marés diminui, enquanto que durante as marés vivas, com a diminuição do fluxo do rio, a intrusão da maré aumenta (McLusky, 1989).

A interação entre o escoamento do rio e as correntes de maré é influenciada pelas dimensões físicas do estuário e pelo efeito de rotação da Terra representado pela força de Coriolis. Se o estuário for estreito a força de Coriolis é desprezível.

Apesar de geralmente a circulação estuarina ser determinada principalmente pela influência da descarga do rio e das correntes de maré, o vento também tem uma influência significativa nesta. Através da tensão exercida na superfície, pode originar um transporte residual de água, e as ondas geradas irão aumentar a intensidade da mistura vertical. Na camada superficial, o transporte de água será maioritariamente na direcção do vento (Bowden, 1967). A circulação devida ao vento é particularmente importante em lagoas. As condições que favorecem o domínio da circulação devida ao vento são grandes extensões de água com baixa profundidade e baixa descarga do rio (Day et al, 1989). No estuário do Incomáti, a principal forma de circulação é a circulação induzida por marés.

2.7 O processo de Mistura

O mecanismo de diluição da água do mar pela água doce varia de estuário para estuário dependendo do volume de água doce, do alcance da maré, da amplitude e da extensão da evaporação da água no estuário. A salinidade da água do mar é aproximadamente 35 psu podendo ser baixa (33 psu) em mares costeiros e relativamente alta (37 psu) em águas tropicais. A salinidade da água doce é sempre menor que 0,5 psu. Assim, a salinidade das águas estuarinas está entre 0,5 e 35 psu.

A mistura refere-se a diluição ou a redistribuição de parcelas de água quando elas se movem ao longo do estuário, sobre a influência dos fluxos de água doce, fluxo de maré e correntes secundárias. A mistura não envolve apenas a troca de massas de água, mas também de qualquer

substância dissolvida nela, como os sais e poluentes dissolvidos. O processo de mistura é de grande importância na distribuição da salinidade e na qualidade da água ao longo das massas de água estuarinas (www.dlwc.nsw.gov.au).

O processo de mistura pode ser advectivo ou dispersivo. A mistura numa escala longa de tempo e espaço é chamada **advecção** e num curto espaço e período é chamada **dispersão** (Day et al., 1989).

O transporte advectivo consiste na transferência de matéria dissolvida pela água, quando esta flui ao longo do estuário. Durante este processo, a água mistura-se com parcelas de água da vizinhança. Esta mistura, conduz à um transporte residual de matéria dissolvida de regiões de alta concentração para regiões de baixa concentração, ao que chamamos, transporte dispersivo (www.dlwc.nsw.gov.au).

A distribuição da salinidade nos estuários é o indicador de mistura mais usado, pois o sal é um constituinte conservativo.

2.8 Caracterização do fluxo

A caracterização do fluxo dum fluido homogêneo ou estratificado, pode ser feita por meio de dois números adimensionais; o número de Reynolds (Tabela 1) e o número de Richardson (Tabela 2).

O número de Reynolds compara a importância relativa das forças inercial e viscosa, na determinação da resistência do fluxo.

$$Re = \frac{uh}{\nu} \quad (2.1)$$

Onde u é a velocidade, h é a profundidade e ν é a viscosidade cinemática dada por: $\nu = \mu / \rho$

Sendo μ a viscosidade molecular e ρ a densidade.

Tabela 2: Caracterização do fluxo pelo número de Reynolds

Número de Reynolds	Características do fluxo
$Re < 2000$	Laminar
$2000 < Re < 10^5$	Transiccional
$Re > 10^5$	Completamente turbulento

A competição entre a mistura e a estratificação desempenha um papel crucial na dinâmica estuarina porque quando o fluido é estratificado o gradiente de densidade resiste à transferência vertical de momento pela turbulência e é necessário uma velocidade de cisalhamento *extra* para causar mistura.

O número de Richardson é um parâmetro de comparação entre as forças que estabelecem a estratificação da densidade e das forças de desestabilização da velocidade crítica e define-se pela expressão:

$$Ri = - \frac{g \frac{\partial \rho}{\partial z}}{\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2} \quad (2.2)$$

Quando a estratificação aumenta, a turbulência diminui, a mistura será limitada e o fluxo será essencialmente laminar.

Tabela 3: Caracterização do fluxo através do número de Richardson

Número de Richardson	Caracterização do fluxo
$Ri > 0$	Estratificação estável
$Ri = 0$	Estratificação neutra
$Ri < 0$	Estratificação instável

2.9 Curvas de intrusão Salina

Podem ser distinguidos, quatro tipos de curvas de intrusão salina (Figura 2.9):

1. Forma de recessão: ocorre em estuários longos e estreitos.
2. Forma de sino: ocorre em estuários com a forma de funil próximo à boca e estreitos rio acima.
3. Forma de cúpula: ocorre em estuários que têm um canal longo com uma pronunciada forma de funil.
4. Forma de corcunda: Ocorre em condições hipersalinas, no caso de deficiência de chuvas ou excesso de evaporação.

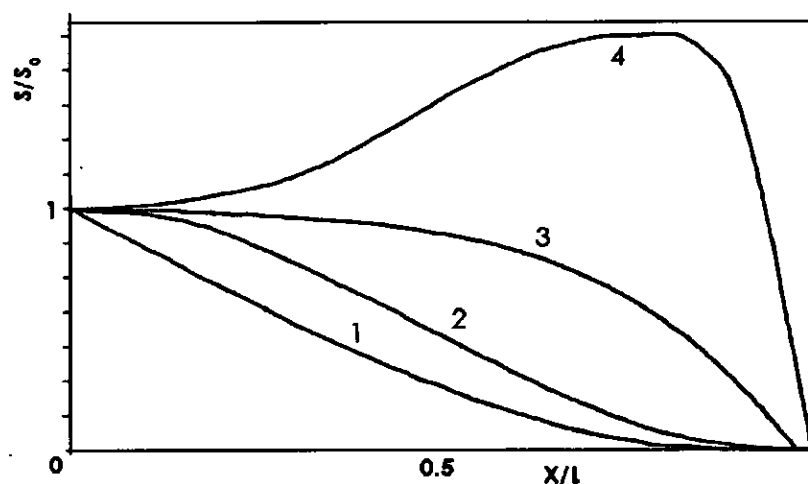


Figura 2.9: Curvas de intrusão salina

Na Figura, S representa a salinidade em função da distância, S_0 representa a salinidade na boca do estuário, X representa a distância da boca à montante do estuário, L representa o comprimento de estuário. Em termos de curvas de intrusão salina o estuário do Incomáti transita do tipo 1 ao tipo 2.

2.10 O Estuário do Incomáti

A bacia total do rio Incomáti tem cerca de 46,426 km², dos quais 28,745 km² encontram-se na África do Sul, 2,786 km² na Suazilândia e 14,856 km² em Moçambique, sendo limitada pelos paralelos 24° 00'S e 26° 30'S e pelos meridianos 29°30'E e 33° 15'E. A bacia do rio Incomáti confina ao norte com a bacia do Limpopo, e ao sul é confinada pelas bacias dos rios Umbelúzi, Matola, Infulene, e pela bacia costeira junto à cidade de Maputo (BUREP¹, 1980 citado por Cossa, 2001).

O estuário apresenta uma morfologia constituída de pequenas ilhotas próximo à boca, além de bancos dispersos em todo o canal. Esta característica proporciona uma mistura rápida das águas dentro do estuário o que garante uma dissipação rápida da cunha salina e das ondas que entram no estuário (Cossa, 2001). O estuário apresenta também algumas depressões ao longo do seu curso, sendo a maior largura observada na boca e confinando-se em direcção à montante. Essa tendência do estuário confinar-se à montante pode ser visualizada na Figura 2.10.

O estuário apresenta uma profundidade baixa, sendo a máxima profundidade de aproximadamente 6 m. Assume-se que a largura e a área de secção transversal decrescem exponencialmente desde a boca até à montante. Em termos geométricos assume-se que o estuário tem a área de secção transversal em forma de V ou seja, apresenta a forma geométrica de um triângulo. Esta área varia em função do nível de água.

O caudal médio do rio é de cerca de 200-400 m³s⁻¹ que corresponde à um escoamento anual de cerca de 700-1000 Mm³ (Hoguane et.al, 2002).

Nos últimos anos o caudal do rio tem vindo a diminuir (exceptuando o ano 2000 em que ocorreram as grandes cheias) reduzindo assim a estratificação. Assim, ao longo do ano o estuário do Incomáti transita da categoria de parcialmente misturado a bem misturado dependendo da época e das condições ambientais (descarga do rio, amplitudes de maré).

O estuário do Incomáti integra-se na categoria de estuário de planície costeira ou vale fluvial de inundação.

As marés são semi-diurnas e na boca do estuário atingem 3.5 m durante a maré viva e 0.5 m na maré morta. Segundo Hogue e Sete (2001), os ventos predominantes são os alísios de sudeste (SE), com velocidade média de 4 m s^{-1} durante a época seca que deslocam as águas para o lado ocidental da baía. Por vezes sopram periodicamente ventos fortes e instantâneos de Nordeste (NE).

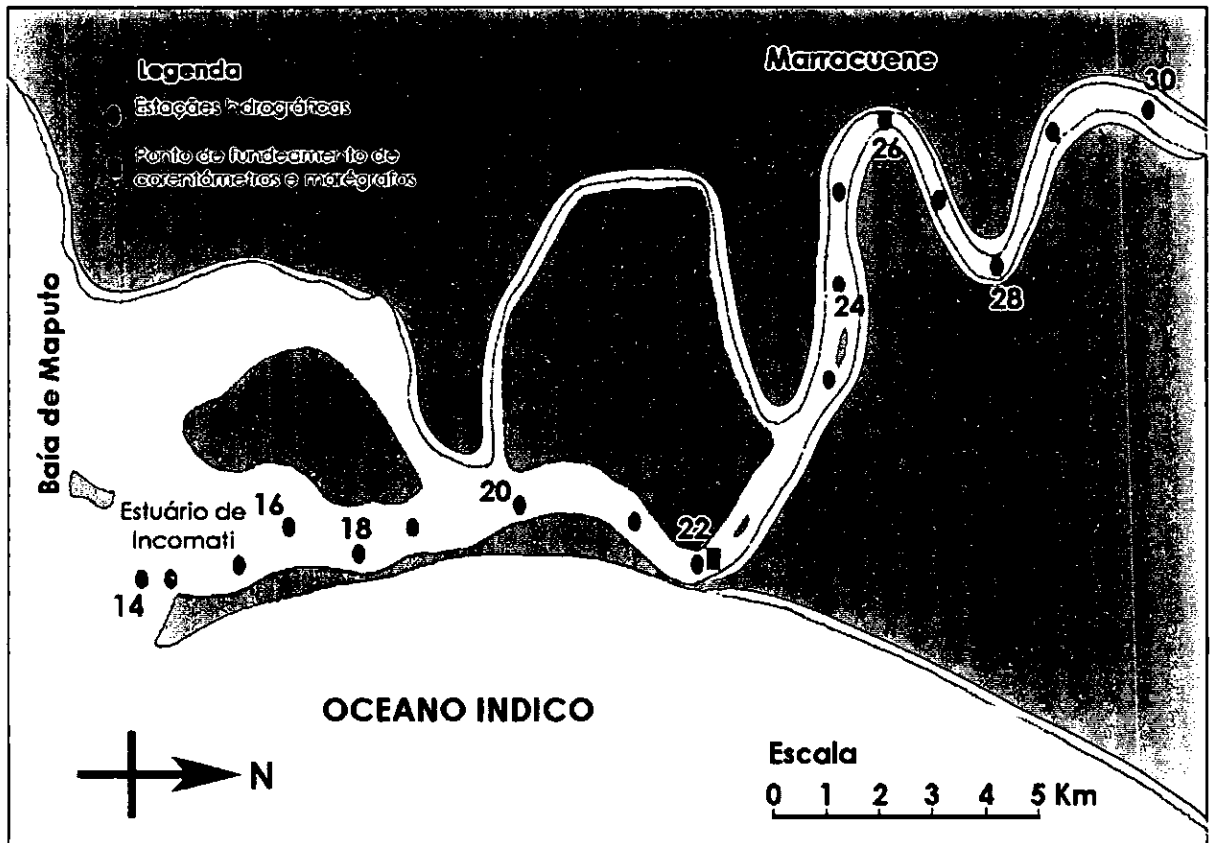


Figura 2.10: Estuário do Incomati e as estações de observação

¹ Plano Básico para o Desenvolvimento Hidráulico do Vale do Incomati, 1980.

III METODOLOGIA

3.1 Modelo Usado

O modelo usado para estimar a intrusão salina como função da descarga do rio e da área de secção transversal é a clássica equação de difusão do sal (Bowden, 1983; Turrel et al., 1996).

$$\frac{dS}{dx} = -S \frac{R_0}{AK_x} \quad (3.1)$$

Que deriva das equações de continuidade, de conservação de sal e de massa, assumindo que o estuário é lateralmente homogéneo e as variações laterais de salinidade provocadas pela força de Coriolis são desprezíveis.

$$\frac{\partial}{\partial x}(Au) + \frac{\partial}{\partial z}(Aw) = 0 \quad (3.2)$$

$$A \left(u \frac{\partial S}{\partial x} + w \frac{\partial S}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(AK_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(AK_z \frac{\partial S}{\partial z} \right) \quad (3.3)$$

Sendo A a área de secção transversal que varia exponencialmente ao longo do estuário:

$A = A_0 \exp(-\beta x)$; onde S é a salinidade média no ponto considerado; x e z são as coordenadas horizontal e vertical, positivas em direcção à montante e para baixo respectivamente; u e w são as componentes da velocidade média; K_x e K_z são os coeficientes de difusão turbulenta.

Assumindo que o estuário é estreito e que exista uma forte mistura por marés, sendo lateralmente e verticalmente homogéneo, é desprezível o transporte de sal em profundidade, e a Equação (3.3) toma a forma:

$$\left(Au \frac{dS}{dx} \right) = \frac{d}{dx} \left(AK_x \frac{dS}{dx} \right) \quad (3.4)$$

Integrando esta equação chegamos à seguinte expressão:

$$u(S_o - S) = K_x \left(\frac{dS}{dx} \right) \quad (3.5)$$

Sendo u a velocidade em função do escoamento:

$$u = \frac{R_o}{A} \quad \text{onde } R_o \text{ é o caudal do rio}$$

Substituindo u , a expressão toma a forma seguinte:

$$\frac{dS}{S - S_o} = \frac{R_o}{A_o \exp(-\beta x) K_x} dx \quad (3.6)$$

Fazendo uma nova integração, chegamos à seguinte solução:

$$-\ln \frac{S}{S_o} = - \frac{R_o}{\beta A_o K_x} [\exp(\beta x) - 1] \quad (3.7)$$

Onde S_o é a salinidade na boca e S é a salinidade numa posição arbitrária ao longo do estuário. O sinal negativo no segundo membro indica que o escoamento do rio tem sentido contrário ao eixo referencial imaginário do estuário que tem a sua origem na boca e se direcciona para montante.

De tal modo que a extensão da intrusão salina obedece a expressão:

$$X = \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{A_o K_x \beta}{R_o} \left(-\ln \frac{S}{S_o} \right) + 1 \right) \quad (3.8)$$

Se considerarmos que o limite do estuário será o local com uma salinidade correspondente a 1 psu a equação toma a forma seguinte:

$$X = \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{A_o K_x \beta}{R_o} \left(-\ln \frac{1}{S_o} \right) + 1 \right) \quad (3.9)$$

Para a determinação dos coeficientes K e β assume-se que na equação (3.7) o termo $\frac{R_0}{\beta A_0 K}$, equivale à um coeficiente γ que em termos físicos corresponde à inclinação do fundo. Logaritmizando ambos os membros da equação tem-se:

$$\ln \left(-\ln \frac{S}{S_0} \right) = \ln (-\gamma) + \beta x \quad (3.10)$$

Com os dados de campo faz-se a regressão linear da equação (3.10) no programa estatístico Minitab e obtêm-se os valores de γ e β .

Sendo conhecido o γ e o β determina-se o coeficiente de mistura para valores correspondentes do caudal do rio. A expressão para o cálculo do caudal para a ocorrência da mínima intrusão salina deriva da equação (3.7) e tem a forma

$$R = \frac{\beta A_0 K}{e^{\beta x} - 1} \left(-\ln \frac{S}{S_0} \right) \quad (3.11)$$

Para o caso deste estudo este caudal é calculado para uma intrusão fixa de 20 km. Um parâmetro importante a determinar é a probabilidade de ocorrência da intrusão salina no estuário. A sua expressão tem a seguinte forma:

$$P = \frac{N_c}{N_0} \quad (3.12)$$

Onde: P é a probabilidade de ocorrência da intrusão salina, N_0 é o número total de eventos observados e N_c é o número de eventos observados inferiores ao caudal mínimo calculado.

3.2 Área de Secção Transversal da Boca do Estuário do Incomáti

A área de secção transversal da boca do estuário é conhecida. Segundo Halo (2004) o comprimento da linha de fronteira entre o estuário do Incomáti e a baía do Maputo e as profundidades médias de cada estação forneceram uma área de secção transversal de aproximadamente 9.000 m^2 . Esta área varia com o estagio da maré.

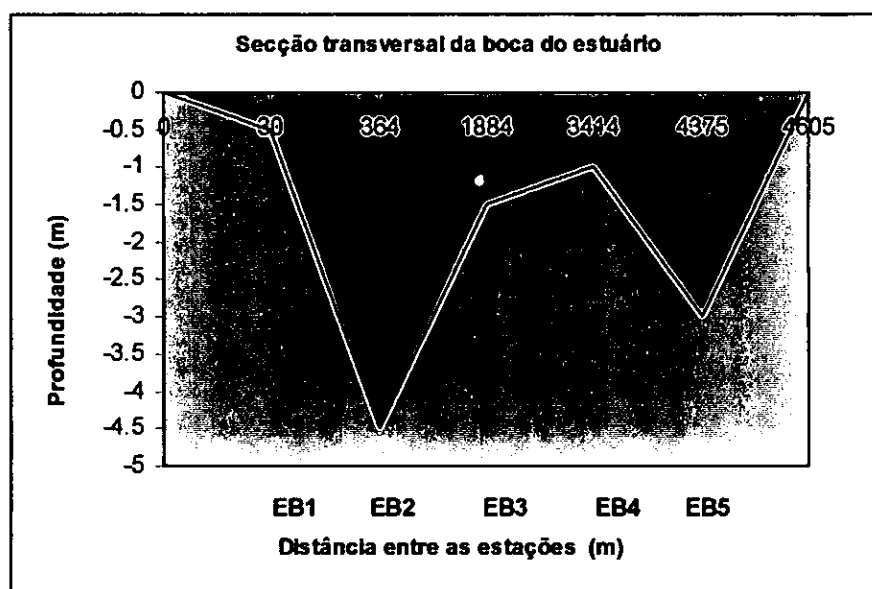


Figura 3.1: Secção transversal da boca do Estuário do Incomáti, segundo Halo (2004)

3.3 Observações de Campo

As observações de campo tiveram o seu início no dia 19 de Julho de 2004. Nesse dia fez-se um cruzeiro ao longo do estuário com a finalidade de medir a salinidade, a temperatura, a densidade da água. Mediu-se também a largura e a profundidade do estuário em posições determinadas. Para isso, fez-se uma excursão longitudinal ao longo do estuário onde estavam mapeadas 29 estações, estando a estação inicial localizada na boca do estuário (Estação 14). Para cada estação foram medidos os parâmetros acima indicados.

Os dias 20 e 21 do mesmo mês foram reservados para as medições das correntes de marés. Por motivos de acidente de campo não nos foi possível obter os dados das correntes de maré porque um dos sensores do marégrafo ficou danificado por causa da proliferação das plantas no local

onde este foi fundeado. Para além das observações efectuadas no mês de Julho usaram-se dados colhidos de 2002 à 2004 referentes aos meses em que se fizeram medições dos parâmetros já referidos. Quase a totalidade das observações foi feita no período de marés vivas, exceptuando o mês de Junho de 2003.

3.4 Material Usado

No trabalho de campo usaram-se os seguintes instrumentos: (especificações em anexo, pág.44)

- Um CTD SBE 19 plus
- Um marégrafo (microtide)
- Um GPS III plus

Os CTDs são aparelhos usados para a medição de salinidade, temperatura e profundidade (Conductivity, Temperature, Depth). Estes são compostos por sensores de condutividade, temperatura e pressão. O SBE 19 plus mede a condutividade, a temperatura e a pressão em ambientes de águas doces ou marinhas a profundidades inferiores a 7000 m. As suas principais características são: sensores de temperatura e condutividade, medidor de tensão e sensor de pressão. O SBE 19 plus tem a capacidade de fazer rápidas amostragens com uma alta precisão (0.005 à 0.01 °C para a temperatura, 0.0005 à 0.001 psu para salinidade e 0.1 à 0.25% para a condutividade), e uma grande capacidade de memória (8Mbytes vs 1). Sensores auxiliares de oxigénio dissolvido, PH, turbidez, fluorescência podem ser adicionados.

O marégrafo regista níveis de pressão para posterior leitura de níveis de maré usando um sensor de pressão. O seu funcionamento baseia-se na medição da variação da pressão na coluna de água. Estas variações são convertidas em elevações do nível do mar e depois gravadas na memória do instrumento.

O GPS (Global Positioning System) é um instrumento que nos dá o posicionamento geográfico de qualquer ponto da superfície da Terra. Se estivermos num barco em movimento ele pode dar-nos a velocidade instantânea, a velocidade média, o tempo e a distância entre dois pontos.

Para obter os perfis de salinidade, temperatura e densidade usou-se o programa *Surfer*. O *Surfer* é um programa concebido para fazer representação dos perfis. Para o cálculo do γ e do β por regressão linear usou-se o pacote estatístico *Minitab*.

IV RESULTADOS

Variação da salinidade ao longo do estuário

O perfil de salinidade apresenta uma tendência de estratificação para o mês de Março de 2003, mostrando que nesse mês a intrusão salina estendeu-se para muito além da última estação em estudo (23.4 km). Encontramos valores relativamente elevados de salinidade (32 psu) mesmo à médio estuário (Figura 4.1).

Para Agosto de 2003 as isohalinas apresentam características de um estuário bem misturado à parcialmente misturado no fundo e à montante do rio, onde diminui a acção das marés. A salinidade varia de 34 psu próximo à boca para valores próximos de zero na última estação (Figura 4.2). A intrusão salina não excedeu os 23.4 km.

Em Março de 2004 (Figura 4.3), o estuário encontrava-se parcialmente misturado com a salinidade máxima junto à boca inferior a 24 psu. Para este mês a intrusão salina foi mínima. O mês de Abril de 2004 (Figura 4.4) é similar ao mês de Março com uma diferença no deslocamento da isohalina de 2 psu em aproximadamente 1 km à montante do rio.

Em Julho de 2004 (Figura 4.5), o estuário encontrava-se bem misturado com a salinidade a variar de aproximadamente 26 psu junto à boca a próximo de zero à montante do estuário. A intrusão salina não excedeu os 14 km.

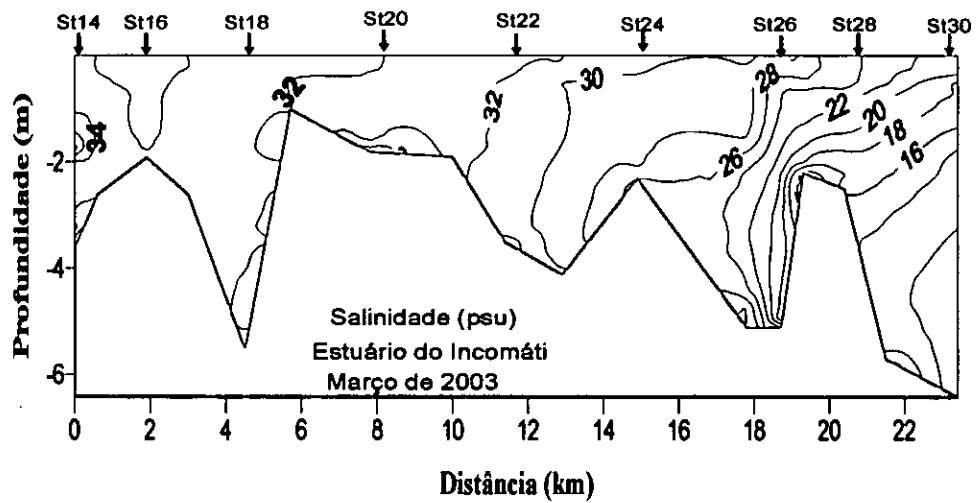


Figura 4.1: Variação vertical e longitudinal da salinidade no Estuário em Março de 2003

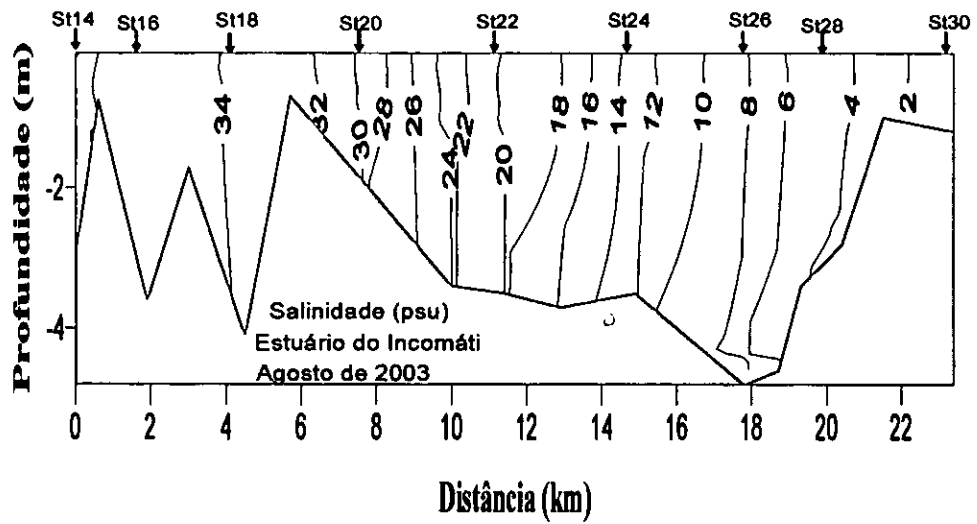


Figura 4.2: Variação vertical e longitudinal da salinidade no Estuário em Agosto de 2003

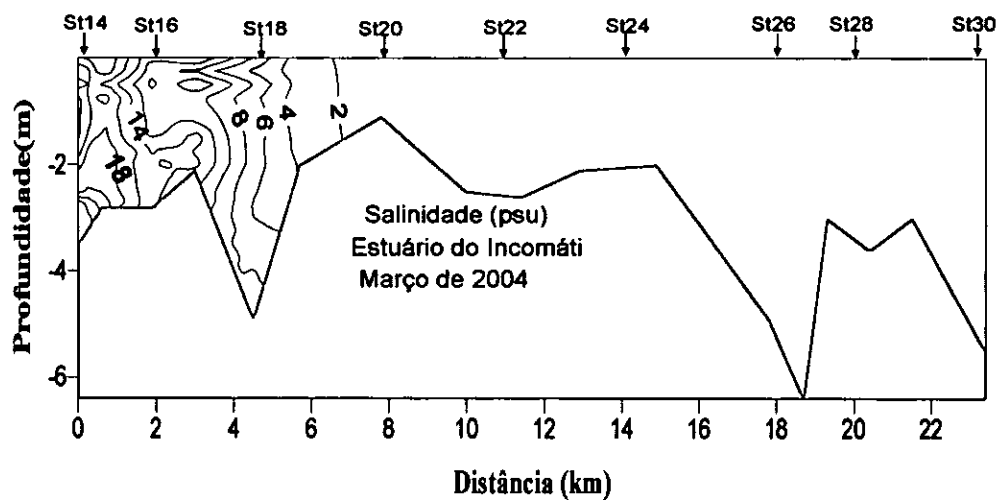


Figura 4.3: Variação vertical e longitudinal da salinidade no Estuário em Março de 2004

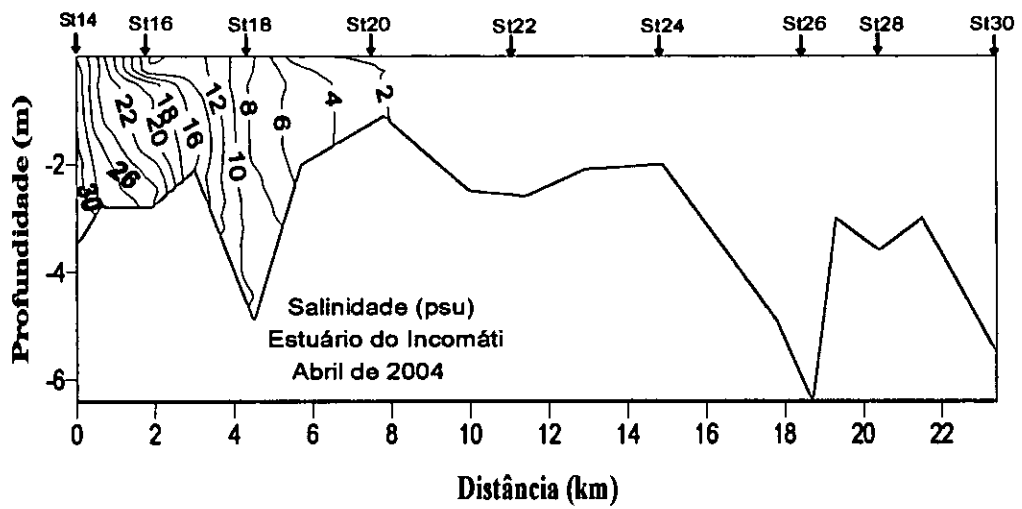


Figura 4.4: Variação vertical e longitudinal da salinidade no Estuário em Abril de 2004

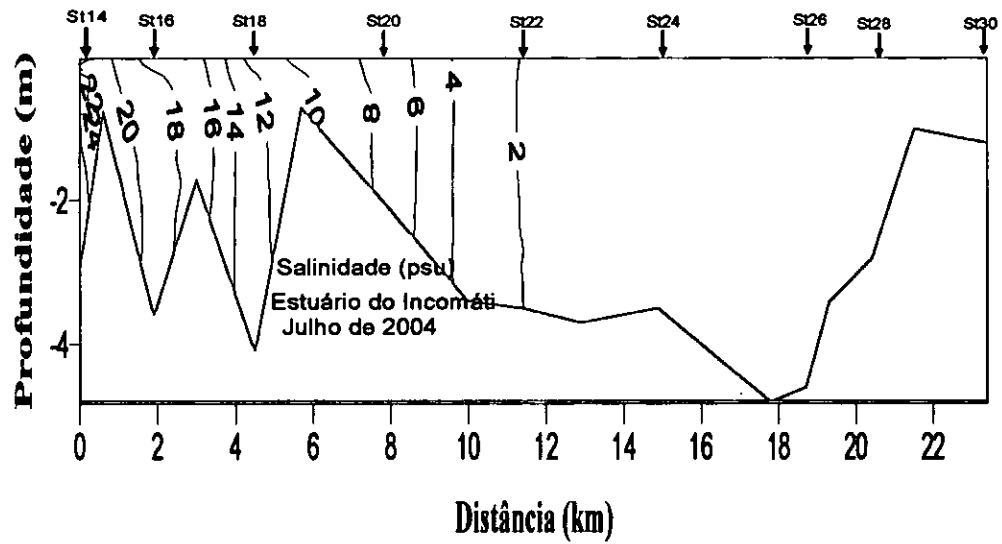


Figura 4.5: Variação vertical e longitudinal da salinidade em Julho de 2004

Variação da densidade ao longo do Estuário

Os perfis de densidade para os meses de estudo mostram a forte dependência da densidade pela salinidade sendo este facto visível pela similar inclinação das isolinhas e pelos valores de densidade. A densidade tende a decrescer em direcção à montante do estuário. Os perfis de densidade retratam a mistura ou a estratificação das massas de água similarmente aos perfis de salinidade (Figuras 4.6 a 4.9). Não foi possível obter os dados de densidade do mês de Março de 2003.

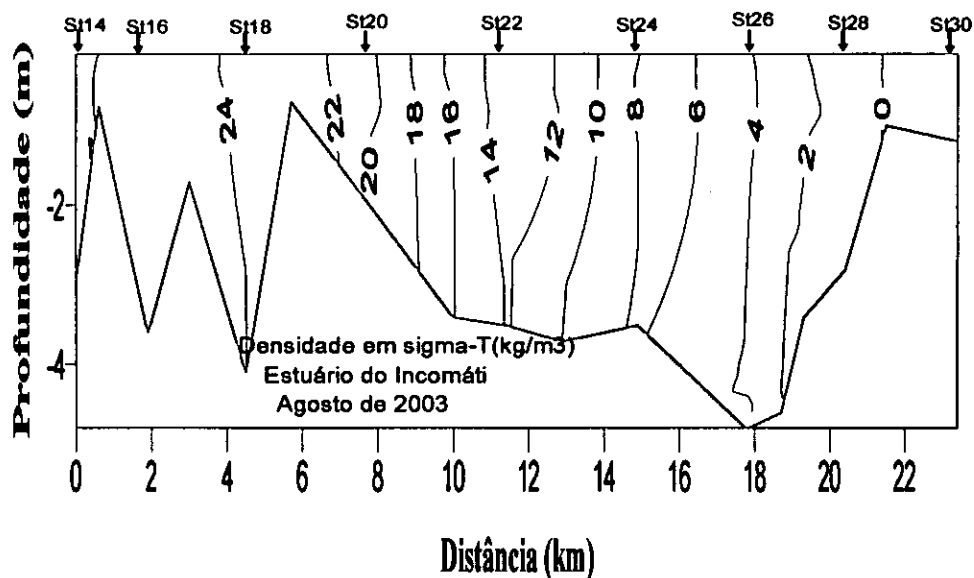


Figura 4.6: Variação vertical e longitudinal da densidade no Estuário em Agosto de 2003

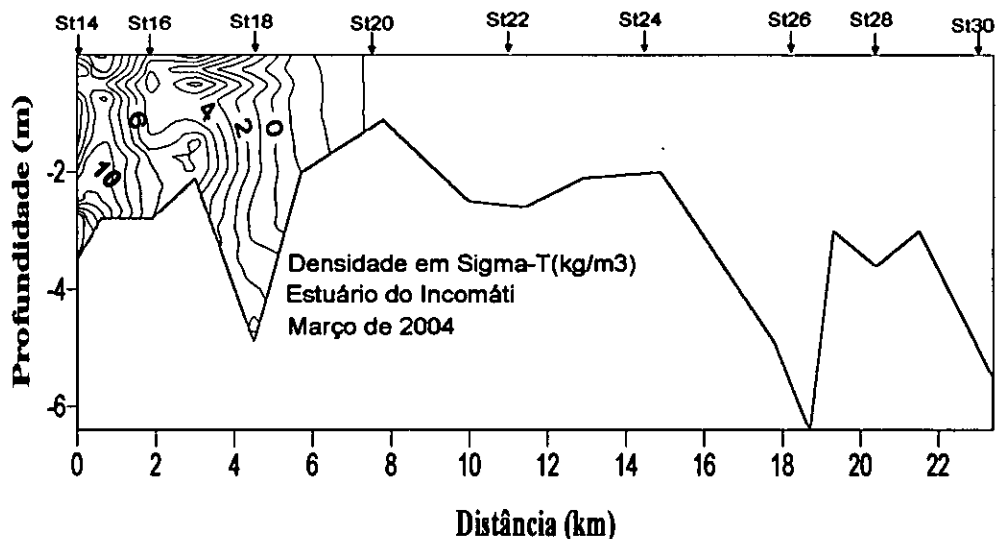


Figura 4.7: Variação vertical e longitudinal da densidade no Estuário em Março de 2004

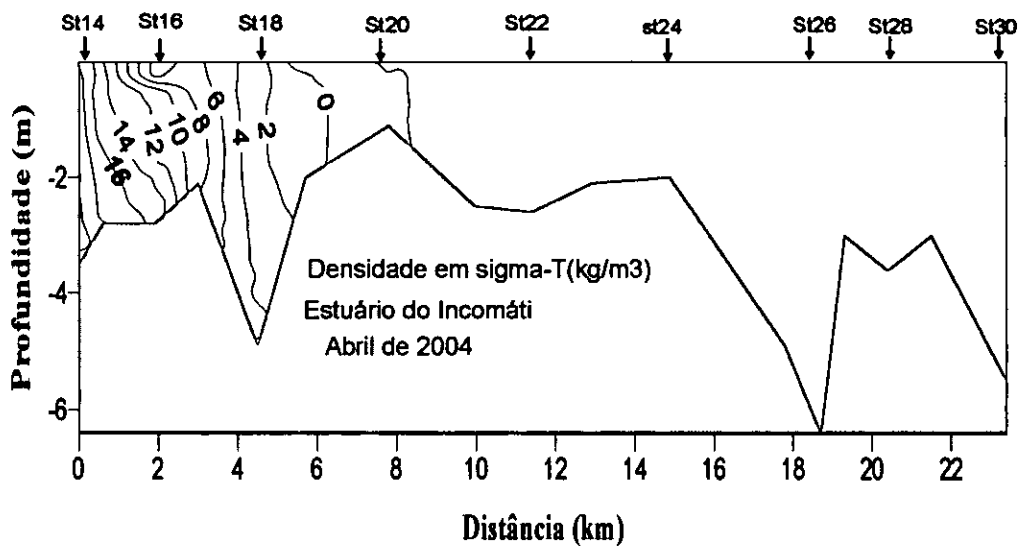


Figura 4.8: Variação vertical e longitudinal da densidade no Estuário em Abril de 2004

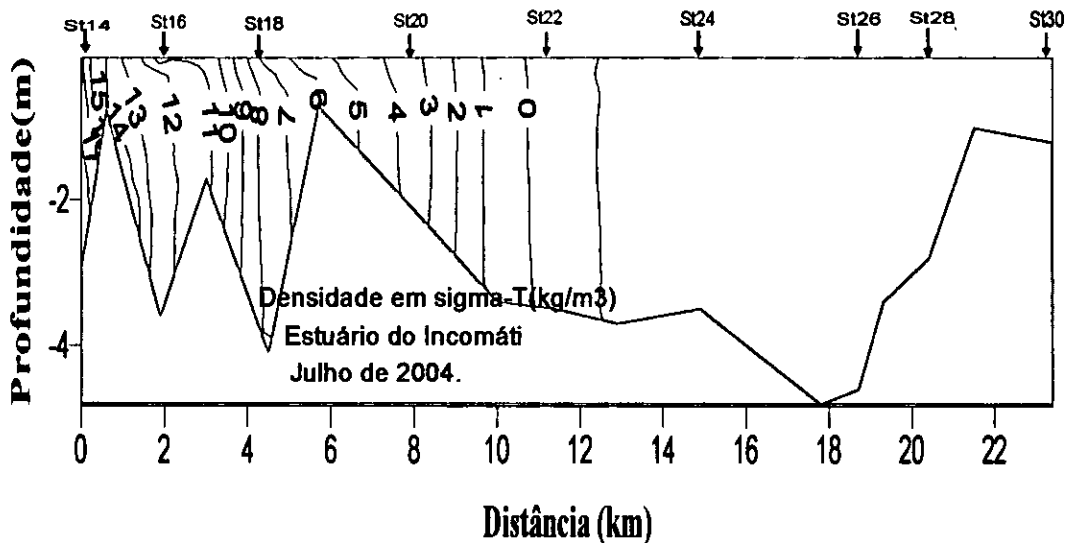


Figura 4.9: Variação vertical e longitudinal da densidade no Estuário em Julho de 2004

Variação da temperatura ao longo do Estuário

A temperatura é praticamente constante ao longo do estuário. Os gradientes observados para os meses abaixo representados foram baixos. Para o período de estudo a temperatura variou de 18.4°C à 30°C (Figuras 4.10 a 4.14). Esta constância da temperatura é ótima para a sobrevivência das espécies dentro do estuário.

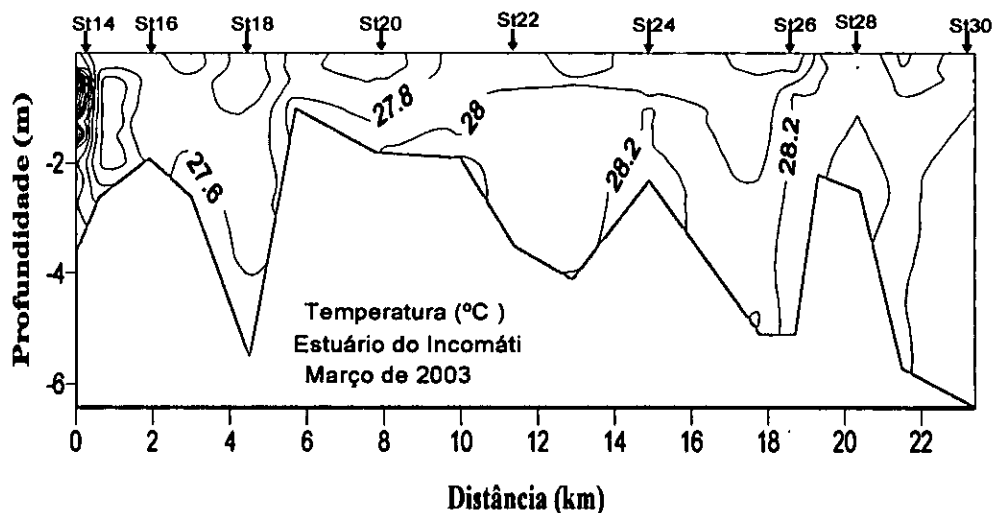


Figura 4.10: Variação vertical e longitudinal da temperatura no Estuário em Março de 2003

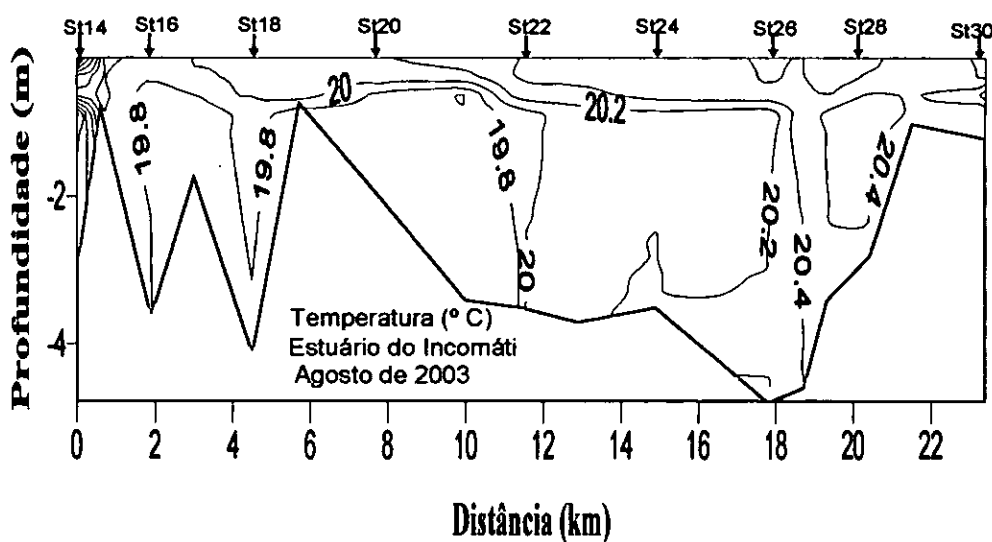


Figura 4.11: Variação vertical e longitudinal da temperatura no Estuário em Agosto de 2003

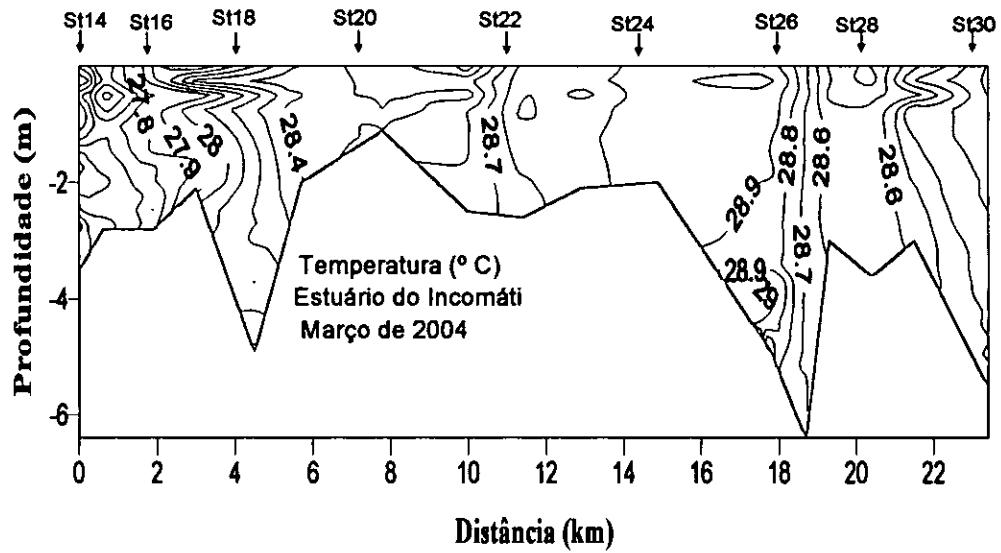


Figura 4.12: Variação vertical e longitudinal da temperatura no Estuário em Março de 2004

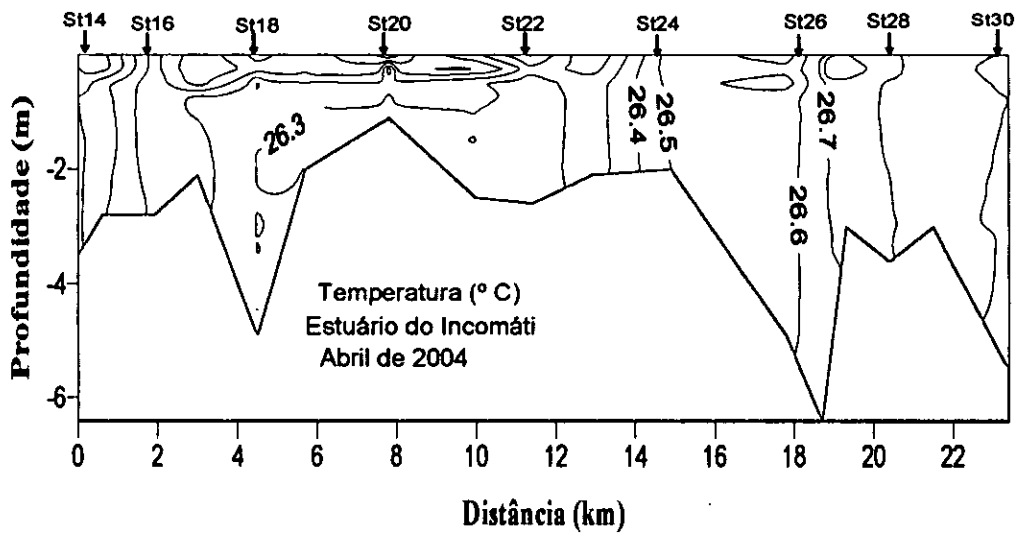


Figura 4.13: Variação vertical e longitudinal da temperatura no Estuário em Abril de 2004

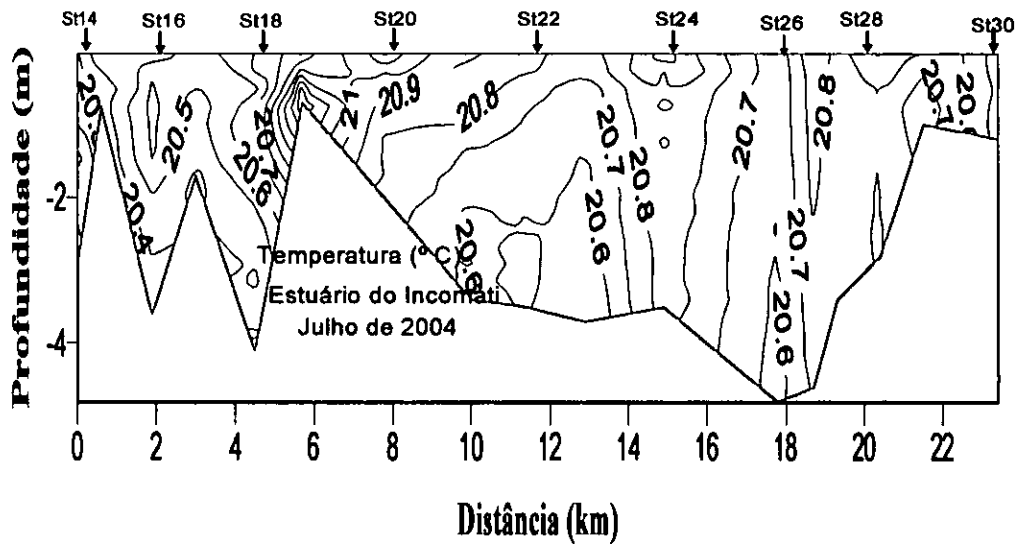


Figura 4.14: Variação vertical e longitudinal da temperatura no Estuário em Julho de 2004

Os gráficos mostram claramente que a salinidade decresce em direcção a montante. As curvas de intrusão salina se assemelham ao estuário do tipo 1 e do tipo 2 da Figura 2.9. Estes gráficos foram obtidos através de medições directas efectuadas no campo.

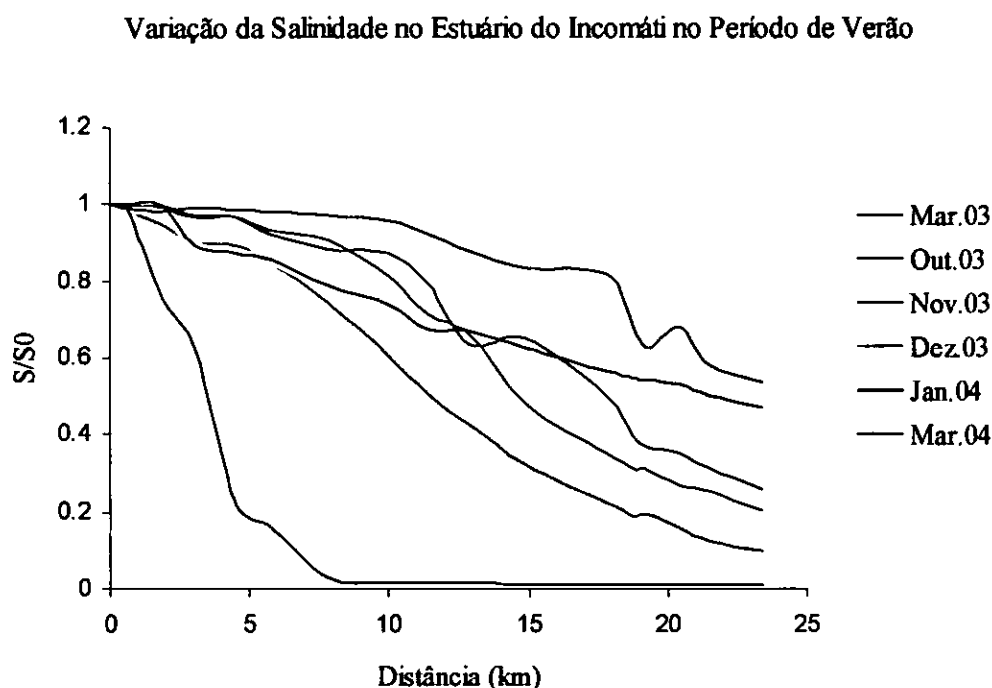


Figura 4.15: Variação longitudinal da salinidade no período de Verão no Estuário do Incomáti

De um modo geral, a intrusão salina é menor no período de Verão em que os caudais dos rios são relativamente superiores aos caudais do Inverno. De facto, no presente trabalho, é neste período em que encontramos a menores extensão de intrusão salina que ocorreu no mês de Março de 2004. Ao mesmo tempo, encontramos neste período, as maiores extensões de intrusão salina no mês de Março de 2003 e Janeiro de 2004.

Para o período de Inverno, os gráficos mostram que a menor intrusão salina ocorreu no mês de Abril de 2004, tendo a maior intrusão salina ocorrido em Junho de 2003.

Varição da Salinidade no Estuário do Incomati no período de Inverno

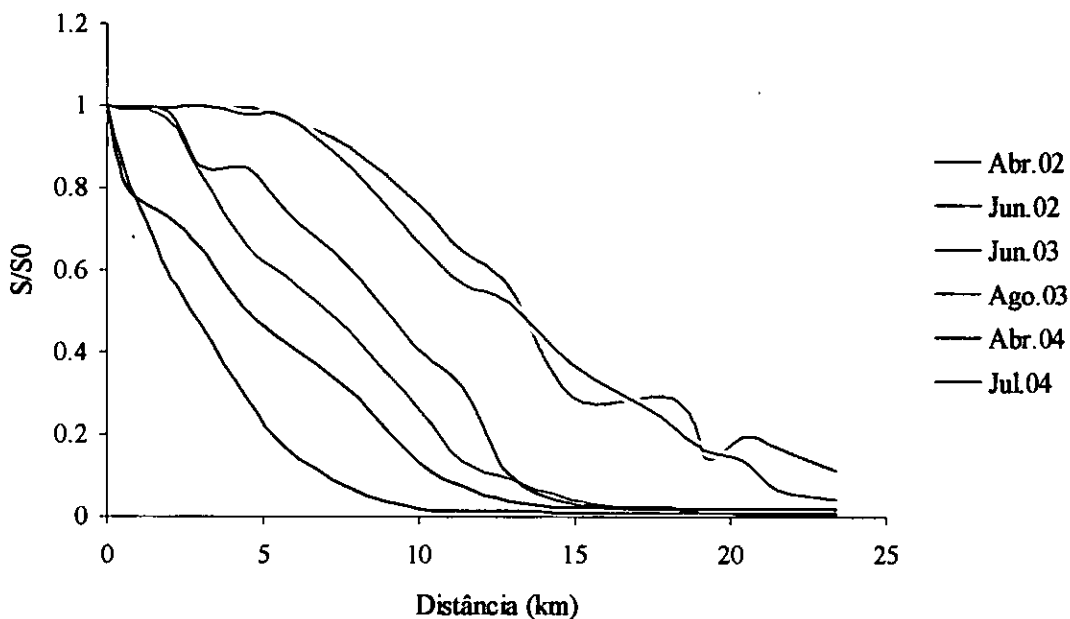


Figura 4.16: Variação longitudinal da salinidade no período de Inverno no Estuário do Incomati

A Figura 4.16 mostra o comportamento das curvas médias de salinidade para as duas estações do ano. Estas curvas foram obtidas achando-se a média da variação da salinidade em função da distância ao longo da estação do ano. Para o período de Inverno a curva média de intrusão salina assemelha-se à curva do tipo 1 que ocorre em estuários longos e estreitos e na época do Verão a curva média de intrusão salina assemelha-se à curva do tipo 2 que ocorre em estuários com forma de funil próximo à boca e estreitos à montante.

Variação média Sazonal da Salinidade no Estuário do Incomati

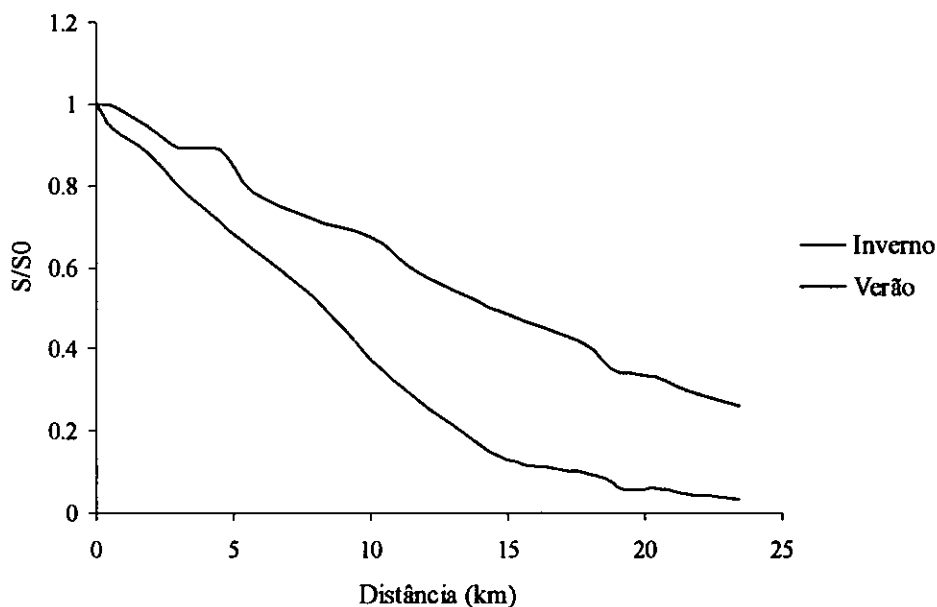


Figura 4.17: Variação Sazonal da salinidade no Estuário do Incomati

Calibração e Validação do Modelo

Para o cálculo do coeficiente de mistura foram usados dados de 12 meses desde Abril de 2002 até Julho de 2004. Os dados dos 12 meses foram usados para se obter o comportamento e as variações sequenciadas das curvas de intrusão salina e dos parâmetros que com elas se relacionam; neste caso o caudal e o coeficiente de mistura, nos diferentes período de um ano.

O coeficiente β (coeficiente de diminuição da área) foi obtido por regressão linear e à seguir calculou-se o coeficiente de mistura para cada mês. Determinaram-se à partir destes, o coeficiente β médio e o coeficiente de mistura médio do estuário e calculou-se a extensão da intrusão salina. O coeficiente de mistura médio e β médio obtidos têm o valor de $310 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ e 0.227 km^{-1} respectivamente. Procedendo assim, o alcance máximo da intrusão salina ocorreu no mês de Agosto de 2003 e Julho de 2004 e o alcance mínimo no mês de Março de 2004.

Tabela 4: Intrusão salina em função do caudal e do coeficiente de mistura

Mês	Caudal (m^3s^{-1})	β (km^{-1})	K (m^2s^{-1})	Intrusão salina Obs.(km)	Intrusão salina Modelo (km)	Percentagem de erro do Modelo
Abr.02	30.78	0.315	218.0	15	19.0	21%
Mai.02	18.78	N	N	N	N	N
Jun.02	13.22	0.247	119.0	15	22.6	33%
Ago.02	10.77	N	N	N	N	N
Out.02	11.07	N	N	N	N	N
Dez.02	21.23	N	N	N	N	N
Mar.03	9.41	0.202	752.9	>23	24.0	4%
Abr.03	5.99	N	N	N	N	N
Mai.03	6.47	N	N	N	N	N
Jun.03	6.63	0.319	612.0	>23	25.6	10%
Jul.03	7.29	N	N	N	N	N
Ago.03	6.04	0.324	309.0	23	26.0	11%
Set.03	5.54	N	N	N	N	N
Out.03	6.39	0.304	741.4	>23	25.8	11%
Nov.03	6.47	0.193	75.0	>23	25.7	10.5%
Dez.03	6.29	0.257	299.2	>23	25.8	11%
Jan.04	96.73	0.168	1285.0	>23	14.0	39%
Fev.04	73.97	N	N	N	N	N
Mar.04	114.34	0.155	223.0	10	13.0	23%
Abr.04	69.76	0.113	109.0	12	15.0	20%
Mai.04	5.87	N	N	N	N	N
Jun.04	4.30	N	N	N	N	N
Jul.04	5.70	0.128	13.45	14	26.0	46%

N – Não houve medição nesse período

O coeficiente de mistura médio obtido foi usado para calcular o caudal médio aceitável para que a intrusão salina seja mínima se considerarmos como limite a extensão de 20 km à partir da boca, região onde se localizam as terras cultivadas do distrito de Marracuene. Considera-se para

esse efeito que a salinidade na boca é de 34 psu e que o coeficiente β médio é de 0.227 km^{-1} . O valor do caudal para a mínima intrusão obtido foi de $24 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Admitindo que a salinidade na boca do estuário varia de 30 a 35 psu à medida que transita de Verão para Inverno, o caudal para a ocorrência de uma intrusão salina mínima varia de 23 a $24.3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Tabela 5: Variação do caudal para mínima Intrusão em função da salinidade

Salinidade (psu)	30	31	32	33	34	35
Caudal	23	23.5	23.7	23.9	24	24.3

Conhecendo-se o caudal médio para que a intrusão seja mínima calculou-se a probabilidade de ocorrência da intrusão salina para cada mês considerando os meses hidrológicos que vão desde Outubro de 1983 até Julho de 2004.

Tabela 6: Probabilidade de ocorrência da intrusão salina para cada mês em 21 anos

Meses	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Agos.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Prob.(%)	28.6	33	19	33	57	76	86	90	85	66	57	38

A probabilidade de ocorrência da intrusão salina além de 20 km à montante do estuário em 21 anos é de 60%.

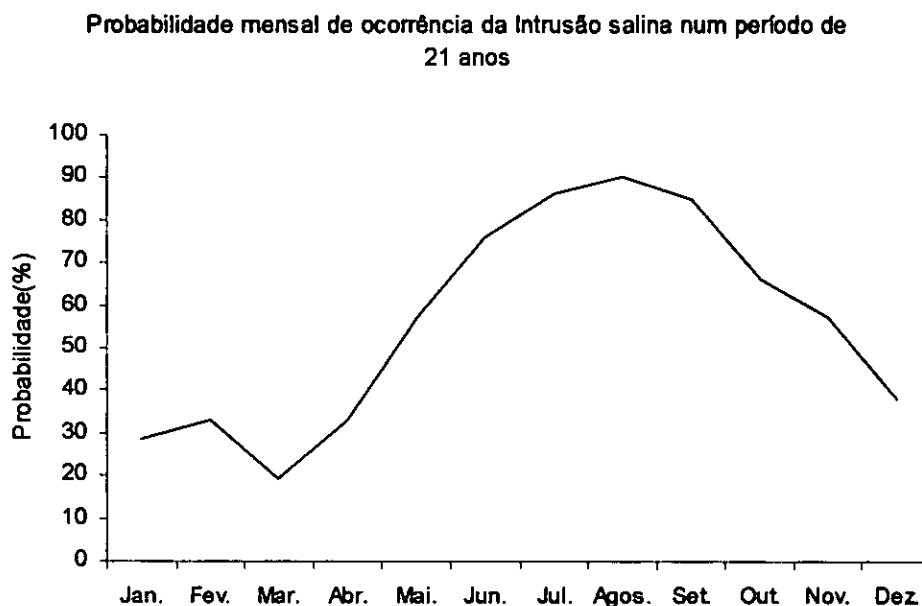


Figura 4.18: Probabilidade mensal de ocorrência da Intrusão salina no Estuário

A intrusão salina tem menor probabilidade de ocorrer no período de Verão que vai desde Outubro a Março, sendo a menor probabilidade neste período verificada no mês de Março. Existe maior probabilidade de ocorrência da Intrusão salina no período de Inverno que vai desde Abril a Setembro, registando-se a maior probabilidade no mês de Agosto (Tabela 5 e Figura 4.18).

Na figura abaixo são representadas as curvas de intrusão salina em função do caudal para as observações de campo e para o modelo.

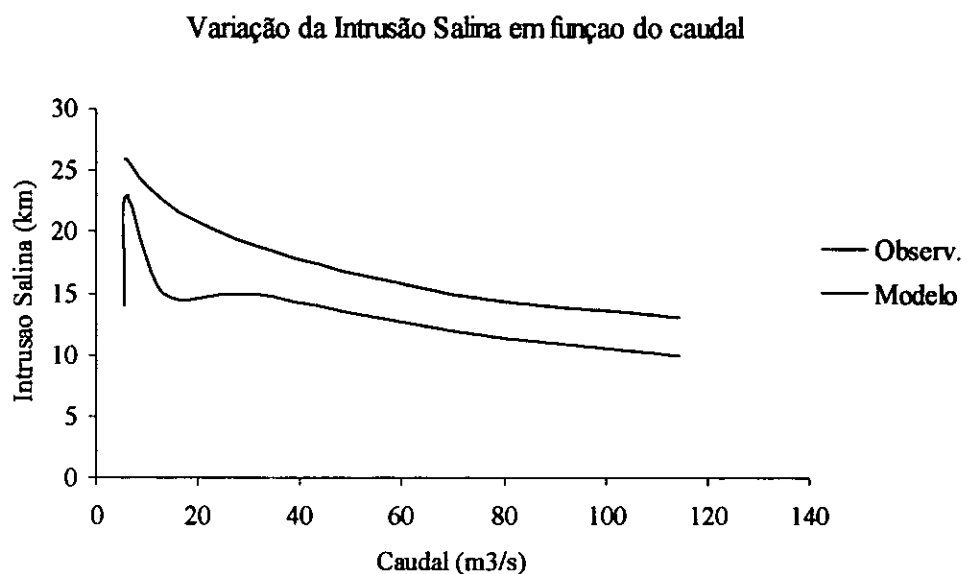


Figura 4.19: Intrusão salina em função do caudal

De um modo geral a relação entre a intrusão salina e o caudal é inversamente proporcional de forma que a intrusão salina diminui à medida que o caudal aumente e vice-versa. Analisando as curvas de Intrusão salina notamos que a Intrusão salina é maior para valores menores de caudais. A curva dos dados observados mostra variações, com a intrusão salina a crescer com o caudal até o seu ponto máximo e depois a decrescer abruptamente com o caudal, tendo depois um pequeno crescimento e voltando depois a decrescer suavemente. O ponto mínimo de Intrusão salina para as observações de campo corresponde a 10 km no mês de maior caudal registado,

Março de 2004. Não foi possível obter numericamente a extensão máxima da Intrusão salina nas observações de campo porque esta estava além da última estação de estudo, à montante do estuário, mas por análise da figura 4.15, nota-se que esta ocorreu no mês de Março de 2003. Em média, a curva de Intrusão salina para os dados observados, decresce com o aumento do caudal.

A curva de Intrusão salina para o modelo decresce de uma forma inversa com o aumento do caudal. A intrusão máxima corresponde a Março de 2003 e a Intrusão mínima corresponde a Março de 2004.

V. DISCUSSÃO

A intrusão salina para os dados observados foi maior em Março de 2003. Este facto é comprovado tanto para os resultados das observações de campo (Figuras 4.1 e 4.15), como para os resultados do modelo da Tabela 3 e Figura 4.18.

As menores intrusões verificadas nos meses de Abril de 2002, Março e Abril de 2004 devem-se aos relativamente altos valores de caudal registados naqueles meses. Para os meses de Junho de 2002 e Julho de 2004, apesar dos relativamente baixos caudais, existe uma fraca mistura (Tabela 3).

Apesar da defasamento das curvas, estas têm em média o mesmo comportamento principalmente para caudais superiores a $30 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Este facto é justificável porque quanto maior for o caudal de um rio, menor será a intrusão de marés. As marés e os ventos não terão energia suficiente para misturar e dissipar a salinidade contida nas massas de água, de tal modo que a intrusão salina tenderá a diminuir à montante do Estuário. O contrário acontecerá com a diminuição do caudal do rio, em que a intrusão salina estará à mercê das marés.

Se tomarmos como exemplo o resultado da intrusão salina para o mês de Janeiro de 2004 do modelo (Tabela 3), notaremos que apesar do relativamente alto valor de caudal registado, a intrusão salina é grande devido ao elevado coeficiente de mistura que contribuiu na dispersão rápida da água salina à montante do estuário. Nota-se que o processo de intrusão salina envolve uma complexidade de processos que devem ser conjugados. Um desses factores é o estágio da maré na altura das medições. As medições de campo não coincidiram com o pico da maré na

preia-mar (veja tabela 6) e por outro lado os valores de caudais usados são mensais e não são instantâneos.

Analisando a curva do modelo e das observações de campo na figura 4.18, conclui-se que, no estuário do Incomáti, para caudais superiores a $30 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a intrusão salina depende maioritariamente dos caudais do rio. Para caudais inferiores a $30 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ os valores de intrusão salina flutuam, dependendo do estágio da maré e provavelmente dos ventos (apesar de ser reduzida a acção dos ventos).

A tabela a seguir mostra o comportamento das ondas de maré na Baía de Maputo no período das medições de campo (segundo as Tabelas de marés do Instituto Nacional de Hidrografia e Navegação - INAHINA, para os anos 2002, 2003 e 2004). Como foi dito anteriormente, quase a totalidade das medições foram feitas no período de marés vivas (excepto Junho de 2003).

Tabela 7: Comportamento das ondas de maré na Baía do Maputo (segundo o INAHINA)

Data	PREIA-MAR				BAIXA-MAR				Obs. campo
	Manhã		Tarde		Manhã		Tarde		
	Hora	Altura	Hora	Altura	Hora	Altura	Hora	Altura	
29.06.02	06:57	3.0	19:14	3.0	00:59	0.8	13:07	0.8	07:33
30.04.02	06:18	3.4	18:31	3.4	00:13	0.5	12:26	0.6	09:18
22.03.03	06:52	3.6	19:02	3.5	00:45	0.4	12:59	0.6	09:22
13.06.03	02:36	3.2	14:58	3.2	08:47	0.8	21:09	0.7	17:22
16.08.03	06:44	3.2	18:59	3.3	00:46	0.6	12:53	0.6	7:00
28.10.03	05:53	3.5	18:11	3.6	–	–	12:02	0.4	08:00
14.11.03	06:42	2.9	18:47	2.9	00:31	0.9	12:41	1.0	10:50
09.12.03	00:42	3.3	16:56	3.4	10:48	0.7	23:10	0.7	08:46
24.01.04	06:12	3.5	18:24	3.5	00:05	0.6	12:23	0.7	12:43
26.03.04	06:56	3.2	19:06	3.2	00:53	0.8	12:58	1.0	09:29
22.04.04	05:57	3.2	18:15	3.1	–	–	12:06	0.8	08:22
01.07.04	11:47	2.5	–	–	05:06	1.5	18:13	1.6	10:22

Segundo as curvas médias de intrusão salina o estuário do Incomáti transita de longo e estreito (curva do tipo 1, Figura 2.9), quando ocorrem inundações do vale à montante, para estuário com forma de funil próximo à boca e estreito à montante (curva do tipo 2, Figura 2.9), em épocas em que o caudal do rio é baixo e as massas de água confinam-se ao volume interior ao longo do canal do estuário.

A probabilidade de ocorrência de intrusão salina além dos 20 km à montante é maior no período que vai desde Abril à Setembro, que corresponde ao período em que os caudais são baixos. A probabilidade é menor no período que vai de Outubro à Março, época esta que corresponde ao período do aumento dos caudais dos rios. Em 21 anos a probabilidade de ocorrência da intrusão salina é de 60%.

Segundo Cossa (2001) o caudal necessário para uma intrusão salina mínima que permitisse o desenvolvimento agrícola no baixo Incomáti foi de $254 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Este valor é bastante alto tendo em conta que os caudais médios mensais raramente atingem o valor de $200 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Macuiane (2003) obteve o valor de $80 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ que continua a ser um valor elevado. O alto valor do caudal encontrado por Cossa deve-se ao facto de se ter feito o estudo numa época de cheias em que os caudais do rio eram extremamente elevados, por um lado, e por outro lado por assumir a área de secção transversal constante ao longo do estuário. O baixo valor encontrado por Macuiane deve-se essencialmente à maneira como desenvolveu o modelo que também, considera constante a área de secção transversal ao longo do estuário.

Segundo Cossa (2001), a probabilidade da não ocorrência da intrusão salina no período que vai de Junho à Dezembro em 17 anos é de 0% (Tabela 6) sendo a máxima probabilidade registada no mês de Fevereiro correspondente a 29%, ou seja, o estuário é bastante vulnerável à ocorrência da intrusão salina ao longo de todo o ano. Segundo Macuiane (2003), a probabilidade de ocorrência da intrusão salina no estuário do Incomáti em 20 anos foi estimada em 29.5%. O estuário sofre maior intrusão salina à partir de Maio até ao mês de Novembro e atinge a máxima intrusão nos meses de Agosto e Setembro.

VI. CONCLUSÃO

O valor do caudal mínimo obtido para reduzir a intrusão salina para o mínimo aceitável é realístico, pois se repararmos para os valores de caudais (Tabela de caudais em anexo), notamos que o estuário está em condições de fornecer este caudal desde que exista uma boa gestão de caudais pelos países que compartilham a bacia do Incomáti.

O modelo baseado na topografia e na geometria é satisfatório tendo em conta que apesar das limitações, que incluem o facto de não se considerarem as variações quinzenais e semi-diurnas das marés e as variações diárias e instantâneas dos caudais, as curvas de intrusão salina têm em média o mesmo comportamento. Da Figura 4.18, conclui-se que para caudais superiores a $30 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, a intrusão salina é controlada maioritariamente pelos caudais do rio tendo as marés pouca influência no processo. Para caudais inferiores a $30 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a intrusão salina flutua em função do estágio das marés. O modelo desenvolvido neste trabalho é eficaz para caudais superiores a $30 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para o estuário do Incomáti.

O período em que se verificou a ocorrência das maiores intrusões salinas foi o ano de 2003 que em média apresentou caudais menores. Nos meses de Verão de 2004 (Março e Abril) registaram-se as menores intrusões salinas devido aos elevados caudais naqueles meses. As máximas extensões da intrusão salina verificaram-se em Março de 2003 e Janeiro de 2004 (veja figura 4.15) como resultado da conjugação do baixo caudal e elevado coeficiente de mistura (para Março) e alto caudal conjugado à um elevado coeficiente de mistura (o maior do período em estudo correspondente a $1285 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ em Janeiro de 2004).

A probabilidade de ocorrência da intrusão salina é menor no Verão em que a descarga do rio é maior e maior no Inverno em que diminui a descarga do rio. A probabilidade de ocorrência de intrusão salina além dos 20 km à montante do estuário num período de 21 anos é de 60%, que prova que o estuário é propenso à ocorrência da intrusão salina.

VII. RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se:

- Que se cumpra e se reveja o acordo feito entre Moçambique e África do Sul que estabeleceu o caudal mínimo na fronteira de Ressano Garcia equivalente a $2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.
- Que se construam lagos artificiais que conservem a água na época chuvosa e que regulem os caudais e a entrada de água salgada à montante do rio.
- Que no futuro se criem estações fixas de colheita de dados porque sem estas perdem-se informações extremamente importantes para pesquisas científicas.
- Que se expandam as estações de observação à montante e à jusante do estuário do Incomáti no caso pesquisas futuras relacionadas com o tema do trabalho ou com dispersão de poluentes.

VIII. BIBLIOGRAFIA

BOWDEN, K.F. (1967). Circulation and Diffusion. In: LAUFF, George H. Estuaries. pp 15 - 36. Washington, American Association for the Advancement of Science.

BOWDEN, K. F. (1983). Physical Oceanography of Coastal Waters. 302 pp. England, Ellis Horwood Ltd.

CARMO VAZ, A. and VAN DER ZAAG, P. (2003). Sharing the Incomáti waters: cooperation and competition in the balance. In: Water Policy, pp. 349 – 368.

COSSA, Obadias J. (2001). Intrusão salina no Estuário do Incomáti, tese de licenciatura. Universidade Eduardo Mondlane.

DAY, John W., Charles A. S. Hall, W. Michael Kemp e Alejandro Yañez-Arancibia (1989). Estuarine Ecology. 558 pp. John Wiley & Sons, Inc.

DYER, K. R. (1972). Estuaries: A Physical Introduction, 2ª edição, 195 pp.

DYER, K. R. (1979). Estuarine Hydrography and Sedimentation. Estuarine and Brackish- water Sciences Association handbook.

DUXBURY, Alin, Alison Duxbury (1997). An Introduction to the Worlds Oceans, 5ª edição, 504 pp.

GROEN, Marieke De. (1993) Rapid Assessment Technique for Salt Intrusion in Alluvial Estuaries: Steady State Model. Report Nr.50/93, 88 pp. Maputo.

HALO, Issufo F. M. (2004). Caracterização Biogeoquímica do Fluxo de Nutrientes em Relação aos Processos Oceanográficos no Estuário do rio Incomáti, Tese de Licenciatura

HOGUANE A. & SETE C. (2001). Currents and Pollutants distribution in Maputo Bay. Maputo.

HOGUANE, A.M. (2002) Salt Intrusion in the Incomáti River. Proceedings of the II National Conference on Coastal Zone Research. Event Funded by DANIDA, pp 29-35. Maputo.

INAHINA (2001). Tabela de Marés-2002, Ano XVII. Moçambique.

INAHINA (2002). Tabela de Marés-2003, Ano XVII. Moçambique.

INAHINA (2003). Tabela de Marés-2004, Ano XIX. Moçambique.

KJERFVE, B. (1989). Estuarine Geomorphology and Physical Oceanography. In: DAY, John W., Charles A. S. Hall, W. Michael Kemp, e Alejandro Yañez-Arancibia. Estuarine Ecology, pp. 47-78. John Wiley & Sons, Inc.

MACUIANE, Messias A. (2003). Intrusão Salina no Estuário do Rio Incomáti, tese de Licenciatura. Universidade Eduardo Mondlane.

McLUSKY, Donald S. (1971). Ecology of Estuaries. 144 pp. London, Heineman Educational Books Ltd.

McLUSKY, D. S. (1989). The Estuarine Ecosystem, 2ª Edição, 215 pp. USA, Chapman & Hall.

PICKARD and EMERY, (1982). Descriptive Physical Oceanography: An Introduction, 4ª Edição, 249 pp. England, Pergamon Press.

PRITCHARD, Donald. W. (1952). Circulação e Mistura das Águas nas Regiões Costeiras e Estuários. In: VETTER, Richard. Oceanografia: A Última Fronteira. pp 321-331.

PRITCHARD, Donald. W. (1967). What is an Estuary: Physical Viewpoint. In: LAUFF, George H. Estuaries, pp 3-5. Washington, American Association for the Advancement of Science.

<http://www.dlwc.nsw.gov.au/care/water/estuaries/FactSheets/Physical/salinity.html>

<http://omp.gso.uri.edu/doee/science/descript/fjordtyp.htm>

IX. ANEXOS

Tabela 8: Dados de caudais em $m^3 \cdot s^{-1}$ na Estação Hidrométrica de Magude no período de 21 anos (1983 - 2004)

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maior	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
1983										32.10	63.72	44.52
1984	172.29	561.53	63.76	67.25	21.88	14.78	35.74	23.72	14.54	11.31	43.87	59.86
1985	34	560.3	121.67	39.75	26.05	18.32	13.77	7.17	7.36	2.27	18.94	11.87
1986	34.52	64.81	27.55	61.31	31.09	10.2	5.39	2.83	1.82	1.19	2.37	3.5
1987	41.82	14.72	25.69	28.54	33.60	2.07	1.69	1.51	4.44	60.55	41.26	107.03
1988	78.95	62.39	53.95	45.69	16.99	7.37	10.63	3.83	19.66	36.78	18.89	26.54
1989	43.78	159.5	145.75	22.25	14.4	18.54	9.54	6.45	4.29	3.53	41.52	147.39
1990	23.12	42.92	40.61	31.58	16.44	8.54	6.54	5.11	4.62	6.78	3.78	19.66
1991	100.06	179.82	124.95	60.67	32.6	27.16	19.39	10.31	7.65	2.9	14.93	8.98
1992	5.55	7.16	2.91	1.08	2.95	4.59	4.17	4.71	3.94	2.31	5.23	42.64
1993	19.55	7.21	95.13	10.8	4.63	3.64	3.62	1.9	2.68	2.49	2.53	3.68
1994	6.23	4.12	3.31	3.66	3.75	3.68	3.83	3.99	4.84	5.51	5.19	7.43
1995	6.46	10.53	4.57	5.47	5.25	4.95	4.7	4.58	4.15	2.88	2.78	27.76
1996	193.34	675.30	547.69	143.69	95.55	61.87	52.65	45.35	29.99	28.77	26.89	50.58
1997	46.36	42.26	38.16	34.06	29.95	25.85	21.83	14.91	25.47	13.48	22.96	57.88
1998	55.81	22.47	35.19	12.22	8.93	8.12	7.18	6.58	6.49	26.21	59.46	106.89
1999	154.43	366.23	187.68	60.81	34.54	19.07	12.76	9.52	7.98	27.35	33.65	86.74
2000	902.84	1752.28	957.67	680.92	346.56	254.59	142.8	96.06	97.46	88.84	252.94	349.36
2001	149.21	149.78	105.93	92.02	55.65	28.75	21.29	17.89	15.98	17.3	244.63	506.94
2002	181.46	126.1	35.72	30.78	18.78	13.22	12.67	10.77	10.51	11.07	15.96	21.23
2003	20.11	10.38	9.41	5.99	6.47	6.63	7.29	6.04	5.54	6.39	6.47	6.29
2004	96.73	73.97	114.34	69.76	5.87	4.3	5.7					

Figuras dos Instrumentos usados nos trabalhos de campo

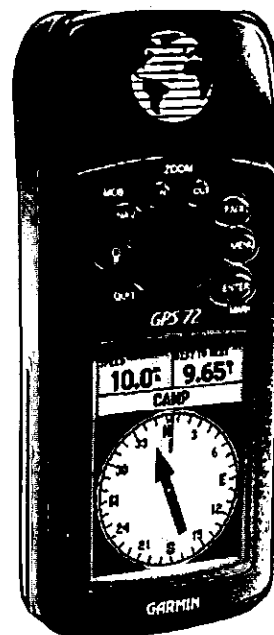
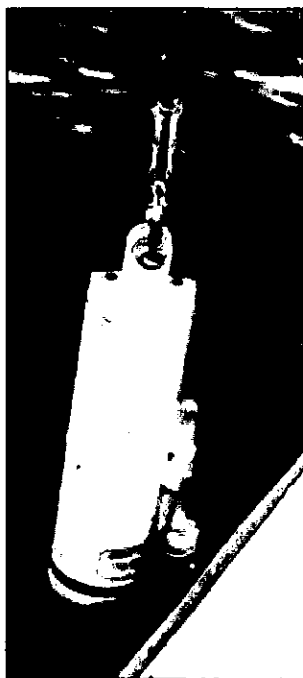


Fig.9.2: CTD usado para o trabalho de campo

Fig.9.1: Marégrafo usado no trabalho de campo

Fig.9.3: GPS III plus

Tabela 9: Especificações dos instrumentos

Instrumento	Especificações			
		Temperatura (°C)	Condutividade (S/m)	Pressão
CTD (SBE 19 plus)	Intervalo de medição	-5 a +35	0 a 9	0 ao limite da escala: 20/ 100/ 350/ 1000/ 2000/ 3500/ 7000 metros
	Precisão inicial	0.005	0.0005	0.1% do limite da escala
	Estabilidade (mensal)	0.0002	0.0003	0.004% do limite
	Resolução	0.0001	0.00005 (águas oceânicas) 0.00007 (hipersalinidade) 0.00001 (água doce)	0.002% do limite da escala
	Calibração	+1 a +32	0 a 9	Pressão ambiente ao limite da escala.
	Marégrafo (Microtide Pressure Gauge Type 316L)	Intervalo de medição	0.5 s	
Média de amostragens		120		
Precisão		1.5 cm		
Resolução		0.01 psia		
Garmin GPS III plus	Pontos de Direcção	Total: 500 com nome, símbolo, comentário e com amostra de um mapa Próximos: 9 (automáticos) continuamente actualizados		
	Trajectos	20 rotas reversíveis com mais de 30 direcções cada		
	Registro da Trajectória	1900 pontos		
	Pontos de referência	106		
	Coordenadas	Lat/Lon, UTM/UPS, MGRS, Loran TDs, Maidenhead, User Grid, etc.		
	Precisão	Posição: 15 metros (49 pés) 1- 5 metros (3- 15 pés)		

No programa estatístico Minitab foram feitas análises de regressão para todos os meses de estudo. O exemplo a seguir foi importado do programa e mostra a análise de regressão para o mês de Março de 2003. A partir dos valores à seguir tabelados obteve-se a equação de regressão.

$\ln(-\ln(S/S_0))$	X (m)
-4.74	600
-4.04	1900
-4.74	3000
-4.23	4500
-4.04	5700
-3.50	7800
-3.20	10000
-2.50	11400
-2.40	12900
-1.70	14900
-1.60	17800
-0.97	18700
-0.76	19300
-0.95	20400
-0.61	21500
-0.47	23400

Regression Analysis

The regression equation is

$$\ln(-\ln(S/S_0)) = -4.98 + 0.000202 X$$

Predictor	Coef	StDev	T	P
Constant	-4.9755	0.1262	-39.43	0.000
X	0.00020206	0.00000891	22.68	0.000

S = 0.2617 R-Sq = 97.3% R-Sq(adj) = 97.2%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	35.214	35.214	514.26	0.000
Residual Error	14	0.959	0.068		
Total	15	36.173			

Unusual Observations

Obs	X	ln(-ln(S	Fit	StDev Fit	Residual	St Resid
2	1900	-4.0400	-4.5916	0.1121	0.5516	2.33R

R denotes an observation with a large standardized residual

Worksheet size: 100000 cells

Retrieving project from file: C:\Program Files\MTBWIN\Data\marco03.MPJ