

UNIVERSIDADE DE AVEIRO  
Departamento de Ambiente e Ordenamento

**CIRCULAÇÃO DA ÁGUA NA RIA DE AVEIRO  
CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO DA QUALIDADE DA ÁGUA**

por

**JOSÉ DE JESUS FIGUEIREDO DA SILVA**

Aveiro, Setembro de 1994

UNIVERSIDADE DE AVEIRO  
Departamento de Ambiente e Ordenamento

**CIRCULAÇÃO DA ÁGUA NA RIA DE AVEIRO**  
**CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO DA QUALIDADE DA ÁGUA**

Dissertação apresentada à  
Universidade de Aveiro para obtenção  
do grau de doutor no ramo de  
Ciências Aplicadas ao Ambiente, por

**JOSÉ DE JESUS FIGUEIREDO DA SILVA**

Aveiro, Setembro de 1994

## AGRADECIMENTOS

As Ciências do Ambiente são uma área de conhecimento multidisciplinar, o que por vezes implica que os trabalhos são desenvolvidos por equipas. Apesar do presente trabalho ter sido realizado individualmente e com meios limitados, não posso contudo deixar de agradecer vários contributos, que o tornaram possível.

O apoio facultado pelos meus orientadores, designadamente a Professora Doutora Isabel Fernandes que disponibilizou meios do Departamento de Ambiente e Ordenamento, e o Professor Doutor Daniel Rodrigues pelas sugestões sobre a organização e comentários ao conteúdo da Tese.

À Universidade de Aveiro que me dispensou de Serviço Docente; ao Departamento de Ambiente e Ordenamento que suportou os custos do trabalho de laboratório; à Comissão de Desenvolvimento Científico e à Secção Científica e de Desenvolvimento do Senado, que atribuíram subsídios de deslocação.

À Junta Autónoma do Porto de Aveiro, que facilitou o acesso aos documentos com resultados das observações de maré e do levantamento topo-hidrográfico, realizados recentemente na Ria.

À Portucel, Centro Fabril de Cacia, que forneceu os resultados de medições de caudal do rio Vouga.

À Industria Aveirense de Pesca, que no âmbito de um contrato de prestação de serviços, disponibilizou a embarcação com que foi realizado o trabalho de campo.

Ao Programa Ciência, que financiou a aquisição de equipamento autónomo de medição de correntes.

Os dados de batimetria e de altura de maré cedidos pelo Eng<sup>o</sup> Mário Teles, da Hidroprojecto, que foram usados na fase inicial do trabalho.

A ajuda no trabalho de campo e no laboratório dos Engenheiros do Ambiente, Ana Martins, Helena Apolo e Augusto Lopes.

Finalmente, mas não menos significativo, foi o apoio dos meus pais, irmã Helena e da minha mulher.

## SUMÁRIO

O objectivo deste trabalho é estudar a circulação da água na Ria de Aveiro, contribuindo para o conhecimento da qualidade da sua água. É apresentada a caracterização morfológica e hidrológica da Ria, pondo em evidência a complexidade da sua morfologia e o carácter lagunar desta massa de água, que é justificado pelo reduzido caudal de água proveniente dos rios.

O balanço do volume de água no ciclo semi-diurno de maré permitiu calcular caudais e percursos de maré. É analisada a variação de volume de ciclo quinzenal e discutida a importância das correntes residuais no transporte de substâncias na Ria.

É apresentado um método de amostragem para determinar salinidades médias em segmentos dos canais da Ria, que admite condições quase estacionárias. Foram calculados os tempos de residência da água doce nos segmentos dos canais, tendo-se obtido tempos baixos próximo da barra, que aumentam para o interior dos canais.

Foram realizadas observações de correntes de maré, de salinidade e de concentração de partículas em suspensão, em duas secções do canal que vai até ao Largo do Laranjo. Os resultados obtidos são compatíveis com a existência de circulação residual no ramo da Murtosa, predominando a corrente de enchente no sul e nascente, e a de vazante no norte e poente. O predomínio do gradiente longitudinal de salinidade indica também que o transporte dispersivo é importante.

A concentração de partículas em suspensão está relacionada com a velocidade da corrente, indicando que a deposição e a ressuspensão alternam. O aumento da concentração média de partículas quando a salinidade diminui revela a influência do sedimento transportado pelos rios.

O balanço de substâncias resultante do transporte entre os segmentos dos canais foi representado por um modelo de segmentos de prisma de maré. Os valores dos coeficientes de retorno entre os segmentos foram calibrados por um procedimento automático, baseado nas salinidades médias observadas. O modelo simula com êxito a evolução do campo médio de salinidade durante períodos longos.

## SUMMARY

The objective for this work is to study the circulation of water in Ria de Aveiro, contributing to the knowledge of its water quality. The morphological and hydrological characterization of Ria is presented, in which its complexity and marshy character are discussed.

Basing on a balance of volume of water, over the semi-diurnal tidal cycle, the tidal flows and tidal excursions were calculated. The fortnight variation of volume was identified and the importance of residual current for the transport of substances is discussed.

A sampling method for obtaining the values of mean salinity in the segments of the channels is described. The residence time of fresh water contained in the segments was calculated. Small values were obtained near the mouth which increased to the interior of the channels.

Observations of current, salinity and suspended particles concentration were made in two sections of the channel leading to Largo do Laranjo. The results obtained agree with a residual circulation in the Murtosa branch, characterized by the flood current dominating on the south and east sides and ebb current dominating on the north and west sides. A large longitudinal salinity gradient was also observed, indicating that dispersive flux can be important.

Suspended particles concentration is related with current speed indicating that deposition and resuspension are alternating. The increase of suspended particles mean concentration when mean salinity decreases, reveals the influx of sediment from rivers.

Transport of substances along the channels was calculated by a tidal prism model, based on mass balances to the segments in which the channels were divided. The values for the return coefficients were calibrated by an automatic procedure, based on the mean salinities observed in the segments. The model can successfully simulate the salinity evolution for a long period.

## ÍNDICE

INTRODUÇÃO	1
1. A RIA DE AVEIRO: CARACTERIZAÇÃO E EVOLUÇÃO RECENTE	
1.1 MORFOLOGIA DA RIA	6
1.2 DEFINIÇÃO DOS CANAIS UNIDIMENSIONAIS NA RIA DE AVEIRO	9
1.3 MORFOLOGIA E AMBIENTE SEDIMENTAR	11
1.4 EVOLUÇÃO MORFOLÓGICA RECENTE	13
1.5 BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS AFLUENTES DA RIA	15
1.5.1 Bacia do Rio Vouga	15
1.5.2 Bacia da Vala de Mira	16
1.5.3 Bacia do Rio Antuã	16
1.5.4 Bacia do Canal de Ovar	17
1.5.5 Bacia do Rio Boco	17
1.6 CAUDAIS AFLUENTES À RIA	17
2. ANÁLISE DESCRITIVA DOS PROCESSOS DE TRANSPORTE DE SUBSTÂNCIAS NA RIA DE AVEIRO	
2.1 PROCESSOS FÍSICOS DOMINANTES NO ESTABELECIMENTO DO CAMPO DE CORRENTES	22
2.1.1 Correntes Provocadas pelas Marés	23
2.1.2 Campo de Correntes Associadas ao Caudal de Água Doce	24

2.1.3	Outros Factores Intervenientes nas Correntes	25
2.1.4	Transporte, Dispersão e Mistura	25
2.1.5	Renovação da Água de um Estuário	28
2.1.5.1	Renovação Durante um Ciclo de Maré	28
2.1.5.2	Renovação em Processos de Longo Termo	29
2.2	PROPAGAÇÃO DA MARÉ NA RIA	29
2.2.1	Observações da Maré na Ria	30
2.2.2	Variação dos Níveis Médios	33
2.3	VOLUMES, CAUDAIS E PERCURSOS DE MARÉ	35
2.3.1	Representação Numérica da Batimetria dos Canais da Ria	35
2.3.2	Cálculo de Volumes nos Canais da Ria	37
2.3.3	Cálculo de Caudais de Maré	39
2.3.4	Cálculo de Prismas e Percursos no Ciclo de Maré	40
2.3.5	Exemplo de Cálculo de Volumes e Caudais de Maré	41
2.3.6	Exemplo de Cálculo de Prismas e Percursos de Maré	44
2.4	CORRENTES RESIDUAIS, MISTURA E RENOVAÇÃO DA ÁGUA	45
2.5	ACÇÃO DAS CORRENTES DE MARÉ NO TRANSPORTE DE PARTÍCULAS EM SUSPENSÃO.	49
3.	ESTUDO EXPERIMENTAL DO TRANSPORTE DE SUBSTÂNCIAS NA ÁGUA DA RIA DE AVEIRO	
3.1	BALANÇO DE SUBSTÂNCIAS NA RIA	52
3.2	METODOLOGIA DE OBSERVAÇÃO E PLANO DE AMOSTRAGEM	55
3.2.1	Caracterização Espacial do Campo de Salinidade	55
3.2.1.1	Fracção de Água Doce e Tempo de Renovação	58
3.2.2	Observações em Ciclos de Maré	59
3.2.3	Comportamento de Constituintes não Conservativos	64
3.3	INSTRUMENTAÇÃO E MÉTODOS ANALÍTICOS	66
3.3.1	Métodos de Observação de Correntes	66
3.3.2	Métodos de Observação de Salinidade	67

3.3.3 Métodos de Observação da Concentração de Partículas em Suspensão	70
3.3.4 Método para Clorofila	71
3.3.5 Método Qualitativo para Nitratos	71
3.4 CARACTERÍSTICAS DO CAMPO DE SALINIDADE DA RIA	73
3.4.1 Cálculo de Salinidades Médias	79
3.4.2 Cálculo de Tempos de Residência	80
3.5 RESULTADOS DAS OBSERVAÇÕES EM CICLOS DE MARÉ NA SECÇÃO DO CHEGADO	81
3.5.1 Circulação Observada no Canal do Chegado	81
3.5.2 Fluxos de Maré na Secção do Chegado	86
3.5.3 Concentração de Partículas em Suspensão	94
3.5.4 Concentração de Clorofila-a	95
3.5.5 Concentração de Nitrato	96
3.6 RESULTADOS DAS OBSERVAÇÕES EM CICLOS DE MARÉ NA SECÇÃO DA TESTADA.	98
3.6.1 Circulação no Canal da Testada	98
3.6.2 Fluxos de Maré na Secção da Testada	102
3.6.3 Concentração de Partículas em Suspensão	108
3.6.4 Concentração de Clorofila-a	109
3.6.5 Concentração de Nitrato	110
3.7 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES	112
4. BALANÇO DE SUBSTÂNCIAS APLICANDO UM MODELO DE PRISMA DE MARÉ	
4.1 MODELOS DE SEGMENTOS DE PRISMA DE MARÉ	114
4.1.1 Divisão do Estuário em Segmentos	116
4.1.2 Fluxos Através das Secções e Mistura entre Segmentos	117

4.2 DESCRIÇÃO DO MODELO DE SEGMENTOS DE PRISMA DE MARÉ PARA A RIA DE AVEIRO	119
4.2.1 Divisão da Ria em Segmentos	120
4.2.2 Simulação da Variação de Caudal dos Rios	121
4.2.3 Transporte entre Segmentos	124
4.2.4 Organização do Cálculo Numérico de Transporte	126
4.2.5 Procedimento de Ajustamento Automático dos Coeficientes de Retorno	128
4.3 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MODELO À RIA DE AVEIRO	131
4.3.1 Análise de Sensibilidade e Calibração dos Coeficientes de Retorno	133
4.3.2 Simulação da Evolução da Salinidade entre 3-Abril e 27-Julho de 1991	138
4.3.3 Potencialidades para Desenvolvimento do Modelo de Qualidade da Água da Ria	141
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	144
REFERÊNCIAS	151
ANEXO	155

## INTRODUÇÃO

As questões ambientais devem ser analisadas no contexto do desenvolvimento da sociedade que as origina. Na questão ambiental da Ria de Aveiro está em causa a relação entre a valorização dos seus recursos e a qualidade do seu ambiente.

Um componente fundamental da qualidade do ambiente lagunar é a qualidade da água da Ria. Na avaliação do estado de qualidade da água da Ria devem ser considerados não só os efluentes e resíduos originados nas múltiplas actividades localizadas na região, e que podem atingir a Ria, mas ainda os fenómenos de transferência entre a terra, a atmosfera e o oceano. É reconhecido que os estuários e lagunas costeiras são sistemas de interface entre a terra e o mar, com importância na regulação do transporte entre os dois meios. Esta posição de interface faz com que o seu ecossistema seja também variado e rico, suportando importantes actividades económicas.

O estudo dos processos de transporte na massa de água da Ria constitui um problema complexo que faz parte do equacionamento rigoroso dos problemas de qualidade da água e que é necessário ter em conta nas medidas susceptíveis de os resolver.

Os modelos matemáticos de qualidade da água são instrumentos que representam os sistemas naturais de um modo mais ou menos simplificado e que podem apoiar a aquisição de novos conhecimentos, a definição de medidas de controlo e, em geral, a gestão da qualidade do ambiente. Nesta perspectiva a característica fundamental de um modelo é a sua utilidade em relação aos objectivos com que foi criado. Na formulação de um modelo deve ter-se em consideração a necessidade de dados para calibração,

cuja natureza e dificuldade de obtenção não deve a limitar a utilidade do modelo. ORLOB (1983) sugere que limitar a complexidade dos modelos de qualidade da água, vai permitir verificar os modelos e aumentar a confiança nos resultados.

Tendo como objectivo geral identificar os processos que condicionam a qualidade da água da Ria, é natural que este objectivo implique a criação de um sistema de modelos que possam representar os vários processos intervenientes na qualidade da água. Se também se procurar criar instrumentos adaptados ao apoio da gestão da qualidade da água, torna-se indispensável que sejam representados os processos que decorrem lentamente e que têm grande significado na evolução das características da Ria.

Na presente análise dá-se relevo aos processos de longo-termo relacionados com o transporte e eventual retenção na Ria de substâncias provenientes da terra, que por vezes, constituem cargas poluentes. São os casos de substâncias que são introduzidas na Ria em quantidades acrescidas, devido às actividades humanas, tais como metais pesados, nutrientes de plantas e materiais orgânicos.

A alteração da qualidade da água, que é provocada por muitas das actividades do homem, está relacionada com a densidade populacional e formas de uso do território abrangido pela bacia hidrográfica em causa. No caso da Ria de Aveiro, a área mais importante para caracterizar a poluição a que está sujeita é a área de planície costeira que a rodeia, e que até à cota de 100 metros inclui cerca de 50% da área total que é drenada pela Ria. Nesta área reside uma população que ultrapassa os 300000 habitantes, sendo a sua distribuição dispersa. Na economia da região têm importância todos os sectores de actividade. A agricultura ocupa perto de 40% da área, sendo relevante neste sector a produção animal. A indústria é o sector com maior peso na economia: é uma indústria diversificada que inclui unidades dos sectores químico, de pasta e papel, cerâmico, metalúrgico e ainda unidades do sector alimentar.

A zona central da Ria, entre Aveiro e a Murtosa, recebe as mais significativas entradas de água doce e sedimentos, bem como de poluentes. Nesta zona da Ria foi identificada

por HALL e OUTROS (1987) a acumulação de mercúrio nos sedimentos dos canais próximos da descarga de uma fábrica de cloro e soda cáustica. O problema da qualidade da água da Ria de Aveiro, além deste caso de poluição por mercúrio, possui outras vertentes também relacionadas com os materiais particulados presentes na Ria.

De entre as substâncias transportadas nos estuários assume grande importância o material particulado, que pode ter origem no exterior do estuário: sedimento transportado pelos rios, sedimento proveniente da zona costeira, material particulado de efluentes líquidos ou ainda proveniente da atmosfera. Podem também existir fontes internas: material resultante da erosão do fundo, material coloidal que floccula no estuário, e material produzido por processos biológicos. Não tem sido desenvolvido grande esforço para quantificar as fontes do material particulado na Ria, cuja importância parece evidente através da formação de vastos depósitos de sedimento fino, coesivo e rico em matéria orgânica.

A formação da Ria foi determinada pelos processos costeiros que movimentam areias e que deram origem ao sistema de barras. No entanto, a evolução interna da laguna assim formada é muito influenciada pela dinâmica do transporte em suspensão de materiais particulados finos, cuja importância deve ser realçada na compreensão do ecossistema da Ria. A deposição e erosão de materiais particulados coesivos é particularmente difícil de representar num modelo matemático, porque depende da interacção entre as fontes, da circulação residual e dos processos físicos - químicos - biológicos que alteram as suas características (DRAKE, 1976). A análise do comportamento deste material pode ser baseada em resultados empíricos que revelem o resultado da interacção referida.

A mistura entre a água doce dos rios e a água do mar, que ocorre na Ria, mantém um campo de salinidade cujas variações são igualmente importantes na definição das características do meio lagunar. A estrutura do campo de salinidade observado serve de base à classificação dos estuários, e pode revelar em linhas gerais a organização da circulação na massa de água. As primeiras classificações de estuários atenderam

principalmente à importância da estratificação vertical, que reflete se o transporte de sal está relacionado com a circulação residual gravítica, ou se esse transporte tem de ser considerado difusivo. Mas, tal como PRITCHARD (1989) comenta, o transporte resultante de variações laterais nos estuários, pode ser importante em alguns casos, e não é considerado nestes esquemas de classificação.

A complexidade morfológica da Ria obrigou a uma análise da sua circulação por partes, fazendo a sua divisão em ramos. As interacções entre estes ramos deverão também ser consideradas na análise global do sistema. A análise da morfologia da Ria e a sua caracterização hidrológica são desenvolvidas no 1º Capítulo. A energia transmitida pelas ondas de maré é um elemento fundamental no estabelecimento da circulação da água da Ria. A descrição da propagação da maré na Ria, que é feita no 2º Capítulo, vai fundamentar o plano do trabalho experimental para caracterizar a circulação da sua água.

Os resultados experimentais indicam que na Ria de Aveiro o caudal dos rios é geralmente muito reduzido face aos caudais de maré. As maiores variações de salinidade são observadas ao longo dos canais, sendo menos importantes as variações laterais e verticais dentro de cada canal da Ria. Com base nesta evidência experimental, admitiu-se que o campo de salinidade da Ria é quasi estacionário e que cada um dos ramos é seccionalmente homogéneo. A estratégia de amostragem, apresentada no 3º Capítulo, baseia-se nestas hipóteses e permitiu obter estimativas aceitáveis das salinidades médias.

A concentração de partículas em suspensão na água é também um parâmetro que depende da circulação na massa de água, e que, pelas razões aludidas acima, é considerado como um indicador ambiental importante. Ao contrário da salinidade, o seu comportamento não é conservativo, pelo que poderão ocorrer variações espaciais e temporais mais rápidas. Por esta razão, a estratégia de amostragem para este parâmetro foi diferente, sendo também descrita no 3º Capítulo. A natureza das partículas em suspensão na água varia com a natureza da fonte dessas partículas. No plano de

trabalho foram incluídos parâmetros que indicam a importância das fontes biológicas das partículas (clorofila-a e fracção volátil).

No 4º Capítulo é apresentada a formulação e a calibração de um modelo de segmentos de prisma de maré. Este modelo permite realizar simulações da qualidade da água, especialmente envolvendo variáveis de qualidade da água que se caracterizem por dependerem de interacções com constantes de tempo superiores ao período da maré.

O objectivo geral de identificar a circulação da água na Ria de Aveiro, tal como é desenvolvido nos Capítulos que foram referidos, implicou a definição de objectivos específicos para as partes em que o trabalho foi desenvolvido, designadamente:

- A Formulação e a calibração de um modelo de transporte e mistura de substâncias na água da Ria, para apoio da gestão da qualidade da água.
- A quantificação dos volumes de água que entram na Ria a partir dos rios e do mar, e a delimitação dos percursos médios realizados por partículas de água no ciclo de maré.
- A observação de salinidades para cálculo de valores médios e de tempos de residência da água doce.
- A observação de concentrações e de fluxos de materiais particulados em suspensão na água, em secções relevantes da Ria. O estabelecimento de relações empíricas entre concentrações de constituintes e variáveis hidrológicas.

# 1. A RIA DE AVEIRO: CARACTERIZAÇÃO E EVOLUÇÃO RECENTE

## 1.1 MORFOLOGIA DA RIA

A Ria de Aveiro é uma massa de água costeira, delimitada por terra, com ligação ao mar, que pode ser considerada um estuário uma vez que ocorre diluição da água salgada pela água doce transportada pelos rios. É uma formação geológica recente cujas formas actuais têm origem no período pós-glaciar de subida rápida do nível do mar. Durante a subida de nível a faixa costeira ficou submersa e os vales dos rios foram inundados pelo mar. Os rios, as ondas com as correntes litorais associadas e as correntes de maré transportam sedimentos, que tendem a depositar-se nas áreas mais calmas. Os estuários e as lagunas costeiras são formações em que a acumulação de sedimentos pode ser rápida.

Os tipos de estuário são muito variados e podem ser classificados de acordo com a sua morfologia ou com a sua estrutura salina. Esta depende do modo como a água doce do rio se mistura com a água salgada do mar em resultado das correntes provocadas pela descarga de água doce e pelas marés.

Uma classificação dos estuários proposta por Pritchard na década de 50 (PRITCHARD, 1989) define os seguintes tipos morfológicos:

- Estuários em planície costeira (vales submersos de rios).
- Estuários fechados por barras de areia (vales de rios submersos em que a sedimentação recente foi suficientemente importante para competir com a subida do nível do mar).

- Fiordes (vales profundos de origem glacial).
- Outros (por exemplo origem tectónica).

A classificação com base na estrutura salina estabelece os tipos:

- Bem misturado (na secção transversal observa-se homogeneidade vertical da salinidade, podendo ocorrer variação lateral).
- Parcialmente misturado (na secção transversal observa-se variação vertical da salinidade).
- Altamente estratificado (na secção transversal observa-se uma camada superficial de água de baixa salinidade e uma camada no fundo com água salgada).

Esta classificação está mais directamente ligada aos tipos morfológicos Estuários de planície costeira e Fiordes.

A Ria de Aveiro pode ser incluída no tipo morfológico de Estuário fechado por barras de areia. As suas características específicas resultam do sistema de barras de areia ter neste caso um grande desenvolvimento ao longo da costa que ultrapassa muito a área onde entra o principal rio (Vouga), incluindo por isso vários outros rios que desaguam na massa de água estuarina em pontos distantes da foz do rio Vouga. Por esta razão a Ria de Aveiro tem também características lagunares, sendo a sua massa de água influenciada pela contribuição dos vários rios afluentes.

Analisando a morfologia da Ria podemos descrevê-la como um sistema de canais de grande desenvolvimento longitudinal e organizados em forma arborescente por ramificações sucessivas a partir do ponto único de comunicação com o mar (Figura 1.1). Os extremos dos vários canais transformam-se no leito dos vários rios afluentes. Em cada um destes canais pode observar-se a existência de um pequeno subestuário com características de estrutura salina específicas e influenciando também o campo de salinidade de todo o sistema.

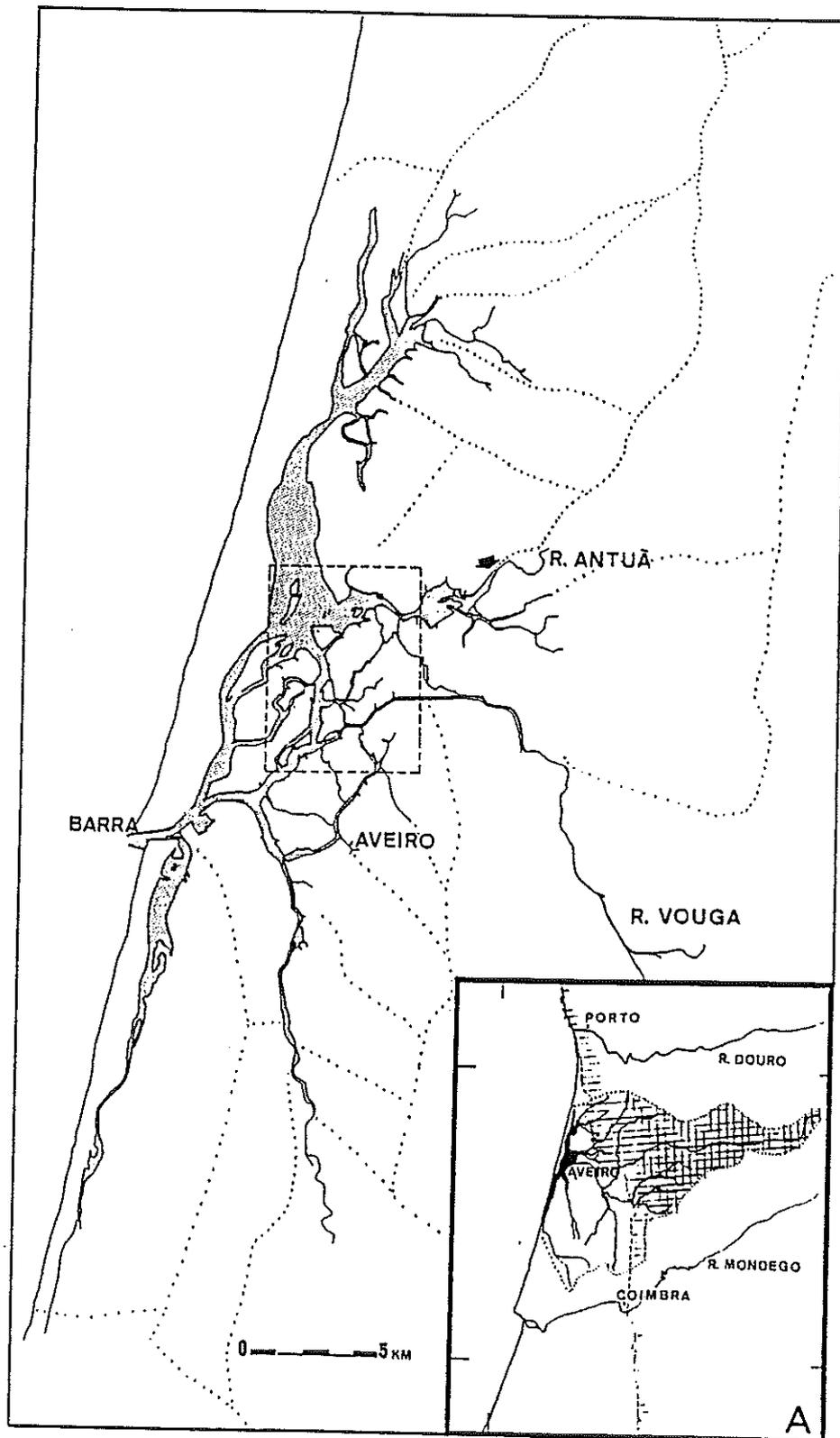


Figura 1.1. Aspecto geral da Ria de Aveiro. A ponteeado estão marcadas as bacias hidrográficas das linhas de água afluentes. A - Localização na costa Portuguesa. Base cartográfica: carta na escala 1:100000 (IGC, 1974), com o desenho da zona central actualizado com base nos levantamentos hidrográficos recentes.

Em resultado destas características, a Ria é uma massa de água com morfologia e estrutura salina complexas, que justificam uma primeira abordagem qualitativa ao seu funcionamento hidrodinâmico e bioquímico, de que depende a qualidade do seu ambiente aquático.

## 1.2 DEFINIÇÃO DOS CANAIS UNIDIMENSIONAIS NA RIA DE AVEIRO

A estrutura arborescente formada por canais de grande desenvolvimento longitudinal pode ser dividida em ramos quase independentes que se ligam a um canal principal entre a Barra e Aveiro, designadamente (Figura 1.2):

- A - Canal de Ovar (desenvolve-se para norte).
- B - Canal do Espinheiro (desenvolve-se para este).
- C - Canal de Ilhavo (desenvolve-se para sul).
- D - Canal de Mira (desenvolve-se para sul).

Esta divisão em ramos tem paralelo nas características gerais da organização espacial do campo de correntes de maré, tal como foi mostrado por TELES e OUTROS (1991) usando um modelo hidrodinâmico bidimensional da Ria de Aveiro em toda a sua extensão. As linhas de divisão entre as bacias indicadas na Figura 1.2 correspondem a barreiras físicas existentes entre as bacias, à excepção da linha de divisão entre as bacias A e B. Neste trabalho esta linha é uma fronteira hipotética cuja consistência vai ser analisada por observações do campo de correntes.

Pela divisão em ramos consegue-se uma simplificação significativa na representação do comportamento hidráulico da Ria resultante quer da propagação da maré quer da descarga da água doce afluente aos vários pontos onde desaguam os rios. Esta representação simplificada pode ser aplicada à formulação de modelos numéricos, discretos, ou de caixas, para a qualidade da água.

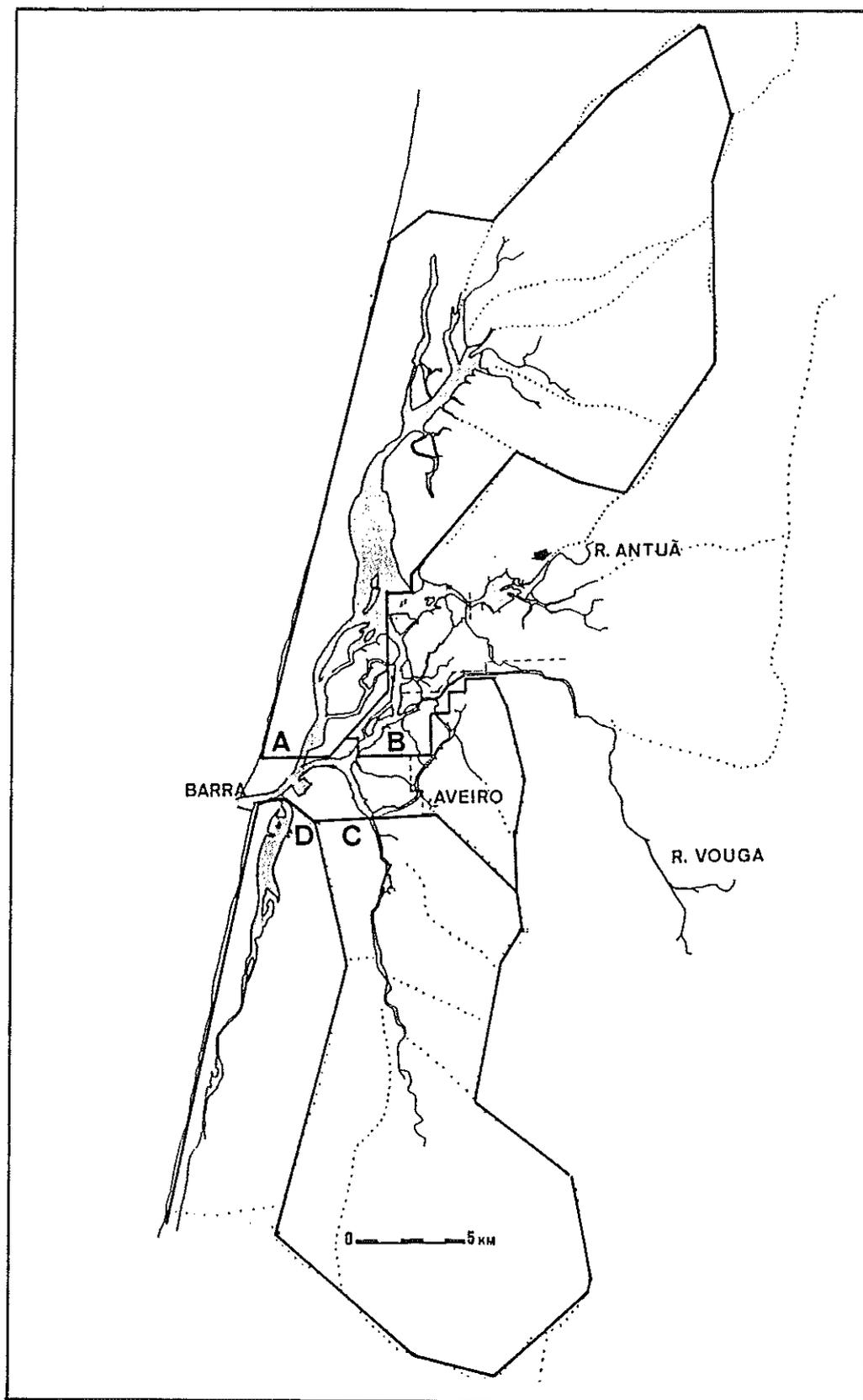


Figura 1.2. Divisão da Ria em ramos: Canal entre a barra e Aveiro; A - Canal de Ovar; B - Canal do Espinheiro; C - Canal de Ilhavo; D - Canal de Mira.

### 1.3 MORFOLOGIA E AMBIENTE SEDIMENTAR

As formas actuais observadas na Ria de Aveiro resultam fundamentalmente dos processos hidrodinâmicos que intervêm no transporte, erosão e deposição de sedimentos. A intervenção do homem tem sido um outro factor determinante do sentido geral da evolução, principalmente por ter actuado directamente na ligação do sistema com o mar.

A evolução morfológica da Ria deve-se à movimentação dos sedimentos recentes que formam o litoral de Aveiro entre Espinho e o cabo Mondego. Nos sedimentos comuns na Ria, as fracções granulométricas mais abundantes são areia fina e o silte, frequentemente com alguma argila. No diagrama da Figura 1.3 estão representados os resultados da análise granulométrica de amostras de sedimento colhidas na zona norte do canal de Ovar (SILVA, 1985). As areias predominam ao longo do cordão litoral e no leito dos canais próximos da barra. O sedimento mais fino, com comportamento coesivo, forma extensos bancos de maré em grande parte colonizados por vegetação halófitas.

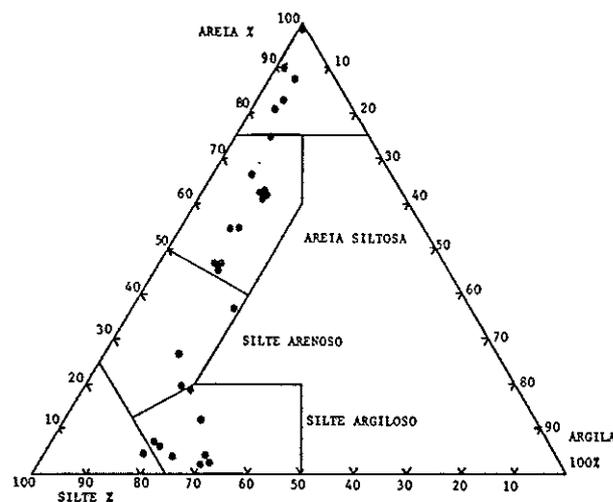


Figura 1.3. Classificação gráfica da granulometria de amostras de sedimento colhidas no canal de Ovar (SILVA, 1985).

A origem e evolução dos bancos de maré, onde se acumula sedimento fino, indica que o ambiente de deposição é dominado por correntes de maré pouco intensas. A

rebentação da ondulação causada pelo vento sobre esses bancos quase horizontais ocorre em pontos que variam continuamente durante o ciclo de maré, actuando mais demoradamente próximo dos níveis médios de preia-mar e baixa-mar. A Figura 1.4 ilustra um perfil típico da zona central da Ria pondo em relevo a importância das áreas situadas perto do nível de preia-mar e cobertas por vegetação.

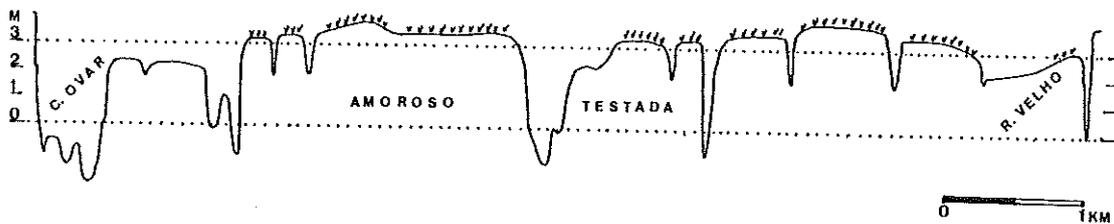


Figura 1.4. Corte W-E entre o canal de Ovar e o rio Velho (Vouga), identificado na Fig. 1.5 pela linha A-A'. Escala vertical com alturas em metros referidas ao Zero Hidrográfico.

Na Tabela 1.1 apresentam-se estimativas das áreas cobertas por água, correspondentes ao nível médio e à máxima preia-mar, bem como das áreas drenadas pelos rios afluentes. Estas áreas foram medidas numa carta à escala 1:50000.

Tabela 1.1. Áreas correspondentes à divisão da Ria em ramos. Áreas submersas médias; áreas submersas nas máximas preia-mar; áreas drenadas pelas bacias hidrográficas dos rios afluentes.

RAMO	ÁREA MÉDIA	ÁREA EM P.M.	ÁREA DRENADA
Aveiro	4,35 km <sup>2</sup>	20,98 km <sup>2</sup>	27 km <sup>2</sup>
Ovar	22,35 km <sup>2</sup>	47,92 km <sup>2</sup>	225 km <sup>2</sup>
Espinheiro	8,68 km <sup>2</sup>	33,38 km <sup>2</sup>	2691 km <sup>2</sup>
Ilhavo	1,45 km <sup>2</sup>	8,10 km <sup>2</sup>	189 km <sup>2</sup>
Mira	3,73 km <sup>2</sup>	8,00 km <sup>2</sup>	375 km <sup>2</sup>
Total	40,55 km <sup>2</sup>	118,38 km <sup>2</sup>	3507 km <sup>2</sup>

Admitindo que na Ria as correntes de maré são o principal agente modelador dos sedimentos depositados, é possível relacionar a evolução das formas observadas em levantamentos batimétricos com a acção das correntes, e a partir da observação das formas actuais concluir sobre a organização do campo de correntes existente.

## 1.4 EVOLUÇÃO MORFOLÓGICA RECENTE

A evolução da Ria está documentada cartograficamente a partir do fim do século XVIII. A causa principal da evolução recente foram as obras que continuamente foram sendo realizadas no canal de ligação com o mar e no que serve as zonas portuárias. Estas obras foram progressivamente facilitando a penetração da onda de maré na Ria. De observações realizadas em 1905 no molhe sul da barra, referidas por LEITÃO (1906), conclui-se que as amplitudes de maré variavam entre 1,45 m (marés vivas) e 0,7 m (marés mortas). Em observações recentes (COSTA, 1990) as amplitudes na barra variaram entre 2,5 m (marés vivas) e 1,3 m (marés mortas). A comparação das amplitudes de maré prova que ocorreu uma grande alteração das condições hidrodinâmicas da Ria que naturalmente terá consequências na evolução morfológica do sistema mesmo em áreas afastadas da barra.

A evolução morfológica em curso actualmente é motivada por várias obras realizadas entre 1932 e 1986, que consistiram fundamentalmente na construção de molhes para canalizar os fluxos de maré na ligação com o mar. Em várias fases do avanço destas obras continuou a verificar-se o aumento da amplitude das marés na Ria e o aprofundamento do canal da barra (ABECASIS, 1961). A evolução morfológica no resto da Ria está documentada por dois levantamentos hidrográficos detalhados, realizados em 1951-52 e 1987-88. A comparação destes levantamentos revela importantes modificações da morfologia de alguns canais, que sugerem uma alteração na organização geral do campo de correntes na zona central da Ria. A Figura 1.5 compara a morfologia dos canais mais profundos na zona central da Ria, de acordo com os levantamentos hidrográficos de 1951 e 1987. Verifica-se que a principal ligação da zona do Laranjo com o resto da Ria, o canal da Murtosa, tinha ligação preferencial com o canal de Ovar. Actualmente a ligação mais em evidência é para sul com o canal do Espinheiro. Esta modificação morfológica recente e possivelmente ainda não concluída, tem impacto na organização espacial do campo de correntes e em consequência nos processos que controlam a qualidade da água da zona central da Ria.

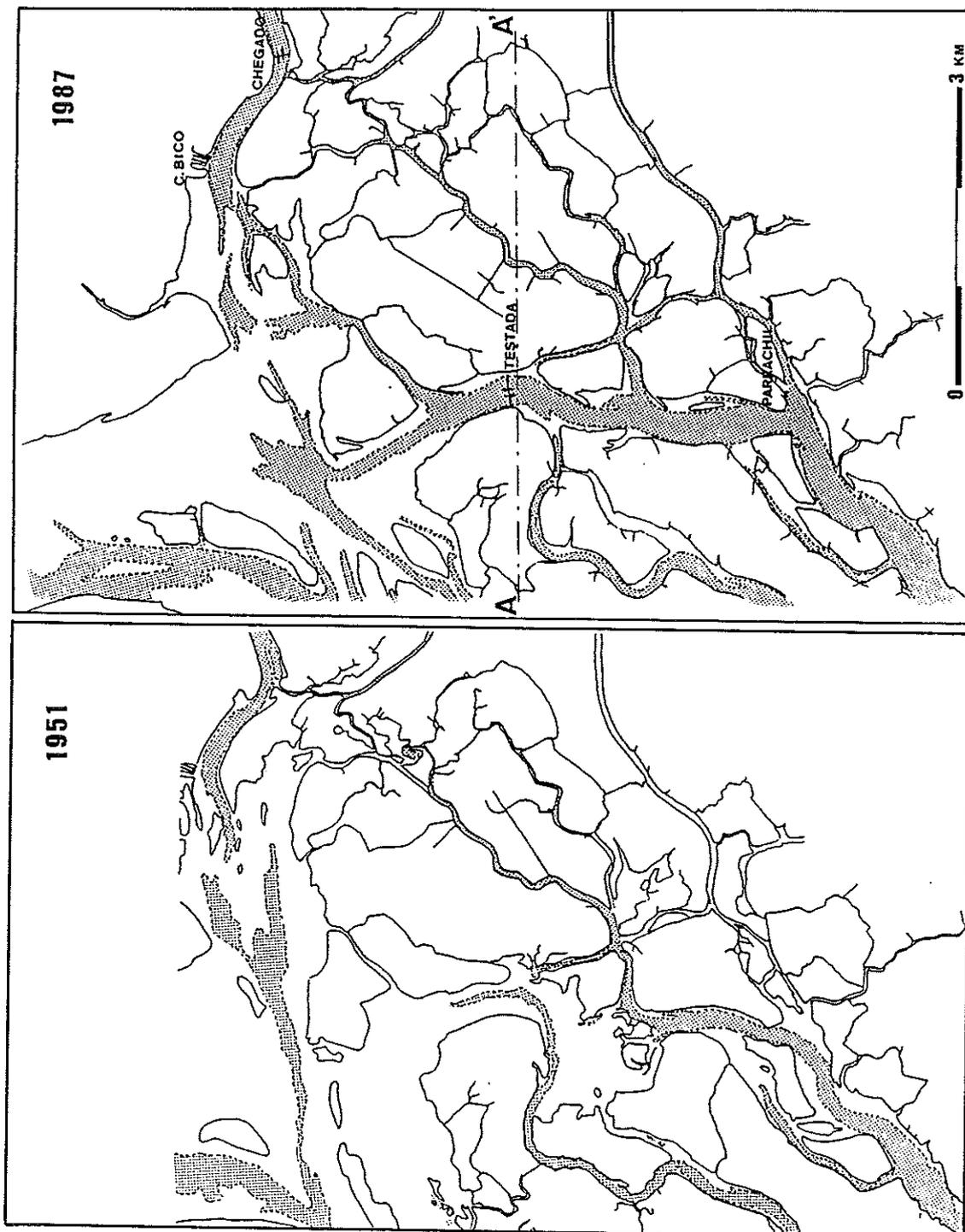


Figura 1.5. Evolução morfológica da zona central da Ria entre 1951 (A) e 1987 (B). As zonas sombreadas situam-se abaixo do Zero Hidrográfico. Localização na Ria indicada na Figura 1.1. Linha A-A' corte da Figura 1.4.

## 1.5 BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS AFLUENTES DA RIA

Na Ria predominam as correntes originadas pelas marés em relação às correntes devidas à descarga de água doce afluente. A importância da Ria como meio estuarino é posta em evidência através da Tabela 1.1, na qual se indicam as áreas das bacias que são drenadas pelos diferentes ramos da Ria.

### 1.5.1 BACIA DO RIO VOUGA

O Vouga é o principal rio que desagua na Ria. A área da sua bacia hidrográfica, medida em projecção horizontal na escala 1:250000, é de 2425 km<sup>2</sup> e perto de 30% dessa área situa-se abaixo dos 100 m de altitude (FARIA e MACHADO,1976). Realizaram-se medições do seu caudal em S. João de Loure, numa secção a que corresponde uma bacia de 2350 km<sup>2</sup>. A foz do rio Vouga situa-se no centro da Ria o que contribui para que o seu caudal tenha uma maior influência sobre o campo de salinidade de toda a Ria. O seu caudal é o maior dos rios afluentes á Ria, mas não é bem conhecido o seu comportamento anual. O caudal durante o período de verão tem sido medido com uma frequência semanal pelo CENTRO FABRIL DE CACIA, PORTUCEL (1992).

A consulta das cartas Geológica de Portugal (SERVIÇOS GEOLÓGICOS, 1968) e Hidrogeológica de Portugal (SERVIÇOS GEOLÓGICOS, 1970) permite concluir que na área da bacia do Vouga se podem distinguir 3 zonas geológicas:

- A zona de cabeceira em que predominam rochas graníticas de baixa permeabilidade.
- A zona média em que predomina o complexo xisto-grauváquico de muito baixa permeabilidade.
- A zonal final, a partir da confluência com o Águeda em que dominam rochas sedimentares com permeabilidade variável e por vezes elevada.

### 1.5.2 BACIA DA VALA DE MIRA

A segunda maior área drenada para a Ria, 302 km<sup>2</sup> medidos em projecção horizontal na escala 1:100000, corresponde a um conjunto de linhas de água com origem na região de Cantanhede, correndo de sul para norte até ao extremo sul do canal de Mira. Estas linhas de água drenam uma área plana com argilas e grés cretácicos e com cobertura arenosa, terrenos que têm uma permeabilidade variável e no caso das areias elevada, o que leva a supor que a variação do caudal escoado seja menos acentuada que a observada nas outras bacias. O canal de Mira drena também terrenos arenosos ao longo das margens com uma área de 73 km<sup>2</sup>. Dos caudais escoados por esta linha de água não existe qualquer registo. No presente trabalho foram realizadas algumas medições de caudal na secção do Poço da Cruz, a que corresponde uma bacia de 302 km<sup>2</sup>.

### 1.5.3 BACIA DO RIO ANTUÃ

O rio Antuã é geralmente considerado o segundo rio mais importante que desagua na Ria. Drena uma área de 146 km<sup>2</sup> e entra na Ria no seu extremo nascente, no Largo do Laranjo, próximo da foz do rio Vouga. Na bacia hidrográfica predominam as formações do complexo xisto-grauváquico, com pequenos afloramentos de granito, de muito baixa permeabilidade. O comportamento do caudal do Antuã próximo da Ria tem sido caracterizado pela Brigada de Hidrometria do Baixo Mondego. Os dados obtidos na estação hidrométrica da Ponte da Minhoteira constam dos anuários dos SERVIÇOS HIDRÁULICOS, HIDROMETRIA (1978-1990) e constituem a mais completa fonte sobre o comportamento do caudal de um rio que entra na Ria. No presente trabalho foram realizadas medições de caudal na secção de Estarreja, que corresponde a uma bacia de 142 km<sup>2</sup>. Para o Largo do Laranjo também escoam linhas de água que drenam uma área de 120 km<sup>2</sup> de características semelhantes às da bacia do Antuã.

#### 1.5.4 BACIA DO CANAL DE OVAR

Para o extremo norte do canal de Ovar drenam o rio Caster com uma bacia de 71 km<sup>2</sup> e o rio Gonde com uma bacia de 49 km<sup>2</sup>. As bacias destes rios atingem os terrenos xistosos impermeáveis. A parte inferior destas bacias e a restante área drenada pelo canal de Ovar, cerca de 105 km<sup>2</sup>, situa-se em terrenos recentes formados por areias e aluviões. Apesar da área permanentemente coberta por água no canal de Ovar ser cerca de 50% do total na Ria, para este canal só escoa directamente cerca de 7% da área da bacia hidrográfica da Ria. No presente trabalho foram realizadas medições de caudal no rio Caster, na secção de Ovar, a que corresponde uma bacia de 71 km<sup>2</sup>, e no rio Gonde, na secção de Entre-Águas, a que corresponde uma bacia de 47 km<sup>2</sup>.

#### 1.5.5 BACIA DO RIO BOCO

O rio Boco desagua no extremo sul do canal de Ihavo e drena uma área de 104 km<sup>2</sup>, onde predominam argilas de cretácico por vezes cobertas por depósitos arenosos recentes. O canal de Ihavo também drena várias pequenas linhas de água na margem esquerda e algumas valas na margem direita, a que corresponde uma área total de 85 km<sup>2</sup>. No presente trabalho foram realizadas medições de caudal na secção da Ponte de Ouca, a que corresponde uma bacia de 84 km<sup>2</sup>.

### 1.6 CAUDAIS AFLUENTES À RIA

Ao rio Vouga corresponde 69% de área drenada pela Ria. O conhecimento do comportamento do seu caudal é fundamental para a análise da dinâmica do meio estuarino da Ria. O caudal do Vouga tem sido observado em estações hidrométricas pela Brigada de Hidrometria do Baixo Mondego. Os resultados compilados nos anuários dos SERVIÇOS HIDRÁULICOS, HIDROMETRIA (1976/77) incluem várias estações no rio Vouga mas que são pouco úteis para a caracterização do caudal chegado

à Ria, porque a estação de Angeja, única próxima da Ria e actualmente desactivada, situa-se num troço do rio sujeito a significativa influência das marés. A informação mais exacta sobre o comportamento do caudal do rio Vouga é obtida em medições do caudal do rio (método velocidade - área) numa secção próxima de S.João de Loure, durante períodos de menor pluviosidade e com frequência semanal. Os resultados referentes ao período 1981-1991 foram facultados pelo CENTRO FABRIL DE CACIA, PORTUCEL (1992). Com estes resultados foi possível estimar o caudal médio do rio nos meses de Agosto ( $4,2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ) e de Setembro ( $4,3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ). Contudo não foi possível com estes dados estimar o caudal médio anual do rio.

Sobre os caudais drenados pelo canal de Mira não foi possível obter qualquer informação. Pelo contrário os caudais escoados pelo rio Antuã são relativamente bem conhecidos na secção da ponte da Minhoteira (método da equação de vazão), que corresponde a 77% do total da área drenada. De acordo com os resultados compilados nos anuários dos SERVIÇOS HIDRÁULICOS, HIDROMETRIA (1978-1990) o caudal médio neste período foi de  $3,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Admitindo um caudal específico constante, este caudal na ponte da Minhoteira corresponde a cerca de  $4,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  à chegada à Ria. Na falta de melhor informação os caudais médios anuais podem ser estimados por um balanço hidrológico. FARIA E MACHADO (1976) calcularam por um balanço hidrológico o escoamento específico médio para a bacia do rio Vouga, tendo obtido o valor de 660 mm/ano. Na tabela 1.2 resumem-se os dados de caudal que foram obtidos pelos autores já mencionados.

Tabela 1.2. Resumo de estimativas de caudais médios (Q) do Vouga e do Antuã

RIO	VOUGA	ANTUÃ	MÉTODO
Q med. anual	$50 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$		balanço hidrológico
Q med. anual		$4,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$	hidrometria, 1978-90
Q med. Agt/Set	$4,3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$	$1,0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$	hidrometria, 81-91; 78-90
Q esp. Agt/Set	$1,8 \text{ ls}^{-1}\text{km}^{-2}$	$6,4 \text{ ls}^{-1}\text{km}^{-2}$	cálculo

Na Tabela 1.3 indicam-se os caudais médios anuais calculados admitindo que o escoamento médio anual de 660 mm/ano é aplicável a todas as áreas drenadas pela Ria. Indicam-se igualmente os caudais médios dos meses de Agosto e Setembro, calculados admitindo um caudal específico igual ao observado para o rio Vouga ( $1,8 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ ). Uma parte significativa do volume correspondente a estes caudais médios deve chegar à Ria nos períodos curtos em que ocorrem caudais de cheia. O caudal mais frequente será por isso bastante inferior ao valor calculado, que poderemos tomar como um limite máximo para calcular o volume médio de água doce a escoar pela Ria em cada ciclo de maré. Em média anual esse volume é cerca de  $3 \text{ Mm}^3$  enquanto que considerando a média de Agosto / Setembro esse volume é cerca de  $0,3 \text{ Mm}^3$ .

Tabela 1.3. Caudais médios calculados (Q) afluentes a cada bacia da Ria

BACIA	ÁREA DRENADA	Q ANUAL	Q AGT/SET
Aveiro	27 km <sup>2</sup>	0,6 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	0,0 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
Ovar	225 km <sup>2</sup>	4,7 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	0,4 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
Espinheiro	2691 km <sup>2</sup>	56,3 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	4,8 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
Ilhavo	189 km <sup>2</sup>	4,0 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	0,3 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
Mira	375 km <sup>2</sup>	7,8 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	0,7 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
Total	3507 km <sup>2</sup>	73,4 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	6,3 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>

Os caudais que foram medidos no decorrer do presente trabalho estão resumidos na Tabela 1.4. As medições de caudal tiveram como objectivo permitir estimar o caudal afluente à Ria num dado momento. Estes momentos foram seleccionados evitando situações de precipitação intensa que provoca a rápida variação dos caudais afluentes. O conjunto de observações permite também comparar a importância relativa das várias linhas de água nos períodos em que decorreram as observações.

A comparação dos caudais do rio Vouga e da vala de Mira com o do rio Antuã é feita na Figura 1.6, que mostra que existe relação entre estes caudais nos períodos indicados. Os resultados da análise de regressão entre os valores dos caudais destes três rios, mostra que se pode tomar o caudal do rio Antuã como indicador da afluência de água doce à Ria.

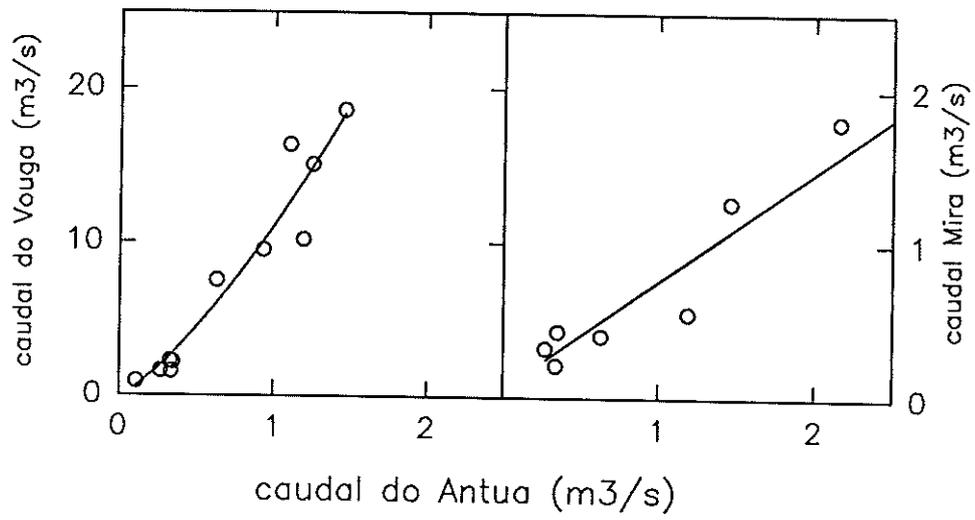


Figura 1.6. Comparação gráfica dos caudais medidos no rio Vouga, na vala de Mira e no rio Antuã. As linhas foram obtidas por regressão polinomial entre os valores observados.

Tabela 1.4. Resumo do conjunto de medições de caudal realizadas nas linhas de água afluentes à Ria. Marcadas com \* estão as medições realizadas na ponte de S. João de Loure, com menor rigor.

DATA	VOUGA	ANTUÁ	MIRA	BOCO	CASTER	GONDE
28/03/90			1,12			
21/04/90			0,94			
13/05/90			0,56			
7-8/06/90	7,50	0,63	0,40	0,02	0,20	
17/06/90			0,28			
5-10/09/90	1,62	0,27	0,32	0,00	0,08	
11-17/11/90	41 *	2,16	1,80	0,33	0,52	0,17
16-20/12/90	19 *	1,46	1,27	0,24	0,44	0,29
2-8/04/91	42 *	4,47	3,15	0,47	2,03	1,04
22-25/05/91	10,19	1,19	0,55	0,05	0,48	0,20
27-29/07/91	1,58	0,34	0,21	0,00	0,13	0,01
21-25/09/91	2,16	0,35	0,43	0,00	0,08	0,01
17/11/91		2,78				
27/01/92		1,62				
23/02/92		1,18				
11/04/92		1,43				
21/05/92		0,44				
27/08/92	0,93	0,11				
28/01/93		2,17				
4-10/03/93	15,10	1,25				
21/05/93		1,61				
4-5/07/93	16,40	1,10				
11/07/93	9,50	0,93				
25/08/93	2,23	0,33				

## 2. ANÁLISE DESCRITIVA DOS PROCESSOS DE TRANSPORTE DE SUBSTÂNCIAS NA RIA DE AVEIRO

### 2.1 PROCESSOS FÍSICOS DOMINANTES NO ESTABELECIMENTO DO CAMPO DE CORRENTES

A massa de água da Ria de Aveiro está separada do Oceano pelo Canal da Barra. Em última análise, são os fluxos médios de água, de energia e de substâncias através de uma secção deste canal que condicionam a qualidade da água na Ria.

O tempo de permanência da água no meio estuarino é um factor importante do rendimento da Ria como reactor químico. Os fluxos de água numa secção no Canal da Barra dependem fundamentalmente dos caudais de água doce afluyente e do regime de propagação da onda de maré oceânica na Ria. Existem outros processos físicos que intervêm no regime hidrodinâmico da Ria, que podem ser englobados no conjunto vasto de processos de interacção com a atmosfera. A propagação das marés é influenciada pelo atrito da água no fundo, pelo efeito da batimetria irregular, e em certas condições pela tensão do vento na superfície e pelo efeito geostrófico.

As correntes são provocadas principalmente pelo campo de forças do gradiente de pressão, associado ao declive da superfície livre da água, resultante quer da propagação da onda de maré oceânica, quer do afluxo de água doce transportada pelos rios. Outras forças causadoras de correntes como a tensão do vento, têm normalmente uma importância secundária de carácter local, podendo contudo alterar os escoamentos provocados pelas marés e pelo caudal doce.

### 2.1.1 CORRENTES PROVOCADAS PELAS MARÉS

A onda de maré na Ria, que tem uma importância fundamental no estabelecimento de correntes, é uma onda forçada pela maré oceânica. À oscilação da superfície livre da água na Ria correspondem movimentos horizontais das partículas de água.

A velocidade da corrente  $v_x$  associada à propagação de uma onda sinusoidal progressiva, cuja velocidade de fase é  $c$ , num canal rectangular de profundidade constante  $h$ , que é muito pequena comparada com o comprimento da onda, exprime-se em função da elevação  $\zeta$  da superfície livre, através da seguinte relação:

$$v_x = \frac{\zeta}{h} c$$

Em estuários pouco profundos a velocidade de fase não é constante, sendo a velocidade da crista maior que a da cava, o que provoca uma assimetria na onda de maré que é traduzida pelo aparecimento de harmónicas de grau superior designadas por sobremarés. Junto à costa e nos estuários ocorre normalmente a interferência entre as ondas de maré incidente e refletida, que dão origem a ondas estacionárias, fenómeno que é mais importante quando a dissipação de energia antes da reflexão é pequena. Numa onda estacionária, ao contrário da onda progressiva, a corrente atinge o valor máximo quando a elevação da superfície livre é nula.

A importância de ondas estacionárias nos estuários depende da fracção de energia que é dissipada por atrito no leito. O fluxo de energia médio de maré, através da unidade de secção, ou seja, a potência média transmitida pela onda de maré ( $\bar{E}$ ), é obtido fazendo a média no ciclo de maré do produto da velocidade da corrente pela elevação da superfície livre, convertida em pressão. Admitindo que quer a velocidade quer a elevação podem ser representadas por funções sinusoidais de amplitude  $C$  e  $a$ , com o

mesmo período, e que diferem em fase  $\delta$ , obtém-se para a potência média transmitida pela onda de maré por unidade de largura da frente de onda (OFFICER, 1976):

$$\dot{E} = \frac{1}{2} \rho g h a C \cos \delta$$

Esta equação mostra que numa onda progressiva, ( $\delta=0^\circ$ ), o fluxo de energia é máximo e numa onda estacionária ( $\delta=90^\circ$ ) o fluxo médio de energia no ciclo é nulo. A importância da dissipação de energia da onda de maré num estuário pode pois ser indicada pela diferença de fase  $\delta$  observada nesse estuário.

O efeito geostrófico também interfere com a propagação de ondas de maré, por causar uma variação lateral na altura de uma onda que se propague num canal. A amplitude da oscilação da superfície livre bem como a amplitude de variação da corrente são maiores no lado direito do sentido de propagação da onda (hemisfério norte). Em canais pouco profundos essas diferenças de altura de água entre os seus lados podem provocar o predomínio da corrente de enchente na sua margem esquerda e o predomínio da corrente de vazante na margem direita do canal.

### 2.1.2 CAMPO DE CORRENTES ASSOCIADAS AO CAUDAL DE ÁGUA DOCE

O caudal doce afluyente aos estuários origina ao longo dos seus canais um escoamento médio na direcção do mar. Devido à diferença de densidade entre a água doce e a água salgada, a descarga de água doce tende a ser predominante na camada superficial do estuário. No entanto observaram-se casos em que a descarga da água doce está associada a diferenças laterais na secção do estuário, sendo nestes casos a sua análise física muito complexa.

Em geral, a energia necessária para provocar mistura vertical da coluna de água é fornecida pela onda de maré. Este processo de mistura aumenta o caudal que tem de ser advectado na camada superficial relativamente ao caudal proveniente do rio. Uma parte da energia que a onda de maré perde ao longo do estuário é transferida, neste processo de mistura, para a coluna de água, na forma de energia potencial. O rendimento deste processo depende da estabilidade da coluna de água.

Na Ria observaram-se em algumas secções junto de tributários diferenças laterais de salinidade, que mostram que a descarga de água doce é preferencialmente realizada de um dos lados do canal. O estudo dos processos de advecção e dispersão nestas situações, como já foi referido, reveste-se de grande complexidade.

### 2.1.3 OUTROS FACTORES INTERVENIENTES NAS CORRENTES

A interacção entre as correntes de maré, a batimetria irregular e o efeito do atrito no fundo dão origem a correntes residuais, que se sobrepõem às correntes provocadas pelo fluxo de água doce. A tensão do vento sobre a superfície da água também provoca correntes residuais, que podem ser importantes quando se verificam condições meteorológicas especiais, nas quais o vento sopra com grande intensidade e persistência de direcção. O conhecimento do conjunto de correntes residuais, isto é do campo de velocidades médias de maré, é fundamental para o estudo dos processos de mistura dentro de um estuário.

### 2.1.4 TRANSPORTE, DISPERSÃO E MISTURA

A mistura num fluido é, em última análise, o resultado da difusão molecular. Contudo, a velocidade a que a mistura se processa é determinada por mecanismos que actuam de forma a aumentar extremamente a superfície através da qual se realiza a difusão

molecular. A importância relativa dos mecanismos que controlam a velocidade de mistura depende da escala a que analisamos o processo. À escala das partículas de fluido é a difusão turbulenta que actua para aumentar a eficácia da difusão molecular. À escala da secção de um escoamento dinâmico, a fricção externa e as irregularidades do canal intensificam o processo de difusão turbulenta, dando origem ao que se designa por dispersão turbulenta. Analisando o escoamento médio num estuário, numa escala de tempo superior à do ciclo de maré, tem-se verificado que frequentemente são as correntes residuais a controlar a mistura nos estuários.

O escoamento observado nos estuários é em geral turbulento não estacionário; mesmo quando as condições permitem a estratificação de densidade, a energia fornecida pela onda de maré pode ser suficiente para impedir a existência de estratificação de densidade acentuada que torne o escoamento laminar. Nestas condições as flutuações turbulentas dão origem a um fluxo difusivo turbulento. O deslizamento entre camadas do escoamento é um factor que aumenta a escala em que actua a difusão turbulenta. Nos canais naturais, além do deslizamento entre camadas devido ao atrito com o leito, há que considerar também as variações laterais de velocidade resultantes de irregularidades do canal, de curvas e de bacias laterais. Este conjunto de factores dá origem a um importante fluxo dispersivo, isto é, um fluxo interno que causa mistura da massa de água.

Em estuários com canais de pequena secção e irregulares, onde a dissipação por atrito da energia da onda de maré é grande, o fluxo dispersivo é importante no transporte de salinidade para montante. O transporte para jusante do caudal doce afluente é devido á corrente residual e verifica-se em toda a secção. Neste caso o estuário apresenta uma secção homogénea.

Num canal rectilíneo de secção uniforme a dispersão longitudinal de substâncias é controlada pelo gradiente vertical da componente horizontal da velocidade. Nas situações mais frequentes em estuários são as variações laterais de velocidade que

controlam a mistura longitudinal. Admitindo que as misturas vertical e lateral são completas, do que resultam secções do escoamento com distribuição de concentração homogênea, a mistura longitudinal é traduzida por um coeficiente de mistura análogo a um coeficiente de dispersão. Neste coeficiente empírico incluem-se os efeitos da dispersão turbulenta e também os efeitos de processos advectivos que contribuem para a mistura.

Na maior parte dos estuários não se observam as condições de homogeneidade na secção, existindo diferenças de salinidade que correspondem a gradientes da velocidade do escoamento. São estes gradientes de velocidade, que estabelecem os fluxos de quantidade de movimento e de energia que promovem a mistura. Por vezes a variação espacial das propriedades é marcada por superfícies em que ocorre uma descontinuidade nas variações - frentes de mistura. Este fenómeno está associado à convergência do campo de correntes, que num estuário pode ser bem evidente à superfície do escoamento. Na Ria esta situação é frequente na vazante próximo da junção de dois canais como se representa esquematicamente na Figura 2.1, para o caso da junção do canal do Vouga com o canal da Testada.

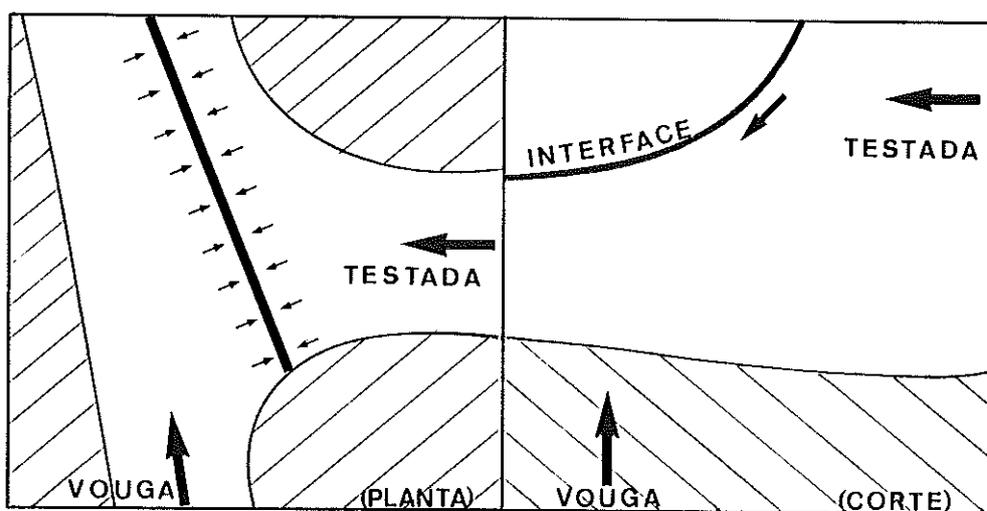


Figura 2.1. Esquema da frente de mistura observada na foz do rio Vouga.

Analisando as frentes em estuários, BOWMAN (1977) refere serem mais frequentes na vazante, o que se explica pela maior velocidade e estratificação geralmente observadas nesta fase do ciclo de maré. Também chama a atenção para a dinâmica da mistura associada às frentes ser diferente da dinâmica da circulação de tipo cunha salina. Nas frentes, a convergência à superfície promove o transporte e mistura na direcção do fundo, enquanto que o transporte associado à mistura na cunha salina é na direcção da superfície.

### 2.1.5 RENOVAÇÃO DA ÁGUA DE UM ESTUÁRIO

O tempo de residência ou de renovação da água no estuário é, em princípio, dado pelo valor médio do intervalo de tempo que decorre desde que uma partícula de água entra no estuário, até sair pela secção que estabelece a fronteira com o mar. O tempo de residência é obtido pela razão entre o volume do sistema estuarino e o valor médio do caudal de renovação. O caudal médio de renovação através da secção de fronteira com o mar, depende dos mecanismos que causam mistura da água do estuário com a água do mar. A importância relativa dos mecanismos de transporte para a renovação de água depende pois das características de cada estuário.

Quando a razão entre o caudal doce e o prisma de maré não é muito pequena, a causa principal de renovação de água é o caudal doce que atravessa o estuário. Quando a relação entre o caudal doce e o prisma de maré é muito pequena, então a renovação de água depende da organização do campo de correntes através da secção de ligação do estuário com o oceano e das condições de mistura fora do estuário.

#### 2.1.5.1 Renovação Durante um Ciclo de Maré

Parte da água que entra no estuário durante a enchente corresponde a água que saiu do estuário em vazantes anteriores. A parte restante é água oceânica e constitui o volume

disponível para diluição de poluentes no estuário. A razão entre o volume de água do oceano e o volume total da enchente é principalmente determinada pelas correntes no litoral adjacente ao estuário. Essas correntes são devidas ao fluxo e refluxo de marés e ainda a correntes ao longo da costa.

A razão de renovação pode ser avaliada por um balanço de salinidade no estuário, admitindo que a salinidade da água do estuário é diferente da salinidade do oceano, e que estas podem ser consideradas estacionárias no tempo. Dividindo o volume da enchente ( $V_f$ ) em volume reentrado ( $V_{fe}$ ) com uma salinidade da vazante ( $S_e$ ), e em volume de água do oceano ( $V_o$ ) com a salinidade do oceano ( $S_o$ ), e fazendo balanços de volume e de salinidade na enchente, obtém-se uma relação entre o volume de água renovado e a diferença entre as salinidades médias na enchente ( $S_f$ ) e na vazante:

$$V_o = \frac{S_f - S_e}{S_o - S_e} V_f$$

#### 2.1.5.2 Renovação em Processos de Longo Termo

A circulação residual provocada pela maré, pelo vento e pela descarga de água proveniente de rios provocam renovação da água contida no estuário. As variações periódicas do volume contido no estuário devidas à desigualdade quinzenal da maré ou a variações sazonais do campo de pressão atmosférica também dão origem à renovação de água. Neste caso é natural que todo o volume movimentado seja renovado, já que se torna improvável o retorno de água num ciclo longo.

## 2.2 PROPAGAÇÃO DA MARÉ NA RIA

A onda de maré propaga-se na costa ocidental Portuguesa com um atraso médio

próximo de 2 horas em relação à passagem da Lua pelo meridiano de lugar. As componentes harmónicas mais importantes têm período semi-diurno, dando origem a marés semi-diurnas com pequena desigualdade diurna, devida às componentes de período diurno. As marés de sizígia tem uma amplitude próxima de 3 metros enquanto que as marés de quadratura têm aproximadamente metade dessa amplitude.

À entrada da Ria, a onda de maré apresenta características locais que denotam o aumento do intervalo Lua - maré e a redução de amplitude, que tem o valor mínimo observado na costa ocidental Portuguesa (INSTITUTO HIDROGRÁFICO, 1990).

O quadrado da velocidade de propagação da onda de maré é proporcional à profundidade. Na Ria, as profundidades são muito reduzidas e a superfície molhada dos canais é muito extensa. A importância da dissipação de energia por atrito com o leito não favorece a formação de ondas estacionárias, resultantes da interferência da onda incidente com as ondas refletidas no interior. Em consequência, as características gerais da onda de maré na Ria são as de uma onda progressiva amortecida: a amplitude diminui e o atraso de fase aumenta durante a propagação.

### 2.2.1 OBSERVAÇÕES DA MARÉ NA RIA

O Instituto Hidrográfico realizou, em 1987 e 1988, observações de alturas de maré em marégrafos instalados em 31 locais distribuídos por toda a Ria. Para 27 das séries foi realizada a análise harmónica de maré, tendo sido obtidos as componentes mais significativas que permitem realizar a síntese das marés nesses locais. Os resultados obtidos constam de vários relatórios produzidos pelo Instituto Hidrográfico. Um resumo desta informação foi objecto de um relatório elaborado por COSTA (1990). Foram obtidos nestes relatórios os valores das constantes harmónicas e dos níveis médios observados, o que permite fazer a síntese das marés num conjunto de locais cobrindo toda a Ria. Um resumo das características das marés nesses locais foi compilada dos

relatórios já mencionados e consta da Tabela 2.1. Os marégrafos cuja designação está a negrito são aqueles em que as séries de alturas de maré são mais longas.

A harmónica semi-diurna lunar  $M_2$  é em todos os marégrafos a componente mais importante. Os valores indicados na Tabela 2.1 para a sua amplitude e para a diferença de fase em relação à barra, são representativos das características médias das marés na Ria. Estes valores mostram que a propagação da onda de maré na Ria tem características gerais de uma onda progressiva amortecida. Constata-se porém que há zonas em que a amplitude se mantém, embora a diferença de fase aumente - casos da bacia do Laranjo, do canal de Ihavo e da parte norte do canal de Ovar.

Os níveis médios indicados na Tabela 2.1 correspondem à média dos níveis médios diários observados nos marégrafos. COSTA (1990) chama a atenção para a não simultaneidade das observações e para o facto da maior parte das séries temporais ser curta, o que se traduz por intervalos de confiança para estas médias relativamente largos.

Na Tabela 2.1 optou-se por apresentar os valores da amplitude média e do nível médio arredondados para o decímetro, a fim de realçar as variações mais significativas. Ressalta assim um padrão regular de variação do nível médio, que aumenta da barra para os extremos dos canais cerca de 0,5 metro. Nota-se que esse aumento é mais rápido próximo da barra.

Os valores indicados na Tabela 2.1 para a preia-mar (P.M.) e para a baixa-mar (B.M.) correspondem a: alturas médias das marés vivas (v.), obtidas pela soma das semi-amplitudes da  $M_2$  e da  $S_2$  ao nível médio; alturas médias das marés mortas (m.), obtidas pela soma das diferenças entre as semi-amplitudes da  $M_2$  e da  $S_2$  ao nível médio. Verifica-se que as alturas médias da preia-mar são idênticas em toda a Ria, enquanto que as alturas médias da baixa-mar aumentam significativamente com a distância à barra. Próximo da barra observam-se grandes diferenças entre as alturas da baixa-mar

nas marés vivas e nas marés mortas, enquanto nos pontos mais afastados essas diferenças não existem.

Tabela 2.1 Características da maré na Ria: amplitude média, diferença de fase e níveis médios. Os valores foram compilados do relatório elaborado por COSTA (1990).

LOCAL	AMPL.M <sub>2</sub> (m)	DIFER.M <sub>2</sub> (min.)	NÍVEL MÉDIO (m)	P.M. (m)		B.M. (m)	
				v.	m.	v.	m.
Barra	1,9	0	2,1	3,4	2,8	0,9	1,5
Sacor	1,7	25	2,2	3,3	2,8	1,0	1,6
P.Cais 2	1,7	35	2,3	3,4	2,8	1,1	1,6
Lota	1,7	50	2,2	3,3	2,8	1,1	1,6
Parrachil	1,5	56	2,4	3,4	2,9	1,3	1,7
R.Novo P.	1,4	74	2,4	3,3	2,9	1,4	1,7
Cacia	1,2	96	2,5	3,3	2,8	1,7	2,0
Cais Branco	1,2	119	2,4	3,2	2,8	1,6	1,6
V.Rainha	1,1	139	2,3	3,2	2,8	1,7	1,7
Salreu	1,1	140	2,4	3,3	2,8	1,8	1,8
S.Jacinto	1,7	23	2,2	3,4	2,8	1,1	1,6
Muranzel	1,3	74	2,4	3,3	2,8	1,6	1,7
Torreira	1,0	126	2,5	3,2	2,8	2,0	1,9
Varela	0,8	172	2,5	3,1	2,7	2,1	2,1
Carregal	0,7	244	2,6	3,1	2,7	2,2	2,1
Ovar	0,7	238	2,5	3,0	2,6	2,1	2,1
Pardilhó	0,7	230	2,6	3,0	2,7	2,2	2,2
Costa Nova	1,8	33	2,2	3,4	2,8	1,1	1,7
Vagueira	1,0	103	2,4	3,4	2,8	2,1	1,9
Vista Alegre	1,0	136	2,5	3,1	2,8	1,8	1,8
C.Pedra	1,0	165	2,5	3,2	2,8	1,9	1,9
Boco	1,0	169	2,5	3,2	2,8	1,9	1,9

A variação do nível de preia-mar no ciclo de marés vivas - marés mortas, quando não é acompanhada por variação análoga do nível de baixa-mar, resulta numa variação do nível médio diário com um ciclo quinzenal. Esta variação observa-se de facto em algumas séries de valores de nível médio diário apresentadas nos relatórios do Instituto

Hidrográfico. O conhecimento do nível médio e das suas variações em cada local é essencial no cálculo de volumes de água nos canais a partir da síntese harmónica de marés.

## 2.2.2 VARIACÃO DOS NÍVEIS MÉDIOS

Na Figura 2.2 estão representadas as variações quinzenal e sazonal dos níveis médios nos marégrafos mais significativos, em função da sua distância à barra. No gráfico da esquerda, a curva superior é relativa à média dos níveis médios diários dos 3 dias que se seguem às sizígias no período de Janeiro a Junho de 1988; a curva do meio corresponde às médias considerando todos os valores obtidos nesses marégrafos; a curva inferior é relativa à média dos 3 dias que se seguem às quadraturas no período de Janeiro a Junho de 1988. A comparação das médias de marés vivas com as médias de marés mortas, mostra que são significativamente diferentes (nível de confiança de 95%), com excepção da barra. Na Figura 2.2 estão também representados os intervalos de confiança (95%) destas médias.

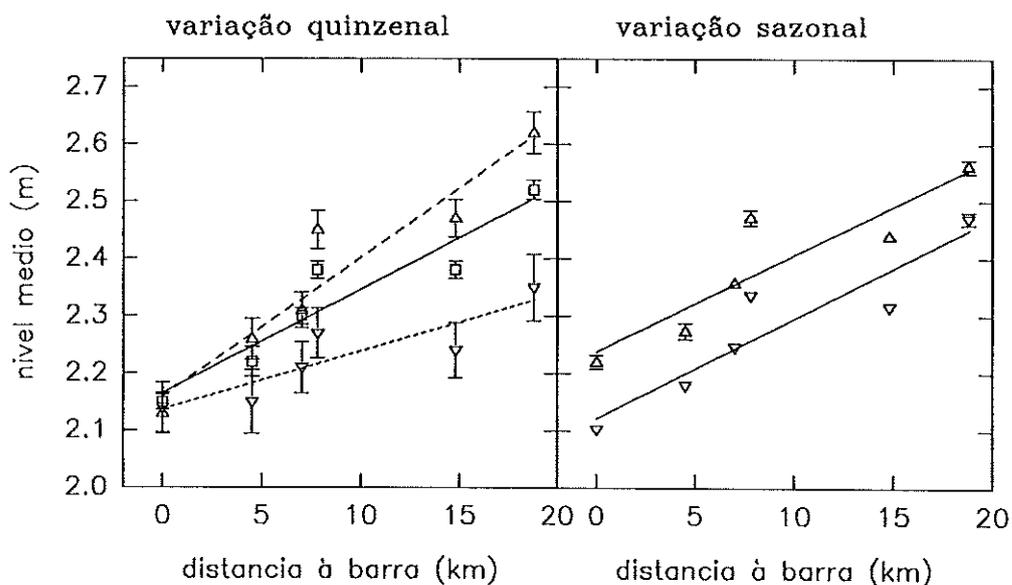


Figura 2.2. Variação quinzenal e sazonal dos níveis médios em função da distância à barra. Nos gráficos estão representadas as médias, os intervalos de confiança (95%) e as rectas de regressão das séries indicadas no texto.

No gráfico da direita na Figura 2.2 representa-se a variação sazonal dos níveis médios. A curva superior corresponde ao semestre de inverno (Outubro a Fevereiro); a curva inferior corresponde ao semestre de verão (Março a Setembro). Factores meteorológicos podem explicar a variação semestral observada nos níveis médios.

O nível médio aumenta com a distância à barra de forma aproximadamente linear para todos os locais em que foram realizadas observações. A variação de nível médio no ciclo quinzenal traduz-se por uma variação do declive da recta de regressão (variação no interior do sistema). A variação sazonal traduz-se por uma variação do nível na origem das distâncias (variação na fronteira com o mar). Na Tabela 2.2 estão reunidos os dados e resultados destas regressões.

Tabela 2.2 Variação dos níveis médios (valores em metros). Médias dos períodos: Março / Setembro; Outubro / Fevereiro; Janeiro / Junho - marés vivas; Janeiro / Junho - marés mortas; ano: 1887/1988.

LOCAL	DIST. (km)	MÉDIAS SAZONAIS		M.VIVAS M.MORTAS		ANO 1987/88
		Mar./Set.	Out./Fev.	Jan./Jun.	Jan./Jun.	
Barra	0	2,10	2,22	2,13	2,14	2,15
Costa Nova	4,5	2,18	2,27	2,26	2,15	2,22
P.Cais 2	7,0	2,25	2,36	2,31	2,21	2,30
Parrachil	7,8	2,34	2,47	2,45	2,27	2,38
Cais Bico	14,8	2,32	2,44	2,47	2,24	2,38
Varela	18,8	2,47	2,56	2,62	2,35	2,52
REGRESSÃO DO NÍVEL MÉDIO COM A DISTÂNCIA À BARRA						
Intersecção (m)		2,12	2,24	2,16	2,14	2,17
Declive (m/km)		0,017	0,017	0,024	0,010	0,018

## 2.3 VOLUMES, CAUDAIS E PERCURSOS DE MARÉ

A diferença de volume associada a duas fases distintas do ciclo de maré, separadas por um determinado intervalo de tempo, é um prisma de maré. Percurso ou excursão de maré é a deslocação a que as partículas de água estão sujeitas durante o ciclo de maré. Sendo conhecido o volume de água existente nos canais em vários momentos do ciclo de maré podem-se calcular os caudais médios que correspondem às diferenças de volume. Neste princípio baseiam-se alguns métodos normalizados de medição de caudais de maré, que especificam procedimentos de cubagem (BRITISH STANDARDS INSTITUTE, 1973).

### 2.3.1 REPRESENTAÇÃO NUMÉRICA DA BATIMETRIA DOS CANAIS DA RIA

A determinação do volume de água existente num canal, faz-se através da avaliação do volume limitado pelo leito e por um plano com uma certa elevação, admitindo que, em pequenas distâncias, a superfície livre da água é horizontal. Um modo prático de calcular o volume que pode ser ocupado por água num canal com forma irregular, consiste em representar esse volume por um conjunto de elementos prismáticos de base quadrada. Esta prática, designada por cubagem, é de uso corrente na representação da batimetria de fundos irregulares, para aplicação de modelos matemáticos hidrodinâmicos. De facto esta técnica permite fazer uma representação discreta do domínio com a propriedade de invariância do volume total, desde que as dimensões da malha permitam resolver a irregularidade das formas.

Para se realizar a representação da batimetria por um conjunto de elementos de volume regulares, é atribuído a cada elemento uma cota para a sua base que corresponda à cota média dos pontos do leito incluídos neste elemento. Este procedimento pode ser facilmente implementado por cálculo automático, permitindo ainda fazer a discretização da fronteira do domínio.

Sempre que o plano definido pela superfície livre varia de cota com o tempo, como acontece quando há marés, e quando a forma da bacia inclui áreas que pela variação de nível passam a ser incluídas ou excluídas do domínio, designadas por áreas entre-marés, então o cálculo de cotas médias só pode ser feito sob hipóteses restritivas. Por exemplo, selecionando dimensões horizontais para os elementos de volume tais que em cada elemento a situação anterior seja irrelevante. Na prática esta solução pode conduzir a muitos elementos de pequena dimensão. Outra possibilidade é alterar a geometria no plano horizontal de modo a ser possível criar áreas maiores que sejam totalmente incluídas ou excluídas no domínio e nas quais seja válido o cálculo da cota média.

No caso da Ria, devido à sua morfologia e também à variação de amplitude de maré, a maior parte das áreas entre-marés situa-se na zona central adjacente à barra. Nos canais de desenvolvimento norte-sul as áreas entre-marés são menos significativas. De acordo com estas características e atendendo às considerações feitas sobre a cubagem de uma bacia, concluiu-se ser necessário para representar a zona central da Ria uma malha de elementos de base quadrada, com 50 metros de lado, e ainda realizar algumas alterações na geometria dos canais mais estreitos. Em relação aos canais de desenvolvimento norte-sul foi admitido como suficiente o uso de malhas de elementos de base quadrada com 100 metros de lado.

A base de dados batimétricos em que se baseou a cubagem do leito da Ria foi obtida no Levantamento Hidrográfico da Ria, realizado pelo Instituto Hidrográfico em 1988, e que inclui as áreas situadas até 2,5 metros acima do Zero Hidrográfico (Z.H.). Esta informação foi complementada na zona central da Ria por cotas obtidas do Levantamento Aero-Fotogramétrico realizado em 1988, o que tornou possível incluir as áreas situadas até 3 metros acima do Z.H. A representação gráfica das malhas resultantes da cubagem da Ria consta da Figura 2.3.

### 2.3.2 CÁLCULO DE VOLUMES NOS CANAIS DA RIA

Os volumes contidos nos canais da Ria ( $V$ ) foram calculados com base na malha regular que representa a batimetria desses canais ( $Z$ ), após se ter definido o nível do plano que corresponde à superfície livre da água. O nível ( $\zeta$ ) deste plano é calculado nos pontos em que se realizaram observações de maré ( $\zeta_M$ ) por síntese harmónica e adicionando às elevações obtidas os respectivos níveis médios observados. Entre estes pontos o nível da superfície livre é estimado por interpolação proporcional à distância ( $x$ ) entre eles.

Seguindo esta metodologia de cálculo não se fica dependente da existência de observações de alturas de maré cobrindo simultaneamente todo o domínio. Podem-se seleccionar para os cálculos, ciclos de maré representativos de várias amplitudes, ou ainda levar em conta as datas de realização de observações de campo. Estes cálculos foram realizados por um programa que usa o seguinte esquema de interpolação:

$$\zeta_x = \zeta_M + \frac{(x - x_M)}{(x_{M+1} - x_M)} \times (\zeta_{M+1} - \zeta_M)$$
$$V_x = \sum_0^{x-1} V_x + \sum_0^{y_H} [(\zeta_x + z_{x,y}) \times (\Delta x)^2]$$

O cálculo de volumes foi feito após divisão da malha que representa a batimetria nos ramos que foram identificados no ponto 1.1. Nos canais de Ovar, Mira e Ilhavo os volumes foram calculados ao longo de eixos Norte-Sul. Nos canais da zona central foi necessário considerar sub-bacias com desenvolvimento quer Norte-Sul quer Este-Oeste, designadamente:

- O canal entre a barra e Aveiro (eixo E-W).
- O canal para norte de Aveiro, Veia (eixo N-S).
- O canal do Espinheiro até à Murtosa (eixo N-S).
- O canal do rio Vouga (eixo E-W).
- O canal da Veia da Testada (eixo E-W).
- A Bacia do Laranjo (eixo E-W).

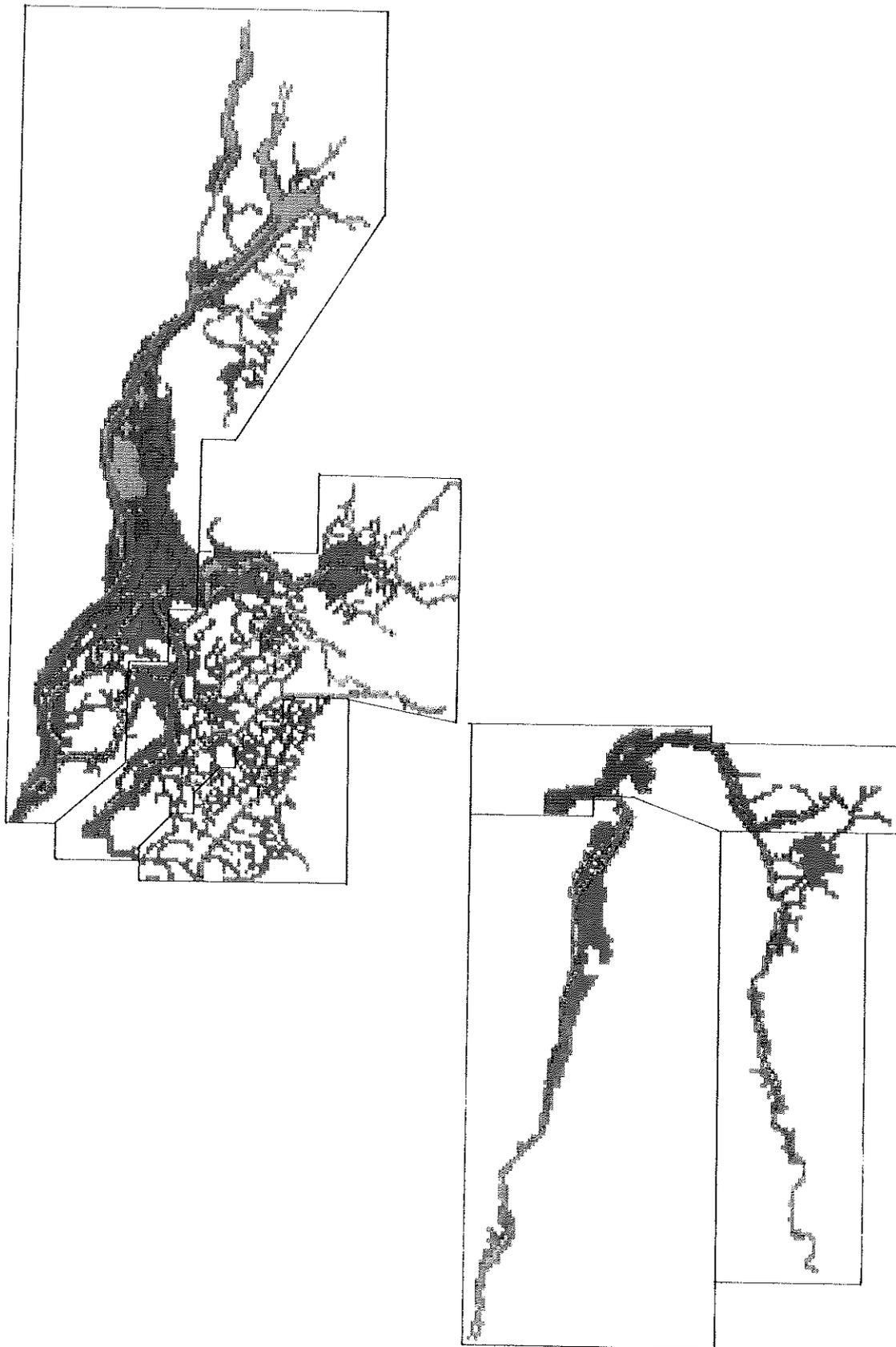


Figura 2.3 Classificação gráfica das profundidades médias dos elementos de volume que representam a batimetria da Ria.

### 2.3.3 CÁLCULO DE CAUDAIS DE MARÉ

Considere-se o esquema da Figura 2.4 que representa em corte longitudinal um canal com duas fronteiras abertas: a de montante recebe um caudal permanente  $R$  e a de jusante recebe um caudal variável  $Q$ . Admitindo que a superfície livre ao longo do canal passa de  $A$  para  $B$  num intervalo  $\Delta t$ , conclui-se por um balanço de volume que o caudal médio no intervalo  $\Delta t$  na secção de jusante é:

$$Q = \frac{V_B - V_A}{\Delta t} - R$$

Por este procedimento calculam-se os caudais médios para intervalos sucessivos do ciclo de maré. Admitindo que o caudal do rio ( $R$ ) é muito pequeno comparado com a variação de volume no canal, então o sentido do caudal  $Q$  inverte-se duas vezes no ciclo de maré. Os momentos em que ocorrem as inversões do caudal médio na secção de jusante correspondem aproximadamente aos momentos em que é máximo ou mínimo o volume ao longo do canal. Deste modo foi possível determinar os momentos de inversão de maré nos vários canais da Ria, tendo-se observado diferenças de tempo variáveis em relação aos momentos de preia-mar e de baixa-mar na secção de jusante.

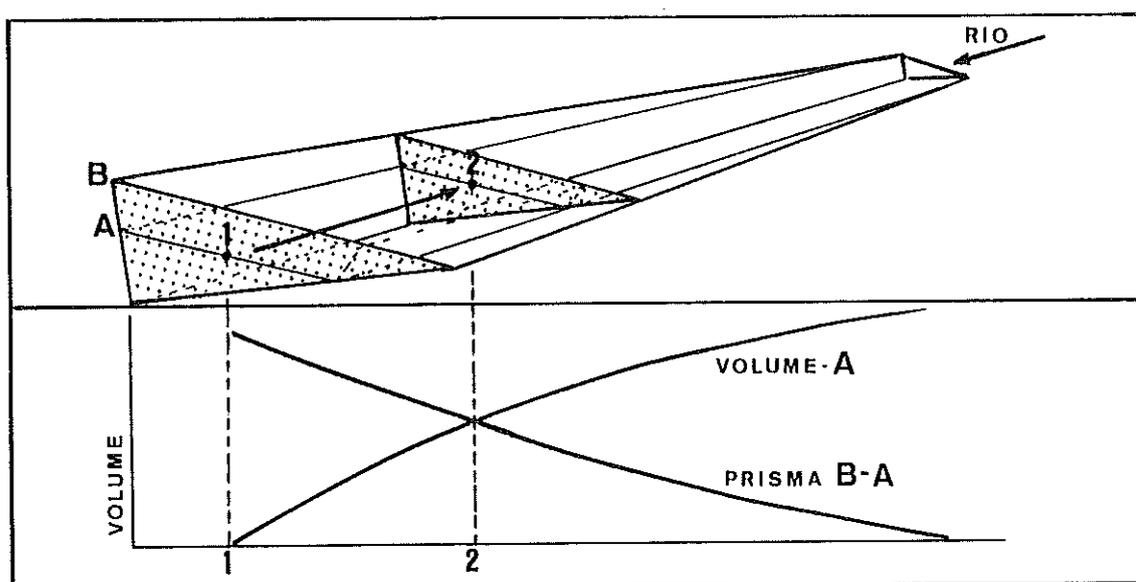


Figura 2.4. Esquema em corte longitudinal de um canal de estuário representando a divisão em segmentos correspondentes aos percursos de maré.

#### 2.3.4 CÁLCULO DE PRISMAS E PERCURSOS NO CICLO DE MARÉ

Começando por admitir que o escoamento provocado pelas marés é unidimensional, então o conhecimento dos momentos de inversão da maré permite aplicar os conceitos de prisma de maré e de percurso ou excursão de maré a canais em que a maré se propaga com atraso significativo. No caso destes canais, os momentos de baixa-mar e preia-mar devem ser substituídos pelos correspondentes momentos de inversão de caudal de maré na boca do canal. Deste modo, o prisma de maré corresponde ao volume de água que entra no canal entre o momento de inversão do caudal de vazante até ao momento de inversão do caudal de enchente.

A determinação dos percursos de maré ao longo dos canais é feita admitindo que as partículas de água situadas na boca do canal no início da enchente (secção 1 na Figura 2.4), se deslocam até à secção 2 no fim da enchente. Se não ocorrer mistura durante este processo, então todas as partículas de água presentes entre 1 e 2 no início estarão para além de 2 no fim. Conclui-se que o volume que corresponde a essas partículas, ou seja o volume no início entre 1 e 2 ( $V_2$ ) é igual ao prisma de maré ( $P_2$ ) a montante da secção 2.

Como se viu é possível calcular quer o volume existente ao longo de um canal num certo momento, quer o prisma de maré em qualquer secção, podendo-se determinar os pontos ao longo do canal em que esses volumes se igualam. O procedimento adoptado está representado graficamente na Figura 2.4.

Nos casos em que as áreas entre marés são significativas, embora o escoamento seja principalmente ao longo do canal, tem de se considerar que uma parte das partículas de água presentes ao longo do canal na inversão do caudal de vazante, se vai deslocar lateralmente para as áreas entre marés, alterando a relação que se obteve entre a variação de volume e prisma de maré ao longo do canal:

$$P_2 = V_2 - f_1 \times V_2$$

A fracção de volume que se desloca lateralmente ( $f_1 V_2$ ) não pode ser incluída no volume que corresponde ao prisma de maré  $P_2$ , o que implica que as partículas que se deslocam para montante tenham um percurso de maré mais longo. A existência de áreas entre-marés implica uma importante variação dos percursos de maré de partículas inicialmente próximas, ou seja traduz-se num aumento da mistura longitudinal.

### 2.3.5 EXEMPLO DE CÁLCULO DE VOLUMES E CAUDAIS DE MARÉ

Tomando as marés do dia 24 de Maio de 1991 como representativas de marés de amplitude média (amplitudes na barra de 1,8 e 1,9 metros), calcularam-se os volumes ao longo dos canais da Ria e os caudais nas secções de boca, usando um programa de cálculo automático baseado nos procedimentos e princípios indicados nos pontos anteriores. O esquema de organização destes cálculos é indicado na Figura 2.5.

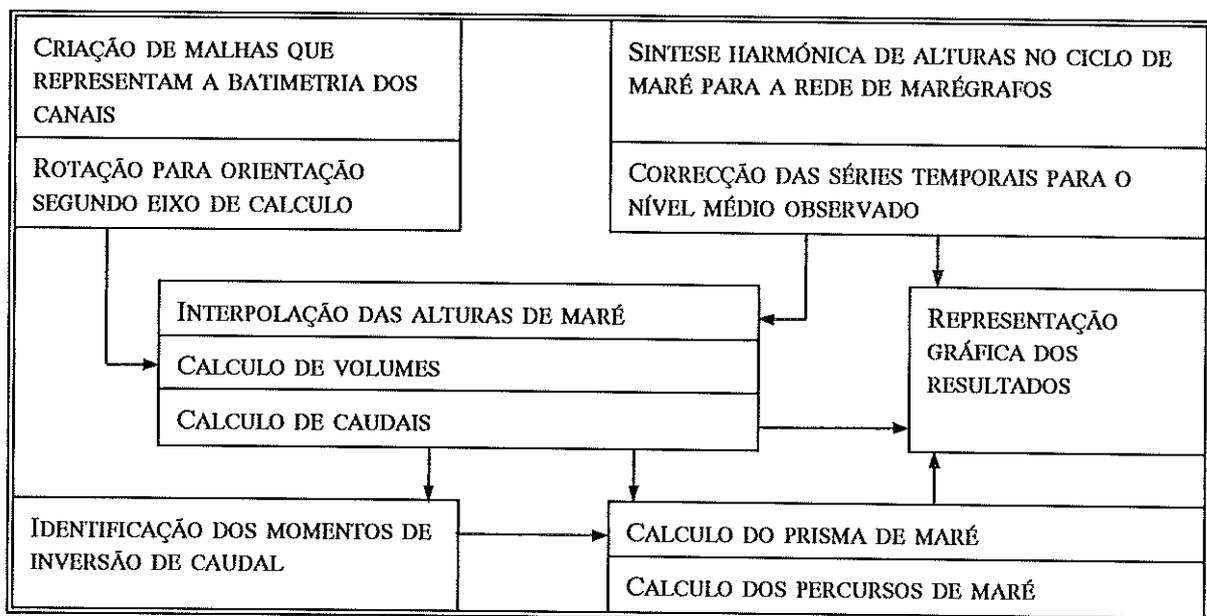


Figura 2.5 Esquema da organização do cálculo de volumes, caudais e percursos de maré.

Nos gráficos da Figura 2.6 estão representadas séries de valores de caudal de maré calculados em algumas secções dos canais da Ria, para as marés do dia 24/5/91. As secções em que se obtiveram estes resultados estão identificadas na Figura 2.7. As curvas do gráfico da esquerda, na Figura 2.6, indicam que a inversão das correntes de maré ocorre com pequenas diferenças de tempo no canal entre a barra e Aveiro. Pelo contrário, as curvas do gráfico da direita revelam importantes diferenças de tempo nos momentos de inversão de correntes entre os vários ramos da Ria.

Um resumo das diferenças temporais entre preia-mar, baixa-mar e correspondentes inversões de corrente consta da Tabela 2.3. Os volumes acumulados nos canais nos momentos de inversão de correntes na Barra são indicados na Tabela 2.4.

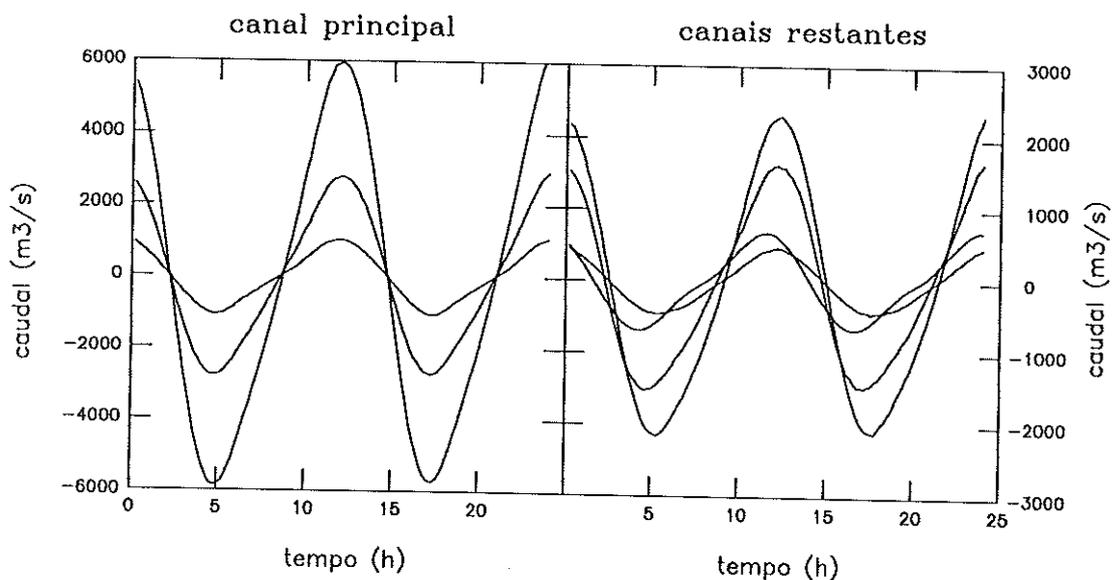


Figura 2.6. Caudais de maré calculados com a maré de 24-Maio-1991. Canal principal: barra, Sacor, P. Cais 2. Canais restantes: Ovar, Espinheiro, Mira, Ilhavo (ordem decrescente dos caudais máximos).

Analisando os resultados referentes ao canal entre a Barra e Aveiro nota-se que a inversão de corrente de maré é quase simultânea ao longo deste canal, embora a vazante seja em média 0,4 horas mais longa que a enchente. A alteração da forma da curva de caudal que essa diferença implica acentua-se entre a P. Cais 2 e a Lota, onde a vazante é mais intensa que a enchente. Comparando as curvas de caudal nas secções dos canais que derivam do anterior, tornam-se salientes diferenças temporais dos

respectivos momentos de inversão de corrente. O primeiro canal em que se observa a inversão de corrente de maré é o de Mira, enquanto que no de Ovar ela só ocorre passado 1 hora. Em todos os canais a vazante é mais longa 0,4 horas que a enchente.

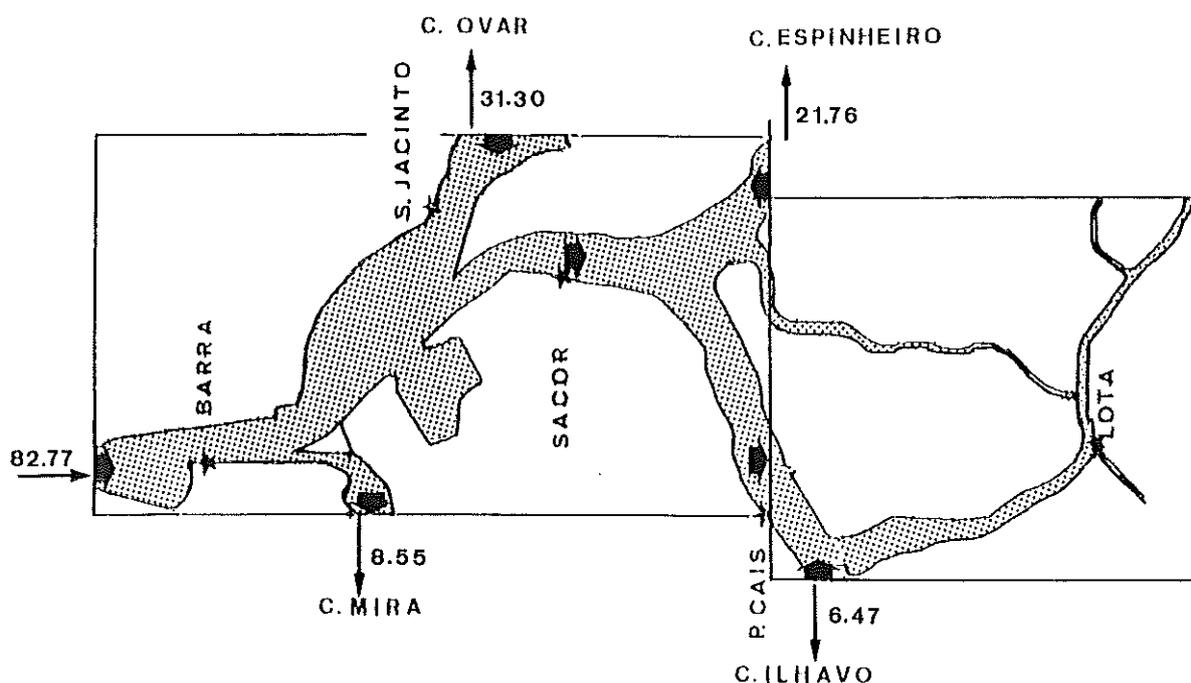


Figura 2.7. Esquema do canal principal indicando os prismas de maré calculados para a maré de 24-Maio-1991 (Mm<sup>3</sup>).

Comparando as curvas de caudal com as curvas de altura de maré usadas nos cálculos dos caudais observam-se diferenças de tempo entre a preia-mar ou a baixa-mar e a correspondente inversão de maré. Estas diferenças, calculadas relativamente aos momentos de preia-mar e baixa-mar e expressas em graus de diferença de fase de uma maré média, estão resumidas na Tabela 2.3. A diferença de fase entre elevação de maré e corrente de maré é máxima no canal entre a Barra e S. Jacinto, diminuindo para o interior de todos os canais. Esta variação pode ser interpretada como revelando o aumento da importância relativa de ondas refletidas no extremo dos canais, que dão origem a ondas de maré com uma componente estacionária.

Tabela 2.3. Atrasos relativos à baixa-mar (BM) e preia-mar (PM) no marégrafo da Barra, da altura e corrente de maré em vários locais.

LOCAL	PM (h)	INVERSÃO (h)	BM (h)	INVERSÃO (h)	DIF. FASE (°)
Barra	0,0	1,2	0,0	1,6	49,4
Sacor	0,2	1,2	0,5	1,6	58,1
P. Cais 2	0,5	1,2	0,6	1,5	66,8
Lota	0,9	1,1	0,8	1,1	81,3
Parrachil	0,8	1,4	1,0	1,8	69,7
Cais do Bico	1,5	1,7	2,0	2,4	81,3
S. Jacinto	0,3	1,6	0,4	2,1	46,5
Muranzel	1,0	2,0	1,2	2,7	52,3
Varela	2,4	2,8	3,2	3,8	75,5
Costa Nova	0,4	0,8	0,6	1,4	72,6
Vagueira	1,0	1,0	2,4	2,6	87,1
Vista Alegre	2,1	2,4	2,6	2,9	81,3

### 2.3.6 EXEMPLO DE CÁLCULO DE PRISMAS E PERCURSOS DE MARÉ

Os momentos de inversão de corrente de maré determinados para as marés de 24 de Maio de 1991 no canal entre a Barra e Aveiro, vão corresponder às fases do ciclo de maré em que o volume na Ria é máximo ou mínimo, desde que se admita que o volume de água transportado pelos rios é pequeno. De acordo com os dados da Tabela 2.4, a diferença entre o volume existente nos canais da Ria 1,2 horas após a preia-mar na Barra e o volume existente nesses canais 1,6 horas após a baixa-mar, corresponde ao prisma de maré da Ria, que numa maré média é cerca de 80 milhões de m<sup>3</sup>. A distribuição do prisma de maré pelos vários canais é indicada na Figura 2.7. Os

volumes de prisma de maré comparados com os volumes mínimos nos canais, têm valores semelhantes no total da Ria e também no canal de Ovar, enquanto que nos restantes canais o volume de prisma é aproximadamente 2 vezes o volume mínimo.

Tabela 2.4. Diferenças de tempo para a inversão da corrente na preia-mar e na baixa-mar. Volumes acumulados nos canais nos momentos de inversão de correntes na Barra.

CANAL	ATRASO - PM (h)	ATRASO - BM (h)	VOLUME EM BM (Mm <sup>3</sup> )	PRISMA (Mm <sup>3</sup> )
Ria (total)	1,2	1,6	78,42	82,77
Espinheiro	1,3	1,7	10,19	21,76
Ovar	1,6	2,1	30,38	31,30
Mira	0,6	1,0	3,40	8,55
Ilhavo	1,5	1,9	2,81	6,47

Usando um programa de cálculo que aplica o princípio ilustrado na Figura 2.5, e não considerando o efeito das áreas entre-marés, foram calculados os percursos que as partículas de água da Ria realizam ao longo dos canais entre os momentos que correspondem à inversão de correntes no canal principal. No mapa da Figura 2.8 representam-se os limites dos percursos realizados por partículas que no início do ciclo se encontram próximas da boca dos vários canais. A distância correspondente a esses percursos situa-se entre 5 e 7 km, o que equivale a uma velocidade média no ciclo de 0,2 a 0,3 m/s.

## 2.4 CORRENTES RESIDUAIS, MISTURA E RENOVAÇÃO DA ÁGUA

Na Tabela 2.4 são postas em evidência as diferenças de tempo calculadas entre a preia-mar ou a baixa-mar e os correspondentes momentos de inversão das correntes. A não simultaneidade de inversão de correntes, que é devida a diferenças de velocidade na propagação da onda de maré, vai promover a mistura de água ao longo dos canais e entre os vários canais.

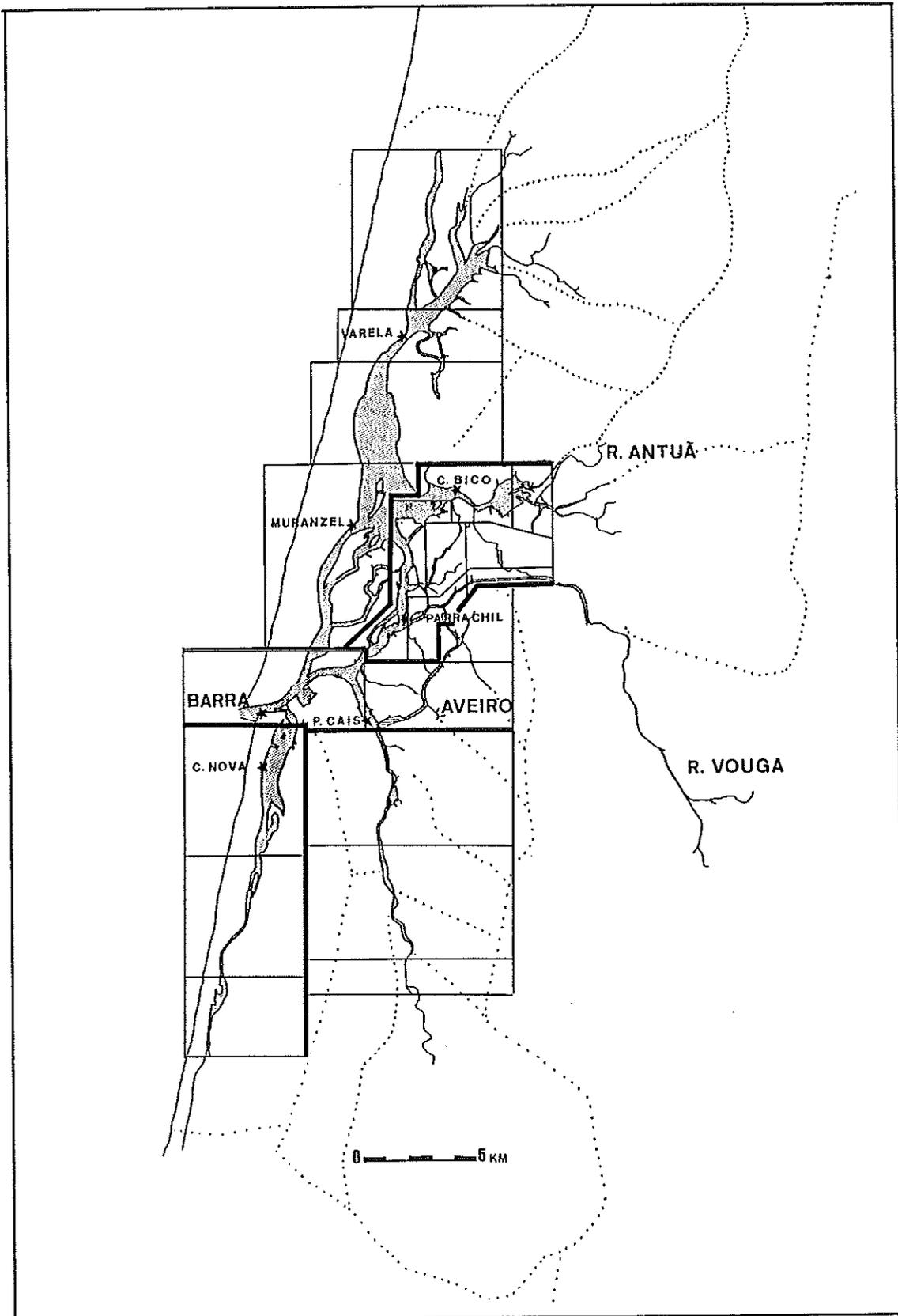


Figura 2.8. Limites das bacias correspondentes aos vários canais da Ria (linhas a grosso). Divisão em segmentos correspondentes aos percursos de maré (linhas finas).

Na Figura 2.9 indicam-se os volumes que são transferidos em várias secções ao longo do canal principal, entre o momento de inversão da corrente de vazante no canal de Mira e o momento de inversão de corrente de vazante no canal de Ovar.

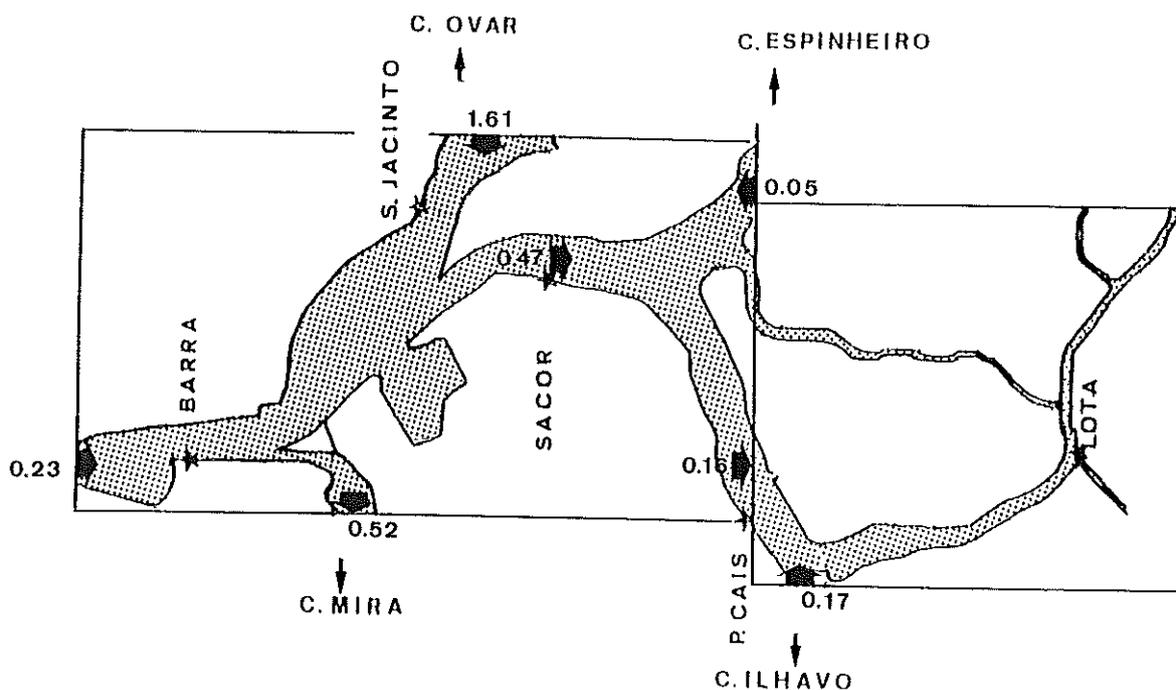


Figura 2.9. Volumes transferidos (Mm<sup>3</sup>) entre os canais no intervalo entre a inversão de vazante no canal de Mira e a inversão de vazante no canal de Ovar.

Constata-se que a água que sai do canal de Ovar no fim da vazante se acumula no canal principal, sendo transportada para os restantes canais durante a enchente. Deste modo aumenta a mistura de água proveniente de canais diferentes e aparentemente bem separados como são o canal de Mira e os restantes canais da Ria.

Um outro fenómeno posto em evidência na análise da propagação da maré na Ria foi a variação de nível médio entre as marés vivas e as marés mortas. Esta variação de nível médio implica uma variação do volume médio com igual periodicidade, a que está associado um campo de velocidade residual.

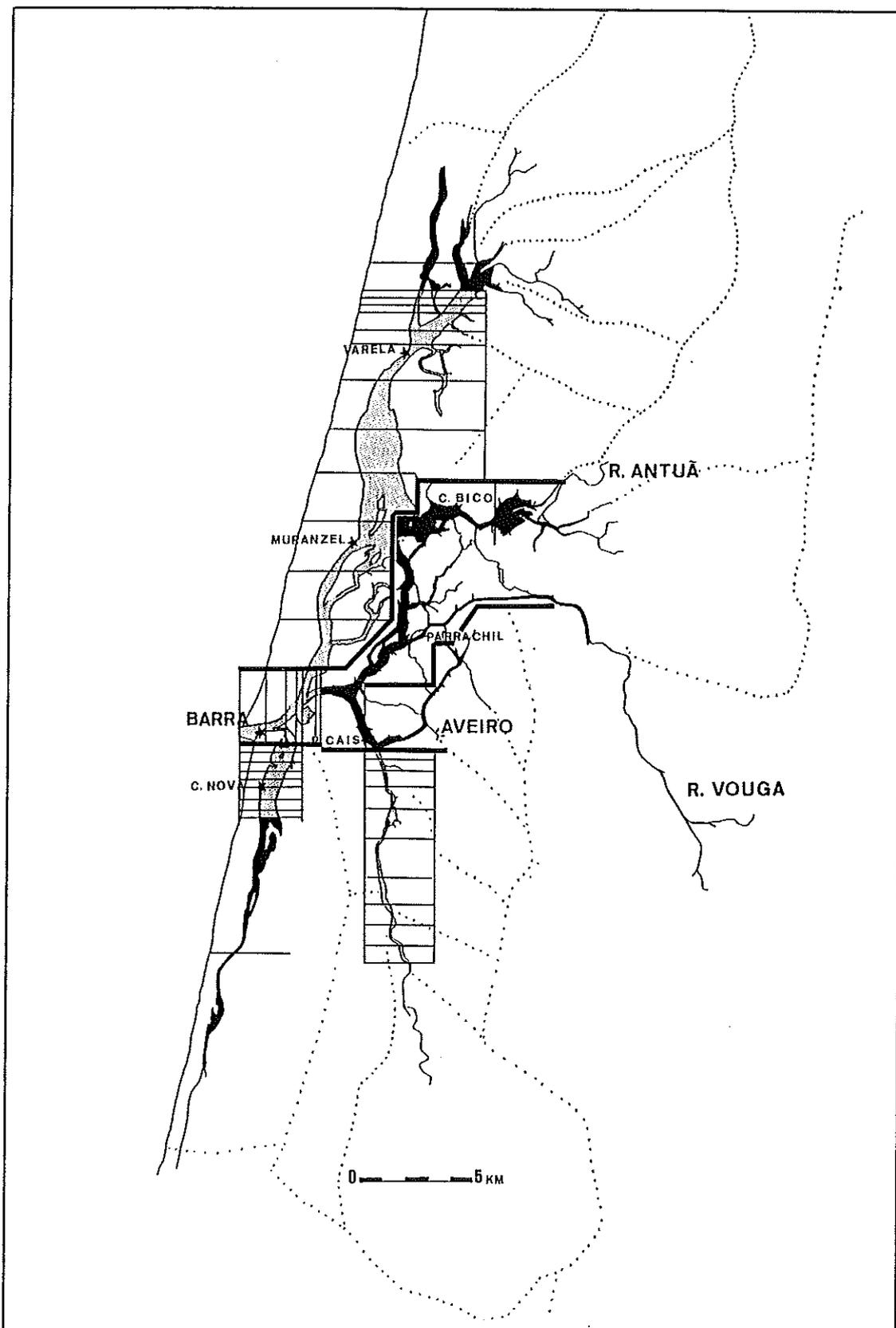


Figura 2.10. Limites dos deslocamentos residuais provocados pela variação de volume com período quinzenal (linhas finas). A cheio as áreas em que a variação de volume quinzenal corresponde ao volume de água transportada pelos rios.

O volume de água que entra e sai da Ria em cada ciclo de maré, só em parte é constituído por água que não entrou na Ria em ciclos anteriores. Pelo contrário numa variação de ciclo quinzenal é pouco provável o retorno de água, e o volume movimentado corresponde a renovação de água. Foi calculado o volume correspondente à variação de nível médio indicada na Tabela 2.2, aplicando a metodologia descrita para o cálculo do prisma de maré. Os percursos associados a essa variação de volume foram igualmente determinados, tendo em atenção que uma parte do volume que se acumula entre a maré morta e a maré viva deve corresponder a água transportada pelos rios afluentes nesse período. Os resultados estão representados graficamente na Figura 2.10, que mostra que os maiores percursos num período quinzenal, são provocados pelo caudal dos rios. Nos canais de Ovar e de Ilhavo, em que os caudais doces são pequenos, já os deslocamentos devidos à variação de volume quinzenal são relativamente mais importantes.

A variação total de volume no ciclo quinzenal é de aproximadamente 14 milhões de  $m^3$  a que corresponde o volume aproximado de 9 milhões de  $m^3$ , que é transportado pelos rios em meio ciclo. Comparando estes volumes conclui-se que o volume que é renovado em virtude da variação quinzenal de nível médio é significativo quando comparado com o volume transportado pelos rios no período a que se referem os cálculos, e que corresponde a um momento em que o caudal dos rios já é inferior ao caudal médio.

## 2.5 ACÇÃO DAS CORRENTES DE MARÉ NO TRANSPORTE DE PARTÍCULAS EM SUSPENSÃO

Os escoamentos que as marés provocam na Ria são, em resultado do atrito com o leito, fortemente turbulentos. As partículas presentes no leito da Ria são predominantemente finas, podendo ser transportadas em suspensão na água, desde que a intensidade da turbulência seja significativa. Contudo, as partículas finas estão sujeitas a agregação que

depende da natureza e concentração das partículas suspensas, bem como das condições físicas e químicas do meio aquático. Segundo PARKER (1988) podem ser considerados quatro estados de agregação das partículas finas coesivas: - suspensão homogénea; suspensão estratificada; leito de lamas fluidas; leito consolidado. Durante um ciclo de maré podem ocorrer algumas mudanças no estado de agregação das partículas em consequência da variação de velocidade nas inversões de maré. Estas variações de estado de agregação correspondem a variações da concentração de partículas em suspensão em vários níveis da coluna de água.

Numa primeira abordagem ao comportamento das partículas finas que podem ser transportadas em suspensão pela água da Ria, vai ser considerada a variação de velocidade dos escoamentos de maré. Aos caudais obtidos por cubagem correspondem velocidades médias de escoamento através de uma dada secção. Seleccionando secções que sejam representativas das características dos canais, podem ser calculadas as velocidades médias correspondentes. Na Figura 2.11 representam-se as velocidades médias calculadas para as marés de 24 de Maio de 1991 em várias secções dos canais da Ria, sendo negativos os valores que correspondem à vazante. Verifica-se que nas secções próximas da barra, os máximos de velocidade se observam na vazante, e são pouco mais intensos que os de enchente, sendo as curvas aproximadamente sinusoidais. No interior dos canais as curvas de velocidade apresentam-se deformadas e observam-se máximos na enchente. A capacidade de transporte em suspensão relaciona-se com a velocidade quadrática média no ciclo para cada secção, e a direcção predominante para o transporte depende da assimetria das curvas de velocidade.

Como nos extremos dos canais pode ainda ocorrer estratificação de densidade, predominando a corrente de enchente junto ao fundo, conclui-se que nessas áreas dos canais se reúnem condições para um transporte residual de partículas em suspensão na direcção dos extremos dos canais. Contudo, o perfil vertical da componente horizontal da velocidade, que por vezes também é alterado pela tensão do vento sobre a superfície, é importante para estudar o movimento das partículas depositadas no leito.

A assimetria das curvas de velocidade, que se conclui ser acentuada nos extremos de alguns canais, também contribui para o transporte médio de partículas na direcção dos extremos dos canais. Isto porque a inversão da corrente de vazante é mais rápida que a inversão da corrente de enchente, sendo o percurso das partículas na enchente maior que na vazante.

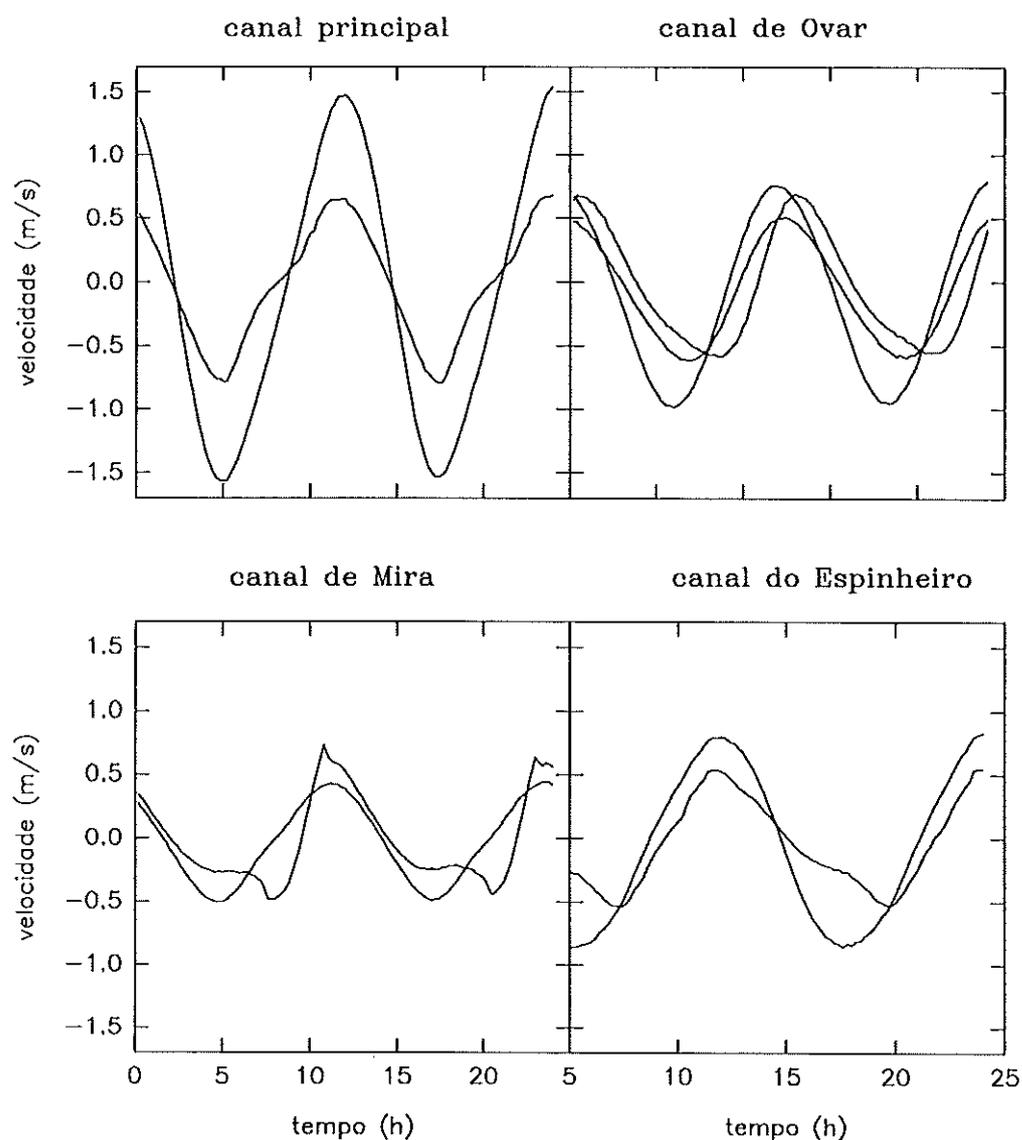


Figura 2.11. Velocidades médias calculadas para a maré de 24-Maio-1991 em secções próximas da barra, designadamente: Barra, S.Jacinto, Costa Nova, Espinheiro. A 2ª curva dos gráficos corresponde a secções no interior dos canais: Lota, Muranzel e Varela, Vagueira, Cais do Bico.

### 3. ESTUDO EXPERIMENTAL DO TRANSPORTE DE SUBSTÂNCIAS NA ÁGUA DA RIA DE AVEIRO.

#### 3.1 BALANÇO DE SUBSTÂNCIAS NA RIA

O balanço de massa de uma substância conservativa, com concentração  $c$ , presente no elemento de volume  $dV$  de um fluido incompressível é representado pela equação seguinte, em que  $D$  representa o coeficiente de difusão molecular. No caso do constituinte não ser conservativo, é preciso incluir também os termos que traduzem a intensidade das fontes e dos sumidouros.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = D \left( \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right)$$

Esta equação é denominada equação da advecção - difusão, pois mostra que os dois processos fundamentais que intervêm no transporte das substâncias conservativas, são o processo de advecção e o processo de difusão molecular. É evidente que a integração desta equação num fluido enfrenta dificuldades graves, já que o campo de velocidades é definido integrando um sistema de equações não lineares, com derivadas parciais (Equações de Navier - Stokes).

Quando se trata de escoamentos cíclicos, como os provocados pelas marés nos estuários, esta equação, juntamente com as equações da hidrodinâmica, pode ser simplificada mediante procedimento de médias no ciclo de maré. A equação de balanço de massa, que se obtém fazendo as simplificações referidas, tem a forma:

$$\frac{\partial \langle c \rangle}{\partial t} + \langle u \rangle \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x} + \langle v \rangle \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial y} + \langle w \rangle \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_y \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial z}$$

onde  $\langle \rangle$  denota o operador de média de maré, e os coeficientes de difusão turbulenta ( $K$ ) incluem o efeito das flutuações temporais, relativamente às médias de maré.

Os mecanismos de transporte de longo termo, ou inter-tidais, são significativos nos estuários porque as escalas temporais de muitos processos químicos e biológicos intervenientes na dinâmica estuarina são superiores à do ciclo de maré. As velocidades médias de maré definem o campo de correntes residuais. O uso de médias de maré locais (velocidades residuais Eulerianas) para descrever processos de longo termo foi discutida por CHENG e OUTROS (1989). Este autor concluiu que o transporte pelas correntes residuais em estuários e lagunas costeiras é melhor representado pelas velocidades residuais Lagrangianas, que correspondem ao percurso efectivamente realizado pelas partículas de água no ciclo de maré.

A equação da continuidade pode ser reduzida a 2 ou 1 dimensões quando as variações laterais ou verticais são pouco significativas. Consideram-se então valores médios na secção da velocidade e da concentração ( $\bar{u}$ ,  $\bar{c}$ ), sendo a advecção provocada por variações na secção incluída num coeficiente de dispersão longitudinal  $K$ .

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} K \frac{\partial \bar{c}}{\partial x}$$

FISCHER e OUTROS (1979) representaram os fluxos de substâncias em secções de estuários, a partir da combinação destas técnicas de decomposição em valores médios ( $\langle \bar{u} \rangle$ ,  $\langle \bar{c} \rangle$ ), flutuações no ciclo de maré ( $U$ ,  $C$ ), flutuações na secção ( $u_s$ ,  $c_s$ ) e flutuações turbulentas ( $u'$ ,  $c'$ ).

$$\langle F_c \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \int_A c u dA dt = A \langle \bar{u} \bar{c} \rangle = A [\langle \bar{u} \rangle \langle \bar{c} \rangle + \langle UC \rangle + \overline{u_s c_s} + \langle u' c' \rangle]$$

Alguns autores (DYER, 1973; PARK e JAMES, 1984) têm examinado a importância dos termos resultantes da decomposição, e feito a sua interpretação com base nos mecanismos envolvidos no transporte em estuários. Os termos que contêm a velocidade média de maré na secção são normalmente interpretados como representando o transporte correspondente à descarga do rio no período de maré. Os restantes termos, que incluem correlações entre desvios no ciclo e na secção, correspondem ao fluxo dispersivo. Destes, as correlações entre desvios de médias na secção são designados por circulação residual, por corresponderem a fluxos locais médios no ciclo de maré.

No caso de alguns canais da Ria, os termos que incluem a velocidade média de maré na secção podem não corresponder unicamente ao fluxo do rio, porque a interligação entre canais permite que numa secção exista um fluxo médio, que é compensado por outro fluxo médio num canal paralelo. Neste caso, a circulação residual aparece organizada também entre vários canais.

Sendo a ligação da Ria ao mar feita por um único canal, a análise dos valores dos termos da decomposição do fluxo permite identificar os principais mecanismos envolvidos no fluxo nessa secção. MATOS (1989) fez esta análise aos fluxos de água e de sal no canal da barra da Ria de Aveiro, usando resultados obtidos em marés de várias amplitudes. Concluiu que, apesar da secção ser quase homogénea, o transporte pela velocidade média de maré na secção não corresponde sempre à descarga de água dos rios, apesar de este ser um termo significativo. Outro termo significativo é o da correlação entre flutuação cíclica de corrente e elevação, característico de ondas de maré de tipo progressivo. Estas conclusões são coerentes com a análise que foi feita no 2º Capítulo, à propagação da maré na Ria, em que se mostrou ocorrer uma variação quinzenal do volume na Ria que é de magnitude superior ao volume médio de água transportada pelos rios. Também o cálculo da diferença de fase entre velocidade e elevação mostrou que no canal da barra a maré tem características progressivas.

## 3.2 METODOLOGIA DE OBSERVAÇÃO E PLANO DE AMOSTRAGEM

### 3.2.1 CARACTERIZAÇÃO ESPACIAL DO CAMPO DE SALINIDADE

A variação espacial da salinidade da água da Ria é o resultado mais facilmente observável do processo de mistura de água doce proveniente dos rios com a água do mar transportada pelas correntes de maré. O campo de salinidade, observado na escala temporal do ciclo de maré, não é estacionário. Contudo, o campo da salinidade média de maré varia lentamente no tempo, uma vez que os fluxos de água doce dos rios, geralmente pequenos comparados com o volume de água na Ria, são quase permanentes.

A determinação da média no ciclo de maré, da concentração de uma substância implica a observação simultânea da velocidade de escoamento ( $v$ ) e da concentração da substância ( $c$ ) durante o ciclo de maré, no local desejado. O cálculo da média de maré numa secção do canal requer que sejam também conhecidas as variações espaciais e a área da secção ( $A$ ) para avaliar por métodos numéricos a seguinte expressão integral,

$$\langle \bar{c} \rangle = \frac{\int_0^{\frac{T}{2}} \int_A c v dA dt}{\int_0^{\frac{T}{2}} \int_A v dA dt} = \frac{\sum_0^{\frac{T}{2}} \bar{c} \bar{v} \Delta t}{\sum_0^{\frac{T}{2}} \bar{v} \Delta t}$$

onde  $\bar{c}$  é média espacial e  $\langle c \rangle$  a média em meio ciclo.

A hipótese de quase estacionaridade implica que a salinidade média da água que atravessa uma secção em meio ciclo de maré (por exemplo enchente), seja aproximadamente igual à salinidade média da água que ocupa um determinado volume do canal ao fim desse tempo. O volume ocupado pela água que atravessou a secção em meio ciclo de maré é definido pelo percurso de maré realizado pelas partículas de água ( $T/2 \rightarrow L$ ):

$$\langle \bar{c} \rangle = \frac{\int_0^L \bar{c} A dl}{\int_0^L A dl} = \frac{\sum_0^L \bar{c} A \Delta l}{\sum_0^L A \Delta l}$$

O esquema de amostragem do campo espacial de salinidade foi estabelecido tendo por base as considerações apresentadas acima. Este esquema baseia-se na realização de observações de salinidade num conjunto de locais distribuídos pelos canais da Ria, em momentos próximos dos instantes em que não ocorre variação de volume de água nos canais. É de salientar que, de acordo com a definição de salinidade média que foi apresentada, o ciclo de maré é limitado pelos momentos de inversão de corrente e não pelos momentos de baixa-mar e preia-mar.

As questões logísticas conduziram a um plano de amostragem com 31 estações cobrindo os principais canais da Ria como se indica na Figura 3.1. Para que a colheita de amostras nos vários locais pudesse ser concluída num intervalo de tempo curto (cerca de uma hora), o número de locais amostrado em cada maré teve de ser limitado. Por esta razão a amostragem foi realizada por zonas:

- Zona sul (canais de Mira e de Ilhavo).
- Zona centro (canais Principal, do Espinheiro e Veia).
- Zona norte (canais de Ovar e da Murtosa).

As estações de cada zona foram amostradas nos dois extremos do mesmo ciclo de maré, isto é, entre 1 a 2 horas após a baixa-mar e a preia-mar.

Na selecção dos locais de amostragem teve-se em atenção não só a facilidade de acesso mas também as características da secção do canal nesses locais. Sempre que possível foram escolhidos os locais de pontes por corresponderem a secções em que a mistura é mais intensa. Em cada local foi colhida uma amostra de água representativa da secção, por imersão de um balde a cerca de 1 metro de profundidade.

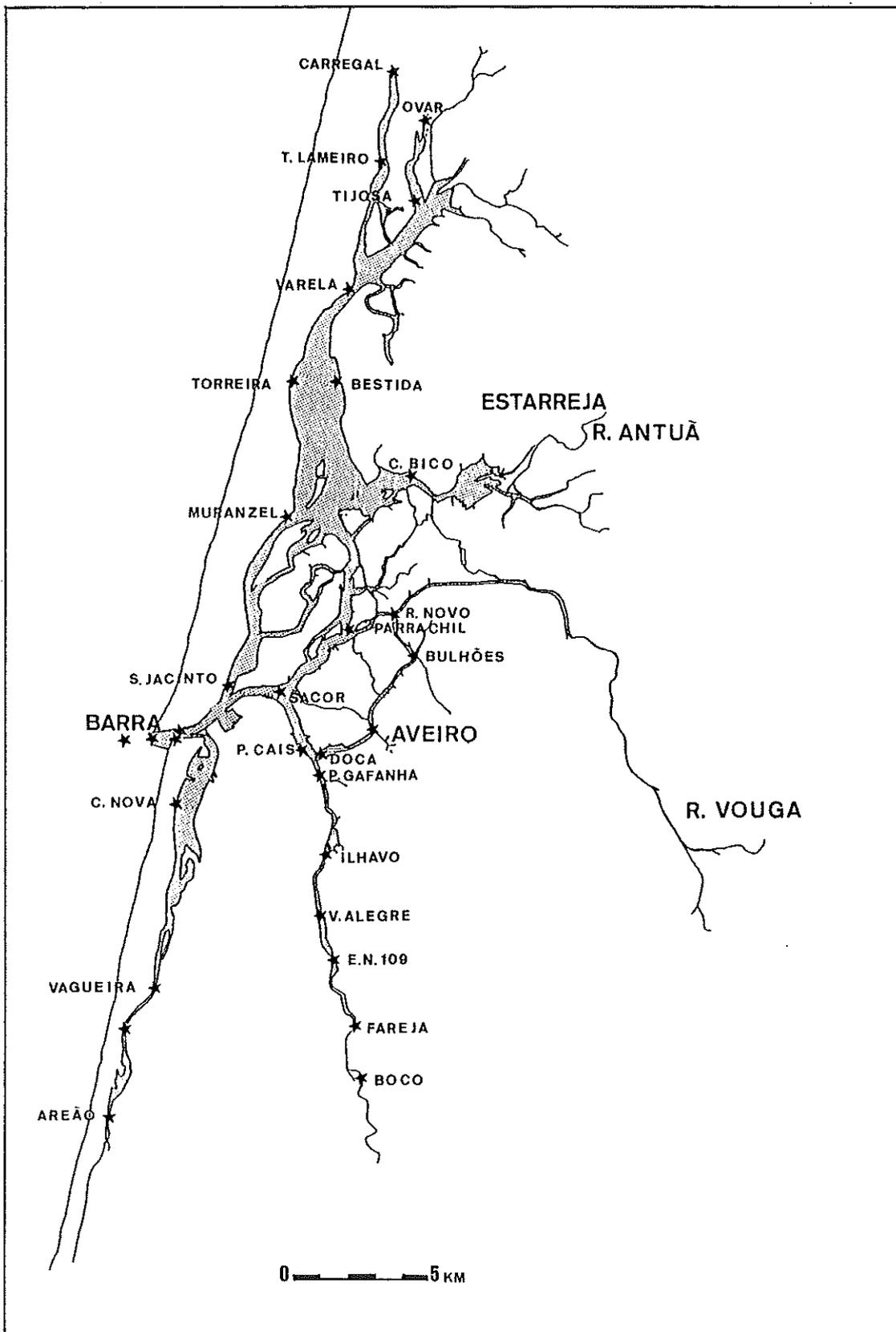


Figura 3.1 Localização das estações de amostragem da salinidade.

O cálculo das salinidades médias, tal como foram definidas, implica que sejam estimadas as distâncias  $L$  correspondentes ao percurso das partículas de água ao longo dos canais durante meio ciclo. Estas distâncias foram já definidas no 2º Capítulo por um balanço de volumes. É também necessário relacionar a variação de salinidade com a variação de volume ao longo dos canais. Como as entradas de água doce se situam próximo dos extremos dos canais, admitiu-se existir uma relação linear entre a salinidade e o volume. As salinidades ao longo dos canais foram então calculadas fazendo interpolação linear entre os valores observados.

Seguindo este procedimento, foram calculadas salinidades médias nos volumes que correspondem aos percursos de maré, tendo o cálculo sido iniciado na secção terminal de cada canal. O cálculo foi repetido nos momentos em que os volumes nos canais são máximos e mínimos. De acordo com a hipótese quase-estacionária, cada massa de água que se desloca em meio ciclo a distância  $L$ , deve manter uma salinidade média quase constante, devendo por isso ser idênticos os dois valores calculados. As diferenças observadas entre estes valores podem ser explicadas pelos erros de amostragem, sendo então a sua média uma melhor estimativa da salinidade média dos volumes que correspondem aos percursos de maré.

### 3.2.1.1 Fracção de Água Doce e Tempo de Renovação

A mistura de água doce e de água do mar num estuário é frequentemente parametrizada através de um número puro que se denomina fracção de água doce ( $f_d$ ). Este número corresponde à razão entre o volume de água doce necessário para diluir a água do mar de salinidade  $S_0$  e o volume total. Numa dada região de um estuário onde a salinidade média no ciclo de maré é  $\langle S \rangle$ , a fracção de água doce é por definição:

$$f_d = \frac{S_0 - \langle S \rangle}{S_0}$$

Em condições quase-estacionárias, pode-se usar a salinidade média para calcular o tempo de renovação da água doce presente no canal ( $t_r$ ), sendo conhecido o caudal doce afluente ( $Q_R$ ), que causa a diminuição de salinidade:

$$t_r = \frac{f_d V}{Q_R}$$

Uma vez que a água doce é uma pequena fracção da água presente no canal e  $Q_R$  é muito pequeno comparado com os caudais devidos à acção das marés, pode-se supor que só uma parte do volume movimentado no ciclo de maré é efectivamente renovado. Define-se então um coeficiente de retorno ( $\alpha$ ) e um volume movimentado em cada ciclo (prisma de maré -  $P$ ), que podem ser relacionados com o tempo de renovação da água do canal, igual ao tempo de renovação da fracção de água doce  $t_r$ , através da expressão,

$$t_r = \frac{V T}{P \times (1 - \alpha)}$$

onde  $T$  é o período de maré e  $V$  o volume total.

As salinidades médias, fracções de água doce, tempos de renovação e coeficientes de retorno, foram calculados a partir dos volumes máximos e mínimos ao longo dos canais da Ria, e também dos valores de salinidade observados em vários pontos desses canais, bem como do caudal de água doce afluente. No anexo 1 encontra-se a descrição dos métodos de cálculo seguidos.

### 3.2.2. OBSERVAÇÕES EM CICLOS DE MARÉ

O conjunto de fenómenos que intervêm no estabelecimento da distribuição espacial das propriedades observadas na Ria de Aveiro não deve limitar-se apenas aos processos na escala temporal da onda de maré. A organização do campo médio da concentração de

uma substância conservativa depende da circulação média que é traduzida por velocidades residuais, que são geralmente difíceis de observar por experimentação directa.

A morfologia da zona central da Ria torna provável que aí possa ocorrer uma circulação residual acentuada. Esta circulação será possivelmente detectável como um desvio da condição quase-estacionária das variações no ciclo de maré. Para se caracterizar a circulação residual devem então ser realizadas observações que permitam quantificar fluxos numa secção ao longo do ciclo de maré. As observações devem incidir sobre a medição da velocidade e da concentração de constituintes que sejam bons indicadores da circulação existente. Por esta razão foram também medidas a salinidade, a concentração de partículas suspensas e de nitrato.

O trabalho de amostragem concentrou-se nas duas secções indicadas na Figura 3.2, tendo sido repetido em vários ciclos de maré em alturas diferentes, de modo a que os resultados obtidos fossem independentes. Estas duas secções estão localizadas em pontos significativos, quer pelo contexto na organização geral dos canais, quer pela relação com a área da Ria em que existe o mais grave problema de poluição - largo do Laranjo. A secção da Testada tem por objectivo principal investigar a interligação entre os canais de Ovar, da Murtoza e do Espinheiro. Os resultados na secção do Chegado caracterizam a circulação no canal que liga o Laranjo com o resto da Ria.

Os troços dos canais em que se situam estas duas secções são aproximadamente rectos e com pequenas variações de largura. Estas características facilitam o delicado trabalho de aplicar um método de velocidade-área à avaliação experimental dos fluxos de maré nas secções, através do cálculo numérico do integral do produto da velocidade e da concentração na área da secção. Na aplicação deste método, procurou-se respeitar as indicações da norma de medição de caudais em canais com maré, BS 3680 (BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 1973).

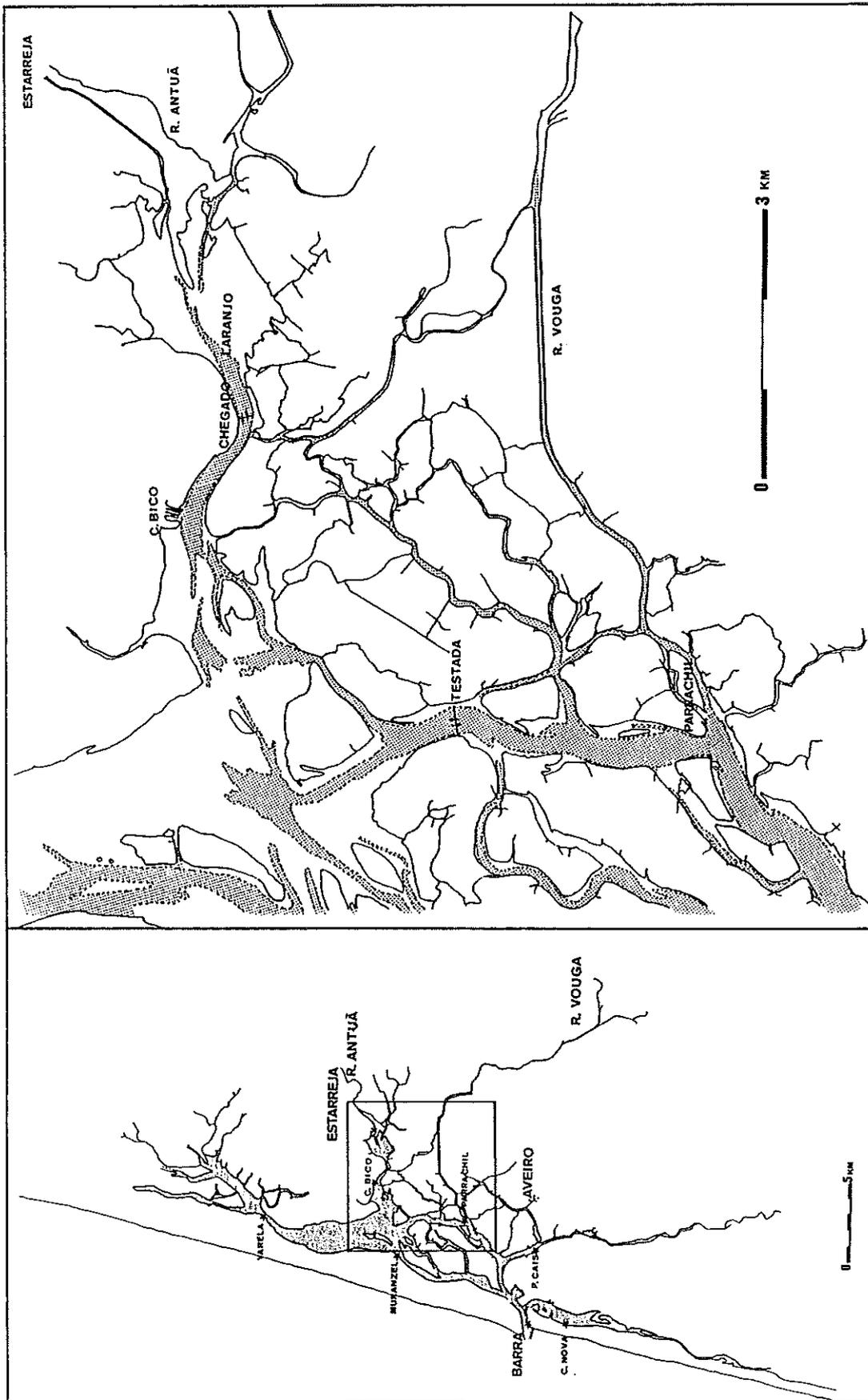


Figura 3.2. Localização das secções estudadas: secção do Chegado e secção da Testada.

Contudo, limitações materiais impediram a realização de observações simultâneas em vários pontos da secção. Para se caracterizar a distribuição das variações na secção, as observações foram realizadas sequencialmente nos pontos das secções indicados na Figura 3.3. De acordo com KJERFVE e OUTROS (1981) a medição em três verticais de uma secção permite obter uma estimativa de fluxo com um erro aceitável.

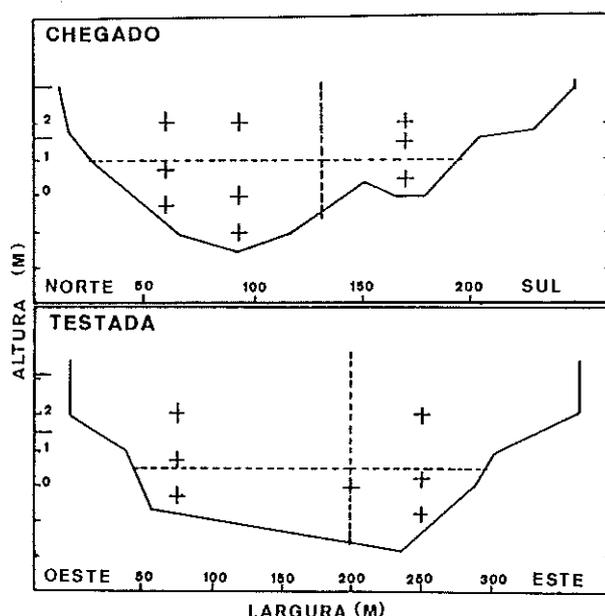


Figura 3.3. Esquema em corte das secções do Chegado e da Testada. Os símbolos + assinalam os pontos de amostragem

Os escoamentos observados na Ria são turbulentos, não estacionários e não uniformes. As variáveis velocidade e salinidade podem ser representadas por valores médios e flutuações. Para cada ponto do escoamento definem-se valores médios no ciclo,  $\langle v \rangle$  e  $\langle s \rangle$ ; flutuações periódicas,  $V$  e  $S$ ; flutuações de período curto (turbulentas),  $v'$  e  $s'$  (DYER, 1973). Tendo como objectivo a avaliação dos valores médios no ciclo e das flutuações periódicas, procurou-se que os procedimentos de amostragem eliminassem as flutuações de período curto.

Por esta razão as observações de velocidade duraram 50 segundos e foram repetidas 2 ou 4 vezes, de modo a se obter um valor médio local. As amostras de água para determinação de salinidade e de outros constituintes foram colhidas bombeando água durante cerca de 3 minutos, para que também representassem o mesmo tipo de média local. As observações da velocidade e a colheita de amostras foram repetidas nas

estações de cada secção a intervalos de 1,5 horas em média. Na estação localizada perto do meio das secções e a 1,5 metros do fundo, foi instalado uma sonda para aquisição automática de condutividade, temperatura, pressão, velocidade e direcção da corrente. Este instrumento estava programado para realizar registos dos valores medidos a intervalos de 3 minutos.

Para tornar os resultados obtidos coerentes no tempo, foi realizada uma interpolação por splines cúbicas entre os resultados obtidos em cada estação (NORBY e OUTROS, 1992). O recurso a esta técnica de interpolação pode-se justificar por não ser conhecida uma função que se poderia ajustar aos dados por uma técnica de regressão. A técnica de interpolação é aceitável, uma vez que os resultados experimentais correspondem a valores médios das variáveis e portanto bastante estáveis. Por interpolação, foram obtidos valores de velocidade e salinidade em todas as estações observadas, com intervalos de uma hora.

Admitindo que não iriam ocorrer variações acentuadas dos parâmetros na secção, uma vez que a altura da coluna de água é pequena e a largura é da ordem de 300 metros, ambas as secções foram divididas em 4 elementos de área tal como é indicado na Figura 3.3. Esta divisão permite representar diferenças laterais e verticais que ocorram nas secções, designadamente a variação lateral da velocidade média e variação vertical de salinidade. Uma vez que a variação lateral da velocidade média é proporcional à altura de coluna de água, na divisão lateral das secções teve-se atenção ao perfil transversal das mesmas.

Os cálculos dos fluxos de água e de salinidade foram feitos partindo dos valores interpolados nas várias estações de cada secção. Com estes dados foram calculados valores médios para os elementos de área das secções. No cálculo destas médias considerou-se que os valores interpolados teriam pesos diversos, traduzindo o perfil natural das variáveis, tal como é indicado nas expressões seguintes, para o caso da velocidade:

- Chegado, lado norte, superfície

$$\bar{v} = ((v_{1,n} + v_{1,c}) \times 2 + (v_{2,n} + v_{2,c})) / 6$$

- Chegado, lado norte, fundo

$$\bar{v} = ((v_{3,n} + v_{3,c}) \times 2 + (v_{2,n} + v_{2,c})) / 6$$

- Chegado, lado sul, superfície

$$\bar{v} = (v_{1,s} \times 2 + v_{2,s}) / 3$$

- Chegado, lado sul, fundo

$$\bar{v} = (v_{3,s} \times 2 + v_{2,s}) / 3$$

- Testada, lado poente ou lado nascente, superfície

$$\bar{v} = ((v_{1,l} + v_{1,c}) \times 2 + (v_{2,l} + v_{2,c})) / 6$$

- Testada, lado poente ou lado nascente, fundo

$$\bar{v} = ((v_{3,l} + v_{3,c}) \times 2 + (v_{2,l} + v_{2,c})) / 6$$

### 3.2.3 COMPORTAMENTO DE CONSTITUINTES NÃO CONSERVATIVOS

Muitos constituintes importantes no ambiente estuarino apresentam um comportamento não conservativo, isto é são determinados por interações entre processos físicos, químicos e biológicos, de que resultam alterações das respectivas concentrações. Usando a terminologia de SCHUBEL e KENNEDY (1984), os estuários podem constituir filtros para algumas substâncias. Este fenómeno pode ser detectado pela análise da relação entre as variações de salinidade e de concentração de outros constituintes.

As concentrações de carbono orgânico e de nitrato são dois importantes indicadores da

qualidade da água. Em particular, a concentração de nitrato pode aumentar no percurso da água doce até ao mar em resultado dos sucessivos usos que a água pode ter. Nos estuários é normal que as concentrações mais altas de nitrato sejam observadas no extremo interno, sendo as concentrações mais baixas características da água do mar. Observações realizadas por WARD (1986) num estuário da baía de Chesapeake mostraram existir uma relação inversa entre a concentração de nitrato e a salinidade.

EISMA (1986), numa revisão ao balanço de sedimentos em estuários, refere que as maiores fontes de partículas nos estuários são os sedimentos de origem fluvial, de origem marinha ou resultantes da erosão local. A contribuição de material orgânico, sílica ou carbonato de origem biológica pode ser pontualmente importante, mas nas partículas em suspensão na água dos estuários esta contribuição é geralmente inferior a 30%. Detritos resultantes de plantas de sapal e até sólidos de descargas poluentes podem em alguns casos fazer parte do material particulado. Outras origens, tais como a precipitação inorgânica, floculação e deposição da atmosfera, são em geral pouco significativas.

Analisando a importância dos sedimentos estuarinos para o transporte de metais pesados, WINDOM e OUTROS (1989) reconhece também a predominância de material inorgânico e distingue entre a fracção de areia siliciosa ou carbonatada e a fracção fina em que abundam aluminossilicatos. O destino desta fracção fina, que é transportada em suspensão, determina o modo como os metais pesados se distribuem nos estuários e zonas costeiras.

O transporte de partículas em suspensão é controlado pela interacção entre os fluxos de maré e a entrada ou saída de partículas da coluna de água. O conjunto de processos que podem alterar a concentração de partículas em suspensão é variado e inclui fenómenos físicos, químicos e biológicos. Desta circunstância deve-se esperar uma elevada variabilidade na concentração de partículas em suspensão, e conseqüentemente da massa transportada nos fluxos de maré.

O trabalho experimental realizado permite estimar a ordem de grandeza do transporte de partículas em suspensão no fluxo cíclico de maré, e formular algumas relações entre as concentrações de partículas e os valores de outros parâmetros.

O procedimento de amostragem usado foi estabelecido de modo a fornecer amostras que fossem representativas da concentração no ponto amostrado e que minimizassem as variações provocadas pela turbulência de pequena escala. Para cumprir estes dois objectivos o sistema de amostragem por bombagem permitia a colheita de água sem grande perturbação do escoamento. A colheita durava cerca de 3 minutos, pelo que integrava as flutuações de período curto. Contudo, este processo de amostragem exclui as partículas de grande velocidade de sedimentação (areias). Deste modo também se elimina mais uma fonte de variabilidade da concentração, uma vez que a presença de partículas com estas características na coluna de água é transitória. Os processos químicos e biológicos que causam a variação da concentração de partículas em suspensão podem provocar também modificações na composição do material particulado. Em particular, a contribuição dos processos biológicos pode ser avaliada com base no conteúdo volátil e na abundância de pigmentos vegetais nas partículas. O plano de análises incluiu por isso, além da determinação da concentração total de partículas, a determinação da fracção não volátil (cinza) e da concentração de clorofila-a contida no material particulado.

### 3.3 INSTRUMENTAÇÃO E MÉTODOS ANALÍTICOS

#### 3.3.1 MÉTODOS DE OBSERVAÇÃO DE CORRENTES

Nos escoamentos em canais pouco profundos e com forma regular, a componente vertical da velocidade é desprezável. O equipamento usado na medição foi concebido para este tipo de escoamentos, e por isso só permite observações de velocidade no plano horizontal. A intensidade de corrente foi medida na direcção da velocidade média

local, uma vez que o equipamento de medição era montado com liberdade de rotação horizontal e dispunha de leme para orientação na direcção da corrente. Foram usados nas observações de correntes dois instrumentos: um molinete fixo ao fundo e realizando aquisição autónoma de intensidade e direcção de corrente - Space Technology Systems (STS), modelo DNC-2M; um molinete móvel suspenso num cabo com lastro hidrodinâmico - Valeport, modelo BFM001. A intensidade média da corrente durante o período de cada observação é proporcional à velocidade de rotação do hélice. As relações de conversão da velocidade de rotação ( $n$ ) em velocidade do escoamento ( $v$ ) foram obtidas dos fabricantes do equipamento e são respectivamente:

Molinete Valeport BFM001 (gama de validade 0,094 - 3,016 ms<sup>-1</sup>; erro médio ±1,5%)

$$v = 0,008 + 0,2667n$$

Molinete Space Technology Systems DNC-2M (gama 0,02 - 5,00 ms<sup>-1</sup>; erro médio ±2,0%)

$$v = 0,0098 + 0,3456n$$

O sistema STS, modelo DNC-2M, regista adicionalmente a direcção média no período correspondente a cada observação de velocidade. Os resultados de intensidade e direcção de corrente registados por este sistema foram posteriormente processados para se obter a componente da velocidade média em 6 minutos, normal á secção em estudo ( $v_N$ ).

$$v_N = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i \right) \cos \theta_R$$

### 3.3.2 MÉTODOS DE OBSERVAÇÃO DE SALINIDADE

A salinidade da água do mar foi definida como a massa de sais dissolvidos numa dada massa de solução. Em princípio a determinação da salinidade pode ser feita evaporando a água e pesando o resíduo da evaporação. No entanto, porque esta separação não é quantitativa, não se adopta este método. A determinação da salinidade tem sido baseada na medição de propriedades físicas ou químicas da solução, que se relacionam com a

salinidade por expressões de natureza empírica. Uma relação que teve grande aplicação foi estabelecida entre a salinidade ( $S$ ) e a concentração de iões de halogéneos designada por clorinidade ( $Cl$ ):

$$S = 1,80655Cl$$

Recentemente a determinação da salinidade tem envolvido essencialmente a medição da densidade ou da condutividade eléctrica da solução, propriedades físicas que se relacionam com a salinidade. As relações obtidas por vários autores entre a salinidade e estas propriedades físicas, são aplicáveis aos estuários desde que a composição química da solução não se afaste significativamente da diluição de água do mar por água pura (SHARP e CULBERSON, 1982).

A generalização do uso de métodos de determinação da salinidade baseados na medição da condutividade eléctrica da água veio causar a alteração da definição de salinidade. Foi criada a Escala Prática de Salinidade 1978, que define a salinidade  $S=35$  (sem dimensões) como sendo a salinidade de uma água do mar que apresenta a mesma condutividade a 15 °C que uma solução com 32,4356 gr de KCl por quilograma de solução (PARSONS, 1982).

MILLERO (1984) concluiu que as diferenças entre as salinidades de águas estuarinas medidas de acordo com a Escala Prática de Salinidade 1978 e as medidas por uma escala directamente relacionada com a clorinidade são normalmente da ordem da segunda casa decimal. Eventuais problemas de selecção da escala de salinidade não terão significado se as observações não tiverem uma precisão superior a 0,1.

No trabalho experimental realizado foram utilizados três instrumentos para medição da condutividade da água da Ria e posterior cálculo da salinidade. Nas observações de salinidade em estações localizadas ao longo dos principais canais da Ria, usou-se o condutivímetro de campo Yellow Springs Instrument (YSI), modelo 33, que mede a condutividade com um erro máximo de 5% e a temperatura com um erro máximo de

0,9 °C. Os valores de condutividade indicados por este aparelho correspondem a uma célula com uma constante de 5 cm<sup>-1</sup>. O valor da constante da célula usada foi verificado antes das campanhas de amostragem medindo a condutividade de soluções padrão de KCl. Os resultados obtidos nas soluções com condutividade semelhante á da água do mar indicam que a constante média da célula é 4,76. Aos valores de condutividade medidos foi por isso aplicado um factor de correcção dado pela razão entre a condutividade real e a condutividade medida, igual a 1,05.

A salinidade foi calculada pelo polinómio indicado por WILSON (1975) que é do quinto grau na razão de condutividades a 15 °C entre a amostra e a água do mar padrão ( $R_{15}$ ). A razão de condutividades à temperatura da medição ( $R_T$ ) foi obtida usando o seguinte polinómio para calcular a condutividade da água do mar padrão ( $C_{35}$ ), válido na gama de temperatura 0-25 °C:

$$C_{35} = 29,048 + 0,867 \cdot T + 0,0037 \cdot T^2$$

O mesmo procedimento de cálculo foi aplicado aos valores de condutividade obtidos com o sistema autónomo de aquisição de condutividade e temperatura Space Technology Systems, modelo DNC-2M. Este sistema, de acordo com o fabricante, possui uma exactidão de  $\pm 0,2$  mScm<sup>-1</sup> na medição de condutividade e de  $\pm 0,2$  °C na medição de temperatura. A validação dos resultados obtidos foi realizada por comparação com resultados obtidos simultaneamente com outros instrumentos. Uma comparação de valores de salinidade medidos no campo em 12-11-91 com o sistema STS e o condutivímetro YSI mostrou existir uma diferença média de cerca de 0,5 ‰. A partir de Dezembro de 1992, devido a mau funcionamento do condutivímetro usado inicialmente, passou a ser usado o salinómetro Kent - EIL 5005. Este aparelho indica directamente a salinidade com uma precisão de  $\pm 0,1$  ‰, com base na medição da condutividade e da temperatura.

### 3.3.3 MÉTODOS DE OBSERVAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE PARTÍCULAS EM SUSPENSÃO

A concentração de partículas em suspensão (CPS) na água de um estuário é condicionada por processos físicos, químicos e biológicos, não podendo por isso ser considerada uma grandeza conservativa. A metodologia adequada à determinação desta concentração depende da concentração e natureza das partículas presentes na coluna de água.

A metodologia de amostragem e determinação da CPS na água da Ria foi definida tendo em atenção que, para avaliar a massa de material transportado em suspensão, é necessário colher uma amostra representativa em que se possa quantificar a massa de material particulado. A necessidade de relacionar a massa de partículas com o volume de amostra requer que se use uma técnica de colheita quantitativa. Esta necessidade exclui o uso de métodos de amostragem que fornecem uma amostra de partículas por sedimentação *in situ* (SCRUDATO e OUTROS, 1988). Outras técnicas aplicáveis *in situ* na avaliação da concentração de partículas em suspensão, como as baseadas em neflometria, requerem calibração baseadas em técnicas de separação quantitativas.

Na colheita de amostras de água destinadas à separação de partículas usou-se o dispositivo representado na Figura 3.4 que permite recolher o volume de água necessário usando uma bomba peristáltica. A captação de água é realizada com o mínimo de perturbação do escoamento e num ponto preciso da secção.

No laboratório era realizada a separação das partículas das amostras filtrando-as sob uma pressão de 0,5 atmosferas. Esta técnica de separação tem a vantagem de permitir processar várias amostras em simultâneo com equipamento barato e que pode mesmo ser usado no campo (Figura 3.5). O intervalo entre a colheita e a filtragem foi no máximo 48 horas, sendo as amostras mantidas refrigeradas a 5 °C. Foram filtradas duas sub-amostras, usando respectivamente filtros de fibra de vidro de 1,2  $\mu\text{m}$  de poro máximo e filtros de membrana de 0,45  $\mu\text{m}$ . A diferença de porosidade dos filtros quando a concentração de partículas é superior a 1  $\text{mg l}^{-1}$  não afecta significativamente

os resultados, porque a porosidade efectiva dos filtros se reduz muito rapidamente no início da filtração (DRAKE, 1976).

O procedimento seguido na determinação da concentração de partículas suspensas totais (secas a 105 °C) e não voláteis (incineradas a 550 °C) é o referido por ANONIMO (1980). Usaram-se neste procedimento filtros de fibra de vidro, previamente lavados e incinerados. O volume de amostra passado pelos filtros variou entre 1 e 2 l.

#### 3.3.4 MÉTODO PARA CLOROFILA

O procedimento seguido na determinação da clorofila-a é o descrito por PARSONS e OUTROS (1984). A separação das partículas para esta análise foi feita com filtros de membrana que se dissolvem na solução a 90% de acetona, usada na extração dos pigmentos. O volume filtrado variou entre 0,5 e 1 l.

#### 3.3.5 MÉTODO QUALITATIVO PARA NITRATOS

A análise de nitrato é difícil devido à complexidade dos procedimentos requeridos. No entanto, é referido por ANONIMO (1980) um método expedito, só adequado a amostras com baixa concentração de matéria orgânica e que indica a variação da concentração de nitrato. Este método só requer a medição das absorvâncias de amostras filtradas a 220 e 275 nm. Não limita por isso o número de amostras em que se pode rapidamente detectar a abundância de nitrato e que é proporcional à absorvância a 220 nm corrigida da absorvância a 275 nm.

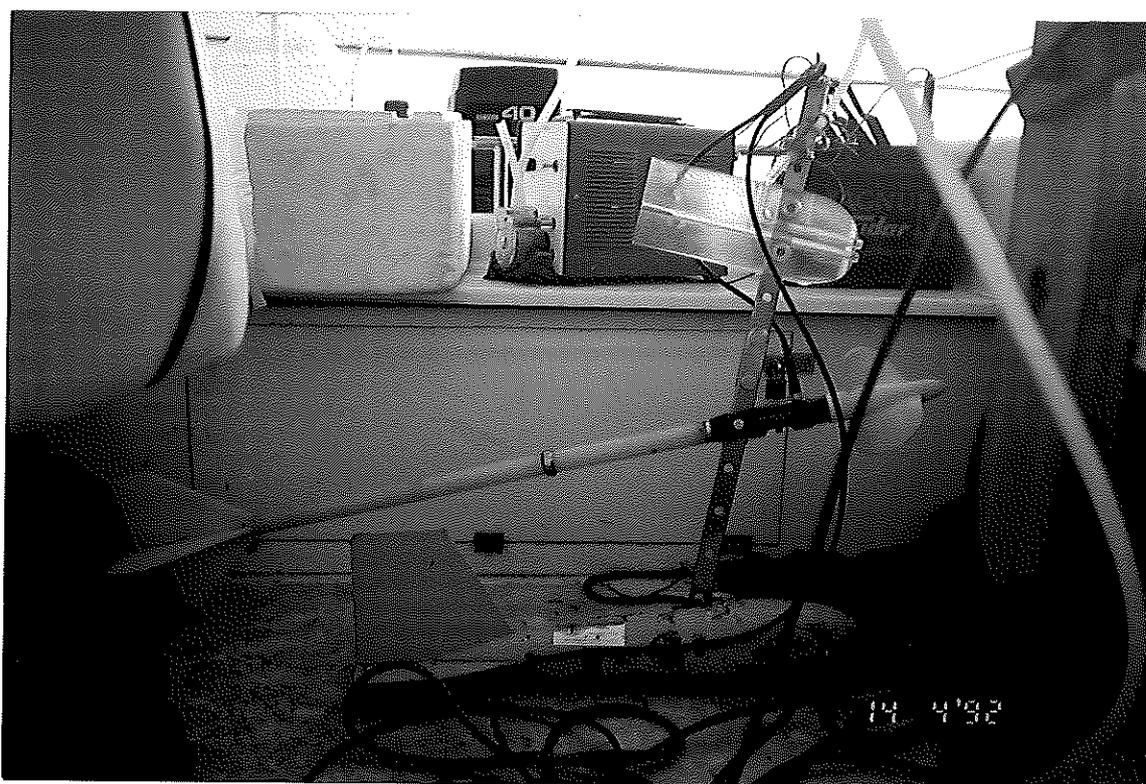


Figura 3.4. Sistema de colheita de amostras.



Figura 3.5. Sistema de filtração e extração de pigmentos.

### 3.4 CARACTERÍSTICAS DO CAMPO DE SALINIDADE DA RIA

As 31 estações localizadas ao longo dos principais canais da Ria foram amostradas, de acordo com a metodologia exposta, durante o período de Junho de 1990 a Setembro de 1991. As datas precisas em que decorreu cada campanha de amostragem correspondem a diferentes momentos do ciclo hidrológico anual, tendo no entanto sido evitados períodos com intensa precipitação. Nestes períodos ocorrem variações rápidas dos caudais dos rios, não sendo por isso válida a aproximação de quase estacionaridade do campo de salinidade.

Para facilitar a apresentação dos resultados, a série de datas das campanhas foi dividida em dois grupos. O primeiro corresponde à situação de Inverno quando o caudal dos rios é idêntico ou superior ao caudal médio anual: 13 de Novembro de 1990, 17 de Dezembro de 1990, 3 de Abril de 1991, 24 de Maio de 1991. O segundo corresponde à situação de verão, sendo então o caudal dos rios inferior à média anual: 7 de Junho de 1990, 5 de Setembro de 1990, 27 de Julho de 1991, 22 de Setembro de 1991. Na Figura 3.6 é estabelecida a relação entre estas datas, a precipitação diária observada na estação meteorológica da Universidade de Aveiro e o caudal total dos rios.

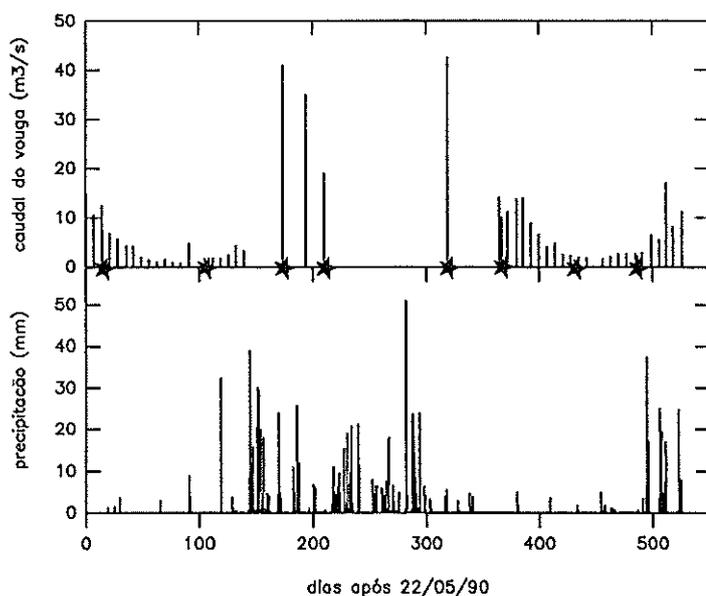


Figura 3.6. Caudal do rio Vouga e precipitação diária na estação meteorológica da Universidade de Aveiro. Períodos de amostragem indicados com ★.

Na Tabela 3.1 da página 79, são indicados os totais de caudal doce drenado pela Ria, estimados a partir de medições de caudal nos 6 principais rios afluentes realizadas em datas próximas das indicadas. São também indicadas as amplitudes de maré (A.M.) previstas para a barra nas mesmas datas. Estas amplitudes aproximam-se da amplitude média neste marégrafo, que é de 1,9 m.

Os resultados de salinidade obtidos nestas campanhas estão representados nas Figuras 3.7 a 3.11, simultaneamente como função da distância à secção do canal mais próxima do mar, e como função do volume de água correspondente. Numa análise geral destes resultados, salienta-se a importância da variação de salinidade no Inverno, enquanto no Verão essa variação só ocorre nos extremos dos canais, com excepção para o canal de Mira em que não se observa uma diferença tão nítida entre Verão e Inverno. A representação da salinidade como função do volume ao longo dos canais permite distinguir melhor as situações de baixa-mar e preia-mar, devido à grande variação de volume no ciclo de maré. A diminuição acentuada de salinidade nos extremos dos canais ocorre numa fracção pequena do volume total.

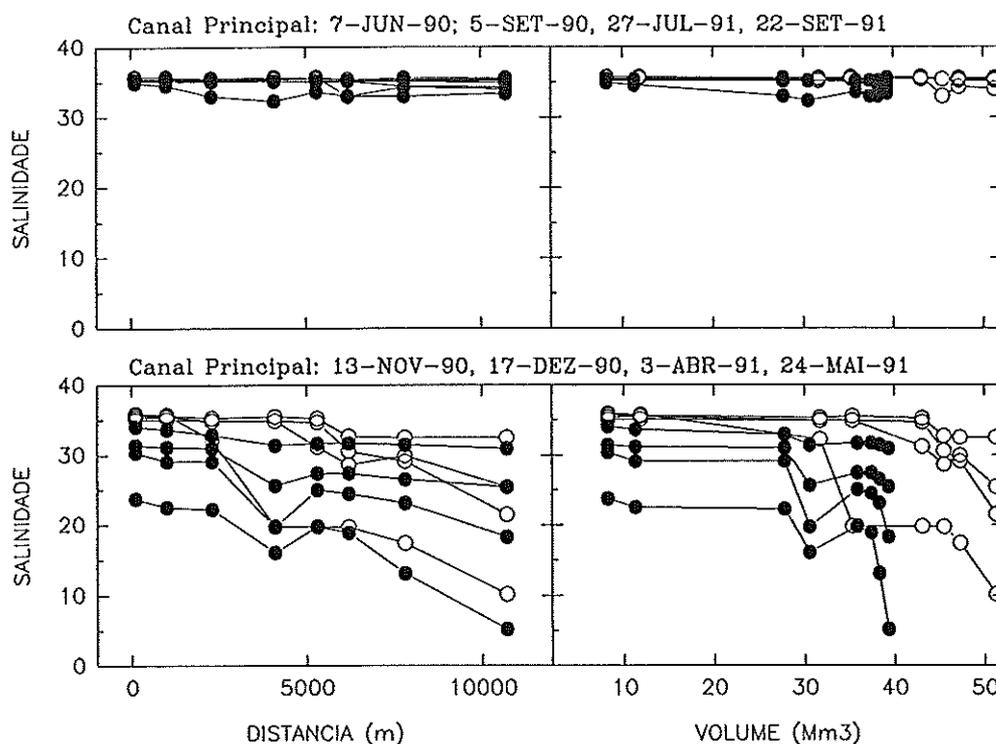


Figura 3.7. Salinidade ao longo do canal Principal. Símbolos abertos na preia-mar e a cheio na baixa-mar.

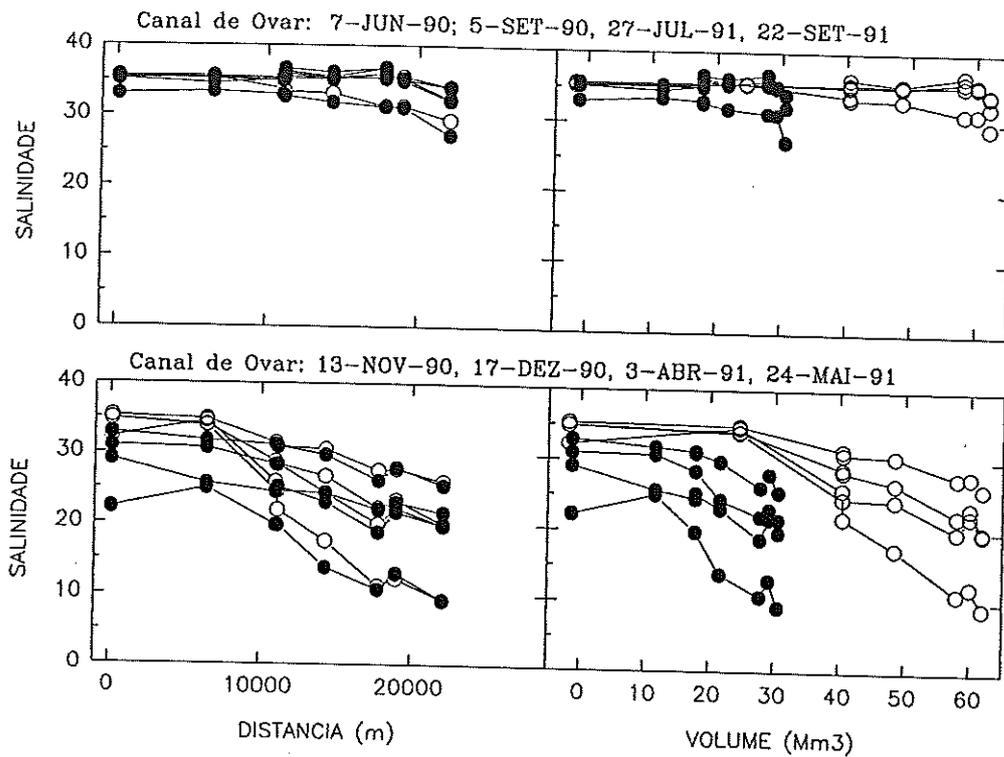


Figura 3.8. Salinidade ao longo do canal de Ovar. Símbolos abertos na preia-mar e a cheio na baixa-mar.

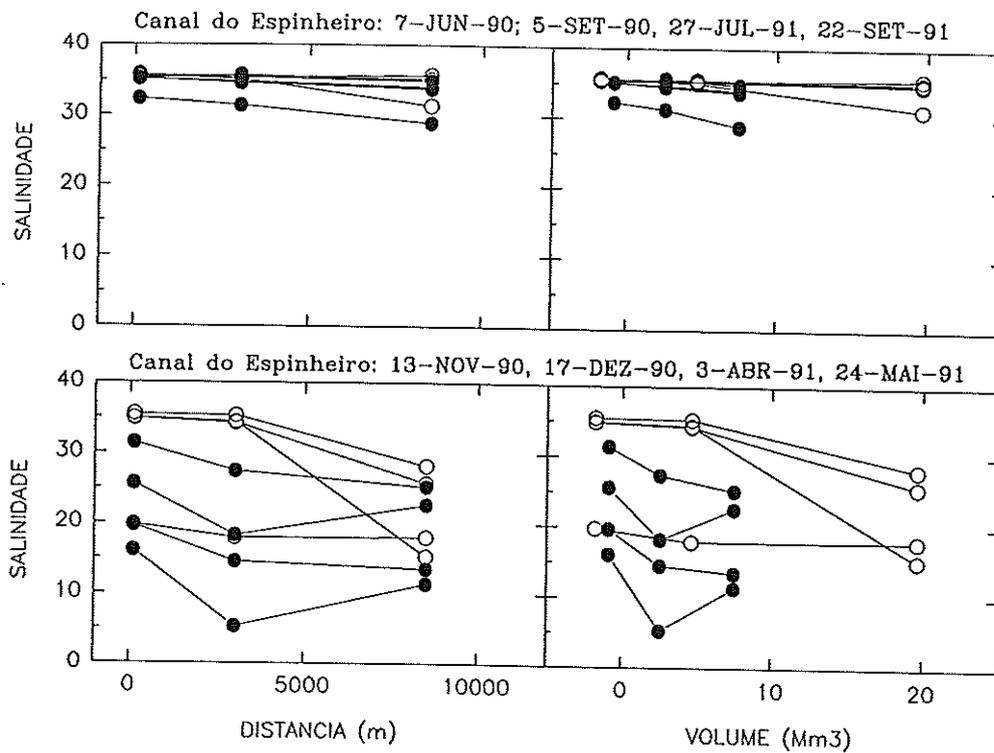


Figura 3.9. Salinidade ao longo do canal do Espinheiro. Símbolos abertos na preia-mar e a cheio na baixa-mar.

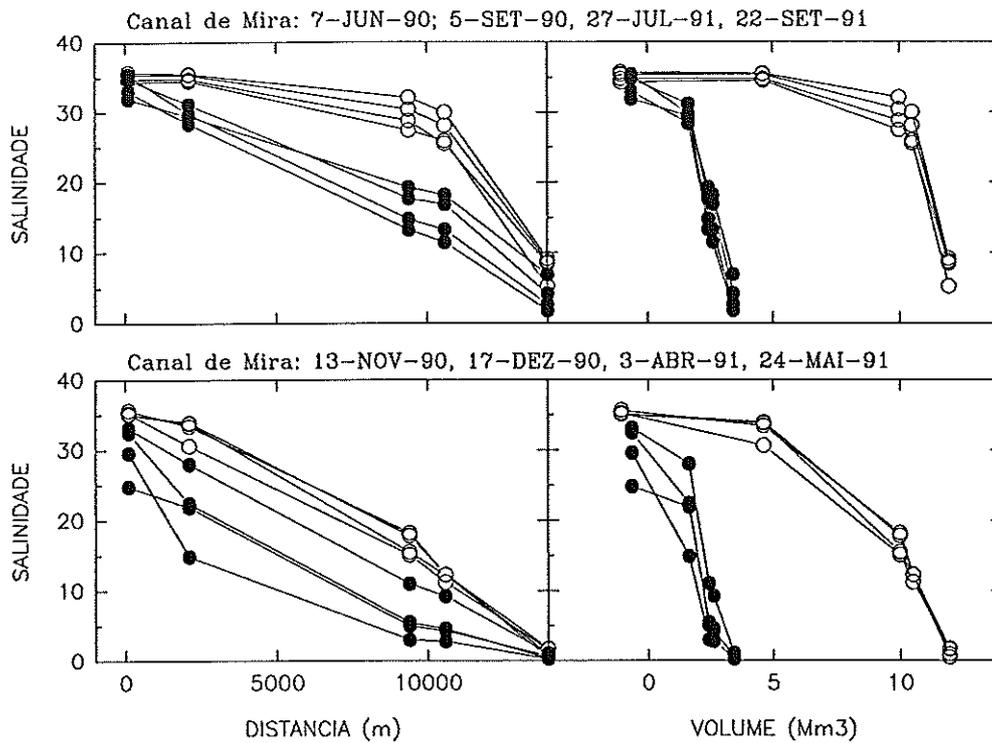


Figura 3.10. Salinidade ao longo do canal de Mira. Símbolos abertos na preia-mar e a cheio na baixa-mar.

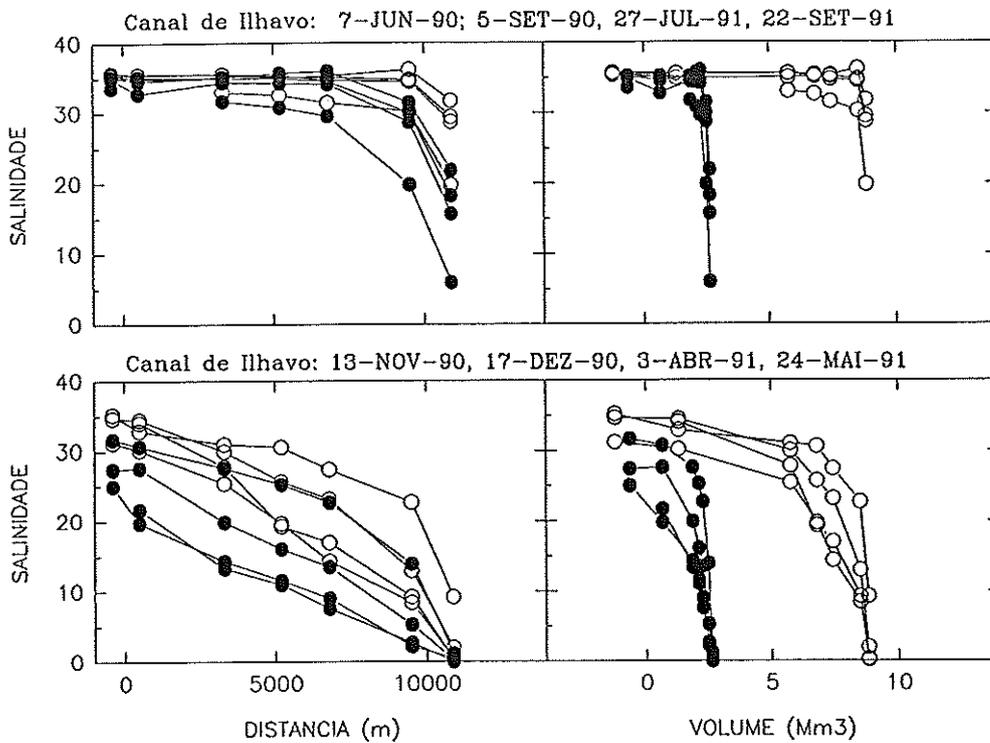


Figura 3.11. Salinidade ao longo do canal de Ilhavo. Símbolos abertos na preia-mar e a cheio na baixa-mar.

A transição da situação de Inverno para a de Verão é bem representada pelos resultados obtidos entre Abril e Setembro de 1991. Os gráficos da Figura 3.12 foram construídos com base em valores de salinidade interpolados ao longo dos canais e no tempo. Observa-se que nos principais canais da Ria, com excepção do canal de Mira, se mantém durante o verão um campo de salinidade quase constante e próximo do valor da salinidade do mar.

Analisando mais detalhadamente a variação de salinidade observada no Inverno, conclui-se que ela é significativa tanto no espaço ao longo dos canais, como no tempo entre as datas das campanhas. Mesmo no canal da barra, próximo do mar, a salinidade variou entre 24 e 35,8. Estas variações são paralelas à variação do caudal doce drenado pela Ria, que também se caracteriza por grandes variações durante o Inverno. A estabilidade do campo de salinidade observada durante o verão corresponde à variação lenta do caudal doce afluente, embora a evaporação de água na superfície da Ria também contribua para a invariância da salinidade ao remover água a uma taxa semelhante ao caudal dos rios. A importância da evaporação no balanço de água da Ria é posta em evidência no Verão pelos valores de salinidade superiores aos observados na água do mar, encontrados no canal de Ilhavo a sul de Vagos (36,2) e no canal de Ovar a norte da Varela (36,8), em Setembro de 1990.

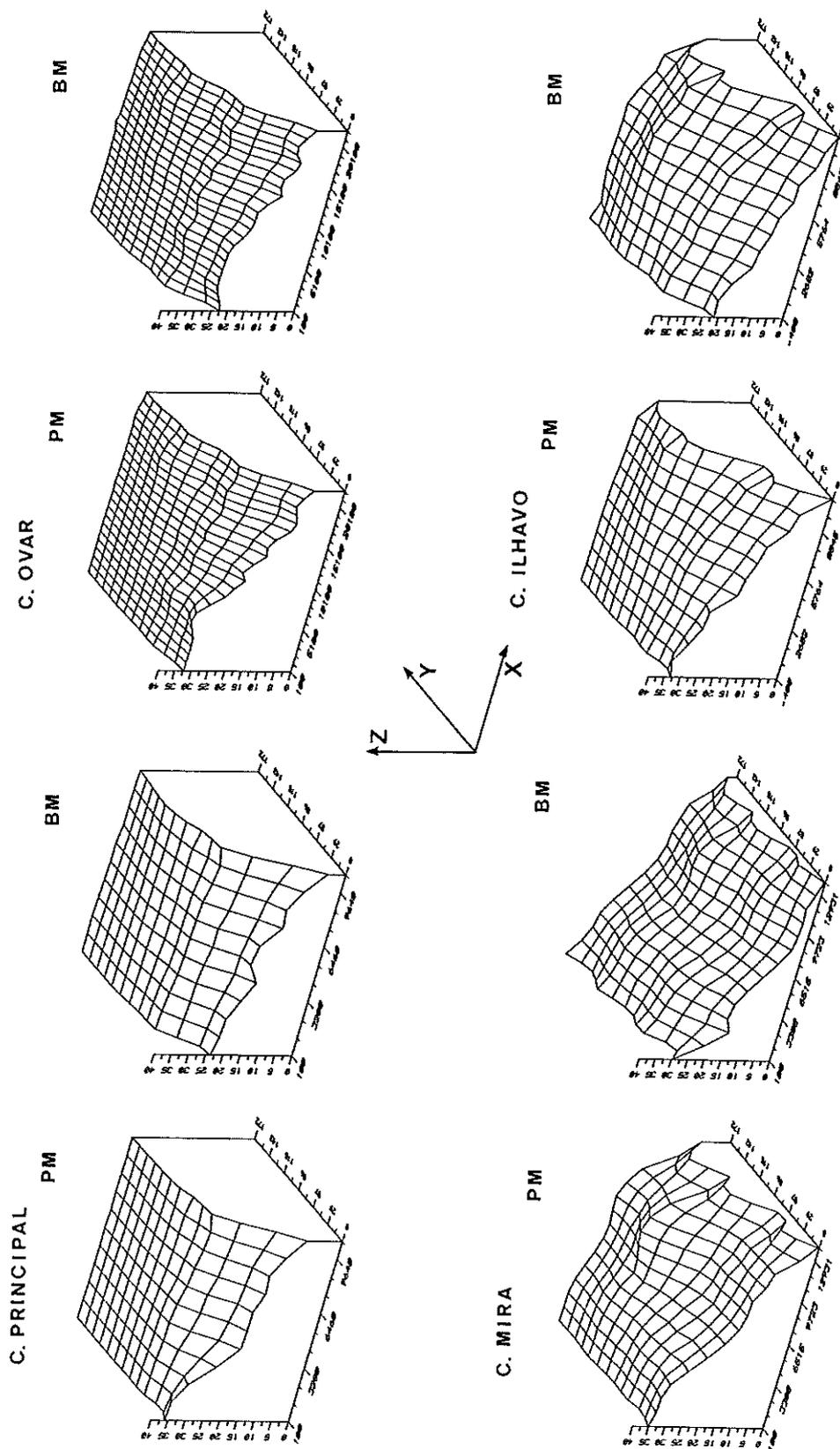


Figura 3.12 Evolução da salinidade entre Abril-91 e Setembro-91, em vários canais da Ria. Os gráficos mostram a salinidade (eixo z) em função da distância (eixo x) ao longo de cada canal e do número de dias após 3-Abril-91 (eixo y), nas situações de preia-mar (PM) e de baixa-mar (BM).

### 3.4.1 CÁLCULO DE SALINIDADES MÉDIAS

O conjunto de resultados de salinidade obtidos permite calcular as salinidades médias no ciclo de maré da água presente em preia-mar nos segmentos indicados na Figura 2.8. Estes segmentos correspondem, como foi discutido, ao percurso realizado pelas partículas de água no ciclo de maré. As médias obtidas para os dois primeiros segmentos de cada canal e os correspondentes desvios padrão são apresentados na Tabela 3.1. Verifica-se que a água contida nestes segmentos, e que corresponde a uma fracção significativa da água da Ria, tem uma salinidade média bastante variável ao longo do ano, sendo no entanto no verão muito próxima da do mar.

Tabela 3.1. Salinidades médias ( $\pm$  desvio padrão) nos dois primeiros segmentos dos canais da Ria. O caudal indicado ( $m^3s^{-1}$ ) é o total estimado para os rios afluentes a montante de cada canal. Na primeira linha indica-se a amplitude de maré na barra (m).

DATA	7/6/90	5/9/90	13/11/90	17/12/90	3/4/91	24/5/91	27/7/91	22/9/91
A.M.	1,9	2,5	2,0	1,9	2,0	1,8	2,2	2,2
Canal Principal								
Caudal	10,3	3,1	51,3	26,0	64,8	15,5	3,2	3,9
S1	35,6 $\pm$ 0,1	35,4 $\pm$ 0,2	34,4 $\pm$ 1,1	35,1 $\pm$ 0,2	30,1 $\pm$ 5,9	35,4 $\pm$ 0,1	35,5 $\pm$ 0,1	35,6 $\pm$ 0,1
S2	33,7 $\pm$ 0,7	35,3 $\pm$ 0,1	27,9 $\pm$ 2,2	29,8 $\pm$ 2,9	20,4 $\pm$ 2,5	32,9 $\pm$ 0,8	35,1 $\pm$ 0,1	35,5 $\pm$ 0,2
Canal de Mira								
Caudal	0,5	0,4	2,2	1,6	3,9	0,7	0,3	0,5
S1	33,4 $\pm$ 1,2	33,8 $\pm$ 1,0	28,7 $\pm$ 3,3	31,2 $\pm$ 2,9	31,0 $\pm$ 3,3	31,5 $\pm$ 2,9	35,0 $\pm$ 0,6	34,6 $\pm$ 0,9
S2	27,8 $\pm$ 2,6	28,8 $\pm$ 2,2	18,6 $\pm$ 3,3	20,7 $\pm$ 4,3	16,8 $\pm$ 4,2	23,0 $\pm$ 3,8	31,1 $\pm$ 2,3	29,8 $\pm$ 2,7
Canal de Ovar								
Caudal	0,7	0,3	1,5	1,4	6,2	1,5	0,4	0,3
S1	35,3 $\pm$ 0,2	35,3 $\pm$ 0,1	33,7 $\pm$ 1,2	34,1 $\pm$ 0,8	33,4 $\pm$ 0,9	34,8 $\pm$ 0,5	35,6 $\pm$ 0,0	35,6 $\pm$ 0,0
S2	33,6 $\pm$ 0,3	35,4 $\pm$ 0,2	26,6 $\pm$ 1,4	30,1 $\pm$ 0,8	24,6 $\pm$ 2,4	32,0 $\pm$ 0,6	35,1 $\pm$ 0,1	35,4 $\pm$ 0,1
Canal do Espinheiro								
Caudal	9,0	2,3	46,0	22,0	52,9	13,0	2,5	3,1
S1	34,3 $\pm$ 0,8	35,3 $\pm$ 0,1	30,1 $\pm$ 4,1	32,4 $\pm$ 1,9	18,1 $\pm$ 0,3	33,6 $\pm$ 1,5	35,5 $\pm$ 0,1	35,5 $\pm$ 0,1
S2	31,6 $\pm$ 0,6	34,8 $\pm$ 0,2	16,7 $\pm$ 2,4	23,5 $\pm$ 1,3	12,8 $\pm$ 1,3	28,4 $\pm$ 1,2	35,6 $\pm$ 0,1	34,9 $\pm$ 0,2
Canal de Ihavo								
caudal	0,1	0,0	1,0	0,6	1,2	0,2	0,0	0,0
S1	34,2 $\pm$ 0,8	34,9 $\pm$ 0,1	27,9 $\pm$ 2,3	32,4 $\pm$ 2,1	31,1 $\pm$ 3,2	32,1 $\pm$ 0,8	35,5 $\pm$ 0,1	35,6 $\pm$ 0,0
S2	32,0 $\pm$ 0,6	35,2 $\pm$ 0,3	16,1 $\pm$ 2,9	23,0 $\pm$ 3,4	17,2 $\pm$ 3,2	28,3 $\pm$ 1,9	35,1 $\pm$ 0,1	34,1 $\pm$ 0,4

### 3.4.2 CÁLCULO DE TEMPOS DE RESIDÊNCIA

Partindo das salinidades médias, calcularam-se as fracções de água doce acumulada em cada segmento do canal. Começando no mar onde se considerou a salinidade constante e igual a 35,8, foi calculada a salinidade média da água no segmento do canal principal a que se ligam os restantes canais. As fracções de água doce nos restantes segmentos foram sucessivamente calculadas a partir das suas salinidades médias. O volume de água doce acumulada num segmento, face ao caudal doce afluente a montante, corresponde a um tempo de residência definido. Os tempos de residência nos três primeiros segmentos são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Tempos de residencia (dia) nos três primeiros segmentos dos canais. Valores negativos são assinalados por (-). Caudais nulos são assinalados por (\*).

DATA	7/6/90	5/9/90	13/11/90	17/12/90	3/4/91	24/5/91	27/7/91	22/9/91
Canal Principal								
TR S1	0,3	1,6	0,3	0,3	1,0	0,3	0,9	0,6
TR S2	45,0	22,8	36,0	49,6	62,9	46,7	30,0	14,2
TR S3	24,3	14,4	26,8	54,2	48,6	31,2	16,6	13,5
Canal de Mira								
TR S1	12,3	11,1	7,3	6,9	-	16,1	5,4	5,2
TR S2	12,0	12,8	5,6	7,0	3,0	14,0	12,7	8,3
TR S3	7,2	7,4	2,3	3,2	1,3	6,7	10,7	6,0
Canal de Ovar								
TR S1	4,5	4,2	4,7	7,1	-	4,1	-	1,9
TR S2	14,1	-	25,7	17,0	5,0	11,3	5,2	3,9
TR S3	7,9	-	14,4	11,2	4,5	6,8	1,3	1,4
Canal do Espinheiro								
TR S1	0,7	0,3	0,5	0,6	1,3	0,7	0,0	0,2
TR S2	4,4	1,7	4,7	5,3	3,4	4,4	-	1,6
TR S3	2,5	0,9	2,9	2,3	1,2	2,2	0,1	0,8
Canal de Ihavo								
TR S1	33,7	23,0	14,8	9,0	-	44,7	1,1	-
TR S2	48,6	15,4	15,2	15,1	10,1	44,4	28,3	97,4
TR S3	48,0	*	8,8	10,7	6,0	36,5	*	*

O cálculo das fracções de água doce está sujeito a um erro, que pode ser estimado em cada caso com base nos desvios padrão das salinidades médias nos segmentos. Os tempos de residência calculados são por isso estimativas cuja variabilidade resulta não só do erro na determinação da fracção de água doce mas também da variação temporal do campo de salinidade e do caudal doce afluyente. Contudo, apesar de existir uma apreciável variação nos valores dos tempos de residência que foram calculados, é identificável um padrão regular de variação espacial de que se salientam os seguintes aspectos:

- Tempos de residência menores que 1 dia correspondem aos segmentos a jusante da foz do rio Vouga (primeiros segmentos do canal do Espinheiro e do canal Principal).
- Tempos de residência maiores que 10 dias foram obtidos nos primeiros segmentos dos canais de Ilhavo e de Mira.

Os valores elevados do tempo de residência indicam que a água doce acumulada não corresponde directamente a um grande caudal doce afluyente a montante, situação que pode ser explicada pela entrada na enchente da água de baixa salinidade proveniente do canal Principal. Os tempos de residência elevados, que também foram obtidos a partir dos segundos segmentos do canal Principal e do canal de Ovar, poderão ser explicados análogamente como consequência da circulação residual nesses canais.

### 3.5 RESULTADOS DAS OBSERVAÇÕES EM CICLOS DE MARÉ NA SECÇÃO DO CHEGADO

#### 3.5.1 CIRCULAÇÃO OBSERVADA NO CANAL DO CHEGADO

O canal do Chegado constitui o limite do lado do mar para a bacia do Laranjo, como se mostrou na Figura 3.2, sendo por isso um local privilegiado para estudar a circulação entre esta bacia e o resto da Ria. O canal é limitado por margens elevadas e apresenta largura razoavelmente constante. Nestas circunstâncias os escoamentos causados pelas

marés podem ser uniformes ao longo do canal. Um pequeno esteiro que deriva da margem sul e que atinge um braço do rio Vouga (rio Velho) poderá fazer variar o escoamento no canal do Chegado, caso neste esteiro ocorram fluxos significativos.

Na sua fase inicial, o trabalho de campo foi planeado para estudar a organização da circulação causada pelos escoamentos de maré no canal do Chegado e no esteiro que liga ao rio Velho. Esta fase decorreu entre Novembro de 1991 e Abril de 1992, tendo sido realizadas observações de velocidade e direcção de corrente, bem como de temperatura e salinidade da água durante vários ciclos de maré e em diferentes pontos das secções referidas.

Um aparelho STS, DNC-2M foi colocado no meio da secção do Chegado a 1,3 m do fundo e mantido a funcionar em regime de aquisição autónoma, durante a semana de 10 a 17 de Novembro de 1991. Um segundo aparelho foi inicialmente instalado no lado sul e posteriormente transferido para a lado norte da mesma secção. Na Figura 3.13 estão representadas as séries de valores de altura de água, de velocidade da corrente (média de 12 minutos segundo o rumo 085 relativo ao norte magnético), de salinidade e de temperatura, obtidos no meio da secção do Chegado. O tempo é indicado em horas após as 16:08 de 10-NOV-91. A amplitude das marés neste período variou entre 1,4 e 1 m.

Comparando as curvas de velocidade e altura conclui-se que existe um pequeno atraso de aproximadamente 0,4 h na inversão da corrente relativamente aos pontos extremos da série de alturas. A vazante é um pouco mais demorada que a enchente. A curva que representa a velocidade apresenta-se quebrada por ocorrerem flutuações breves de velocidade, e também porque a inversão das correntes é rápida, particularmente entre a enchente e a vazante.

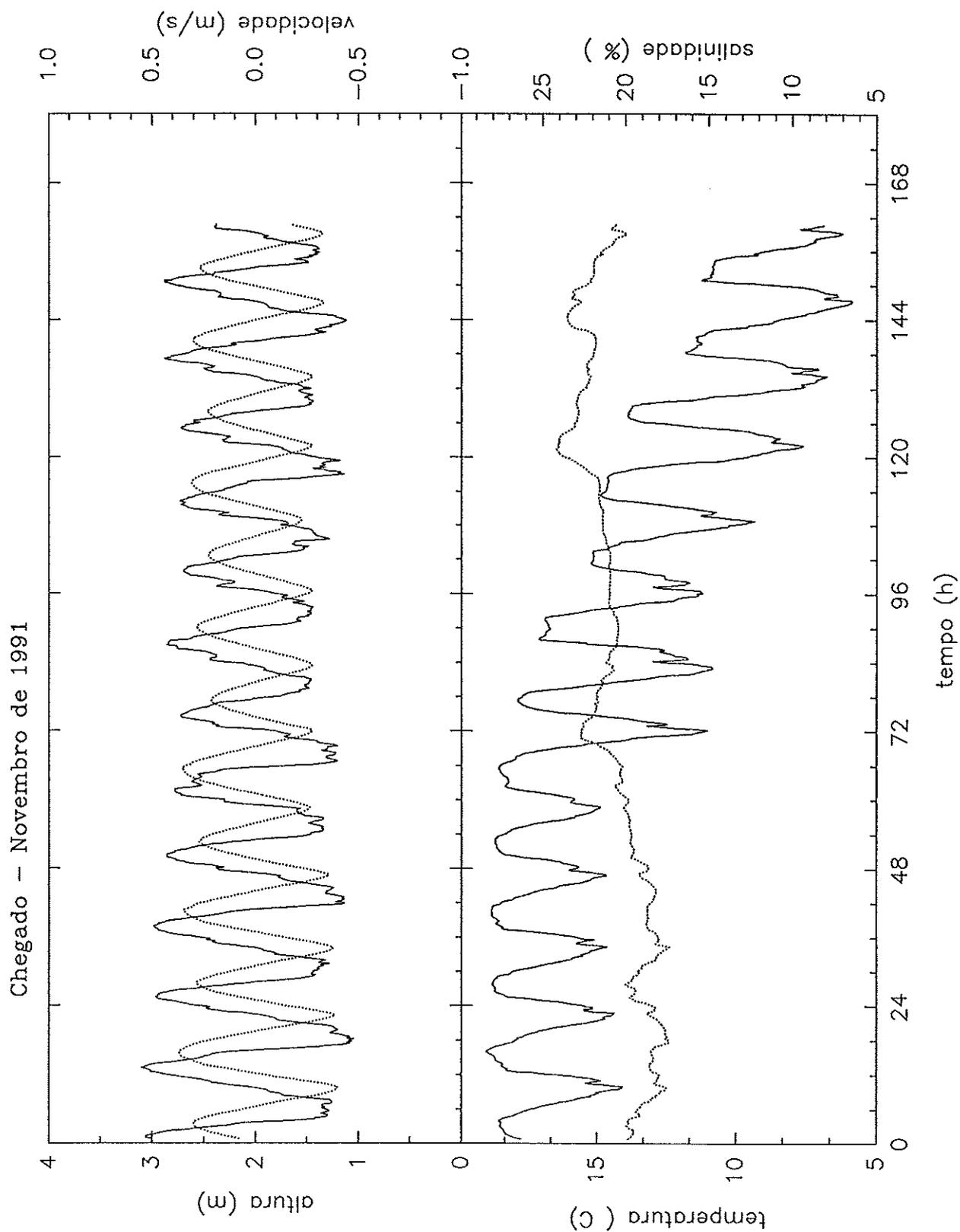


Figura 3.13. Séries temporais de velocidade, altura de água, salinidade e temperatura obtidas no meio da secção do Chegado em Novembro de 1991. Curvas a tracejado para a altura de água e para a temperatura.

A velocidade residual, calculada por integração numérica da série temporal de velocidade para o meio da secção, em nove ciclos de maré, foi de  $0,003 \text{ ms}^{-1}$ . No entanto ao longo deste período aumentou o caudal dos rios em resultado de precipitação intensa. A salinidade que inicialmente só variou no ciclo de maré, mantendo um valor médio quase estacionário, começou a diminuir quando surgiu a precipitação. Apesar da água na vazante ter apresentado uma resposta mais rápida ao aumento do caudal doce, nota-se que a evolução da salinidade de preia-mar acompanha a evolução da de baixa-mar. Esta relação quase constante entre as duas salinidades leva a supor que o tempo de residência da água doce neste canal é bastante superior ao período de maré.

Os resultados obtidos no lado norte do canal, também a 1,3 m do fundo, são quase sobreponíveis aos dos meio. No entanto nesta comparação observa-se que a velocidade máxima da enchente no lado norte é inferior, enquanto que na vazante os resultados são idênticos. Esta diferença justifica que na estação do lado norte a velocidade residual calculada para os mesmos nove ciclos de maré seja de  $-0,03 \text{ ms}^{-1}$ , revelando que aí predomina a corrente de vazante. Os resultados das observações numa estação do lado sul foram condicionados pela reduzida coluna de água na baixa-mar (cerca de 1m). A velocidade observada junto ao fundo apresenta valores máximos de enchente idênticos aos da estação do lado norte, sendo os de vazante menores. Estes resultados são coerentes com uma maior intensidade da vazante no lado norte enquanto a enchente é mais uniformemente distribuída.

Na semana de 26 de Janeiro a 2 de Fevereiro de 1992 foram repetidas as observações no meio da secção do Chegado e simultaneamente realizadas observações no esteiro da margem sul. Durante este período não ocorreu variação significativa do caudal dos rios e a amplitude das marés sofreu um pequeno aumento. Os resultados obtidos na estação do meio estão representados na Figura 3.14 e são comparáveis aos obtidos entre 10 e 13 de Novembro de 1991. A velocidade residual nos 12 ciclos observados foi de  $0,012 \text{ ms}^{-1}$ , tendo pois dominado a enchente.

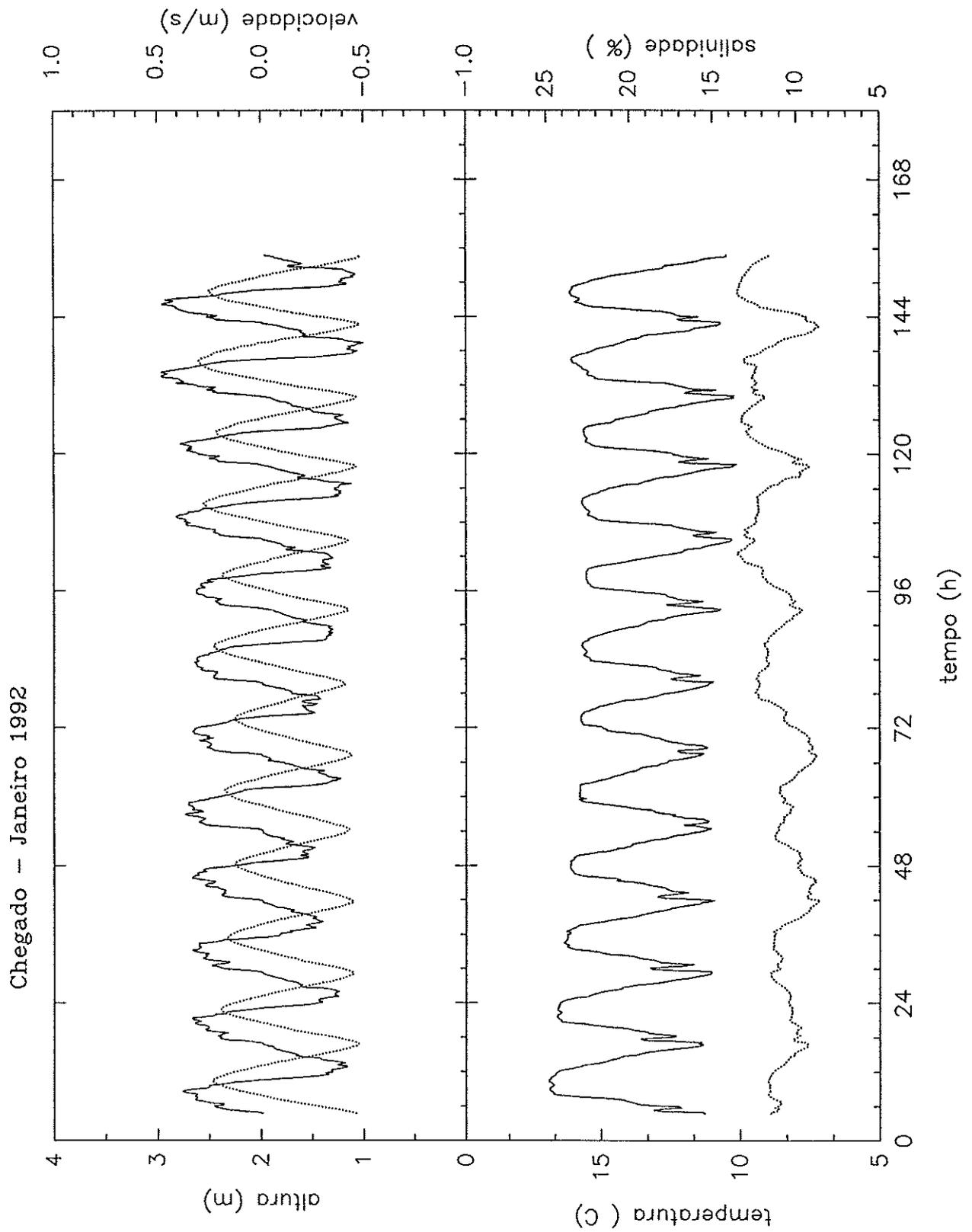


Figura 3.14. Séries temporais de velocidade, altura de água, salinidade e temperatura obtidas no meio da secção do Chegado em Janeiro de 1992. Curvas a tracejado para a altura de água e para a temperatura.

As observações de velocidade realizadas no esteiro revelam existir flutuações de ciclo mais curto que o semidiurno, como é evidente na Figura 3.15. Próximo da preia-mar observou-se ocorrer transitóriamente fluxo de vazante (isto é, para sul). Este fluxo transporta água do canal do Chegado que se conclui ser mais salgada. No início da vazante no Chegado, volta a ocorrer fluxo do esteiro para o canal do Chegado. Esta dupla inversão de corrente, breve nas marés mortas, acentua-se com o aumento de amplitude das marés. A velocidade média em 13 ciclos foi de  $0,008 \text{ ms}^{-1}$ , o que indica que o fluxo residual através do esteiro é pequeno. O fluxo cíclico de maré é da ordem de  $10^5 \text{ m}^3$  por ciclo, que provoca um pequeno aumento no fluxo do canal do Chegado. As observações no esteiro foram repetidas de 11 a 13 de Abril de 1992 (Figura 3.16), tendo sido igualmente observada a dupla inversão de corrente próximo da preia-mar a que está associada a uma flutuação de salinidade, que mostra que a água no esteiro é menos salgada. Esta diferença de salinidade pode ser atribuída à fracção de caudal do rio Vouga que é descarregada pelo rio Velho. Este caudal contudo tem um efeito directo reduzido sobre a salinidade no canal do Chegado, uma vez que a circulação residual entre eles é pequena. Nos três ciclos de maré observados a velocidade residual foi de  $0,014 \text{ ms}^{-1}$ .

### 3.5.2 FLUXOS DE MARÉ NA SECÇÃO DO CHEGADO

A segunda fase do estudo dos fluxos de maré no canal do Chegado decorreu na secção assinalada na Figura 3.2 e representada em corte na Figura 3.3. Nas estações indicadas foram realizadas observações de velocidade e tomadas amostras em que se determinou a salinidade, a concentração de partículas em suspensão (CPS), a concentração de clorofila-a e a absorvância causada pelo nitrato, seguindo os procedimentos referidos. As campanhas de medição e amostragem foram repetidas para cobrirem diferentes condições meteorológicas, hidrológicas e de amplitude de maré.

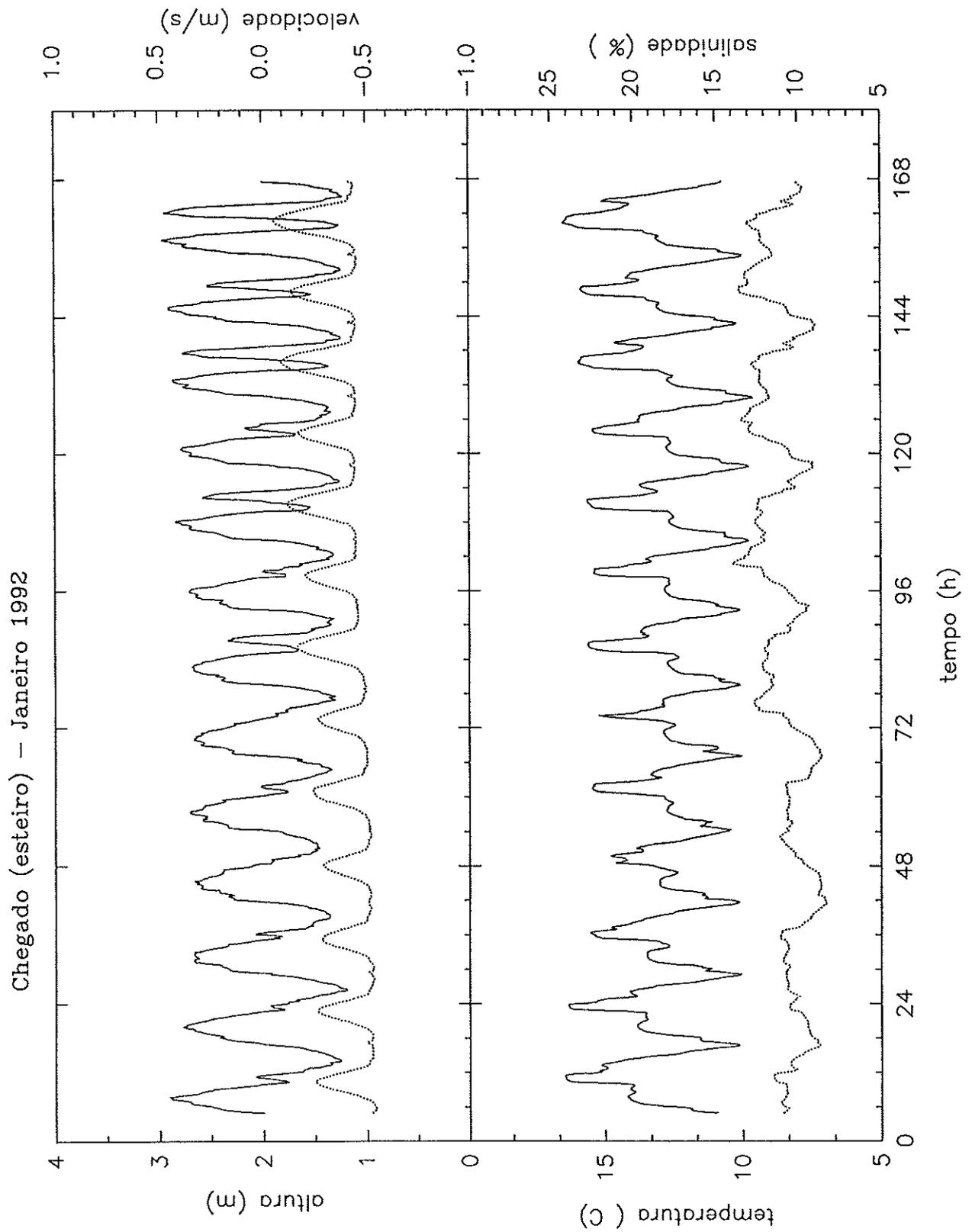


Figura 3.15. Séries temporais de velocidade, altura de água, salinidade e temperatura obtidas no esteiro do Chegado em Janeiro de 1992. Curvas a tracejado para a altura de água e para a temperatura.

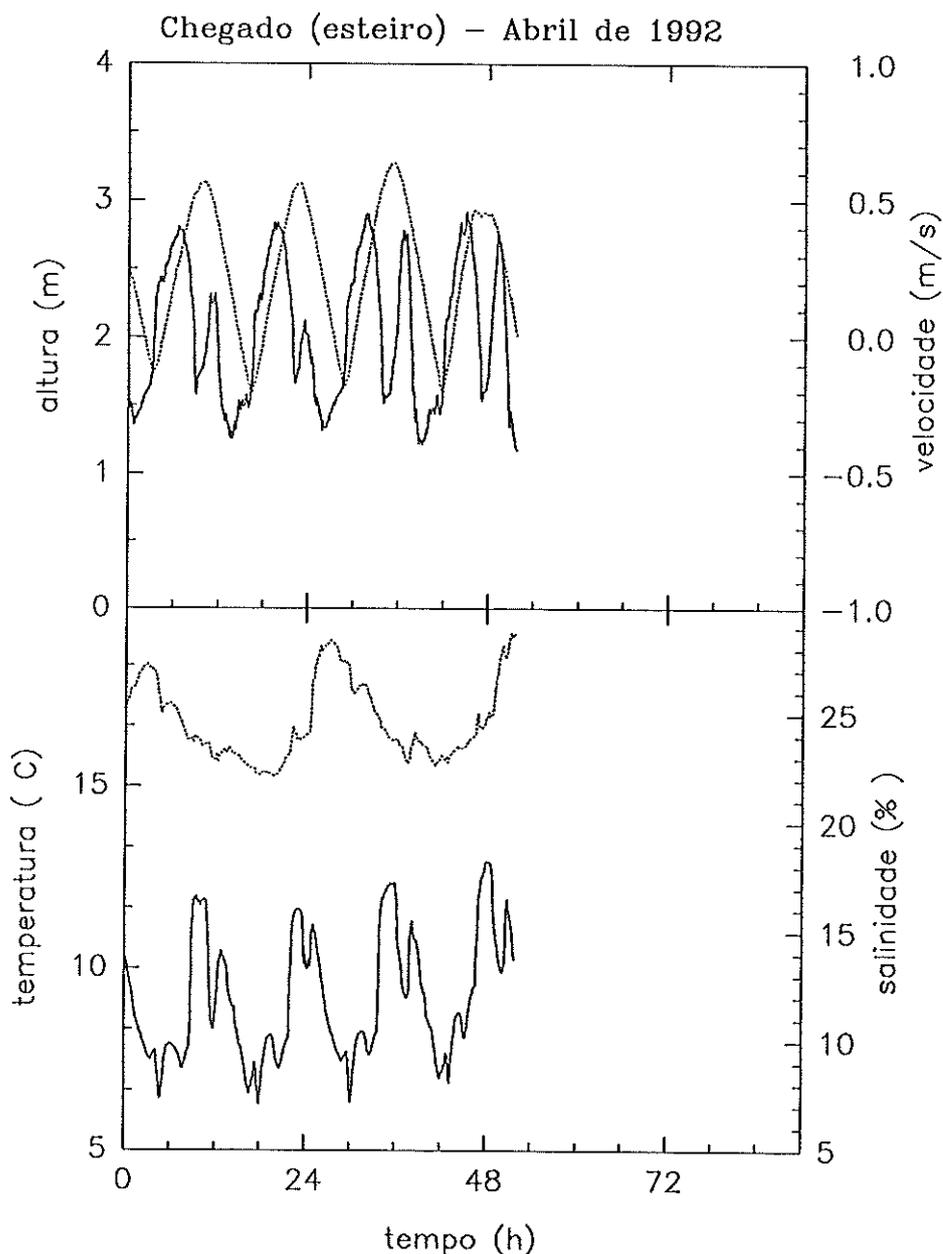


Figura 3.16. Séries temporais de velocidade, altura de água, salinidade e temperatura obtidas no esteiro do Chegado em Abril de 1992. Curvas a tracejado para a altura de água e para a temperatura.

Na Tabela 3.3 são indicadas as datas das campanhas que foram realizadas e resumidos os valores médios dos parâmetros medidos. Estes valores médios resultam da integração numérica dos fluxos na secção entre os pontos do ciclo de maré correspondentes à inversão de correntes. Os valores observados em que se apoiou o cálculo estão representados nas Figuras 3.17, 3.18, 3.19, usando para os valores à superfície símbolos abertos e símbolos a cheio para os valores do fundo. As linhas representam os valores médios na secção. Os caudais de maré máximos que foram calculados são inferiores a  $200 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  nas marés mortas e aproximam-se de  $400 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  nas marés vivas.

Tabela 3.3 Resumo de valores médios dos parâmetros medidos na seção do Chegado, designadamente: caudal do rio Antuá, salinidade, concentração de partículas em suspensão, percentagem de cinza nas partículas, concentração de clorofila-a, volume do prisma de maré, massa de partículas transportadas em suspensão durante o ciclo de maré.

Data	13-ABR-92	19-MAI-92	26-AGT-92	21-DEZ-93	3-JAN-94	22-MAR-94	26-MAR-94
C. Antuá ( $m^3 s^{-1}$ )	1,43	0,44	0,11	3,67	>4	2,84	-
Salinidade	16,1	30,3	34,3	11,4	11,5	10,5	19,9
CPS ( $mg l^{-1}$ )	18,3±4,4	17,5±5,4	8,7±3,9	13,6±6,3	28,0±14,2	14,1±6,1	26,0±10,9
Cinzas (%)	75±7	79±2	71±5	89±4	84±4	73±6	77±6
Clorofila ( $\mu g l^{-1}$ )	35,3±9,1	4,1±1,1	2,1±1,5	5,7±1,0	5,1±1,0	9,0±3,0	20,2±5,1
Vol.maré ( $10^6 m^3$ )	3,4	3,6	4,4	2,6	6,4	1,9	4,7
Massa PS ( $10^3 kg$ )	62	63	38	35	179	27	122

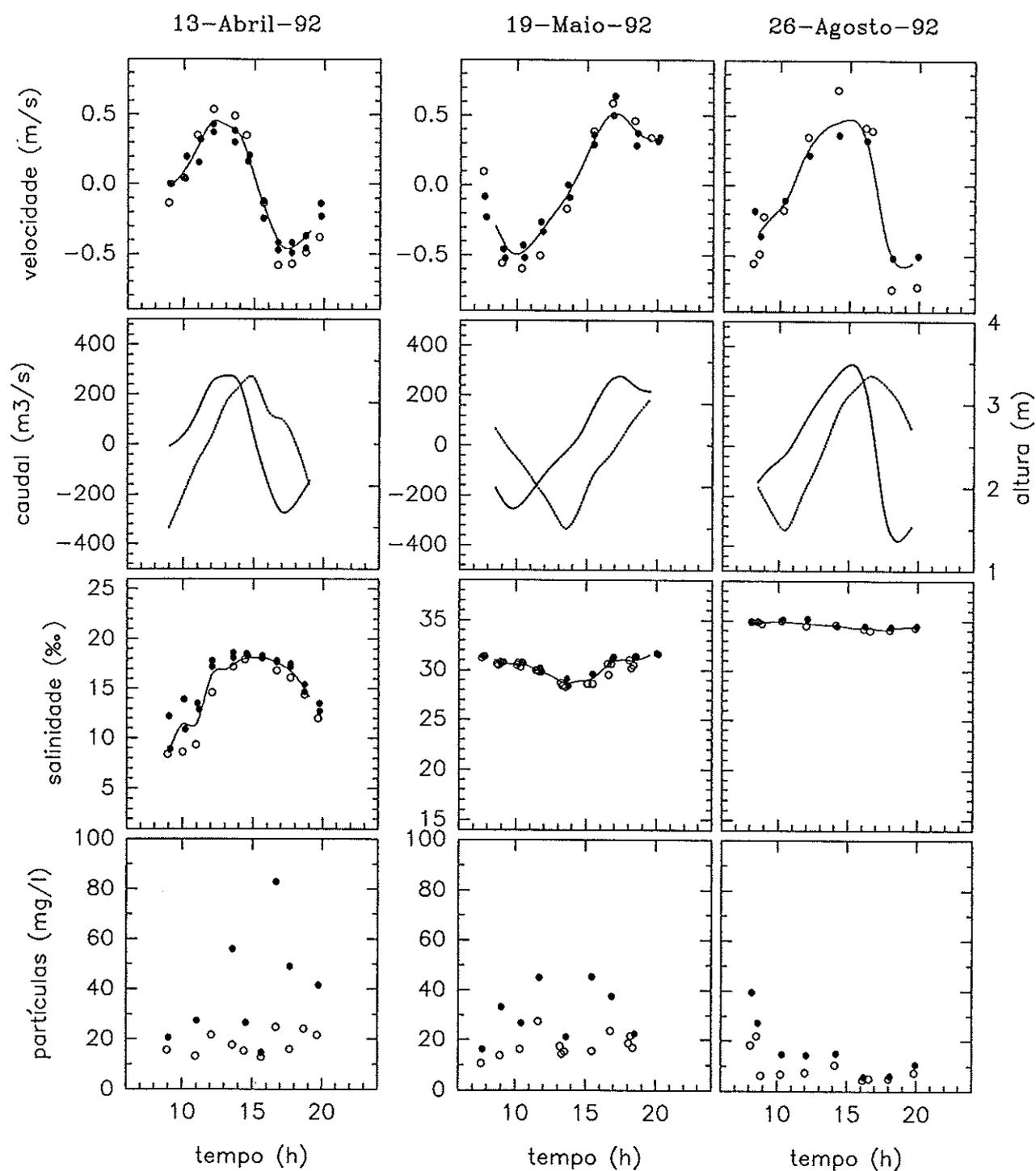


Figura 3.17. Resultados de velocidade, altura de água, salinidade e CPS usados no cálculo de fluxos na secção do Chegado. Símbolos abertos para os valores da superfície; símbolos a cheio para os valores do fundo; linhas para os valores médios na secção.

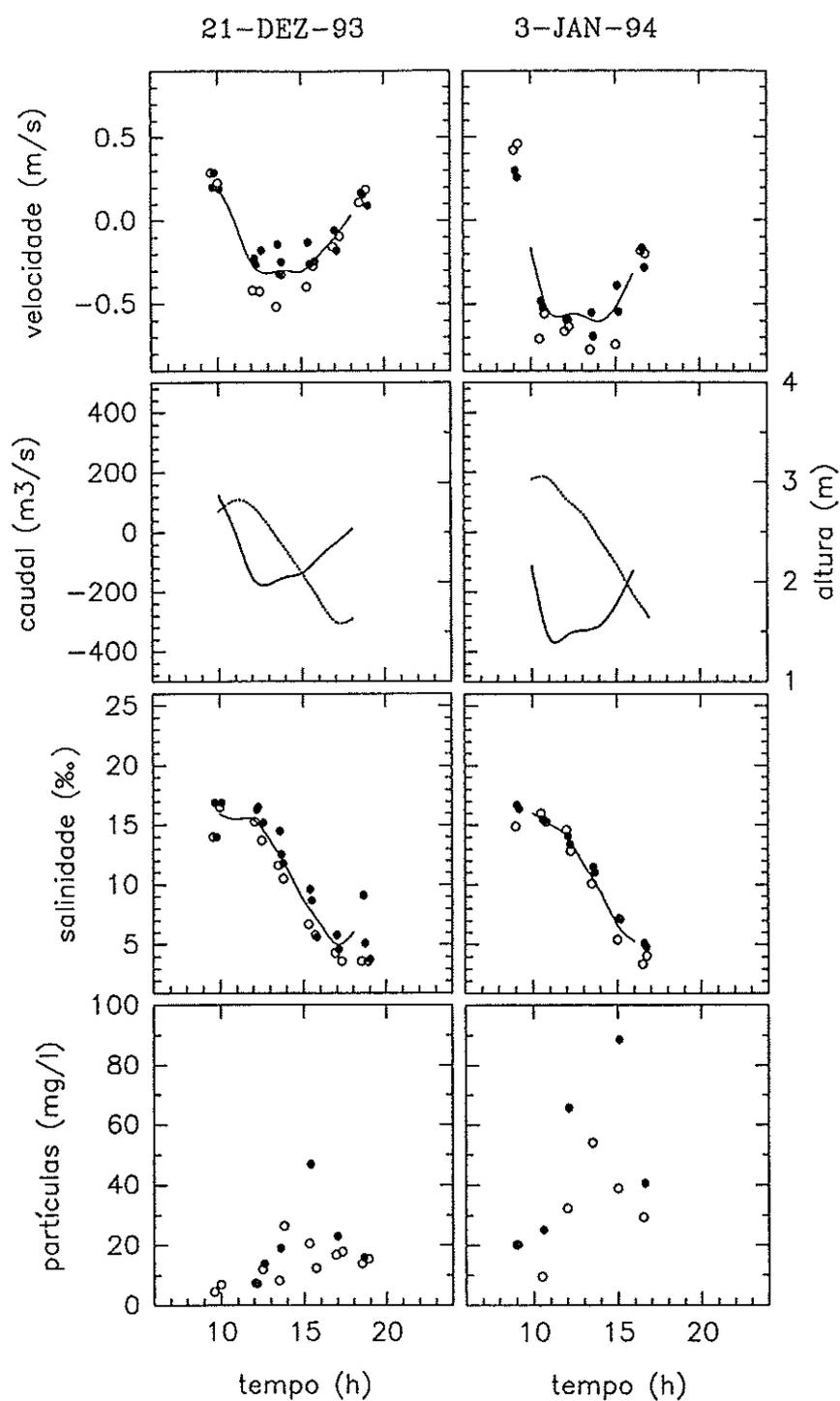


Figura 3.18. Resultados de velocidade, altura de água, salinidade e CPS usados no cálculo de fluxos na secção do Chegado. Símbolos abertos para os valores da superfície; símbolos a cheio para os valores do fundo; linhas para os valores médios na secção.

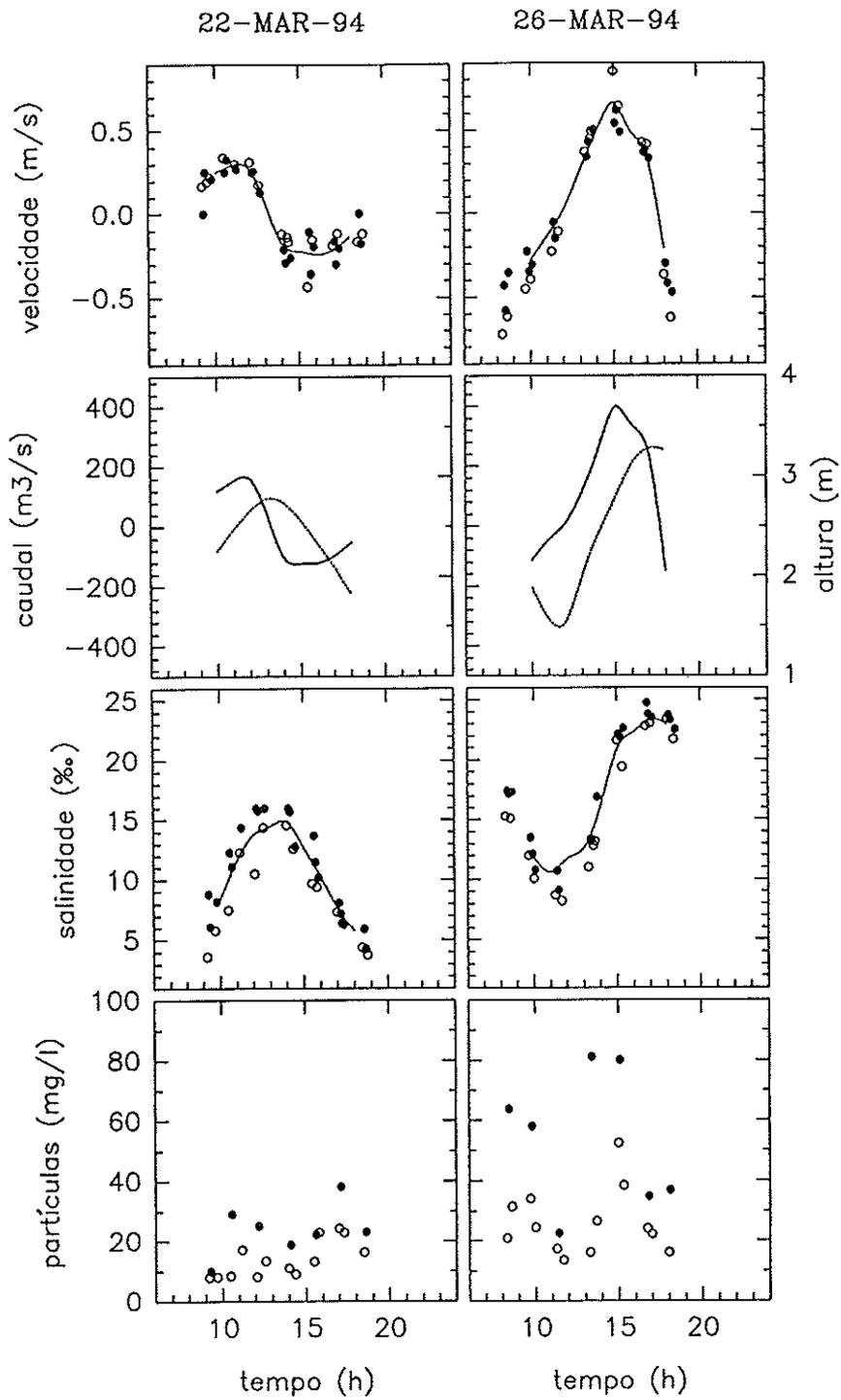


Figura 3.19. Resultados de velocidade, altura de água, salinidade e CPS usados no cálculo de fluxos na secção do Chegado. Símbolos abertos para os valores da superfície; símbolos a cheio para os valores do fundo; linhas para os valores médios na secção.

Foi observado que neste local as marés mortas têm uma amplitude de aproximadamente 1 m enquanto que as marés vivas atingem 1,8 m de amplitude. Esta diferença de amplitude corresponde a razões de velocidades de corrente próximas de 1/2 e razões de volume movimentado no ciclo próximas de 1/3, como é indicado na Tabela 3.3. Os resultados de Janeiro de 1994 foram obtidos sob vento e chuva muito intensos, pelo que representam condições meteorológicas excepcionais.

As campanhas realizadas em 1992 correspondem a marés com amplitudes intermédias no ciclo quinzenal de maré viva - maré morta. A variação observada nos parâmetros determinados revela existir uma tendência sazonal particularmente evidente na salinidade e na clorofila. Contudo a CPS apresenta apreciável variabilidade pouco relacionada com a variação de salinidade. Para esclarecer a causa da variação da CPS, foram realizadas novas campanhas em 93/94, para as quais foram escolhidas datas correspondentes a várias fases do ciclo quinzenal.

A gama de valores de salinidade observada situa-se entre 4 e 35. Parte desta variação é explicada pela variação do caudal do rio Antuã. O ciclo quinzenal de amplitude de maré também causa alguma variação de salinidade média, como é mais visível nas campanhas realizadas em Março de 94. A variação de salinidade no ciclo de maré corresponde à diferença de salinidade da água ao longo do canal, como foi discutido. Se ocorrem diferenças entre os pontos da secção, elas relacionam-se com a circulação residual que existe no canal. Como foram observadas pequenas diferenças laterais de salinidade e como também é pouco acentuada a variação vertical, conclui-se ser mais importante no transporte residual de sal a interacção entre o gradiente longitudinal de salinidade e o gradiente vertical de velocidade, de que resulta um fluxo dispersivo. A estratificação salina observada nos períodos em que o caudal do rio é maior, acentua-se geralmente durante a enchente. Este fenómeno indica maior intensidade da corrente de enchente junto ao fundo. Contudo esta situação pode variar, uma vez que se observou que o vento, quando é contrário à corrente, altera o perfil vertical de velocidade.

### 3.5.3 CONCENTRAÇÃO DE PARTÍCULAS EM SUSPENSÃO

A concentração de partículas em suspensão (CPS) apresenta uma variabilidade espacial e temporal, que é determinada pelos processos que conduzem à entrada ou à saída de partículas da coluna de água. Observou-se nesta secção que a variação de CPS durante o ciclo de maré é independente da variação de salinidade como se verifica na Figura 3.20, representando os valores de CPS em função da salinidade e do quadrado da velocidade. Para testar a relação entre CPS, salinidade e o quadrado da velocidade foi suposto existir uma relação linear entre estes parâmetros que explique parte da variabilidade de CPS. Os valores da razão entre a variância correspondente às rectas de regressão e a variância dos desvios entre valores de regressão e valores observados à superfície são indicados na Tabela 3.4. Esta razão de variâncias pode ser usada num teste F. Se a variância que é explicada pela relação linear for significativamente maior que a variância correspondente aos desvios, conclui-se que a recta de regressão explica parte da variação de CPS.

Tabela 3.4 Resultados da regressão entre CPS à superfície, a salinidade e o quadrado da velocidade. É ainda indicada a razão entre variância explicada pelas rectas de regressão e a variância dos desvios (F).

N. valores	a	b	Coef. corr.	F	$F_{1,N-2} (\alpha=0,01)$
CPS = a + b x SAL.					
72	21,35	-0,206	0,209	3	7
CPS = a + b x VEL. <sup>2</sup>					
72	12,54	27,91	0,478	21	7

Os resultados obtidos indicam que a variação de CPS observada na secção do Chegado é em parte explicada pela alternância da sedimentação e da ressuspensão causada pela variação cíclica da intensidade da corrente. Também se conclui que a variação cíclica de salinidade não tem relação linear com a CPS. A inexistência de relação entre CPS e a salinidade, à escala do ciclo de maré, leva admitir não existir ao longo do canal de

Chegado um gradiente nítido de CPS, sendo portanto o transporte residual determinado pela dinâmica de deposição - ressuspensão. A variabilidade de CPS nas amostras colhidas no fundo é ainda maior, uma vez que foram obtidos pontualmente valores entre 100 e 200 mg<sup>l</sup><sup>-1</sup>. Estes valores elevados indicam também que ocorre ressuspensão local do sedimento do leito.

Um limite que se pode calcular para o transporte residual é dado pela massa total de partículas em suspensão movimentadas no ciclo de maré. Na Tabela 3.3 indicam-se as massas totais de partículas movimentadas calculadas com base nas CPS médias das amostras de superfície.

Além da variação de velocidade da corrente com ciclo semidiurno, ocorre uma grande variação de velocidade máxima entre maré viva e maré morta, que justifica a importância da variação de CPS observada. No entanto, a variação sazonal de CPS não pode ser explicada unicamente com base na velocidade das correntes.

#### 3.5.4 CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A

A variação sazonal de CPS é acompanhada por uma variação da concentração de clorofila-a, como se mostra na Figura 3.21. Esta variação indica que a contribuição do fitoplâncton para a massa de partículas em suspensão apresenta um máximo na primavera. A variação de CPS média relaciona-se simultaneamente como o caudal do rio Antuã e a velocidade máxima da corrente de maré, o que indica que o sedimento transportado pelos rios quando o caudal é alto influencia directamente a CPS no canal do Chegado nos períodos de marés vivas.

### 3.5.5 CONCENTRAÇÃO DE NITRATO

As absorvâncias de luz ultra-violeta a 220 e 275 nm permitiram avaliar a variação da concentração de nitrato nos ciclos de maré em que decorreram as observações. Nas campanhas em que o caudal de água doce foi elevado, a absorvância a 275 nm variou entre 0,04 e 0,09, sendo a absorvância a 220 nm muito maior, pelo que se reúnem as condições ótimas de aplicação deste método expedito para nitratos. Na Figura 3.22 observa-se que existe uma relação inversa entre salinidade e nitrato de tipo linear, entre a salinidade 0 e 20. Acima desta salinidade, a absorvância a 220 nm mantém valores da ordem de 0,2 a 0,5 e que não dependem da salinidade. Estes valores, que correspondem a baixas concentrações de nitrato, já não podem contudo servir para avaliar a variação dessa concentração, porque a interferência da matéria orgânica já é sensível, uma vez que as variações de absorvância a 220 nm são explicadas pelas variações da absorvância a 275 nm.

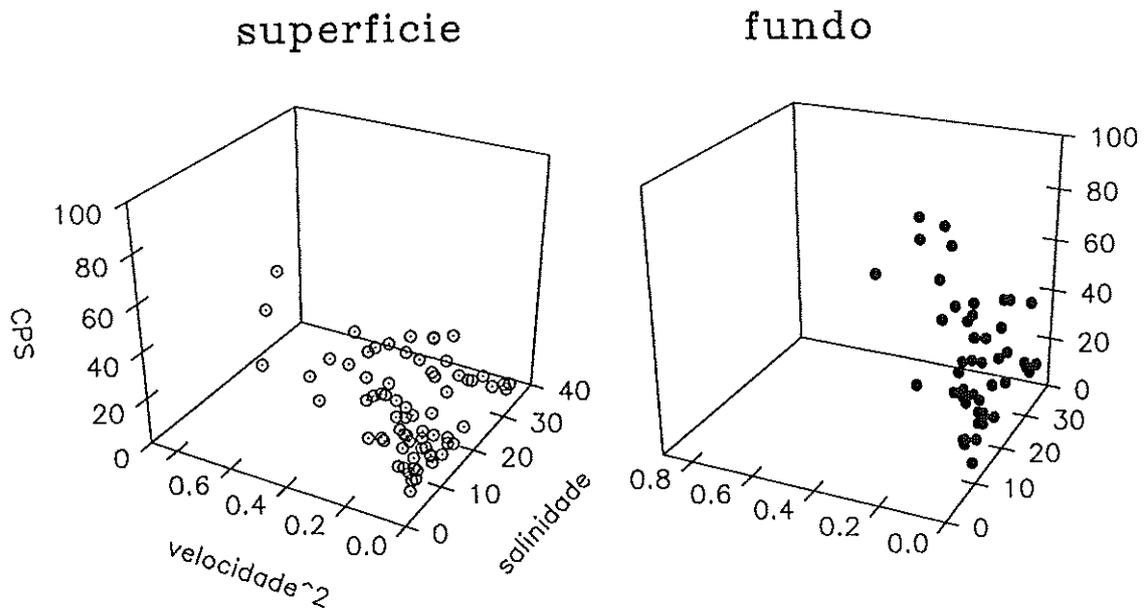


Figura 3.20. Relação entre CPS, velocidade e salinidade. Símbolos abertos para os valores da superfície e símbolos a cheio para os valores do fundo.

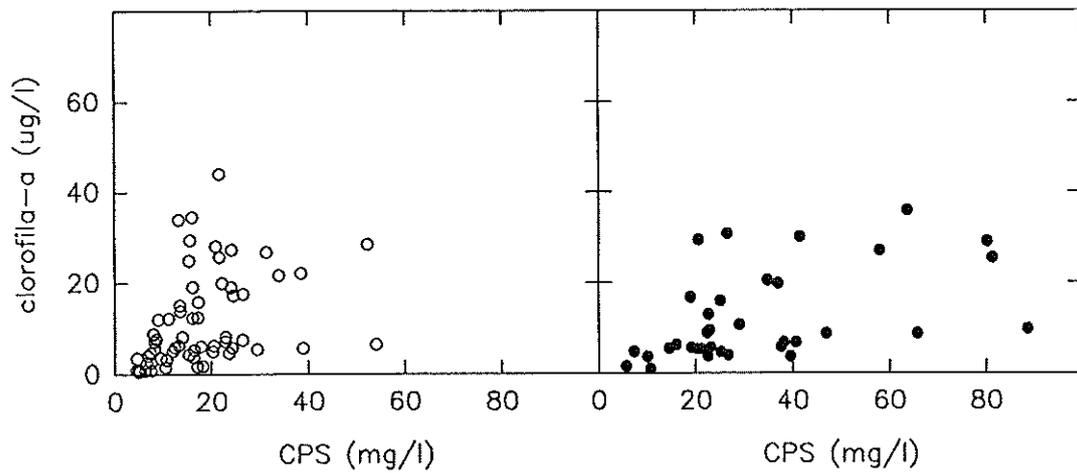


Figura 3.21. Relação entre CPS e concentração de clorofila-a. Símbolos abertos para os valores da superfície e símbolos a cheio para os valores do fundo.

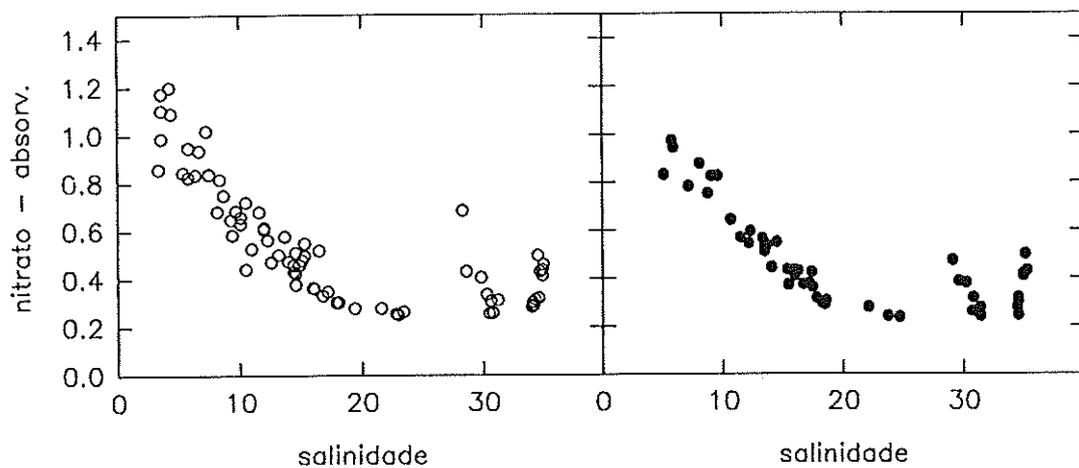


Figura 3.22. Relação entre absorvância a 220 nm e salinidade. Símbolos abertos para os valores da superfície e símbolos a cheio para os valores do fundo.

## 3.6 RESULTADOS DAS OBSERVAÇÕES EM CICLOS DE MARÉ NA SECÇÃO DA TESTADA

### 3.6.1 CIRCULAÇÃO NO CANAL DA TESTADA

O canal do Chegado para poente da secção do Cais do Bico aumenta consideravelmente de largura. A este aumento de largura corresponde a redução da profundidade, o que causa que algumas áreas do canal fiquem emersas na baixa mar. Os locais mais fundos, indicados pelo sombreado na Figura 3.23, desenvolvem-se para oeste em direcção ao cabo da Sobeira e para sudoeste rodeando a ilha da Testada. A organização dos fluxos de maré ao longo deste troço do canal determina a circulação a que a água proveniente do Laranjo está sujeita, na região em que se encontram vários canais da Ria.

Na fase inicial do trabalho de campo, foram realizadas observações de correntes e salinidade no ramo do canal dirigido para oeste, num ponto próximo do cabo da Sobeira, e no ramo orientado para sudoeste, num local entre a ilha da Testada e a ilha da Gaga, conhecido por Gramato. Apesar das condições nestes locais não serem as mais favoráveis ao uso do equipamento disponível para medição autónoma, os resultados obtidos permitem formular algumas conclusões.

As observações de correntes realizadas em 23-24 de Fevereiro de 1992, a cerca de 0,5 m do fundo, mostraram que a direcção das correntes de maré é semelhante nos dois locais (060 - 240, rumos relativos ao norte magnético), apesar de situados em ramos diferentes do canal. Contudo, observaram-se diferenças evidentes nas correntes de maré dos dois locais como se vê na Figura 3.24. No cabo da Sobeira a corrente de vazante é sensivelmente mais intensa que a de enchente, enquanto no Gramato as velocidades são semelhantes e a enchente prolonga-se perto de 30 minutos em relação à vazante. Daqui resulta que a velocidade residual seja de vazante no lado norte (velocidade média de 2 ciclos  $-0,057 \text{ ms}^{-1}$ ) e que a velocidade residual seja de enchente no lado sul (velocidade média de 2 ciclos  $0,018 \text{ ms}^{-1}$ ).

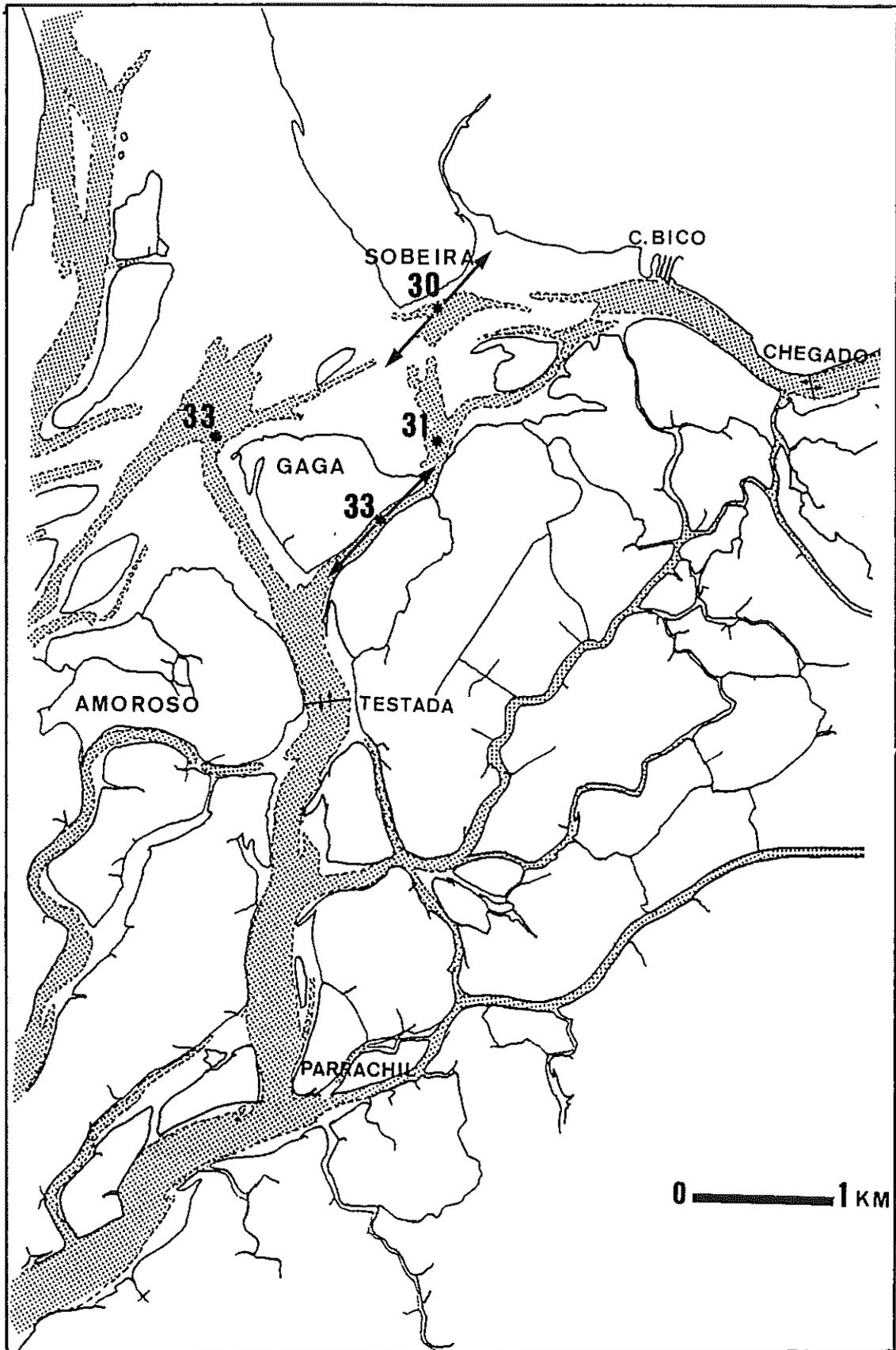


Figura 3.23. Morfologia do fundo do canal da Murtosa e organização dos campos de correntes e de salinidade entre a Sobeira e a Testada.

As observações de salinidade também confirmam este padrão de circulação. No Gramato observaram-se salinidades superiores às da Sobeira, como se vê na Figura 3.24. A maior variação de salinidade nesta zona do canal ocorre ao longo da direcção observada para as correntes, não correspondendo à direcção do eixo principal do canal. Na Figura 3.23 são indicados os valores de salinidade observados na preia-mar de 17-2-92, que suportam esta conclusão.

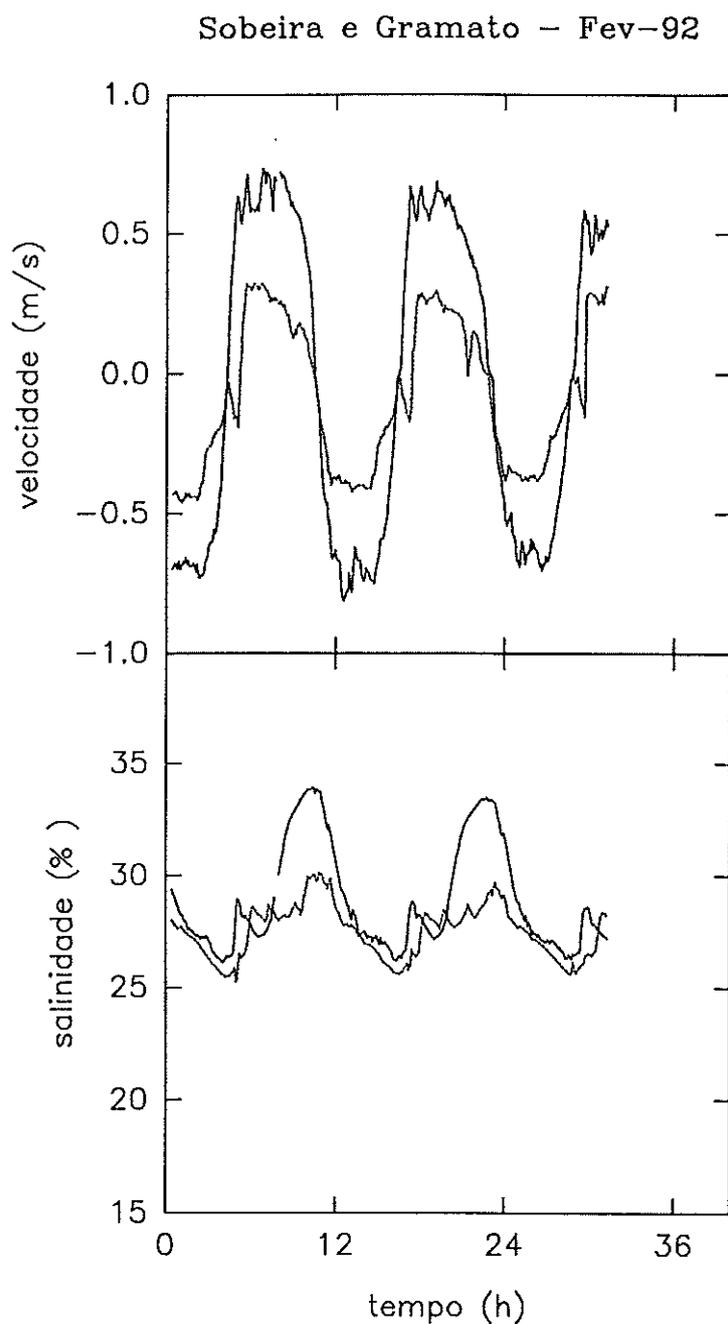


Figura 3.24. Comparação de velocidades e salinidades medidas na Sobeira (curvas a tracejado) e no Gramato (curvas a cheio).

Os fluxos de maré que rodeiam a ilha da Gaga convergem num único canal entre as ilhas da Testada e do Amoroso. Nesta zona do canal da Testada foi localizada a secção marcada na Figura 3.23, onde foram realizadas campanhas para determinar fluxos de maré através da secção. Em algumas destas campanhas também se observou uma assimetria lateral nas correntes de maré. Geralmente a corrente de vazante é mais intensa no lado oeste, enquanto que a corrente de enchente predomina do meio para o lado este. As diferenças observadas num ciclo de maré em 3-Maio-1993 estão representadas na Figura 3.25. A velocidade residual calculada nesse ciclo de maré no centro da secção é de  $0,005 \text{ ms}^{-1}$ .

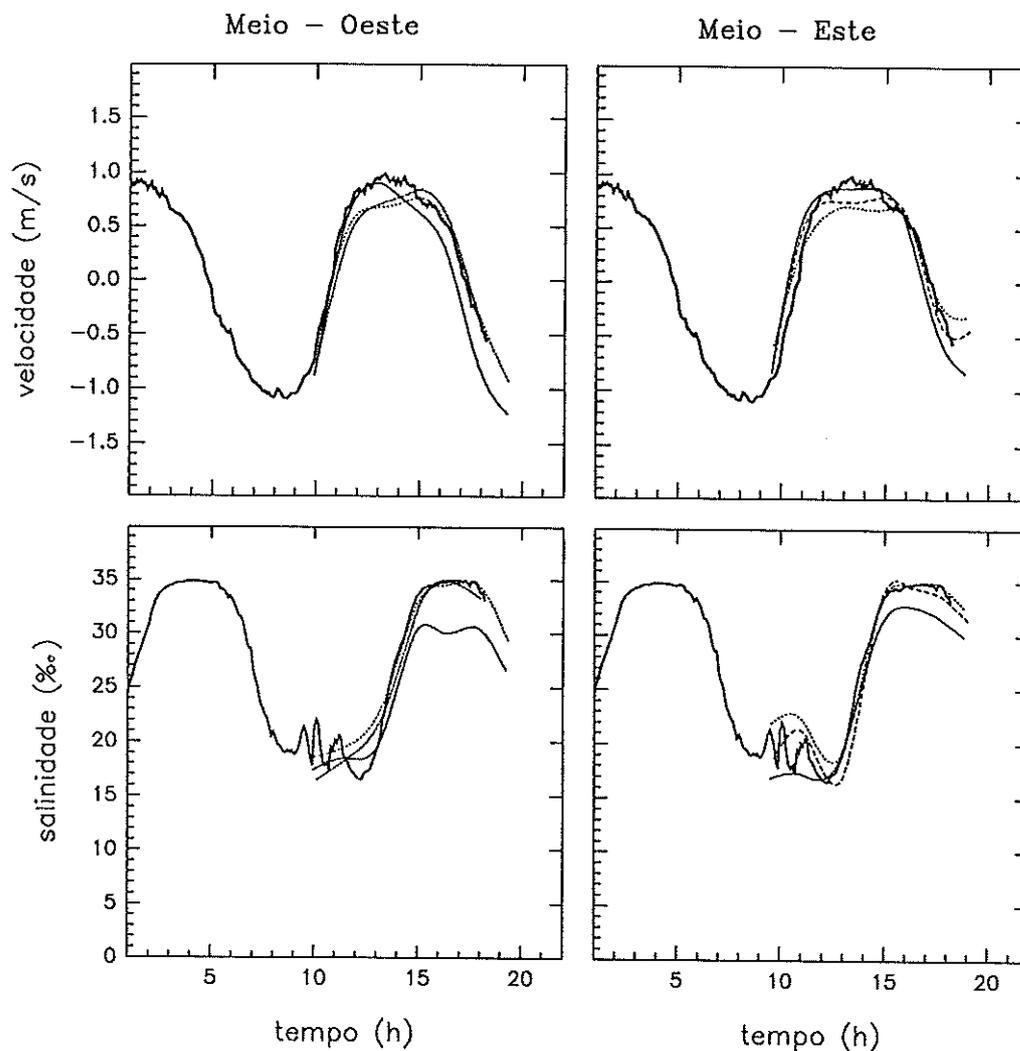


Figura 3.25. Comparação de velocidades e salinidades medidas no centro (curva a grosso) e nos lados da secção da Testada (curvas a cheio para a superfície, a tracejado para o meio e a pontilhado para o fundo).

### 3.6.2 FLUXOS DE MARÉ NA SECÇÃO DA TESTADA

As observações destinadas à determinação dos fluxos de maré na secção da Testada foram realizadas nas estações assinaladas na Figura 3.3, que permitem caracterizar a variação lateral e vertical dos fluxos de maré. Os parâmetros medidos e a metodologia seguida são os já referidos. As campanhas de medição e amostragem foram também repetidas em várias situações meteorológicas, hidrológicas e de amplitude de maré.

Na Tabela 3.5 são indicadas as datas das campanhas realizadas e resumidos os valores médios dos parâmetros medidos resultantes da integração numérica dos fluxos no ciclo de maré. Os valores de CPS e clorofila-a correspondem às médias das amostras da superfície.

Tabela 3.5 Resumo de valores médios dos parâmetros medidos na secção da Testada.

Data	8-DEZ-92	1-MAR-93	3-MAI-93	10-MAI-93	9-JUL-93	23-AGT-93
C.Antuã ( $m^3s^{-1}$ )	>4	1,25	1,61	-	0,93	0,33
Salinidade	8,7	28,4	25,8	28,5	31,7	35,5
CPS ( $mg l^{-1}$ )	27,6±15,8	10,5±3,3	13,4±9,8	8,9±3,7	11,4±7,7	15,0±8,7
Cinzas (%)	76±4	88±3	84±3	82±4	75±8	79±7
Clorof.-a ( $\mu g l^{-1}$ )	2,7±1,8	5,2±2,0	6,0±4,6	-	6,9±2,5	11,0±3,9
Vol. ( $10^6 m^3$ )	11,5	-10,3	15,6	-8,8	12,5 -10,2	12,9 -10,5
PS ( $10^3 kg$ )	317	108	209	78	129	176

Os resultados experimentais usados nos cálculos das médias na secção, estão representados nas Figuras 3.26, 3.27, 3.28. Os símbolos abertos representam os resultados do lado este, os símbolos a cheio representam os resultados do lado oeste e as linhas correspondem aos valores médios na secção. Pelos gráficos de velocidade dessas Figuras, verifica-se em todos os casos observados que a curva de velocidade média é explicada pelas marés semidiurnas que se propagam na Ria. Contudo as velocidades observadas nos vários pontos da secção afastam-se por vezes do valor médio, revelando a acção de outros fenómenos. Foram sempre observadas durante a

vazante velocidades mais baixas no lado este da secção, enquanto na enchente foram por vezes aí observadas velocidades mais altas. Esta última situação verificou-se em 8-Dezembro-1992, em 3-Maio-1993 à superfície e coincide com a ocorrência de vento norte, que altera o perfil vertical de velocidade. Geralmente a velocidade diminui com a profundidade em resultado do atrito do escoamento com o leito do canal.

A variação no ciclo de maré da salinidade tem uma grande amplitude quando o caudal dos rios é elevado. Como se nota na Figura 3.25, ocorrem próximo da baixa-mar flutuações locais de salinidade que são mais acentuadas no lado este, enquanto que próximo de preia-mar é máxima a variação vertical. A diferença lateral observada no fim da vazante, corresponde a uma frente de mistura que por vezes foi observada no local. O aumento de estratificação salina no fim da enchente pode ser explicado pelo perfil vertical de velocidade, que é influenciado pelo vento norte.

Os caudais de maré calculados com base nas velocidades médias e na área da secção estão também representados nas Figuras 3.26, 3.27, 3.28. O conjunto de resultados de caudal é bastante regular o que em parte deve ser atribuído ao método de cálculo que usa velocidades médias resultantes de interpolação. Os caudais máximos calculados variaram aproximadamente entre 800 e 900  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$  na enchente e 700 a 800  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$  na vazante. Observa-se uma ligeira assimetria nas curvas de caudal, sendo a enchente um pouco mais demorada. Pelo dados obtidos em 9-Julho e 23-Agosto e indicados na Tabela 3.6, nota-se que o volume da enchente é maior que o volume da vazante seguinte.

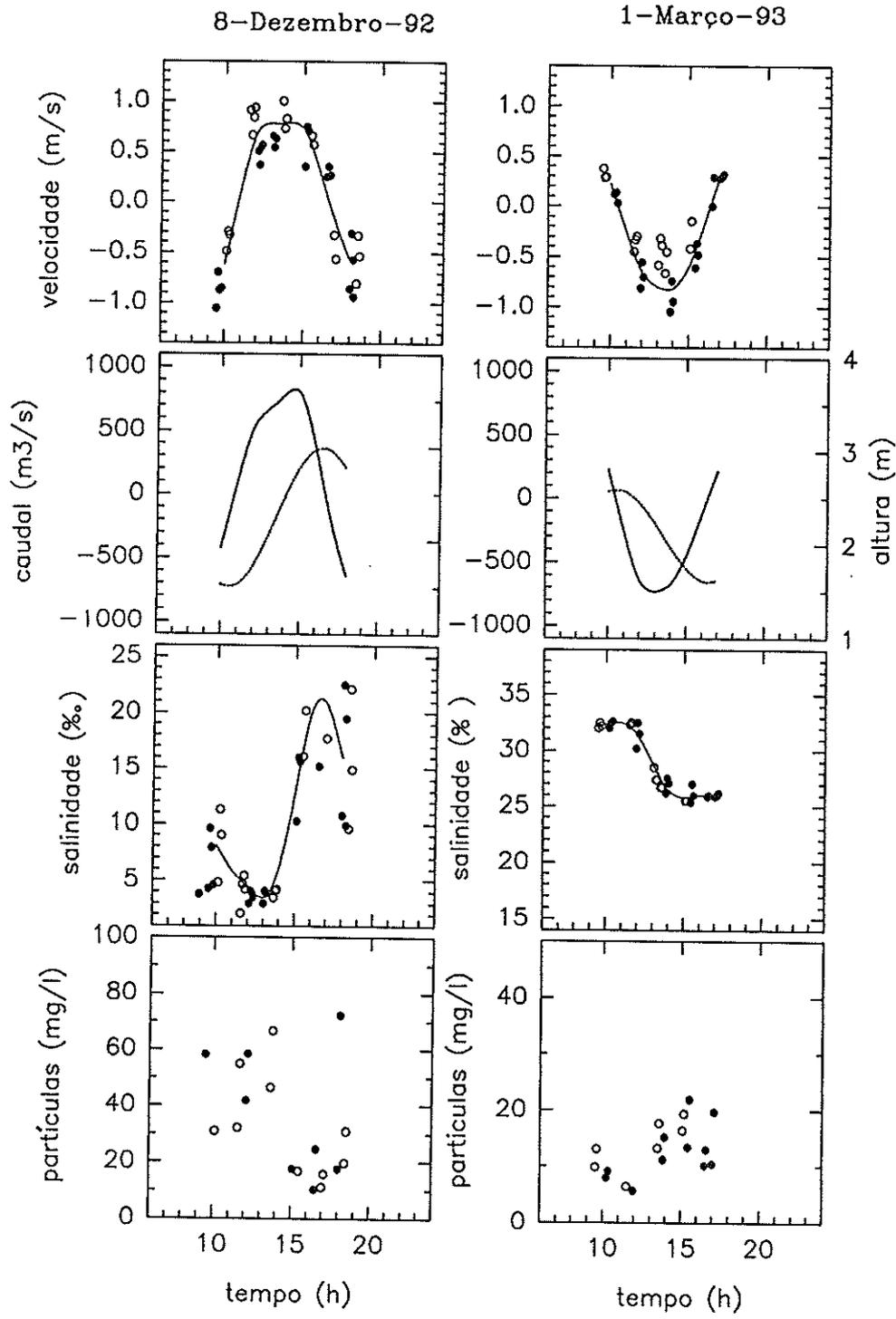


Figura 3.26. Resultados de velocidade, altura de água, salinidade e CPS usados no cálculo de fluxos na secção da Testada. Símbolos abertos para os valores do lado este; símbolos a cheio para os valores do lado oeste; linhas para os valores médios na secção.

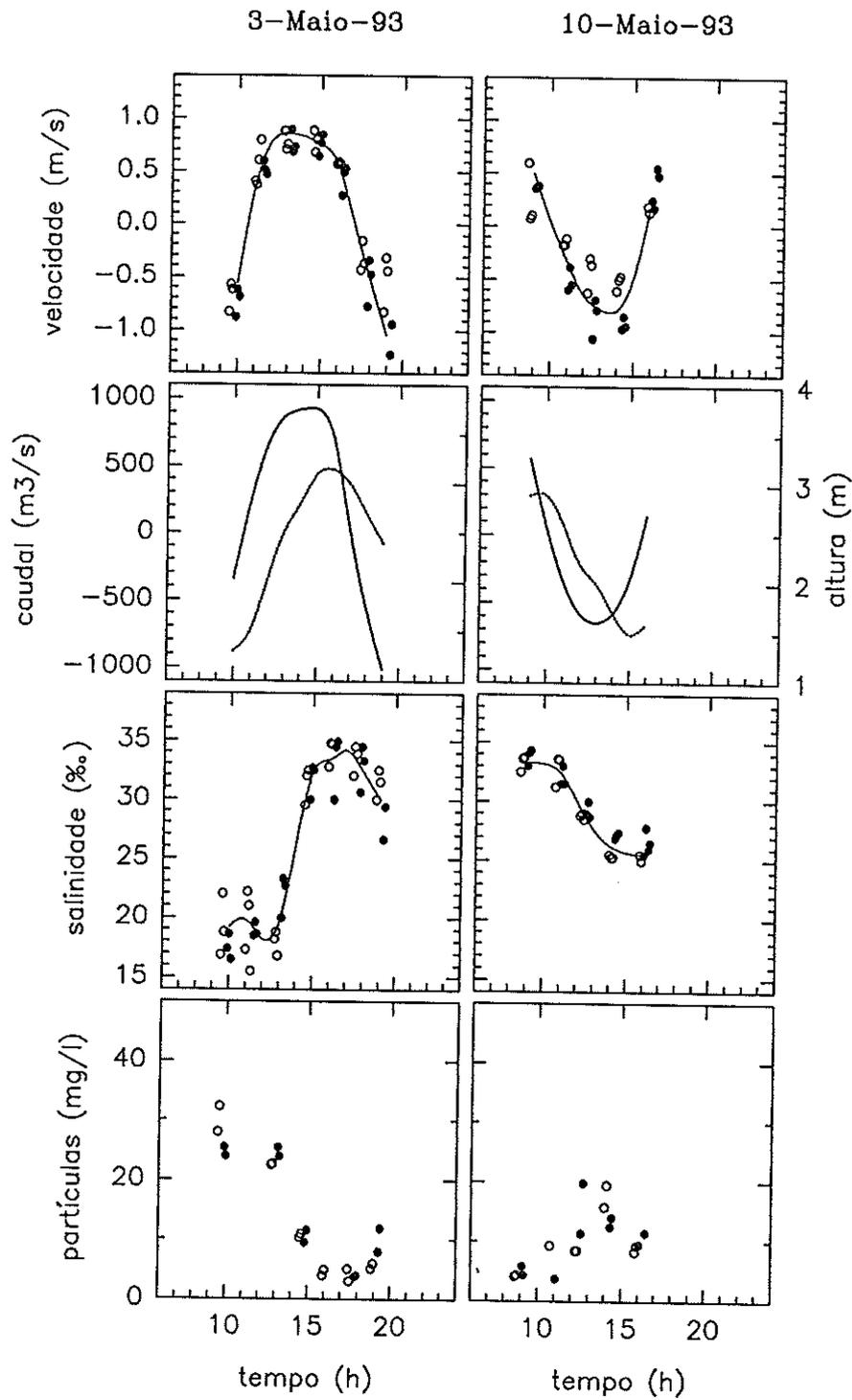


Figura 3.27. Resultados de velocidade, altura de água, salinidade e CPS usados no cálculo de fluxos na secção da Testada. Símbolos abertos para os valores do lado este; símbolos a cheio para os valores do lado oeste; linhas para os valores médios na secção.

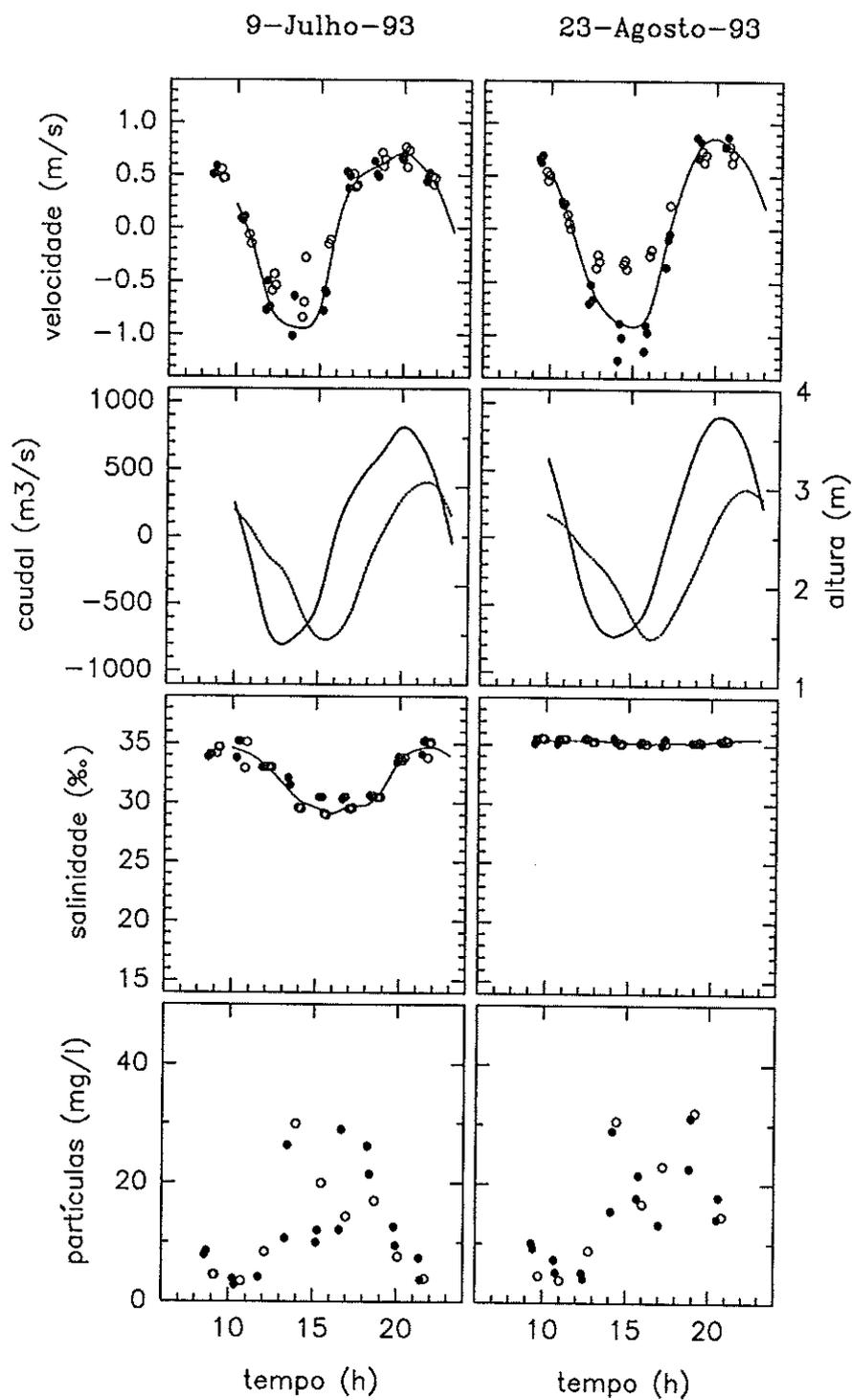


Figura 3.28. Resultados de velocidade, altura de água, salinidade e CPS usados no cálculo de fluxos na secção da Testada. Símbolos abertos para os valores do lado este; símbolos a cheio para os valores do lado oeste; linhas para os valores médios na secção.

Os caudais de maré calculados pelo método de velocidade - área foram comparados com os caudais calculados para esta secção pelo método de cubicagem, admitindo que não existe fluxo significativo entre o canal de Murtosa e o canal de Ovar. Os caudais obtidos pelos dois métodos estão representados na Figura 3.29, e os volumes correspondentes no ciclo de maré são indicados na Tabela 3.6. Os caudais máximos de enchente são maiores que os de vazante, mas a maior intensidade da enchente é compensada pela maior duração da vazante, estabelecendo-se o balanço de volumes no ciclo de maré que o método pressupõe.

Tabela 3.6 Comparação de volumes transportados no ciclo de maré, calculados pelos métodos de velocidade - área e de cubicagem.

Data	Volume ( $10^6\text{m}^3$ )	
	velocidade - área	cubicagem
9-JUL-93	12,5	10,6
9-JUL-93	-10,2	-9,2
23-AGT-93	12,9	10,2
23-AGT-93	-10,5	-10,7

No entanto, as observações de velocidade não são concordantes com uma maior duração da vazante. Bem pelo contrário, foi observado que a enchente pode ser mais longa que a vazante. Em consequência, os volumes efectivamente transportados na enchente são maiores que os correspondentes da vazante. Como os volumes calculados para a vazante pelos dois métodos são idênticos, admite-se que uma parte do volume que na enchente passa na secção corresponde a prisma de maré fora do canal da Murtosa e bacia do Laranjo.

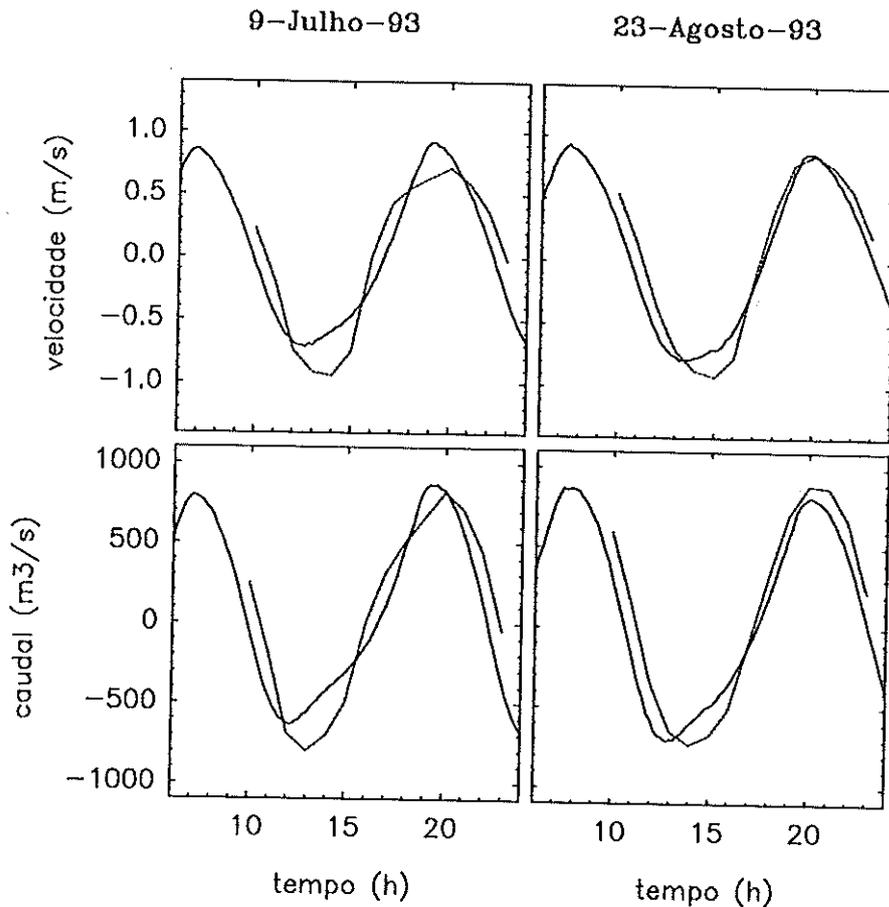


Figura 3.29. Comparação de velocidades médias e de caudais obtidos pelos métodos de velocidade - área (tracejado) e de cubagem.

### 3.6.3 CONCENTRAÇÃO DE PARTÍCULAS EM SUSPENSÃO

Observou-se que a CPS varia inversamente com a salinidade no ciclo de maré e ao longo do ano como se mostra na Figura 3.30. Às salinidades mais baixas correspondem CPS mais altas, o que leva a supor que existe uma relação entre as fontes de água doce (rios) e as mais importantes fontes de material particulado. Para testar a relação entre CPS nas amostras de superfície, salinidade e quadrado da velocidade, foi suposto existirem relações lineares entre estes parâmetros que expliquem parte da variabilidade de CPS. Os valores da razão (F) entre as variâncias correspondentes às rectas de regressão e as variâncias dos desvios são indicados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 Resultados da regressão entre CPS à superfície, a salinidade e o quadrado da velocidade. É ainda indicada a razão entre variância explicada pelas rectas de regressão e a variância dos desvios (F).

N. valores	a	b	Coef. corr.	F	$F_{1,N-2} (\alpha=0,01)$
CPS = a + b x SAL.					
75	35,06	-0,752	0,647	53	7
CPS = a + b x VEL. <sup>2</sup>					
75	10,37	8,971	0,314	8	7

Os resultados indicam que ambas as relações lineares explicam parte da variação de CPS que foi observada. No entanto, a variação explicada pela recta de regressão de CPS com a salinidade é maior que a variação explicada pela regressão com o quadrado da velocidade. Esta situação indica que a variação de CPS é determinada principalmente por fontes remotas deste constituinte, mais do que pelos fenómenos de ressuspensão e deposição locais. Esta conclusão também é compatível com os resultados de 23-Agosto, que mostram que mesmo quando a salinidade é semelhante à do mar e quase constante, se observa um aumento da CPS no fim da vazante.

#### 3.6.4 CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A

A elevada percentagem de cinza no material particulado e a baixa concentração de clorofila-a indicam que este material é principalmente mineral. Um ligeiro aumento da concentração de clorofila-a foi observado em Agosto. Contudo a variação da concentração de clorofila-a não permite explicar a variação de CPS, como é evidente na Figura 3.31, que relaciona estas duas concentrações.

### 3.6.5 CONCENTRAÇÃO DE NITRATO

Como se vê na Figura 3.32, existe uma relação nítida entre a absorvância a 220 nm e a salinidade. A esta absorvância, que variou entre 0,6 e 0,1, corresponde uma absorvância a 275 nm entre 0,08 e 0,01, o que pode explicar a variação da absorvância a 220 nm para salinidades superiores a 30 ‰. Estes valores correspondem a baixas concentrações de nitrato, sendo então a variação da concentração de matéria orgânica solúvel importante. A diferença de declive nas relações representadas nas Figuras 3.22 e 3.32 pode ser explicada com base na diferença de absorvância a 220 nm entre as águas dos rios Vouga e Antuã.

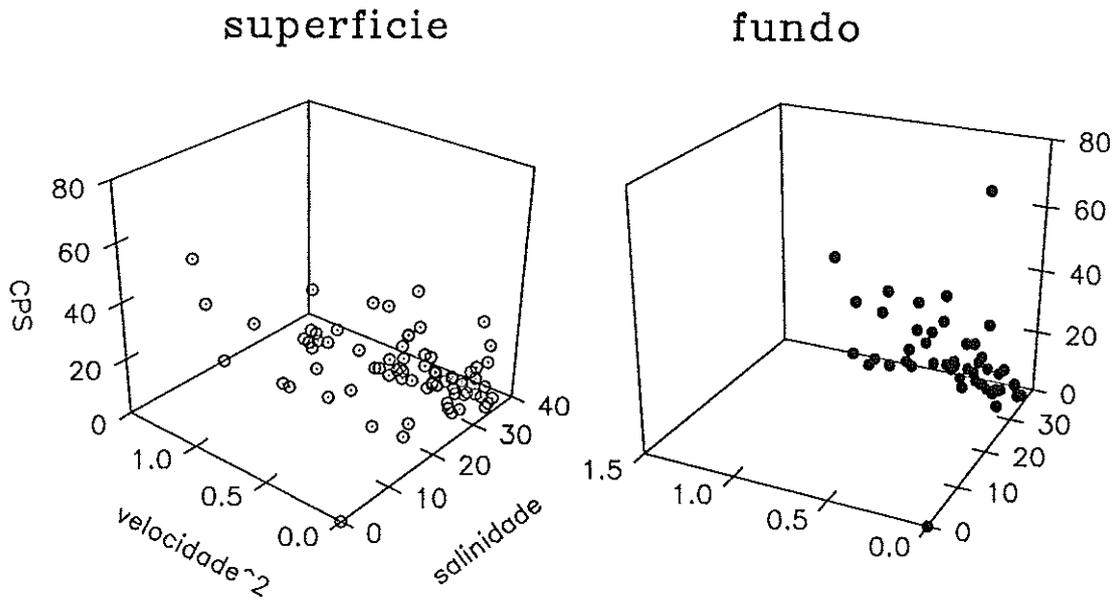


Figura 3.30. Relação entre CPS, velocidade e salinidade. Símbolos abertos para os valores à superfície e símbolos a cheio para valores no fundo.

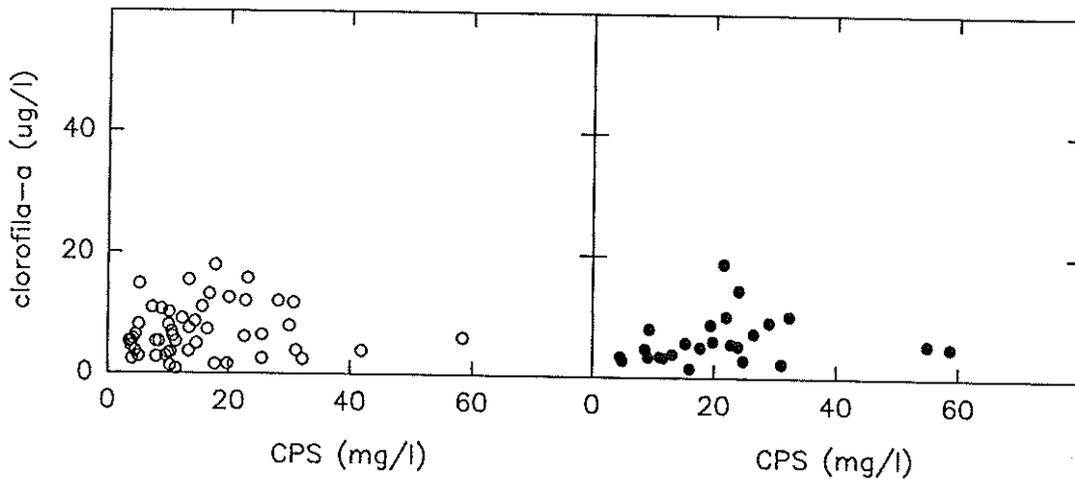


Figura 3.31. Relação entre CPS e concentração de clorofila-a. Símbolos abertos para os valores à superfície e símbolos a cheio para valores no fundo.

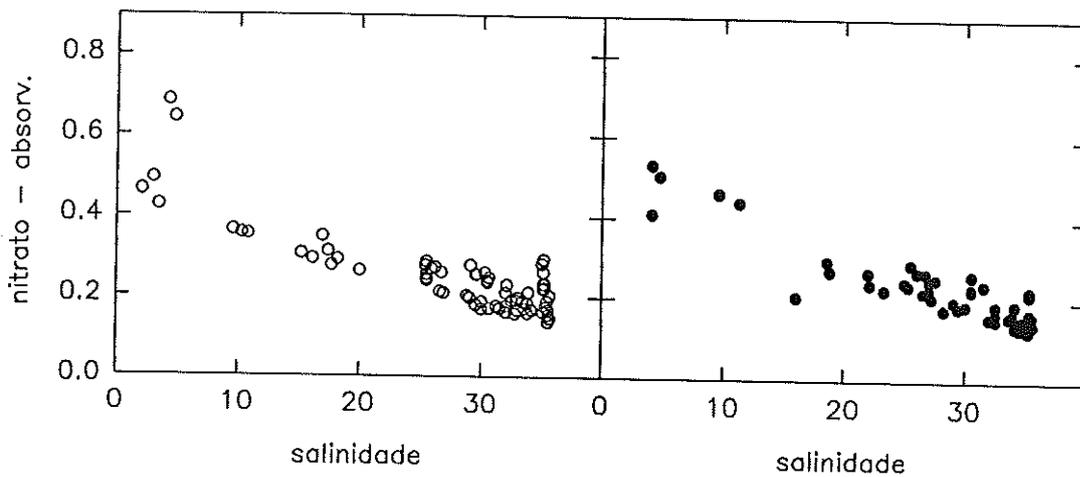


Figura 3.32. Relação entre absorvância a 220 nm e salinidade. Símbolos abertos para os valores à superfície e símbolos a cheio para valores no fundo.

### 3.7 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

Com base em observações de salinidade NOBRE e OUTROS (1912) distinguiram na Ria zona salgada, salobra e doce, referindo que ocorria uma grande variação sazonal destas zonas. A zona mais extensa era a salobra, mas no inverno as zonas doces nos extremos dos canais alargavam-se muito. Analisando a variação do campo de salinidade da Ria nos períodos em que decorreram as observações actuais podem-se também identificar 3 zonas com características distintas. Partindo da Barra, a primeira zona caracteriza-se por uma salinidade que só excepcionalmente é significativamente diferente da do mar. Corresponde ao primeiro segmento do canal principal (Figura 2.8), para o qual foram calculados tempos de residência de água doce inferiores a 1 dia (Tabela 3.2). A massa de água neste segmento, que é movimentada pelo fluxo cíclico de maré entre o interior e o exterior da barra, possui características semelhantes à água da zona costeira, e que em parte são determinadas por mecanismos que actuam no exterior da barra: correntes litorais e agitação marítima.

A segunda zona inclui a região central da Ria e a parte intermédia dos canais que corresponde aos dois primeiros segmentos de cada canal. Apesar da amplitude de maré diminuir sensivelmente ao longo da 1ª zona, passa a diminuir menos acentuadamente ao longo da 2ª zona. Os percursos de maré são longos e os fluxos cíclicos são elevados, sendo por isso elevada a capacidade de dispersão. O tempo de residência da água doce nesta zona é normalmente superior a 10 dias, com excepção do canal do Espinheiro que recebe os dois maiores rios. Nesta zona localizam-se biotopos em que ocorrem populações filtradoras, como são as áreas intertidais e de sapal, sendo provável que esta zona constitua um importante filtro bioquímico, tal como foi definido por SCHUBEL e KENNEDY (1984). Os resultados de nitrato obtidos no Chegado e na Testada indicam que ocorre ao longo do canal da Murtosa e Testada uma importante variação de concentração, que em parte pode ser atribuída a processos bioquímicos que ocorrem nesta zona. As partículas em suspensão na água possuem uma percentagem mássica de cinza entre 70 e 90% o que indica que a componente inorgânica é predominante. As

concentrações de clorofila-a são geralmente inferiores a  $10 \mu\text{gl}^{-1}$ , mas no Chegado na primavera, observaram-se concentrações mais elevadas indicando que nesse período o fitoplâncton é um componente importante do material em suspensão na água.

Finalmente, a terceira zona corresponde aos extremos interiores dos canais. Nesta zona os fluxos de maré perdem alguma importância como mecanismo de transporte relativamente à circulação provocada pelos fluxos de água doce. A qualidade da água nesta zona é determinada principalmente pela qualidade da água doce afluente ou por descargas directas para os canais. Esta zona é a mais directamente influenciada pelas partículas transportadas pelas linhas de água que podem originar o filtro geoquímico referido por SCHUBEL e CARTER (1984). Embora a circulação nesta zona não tenha sido caracterizada, se se atender à grande variação de caudal dos rios drenados pela Ria, é previsível que a circulação alterne entre os tipos de forte estratificação e de secção homogénea, que correspondem a filtros geoquímicos menos eficientes. Daqui se infere uma grande dispersão das partículas transportadas, não ocorrendo de forma significativa a situação de máximo de turbidez. Esta análise é confirmada pelos resultados de CPS obtidos no Chegado, que mostram a influência do sedimento transportado pelo Antuã mesmo quando a água é salobra.

A descrição da Ria como um conjunto de canais que se ramificam, possuindo o conjunto características aproximadamente unidimensionais, implica que seja razoável não considerar a interligação entre vários canais. Os resultados das medições de fluxos de maré permitem testar esta hipótese. No canal do Chegado observou-se que a vazante predomina na margem norte do canal. O esteiro existente na margem sul, que estabelece uma ligação com o rio Velho e com a Veia da Testada, não provoca uma circulação residual importante, embora permita que alguma água do rio Vouga se misture na água do canal do Chegado. Comparando os volumes de água movimentados na enchente e na vazante pela secção da Testada, com os volumes de prisma de maré calculados para os mesmos ciclos de maré no canal para montante da secção, conclui-se que na enchente uma pequena parte do volume movimentado entra no canal de Ovar, existindo por isso circulação residual entre o canal da Testada e o canal de Ovar.

## 4. BALANÇO DE SUBSTÂNCIAS APLICANDO UM MODELO DE SEGMENTOS DE PRISMA DE MARÉ

### 4.1 MODELOS DE SEGMENTOS DE PRISMA DE MARÉ

O uso da equação de balanço de massa para descrever o transporte de substâncias num estuário é, em princípio, simultâneo com a aplicação das equações que traduzem a conservação de momento linear, sujeitas a simplificações adequadas. Para aplicação a estuários, a equação de conservação da massa de água é geralmente simplificada para equação de continuidade de volume, sendo a massa volúmica obtida por uma equação de estado entre as funções salinidade e temperatura. Nas equações de conservação da quantidade de movimento a retenção unicamente das componentes horizontais da velocidade, constitui o aspecto mais importante da simplificação destas equações, para aplicação a estuários pouco estratificados.

Para tornar a aplicação destas equações exequível em domínios complexos, como é o caso dos estuários, é necessário proceder a outras simplificações, e em particular considerar as variáveis evolutivas em termos dos seus valores médios espaço-temporais e das perturbações. Obtém-se assim um conjunto de equações diferenciais que descrevem o escoamento médio e que permitem desenvolver modelos matemáticos hidrodinâmicos para estuários, nos quais os termos que envolvem os produtos das perturbações são parametrizados através do recurso às teorias da turbulência. A onda de maré oceânica, o caudal dos rios, e a tensão do vento sobre a superfície líquida, são fenómenos que entram nos modelos como condições de fronteira. Frequentemente a onda de maré oceânica e o caudal dos rios são os fenómenos, que juntamente com o

atrito ou resistência no fundo, desempenham papel dominante no estabelecimento do escoamento nos estuários.

As marés num dado ponto do estuário, são um fenómeno cíclico cuja previsão para intervalos de tempo longos, pode ser efectuada por métodos que se baseiam na análise e síntese harmónica de Fourier. Os caudais dos rios são, durante a maior parte do tempo, quase estacionários. Se o escoamento for analisado numa escala temporal correspondente à do ciclo de maré, os valores médios das grandezas características do escoamento correspondem à circulação residual e as flutuações provocadas pelo escoamento cíclico são macro - turbulência representada pela dispersão, ou seja, pelo fluxo não advectivo.

Os modelos de segmentos de prisma de maré, mais abreviadamente designados por modelos de caixas de maré, têm como objectivo representar o transporte de substâncias ao longo do estuário numa escala temporal superior à do ciclo de maré. Para estabelecer o balanço de massa consideram-se os fluxos médios resultantes da circulação residual e os fluxos não advectivos resultantes da dispersão. O cálculo destes fluxos é realizado em secções normais ao eixo principal do estuário, que limitam segmentos cujo conteúdo se admite como homogéneo.

A divisão do canal de um estuário em segmentos ou caixas é feita por uma das várias técnicas que têm sido seguidas por diversos autores. OFFICER (1980) nota que independentemente da localização das secções entre segmentos, os fluxos através dessas secções resultam da circulação residual e da dispersão, como foi referido. Contudo, o volume contido em cada segmento deve ser razoavelmente homogéneo para que seja realista representar por valores médios, a concentração dos constituintes presentes. Os tempos de residência dos constituintes conservativos nos segmentos, são estimados a partir das concentrações médias nos vários segmentos. Normalmente usa-se a salinidade observada ao longo do estuário para estimar coeficientes de troca entre os segmentos, admitindo que é conhecido o fluxo provocado pela circulação residual, e que as condições são estacionárias. Com base nesta hipótese, OFFICER (1980) mostrou que

o tempo de residência é proporcional à diferença relativa de salinidade entre segmentos adjacentes, desde que o caudal residual seja constante.

#### 4.1.1 DIVISÃO DO ESTUÁRIO EM SEGMENTOS

O princípio para a segmentação do estuário, partindo de um balanço de volume no ciclo de maré, foi inicialmente proposto por Ketchum em 1951, tal como referem DYER e TAYLOR (1973). A segmentação é realizada partindo do rio e avançando para o mar. No primeiro segmento a variação de volume no ciclo de maré corresponde ao volume de água transportada pelo rio. Os segmentos seguintes são definidos de modo a que o segmento de montante em preia-mar contenha um volume igual ao do segmento para jusante em baixa-mar. Esta divisão em segmentos implica que o fluxo entre segmentos corresponde exclusivamente ao caudal do rio. O transporte dispersivo foi introduzido no balanço de massa por DYER e TAYLOR (1973), mediante coeficientes que traduzem a mistura de água entre segmentos adjacentes.

A divisão em segmentos partindo do rio em direcção ao mar, pode também ser feita com base nas transferências de volume que ocorrem na vazante, tal como WOOD (1979) propôs, salientando que esta divisão idealiza a troca de volumes sem ocorrer mistura entre segmentos. O fluxo dispersivo deve também ser considerado, o que pode ser feito admitindo que na vazante ocorre mistura entre segmentos adjacentes, pelo que parte da água transferida provém do segmento anterior. Em cada ciclo de maré pode assim ocorrer mistura da água de três segmentos adjacentes. Embora nos modelos de segmentos de prisma de maré não seja admitida a analogia com a difusão para estimar o fluxo dispersivo, WOOD (1979) calculou valores do coeficiente de dispersão longitudinal com base nos volumes que correspondem aos fluxos dispersivos entre segmentos, obtidos por calibração do modelo.

Os modelos de segmentos de prisma de maré foram inicialmente formulados para

estuários com morfologia unidimensional e em que a mistura causada pela maré é intensa. A aplicação destes modelos a casos em que existem ramificações do canal principal que formam sub-estuários, foi apresentada por BROWN e ARELLANO (1980), mantendo os mesmos princípios para a divisão em segmentos.

A divisão em segmentos partindo do rio e avançando para o mar pressupõe que o caudal do rio tem uma importância fundamental no transporte pela circulação média, que domina no extremo interno do estuário. Contudo, na realidade nem sempre assim é, porque há casos em que esse caudal é muito pequeno. Nestes casos é preferível seguir o método de segmentação proposto por KUO e NIELSON (1988), que parte da secção mais a jusante e avança para montante até se atingir um critério que estabelece o volume mínimo para um segmento. Aqueles autores propõem que o critério seja que um segmento deve possuir comprimento superior à largura do canal. O limite interior desse último segmento é definido pela secção do rio através da qual não ocorre fluxo de enchente e na vazante passa um volume que corresponde ao caudal do rio no ciclo de maré.

Todos os segmentos com excepção do último possuem um volume em baixa-mar ( $V$ ) que iguala o volume de maré que passa para montante de cada segmento, adicionado do volume que eventualmente entra numa ramificação do canal (tributário). Estes volumes são iguais ao prisma de maré no canal ( $P$ ), reduzido do volume que corresponde ao caudal dos rios em meio ciclo ( $R$ ).

#### 4.1.2 FLUXOS ATRAVÉS DAS SECÇÕES E MISTURA ENTRE SEGMENTOS

Os fluxos de salinidade que ocorrem no ciclo de maré através de uma secção que separa dois segmentos do estuário podem ser divididos em três termos, que são produtos da salinidade por:

- Um coeficiente de fluxo correspondente à circulação residual média na secção.

- Um coeficiente de fluxo dispersivo para jusante.
- Um coeficiente de fluxo dispersivo para montante, que pode ser considerado igual ao anterior.

Admitindo condições estacionárias o fluxo total deve ser nulo, o que permite estimar o fluxo dispersivo, sendo conhecido o fluxo de circulação média. Os fluxos dispersivos têm sido representados nos modelos de segmentos de prisma de maré como resultado da mistura de um determinado volume entre dois segmentos. Ajustando os volumes que se misturam, modificam-se os fluxos dispersivos entre segmentos, de modo a que a variação de salinidade ao longo do estuário seja correctamente simulada pelo modelo.

DYER e TAYLOR (1973) propõem que só parte do volume presente em cada segmento em baixa-mar ( $\alpha$ ) é transferido para o segmento a montante. Se  $\alpha$  for igual a 1, o fluxo dispersivo é nulo e o transporte é exclusivamente realizado pela circulação média que pode corresponder ao caudal do rio. Quando  $\alpha$  tende para 0 o fluxo dispersivo aumenta, e no limite o estuário corresponde a um único segmento.

WOOD (1979) propôs uma forma alternativa de considerar a dispersão, admitindo que resulta da mistura de volumes entre segmentos adjacentes durante a vazante. Devido a essa mistura parte do volume transferido para o segmento de jusante provém do segmento de montante, ocorrendo por isso num ciclo mistura de água entre três segmentos consecutivos.

KUO e NEILSON (1988) admitem que o volume de água que entra num segmento na enchente se mistura completamente com o volume que aí permaneceu em baixa-mar, e da mistura parte é transferida para o segmento a montante. Partem por isso da hipótese de mistura máxima, e introduzem uma razão de retorno ( $\alpha$ ) para limitar a mistura entre os segmentos. Na vazante admitem que não ocorre mistura, para além da causada pela circulação média.

O fluxos através da secção  $n$ , de uma substância com as concentrações  $C_n^P$  (segmento  $n$ , em preia-mar) e  $C_n^B$  (segmento  $n$ , em baixa-mar), de acordo com a formulação de DYER e TAYLOR (1973) são calculados por:

- enchente  $(\alpha V_n)C_n^B$
- vazante  $(\alpha V_n + 2R_n)C_{n-1}^P$

Os mesmos fluxos, de acordo com formulação de KUO e NEILSON (1988) são calculados por:

- enchente  $(P_n - R_n)[(1 - \alpha)C_n^P + \alpha C_{n+1}^P]$
- vazante  $(P_n - R_{n+1})C_{n+1}^P + 2R_{n+1}C_{n+2}^P$

#### 4.2 DESCRIÇÃO DO MODELO DE SEGMENTOS DE PRISMA DE MARÉ PARA A RIA DE AVEIRO

A validade da aplicação de um modelo de segmentos de prisma de maré é limitada pelas aproximações admitidas na representação do domínio e dos processos de mistura. Embora nas várias alternativas de formulação o canal do estuário seja representado por uma sequência de segmentos nos quais a mistura é completa, os métodos para divisão em segmentos são diversos e foram enunciadas várias alternativas para descrever a mistura entre segmentos. Foi seleccionada, para aplicação à Ria de Aveiro, a formulação proposta por KUO e NEILSON (1988), que com algumas adaptações corresponde melhor às características específicas deste estuário, uma vez que admite a possibilidade do caudal do rio ser nulo e também admite que o transporte dispersivo é muito importante. O modelo também permite considerar a existência de ramificações simples do canal principal, que estabelece a ligação com o mar.

#### 4.2.1 DIVISÃO DA RIA EM SEGMENTOS

As bases da divisão da Ria em segmentos para aplicar um modelo de caixas de maré, foram já discutidas no 1º Capítulo, em que se propôs um conjunto de canais unidimensionais formando uma estrutura ramificada. A divisão de cada ramificação em segmentos seguindo a técnica proposta por KUO e NEILSON (1988) foi já descrita no 2º Capítulo. Para realizar esta divisão em segmentos parte-se da secção que limita a jusante cada ramificação e avança-se no canal até que o volume acumulado em baixa-mar ( $V$ ) iguale o volume que na enchente atravessa a secção ( $P-R$ ). O comprimento dos segmentos definidos deste modo, corresponde ao percurso realizado na enchente pelas partículas de água, ignorando o efeito da mistura.

No caso da Ria as primeiras ramificações ocorrem próximo da barra, como acontece com o canal de Mira e com o canal de Ovar. Concluiu-se pela análise de volumes que o volume em baixa-mar no canal principal não comporta o prisma de maré que entra para estes canais, o que levou a considerar no modelo um primeiro segmento com características especiais que foram definidas após terem sido segmentadas as ramificações do canal principal. Considerou-se então um primeiro segmento com um volume igual ao prisma de maré que entra na Ria mas localizado no mar. Esta solução que resultou das primeiras tentativas de definição de segmentos, corresponde a deslocar para o mar a secção da barra.

Como foi discutido no 2º Capítulo, o cálculo de volumes para realizar a divisão em segmentos foi feito para os momentos de inversão de correntes na barra. Contudo a inversão de correntes ocorre mais tarde nos extremos dos canais, pelo que os segmentos definidos nos extremos dos canais não correspondem aos percursos efectivamente realizados pelas partículas de água. Na Tabela 4.1 são indicados os volumes dos segmentos em que foram divididos os canais. O último segmento de cada canal inclui o resto da área no extremo do canal, e não corresponde ao percurso de maré das partículas de água. A estas áreas nos extremos dos canais pode ser aplicado o mesmo modelo, devendo para tal a divisão em segmentos ser feita com base nos volumes

referentes aos momentos de inversão de correntes nesses locais. As concentrações na fronteira a jusante podem ser obtidas do modelo geral. No entanto, uma vez que os percursos de maré são longos, os primeiros segmentos dos canais contêm 65% do volume de água na Ria em preia-mar e 69% do volume em baixa-mar.

#### 4.2.2 SIMULAÇÃO DA VARIAÇÃO DE CAUDAL DOS RIOS

Na Tabela 4.2 são indicadas as áreas drenadas para cada segmento, que incluem as áreas das bacias dos rios que desaguam nesse segmento e ainda as áreas marginais que escoam directamente para a Ria. É também indicada a área molhada correspondente à máxima preia-mar e que inclui todas as áreas situadas até à cota de 1 m acima do nível médio do mar. As áreas drenadas e as áreas molhadas foram medidas no mapa à escala 1:50000 como se referiu no 1º Capítulo. Os caudais totais de água doce afluentes a cada segmento foram calculados com base nos caudais medidos nos rios Vouga, Antuã, Caster, Gonde, Boco e vala de Mira, acrescidos na proporção directa da área drenada que não foi incluída no caudal medido. O caudal do rio Vouga, que corresponde a 71% do total, entra na zona central da Ria que foi incluída no 1º segmento do canal do Espinheiro. As observações realizadas no Chegado permitiram concluir que neste canal não entra directamente um volume de água doce importante, apesar de existir um esteiro ligado a um braço do rio Vouga. O pequeno efeito de transporte por mistura que foi observado, foi levado em conta admitindo que 1% do caudal do Vouga entra no 2º segmento do canal do Espinheiro. Segundo esta hipótese, foi também admitido que 1% do caudal do Vouga se mistura na água que entra nos esteiros da margem sul, que estão também ligados ao extremo interior do canal principal.

Tabela 4.1. Características dos segmentos obtidos para a maré de 24-Maio-1991. Os volumes de água nos segmentos em baixa-mar e preia-mar são indicados em  $Mm^3$ . Os volumes de prisma de maré correspondem ao volume que passa na enchente na secção de jusante de cada segmento ( $Mm^3$ ).

Segmento (km)	Vol-BM	Vol-PM	Prisma	Prof. (m)
Canal Principal				
S1 (0,0 - 5,4)	27,71	34,78	82,77	8,5
S2 (5,4 - 10,9)	3,45	7,58	14,09	2,6
S3 (10,9 - 13,5)	0,49	3,50	3,49	0,9
S4 (13,5 - 14,2)	0,01	0,51	0,50	0,4
Canal de Mira				
S1 (0,0 - 5,7)	2,23	8,48	8,55	1,3
S2 (5,7 - 10,9)	0,47	2,27	2,30	0,9
S3 (10,9 - 11,8)	0,22	0,49	0,50	0,7
S4 (11,8 - 13,3)	0,48	0,71	0,20	0,9
Canal de Ovar				
S1 (0,0 - 7,7)	13,93	31,05	31,30	1,9
S2 (7,7 - 12,3)	5,87	14,11	14,18	1,2
S3 (12,3 - 14,7)	3,24	5,80	5,95	1,2
S4 (14,7 - 15,9)	2,24	3,32	3,38	1,4
S5 (15,9 - 21,0)	5,10	7,40	2,31	1,0
Canal do Espinheiro - Laranjo				
S1 (0,0 - 6,7)	8,41	23,94	21,76	1,7
S2 (6,7 - 10,9)	1,47	6,17	6,24	1,0
S3 (10,9 - 12,1)	0,21	1,52	1,54	0,6
S4 (12,1 - 12,7)	0,09	0,33	0,24	0,9
Canal de Ilhavo				
S1 (0,0 - 4,8)	2,02	6,46	6,47	1,4
S2 (4,8 - 9,5)	0,47	2,03	2,03	0,9
S3 (9,5 - 11,0)	0,16	0,39	0,46	1,2
S4 (11,0 - 12,0)	0,16	0,37	0,23	1,2

Tabela 4.2. Áreas dos segmentos obtidos para a maré de 24-Maio-1991. Área de bacia drenada e área molhada na máxima preia-mar em Mm<sup>2</sup>. Caudais totais de água doce estimados para esta data, excepto caudais de efluentes descarregados (m<sup>3</sup>/s).

Segmento (km)	A. drenada	A. molhada	Descargas	Q total (m <sup>3</sup> /s)
Canal Principal				
S1 (0,0 - 5,4)	6,8	6,0		0,00
S2 (5,4 - 10,9)	10,5	13,3	0,01	0,01
S3 (10,9 - 13,5)	10,1	4,5	0,03	0,01
S4 (13,5 - 14,2)	0,0	0,4		0,10
Canal de Mira				
S1 (0,0 - 5,7)	15,0	5,3		0,03
S2 (5,7 - 10,9)	24,0	1,8		0,04
S3 (10,9 - 11,8)	6,4	0,3		0,01
S4 (11,8 - 13,3)	329,9	0,6		0,60
Canal de Ovar				
S1 (0,0 - 7,7)	14,4	18,0		0,10
S2 (7,7 - 12,3)	6,0	10,3		0,04
S3 (12,3 - 14,7)	5,0	6,5		0,03
S4 (14,7 - 15,9)	2,1	3,2		0,01
S5 (15,9 - 21,0)	188,5	7,2	0,04	1,16
Canal do Espinheiro - Laranjo				
S1 (0,0 - 6,7)	2426,0	25,3	0,04	10,62
S2 (6,7 - 10,9)	12,5	5,1		0,21
S3 (10,9 - 12,1)	151,5	2,0	0,00	1,27
S4 (12,1 - 12,7)	101,1	0,5	0,05	0,85
Canal de Ihavo				
S1 (0,0 - 4,8)	35,5	5,4	0,03	0,02
S2 (4,8 - 9,5)	43,3	1,9	0,01	0,03
S3 (9,5 - 11,0)	0,0	0,5		0,00
S4 (11,0 - 12,0)	110,8	0,4		0,06

Na Tabela 4.2 são indicadas as áreas molhadas máximas de cada segmento. Com base nestas áreas são calculados os caudais de água doce resultantes da precipitação directa sobre a Ria. Usou-se para cálculo destes caudais a precipitação diária observada na estação meteorológica da Universidade de Aveiro. Como não existem observações contínuas do caudal dos rios, estimou-se a variação de caudal dos rios entre duas observações, durante períodos em que a chuva ocorria com pequena intensidade, admitindo uma taxa de variação do caudal unitário constante. Aos caudais estimados deste modo foram adicionados os caudais resultantes da precipitação directa para se simular a variação de caudal afluyente para o período em que seria realizada a simulação com o modelo. Todos os cálculos de caudal foram reunidos numa folha de cálculo em que são introduzidos os caudais medidos nos rios, bem como as datas e intensidades da precipitação observada.

#### 4.2.3 TRANSPORTE ENTRE SEGMENTOS

O transporte entre segmentos foi idealizado por KUO e NEILSON (1988) com dois passos por ciclo de maré, que incluem todos os mecanismos físicos envolvidos no transporte. No primeiro passo, a água existente em cada segmento na preia-mar (início do ciclo) é transferida para o segmento de jusante, durante a vazante. Esta água inclui as descargas e escoamento correspondentes ao ciclo de maré. No segundo passo a água entrada durante a enchente num segmento mistura-se total ou parcialmente com a água que permaneceu no segmento na baixa-mar. Parte da mistura é depois transferida para o segmento a montante. A água entrada na enchente pode, em parte, ser a que saiu do segmento na vazante anterior, ocorrendo retorno que é traduzido por um coeficiente ( $\alpha$ ). Depois de calculadas as concentrações resultantes do transporte e de descargas locais, as concentrações de constituintes não conservativos podem ser ajustadas considerando o efeito de reacções químicas ou bioquímicas.

Durante um ciclo de maré, o balanço de massa em cada segmento é obtido pelo cálculo dos fluxos na vazante ( $ETP_n$  e  $ETP_{n-1}$ ) e dos fluxos na enchente ( $FTP_n$  e  $FTP_{n-1}$ ), respectivamente através das secções a montante ( $n$ ) e a jusante ( $n-1$ ). No esquema seguinte, é indicado o balanço de volume no segmento  $n$ . Na vazante o volume presente no segmento na preia-mar ( $VH_n$ ) é transferido para jusante. Na enchente o volume que permanece no segmento na baixa-mar ( $V_n$ ) mistura-se com o prisma de maré que entra no segmento:

$$\begin{array}{ccc} (P_n + R_n) \rightarrow & \left| \begin{array}{c} VH_n = P_{n-1} - R_n \\ \\ V_n = P_n - R_n \end{array} \right| & \begin{array}{c} \rightarrow (P_{n-1} + R_{n-1}) \\ \\ \leftarrow (P_{n-1} - R_{n-1}) \end{array} \end{array}$$

Na equação seguinte é formulado o transporte na enchente na secção  $n$  ( $FTP_n$ ), para um constituinte cuja concentração inicial é  $C_n^P$  na preia-mar,  $C_n^B$  na vazante e  $C2_n$  na preia-mar seguinte. A diferença entre  $C_n^P$  e  $C_n^B$ , que não foi tida em atenção por KUO e NEILSON (1988), deve ser considerada quando a fracção de volume que retorna ( $\alpha$ ) é grande. Atendendo às características específicas da Ria foi também considerado o volume de água perdido por evaporação ( $Ev$ ) no volume total da enchente.

$$FTP_n = (P_n - R_n + Ev_n) [\alpha C_{n+1}^B + (1 - \alpha) C2_n]$$

O constituinte transportado na vazante através da secção  $n$  ( $ETP_n$ ) é proveniente do segmento  $n+1$ , cujo volume em preia-mar é  $VH_{n+1}$ , a que se pode adicionar o volume afluente que entra neste segmento ( $r_{n+1}$ , concentração  $Cr_{n+1}$ ). Como o volume da vazante excede  $VH_{n+1}$  (ver o esquema anterior), o resto ( $RES_{n+1}$ ) deve ter origem no segmento  $n+2$  (concentração  $C_{n+2}^P$ ) ou nos tributários do segmento  $n+1$ . A introdução da parcela de resto tem ainda a vantagem de permitir variar o caudal de água doce escoado, relativamente ao que foi considerado para a divisão em segmentos.

$$ETP_n = VH_{n+1} C_{n+1}^P + r_{n+1} Cr_{n+1} + RES_{n+1} C_{n+2}^P$$

Para completar o balanço de massa ao segmento  $n$  num ciclo de maré falta considerar a variação de massa do constituinte presente no volume  $VH_n$ , que pode ser traduzida pela variação da sua concentração em dois ciclos sucessivos. Sendo  $C2_n$  a concentração após um ciclo completo, e considerando que também podem existir fontes locais ( $W_n$ ), temos para o balanço de massa ao segmento  $n$ :

$$(C2_n - C_n^P)VH_n = W_n + ETP_n - ETP_{n-1} + FTP_{n-1} - FTP_n$$

substituindo  $FTP$  e resolvendo para  $C2_n$  obtém-se:

$$C2_n = \{C_n + W_n/VH_n + (ETP_n - ETP_{n-1})/VH_n + (P_n - R_n + Ev_n)\alpha C_{n+1}/VH_n + (P_{n-1} - R_{n-1} + Ev_{n-1})[\alpha C_n + (1-\alpha)C2_{n-1}]/VH_n\} / [1 + (P_n - R_n + Ev_n)(1-\alpha)/VH_n]$$

equação que permite calcular novas concentrações após um ciclo de maré, partindo de condições iniciais e de fronteira conhecidas. As condições de fronteira no primeiro segmento podem ser relativas ao mar e por isso constantes, situando-se então o primeiro segmento fora do estuário. O cálculo é repetido sucessivamente até se atingir o último segmento no interior do estuário.

#### 4.2.4 ORGANIZAÇÃO DO CÁLCULO NUMÉRICO DE TRANSPORTE

A forma da equação de balanço de massa a um segmento que permite calcular uma nova concentração de um constituinte após um ciclo de maré, inclui termos de transporte na vazante ( $ETP$ ) que têm de ser avaliados antes de ser aplicada a equação referida. DIANA e OUTROS (1987) estruturaram o cálculo do transporte na vazante de acordo com o esquema da Figura 4.1, que inclui a alteração referente à inclusão do volume de água evaporada. Este volume é calculado para cada secção multiplicando uma taxa de evaporação característica de cada segmento pela razão entre o volume médio e a profundidade média. Como primeira aproximação, usou-se o valor constante

de  $1,7 \times 10^{-4} \text{ mh}^{-1}$  para a taxa de evaporação, obtido fazendo a média aos valores observados entre Abril e Setembro de 1990 na estação meteorológica da Universidade de Aveiro.

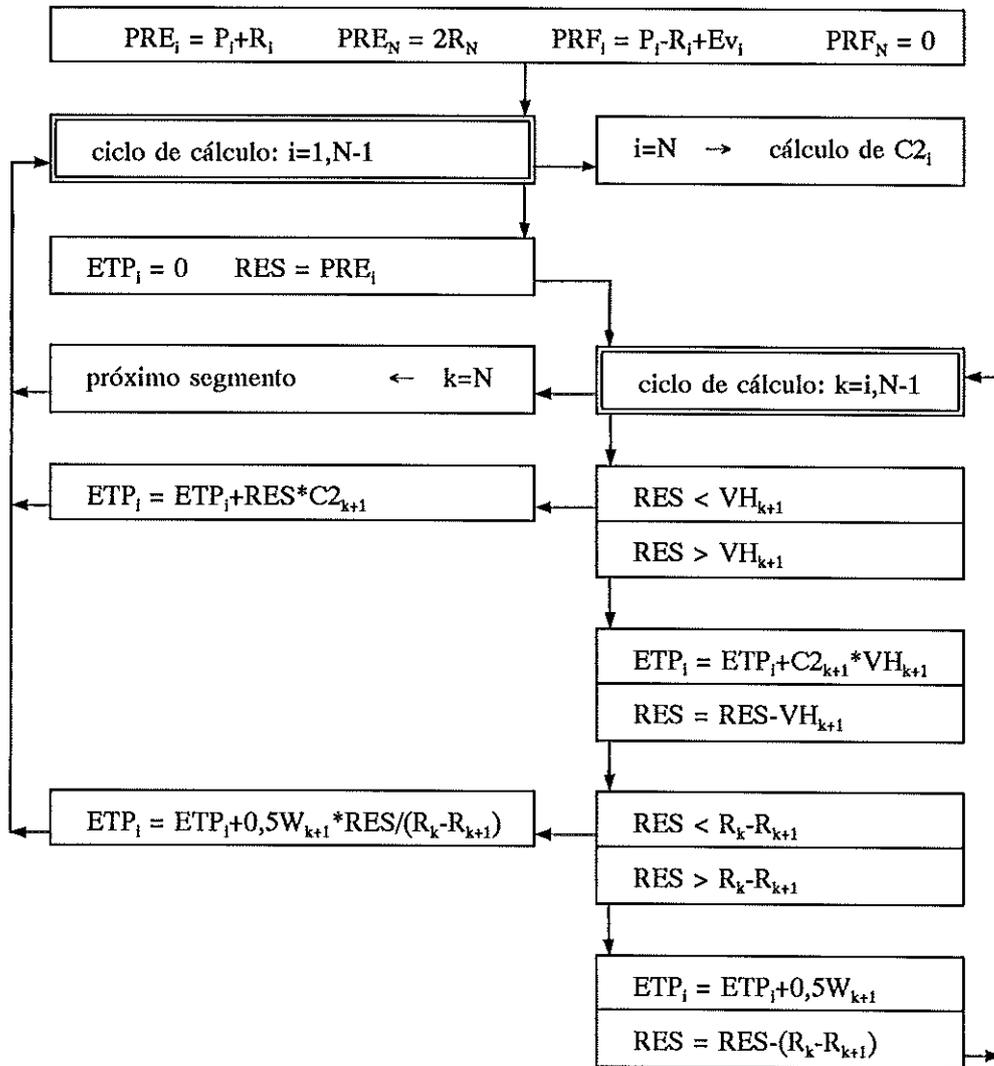


Figura 4.1. Esquema de cálculo do transporte na vazante (ETP), mostrando a distribuição de RES pelos segmentos

Nos segmentos a que estão ligados tributários, o volume de vazante que não pode ser atribuído ao segmento do canal principal ou às descargas no segmento (RES), é dividido entre os tributários proporcionalmente aos volumes de vazante, e atribuído em cada tributário pelo mesmo esquema.

#### 4.2.5 PROCEDIMENTO DE AJUSTAMENTO AUTOMÁTICO DOS COEFICIENTES DE RETORNO

A calibração do modelo de segmentos de prisma de maré depende, numa primeira fase, do ajustamento do valor do coeficiente de retorno ( $\alpha$ ) para cada secção. Valores pequenos de  $\alpha$  correspondem a condições de mistura intensa do conteúdo do segmento. Valores elevados indicam que o conteúdo do segmento não é homogéneo, dominando o transporte pela circulação residual. Na situação limite de  $\alpha=1$  o transporte é unicamente provocado pelo volume água doce que atravessa cada secção no ciclo de maré ( $2R$ ). O valor do coeficiente de retorno deve pois estar relacionado com o tempo de renovação da água no segmento ( $t_r$ ). Com efeito, o caudal máximo que pode causar renovação de água é o que corresponde ao volume do prisma de maré que sai do segmento, em cada ciclo de período  $T$ , e não retorna (caso do 1º segmento):

$$Q_r = (1-\alpha)P/T$$

Obtém-se para o tempo de renovação do volume de água, que em preia-mar é  $VH=P-R$ , e ignorando o caudal de água doce ( $P \gg R$ ):

$$t_r = T/(1-\alpha)$$

De acordo com esta equação o tempo de renovação da água no 1º segmento pode variar entre o mínimo de cerca de 0,5 dia ( $\alpha=0$ ) até um valor que só depende de  $R$ . De facto a equação anterior apresenta uma singularidade para  $\alpha=1$ . Neste caso o tempo de renovação é dado por:

$$t_r = VH/(2R/T)$$

Na Tabela 4.3 são dados exemplos da variação do tempo de renovação com o coeficiente de retorno.

Tabela 4.3. Correspondência entre valores do coeficiente de retorno ( $\alpha$ ) e do tempo de renovação da água no primeiro segmento do estuário obtidos pela equação  $t_r = T/(1-\alpha)$ .

$\alpha$	0,0	0,5	0,9	0,95	1,0
$t_r$ (dia)	0,5	1,0	5,2	10,4	*

DIANA e OUTROS (1987) recomendam que se inicie o cálculo usando valores de  $\alpha$  de 0,5, e que se proceda a ajustes nestes valores de modo a que as concentrações de uma substância conservativa, que tenham sido medidas no estuário, sejam reproduzidas pelo modelo. A substância conservativa usada para calibração pode ser a salinidade da água sempre que a sua variação ao longo do estuário seja significativa e sejam satisfeitas as condições de validade do modelo. Para tal a estratificação salina deve ser pequena, e o campo de salinidade deve permanecer quase estacionário. Estas condições podem ser encontradas na Ria quando o caudal dos rios começa a diminuir lentamente, próximo do verão.

A divisão da Ria em segmentos para se aplicar o modelo de prisma de maré, teve de considerar a existência de quatro tributários de um canal principal, como foi descrito. Nestas circunstâncias, o ajuste manual dos valores dos coeficientes de retorno para calibrar o modelo torna-se difícil, em virtude da repetição de tentativas necessárias para observar as consequências das várias alternativas de ajuste. É também de salientar que, como se conclui pela relação entre coeficiente de calibração e tempo de residência, o ajuste do valor de  $\alpha$  deve ser mais fino à medida que o seu valor se aproxima de 1. Por estas razões, foi incluído no esquema de cálculo numérico do modelo um procedimento para o ajuste automático dos valores do coeficiente de retorno, como é representado no diagrama da Figura 4.2.

A base para o procedimento de calibração automática, consiste na comparação da salinidade média calculada para cada segmento com base em observações, com a salinidade calculada pelo modelo. Com base nessa diferença é atribuído em cada secção um valor a um índice de correcção a aplicar ao respectivo coeficiente de retorno. O resultado da correcção calculada é avaliado avançando o cálculo um determinado número de ciclos de maré, sendo então de novo ajustado o valor do índice de correcção. Todo o procedimento é repetido após um número de ciclos de cálculo definido pelo utilizador, até não ser possível melhorar as diferenças entre os valores médios atribuídos e calculados pelo modelo. O número de ciclos necessário aumenta proporcionalmente ao tempo de residência que corresponde aos valores de  $\alpha$  obtidos

na calibração. Quando as repetições da calibração automática, após um numero variável de ciclos de maré não produzem variações importantes dos valores dos coeficientes de retorno, o processo de calibração está concluído.

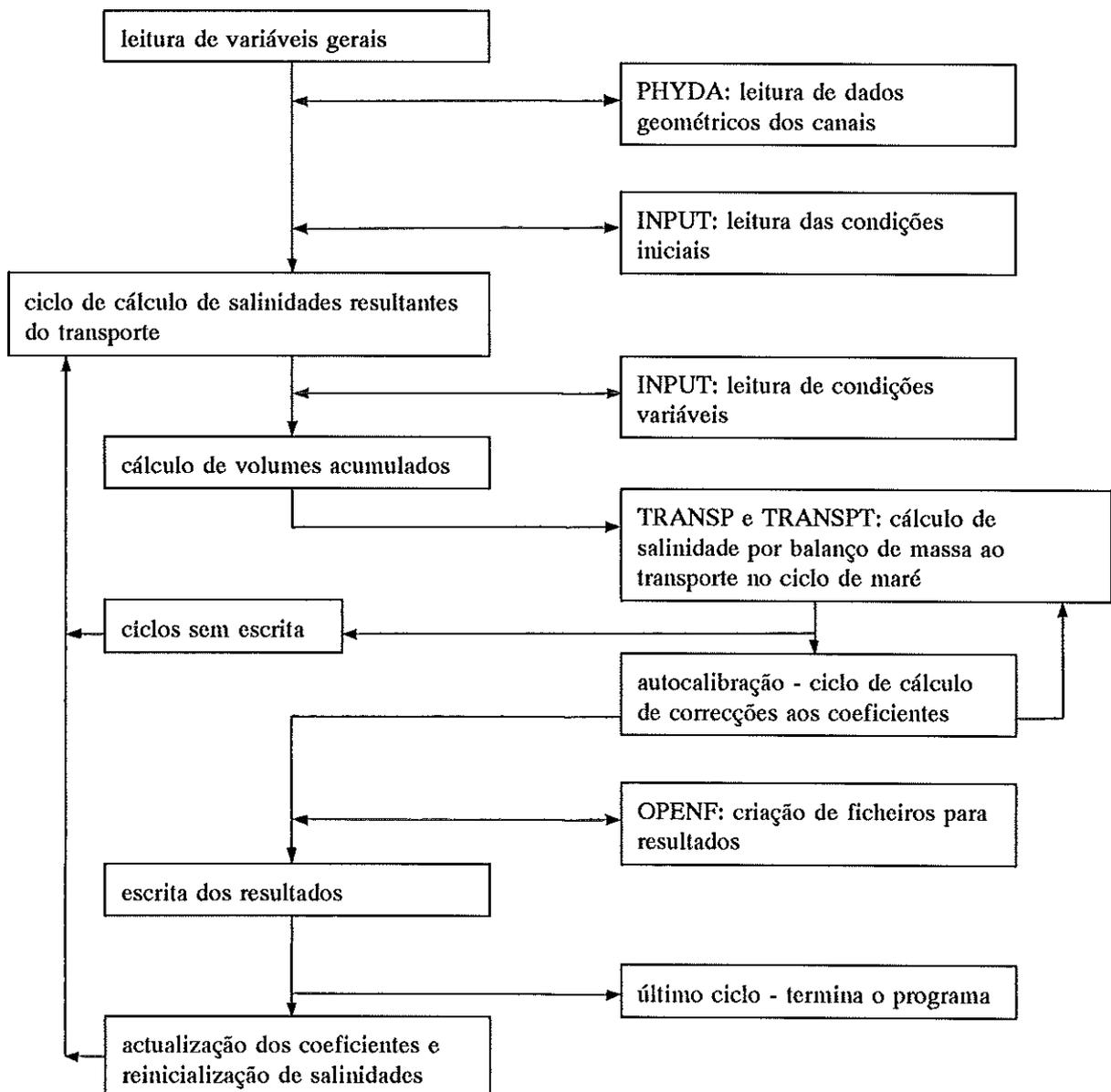


Figura 4.2. Diagrama representando o cálculo de salinidade com o modelo de prisma de maré, fazendo autocalibração dos valores dos coeficientes de retorno.

### 4.3 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MODELO À RIA DE AVEIRO

Na primeira fase do desenvolvimento de um modelo de qualidade da água para um caso particular, devem-se identificar os fenómenos físicos, químicos e biológicos mais significativos nesse caso. A natureza do modelo depende dos objectivos definidos para o trabalho, do conhecimento teórico sobre os fenómenos que devem ser representados e também do conhecimento das características próprias do sistema para o qual se desenvolve o modelo. Definido o tipo e a estrutura do modelo é necessário elaborar uma representação computacional adequada aos cálculos desse modelo.

Na fase seguinte do desenvolvimento do modelo, que BECK (1983) designa de *a posteriori*, é utilizada informação experimental que vai permitir calibrar os valores dos parâmetros do modelo. Adicionalmente novos resultados experimentais permitem verificar a validade das simulações realizadas. No fim deste processo pode ser necessário voltar à fase anterior e corrigir alguns aspectos da estrutura do modelo. Foi este o caminho seguido no desenvolvimento do modelo para a Ria de Aveiro, resultando a estrutura actual do modelo, de alterações motivadas pelos resultados das primeiras tentativas de calibração e ainda pelos resultados do trabalho de campo.

As alterações mais significativas que foram feitas na estrutura do modelo são relativas à divisão e interligação dos canais. As conclusões retiradas da comparação de caudais calculados por cubicagem e medidos, para a secção da Testada, determinaram uma alteração na divisão entre os canais de Ovar e da Murtosa, como foi referido. As primeiras simulações com o modelo produziam salinidades semelhantes no 1º segmento do canal de Mira e no 1º segmento do canal principal a que o canal de Mira estava ligado, enquanto que as salinidades observadas eram inferiores no canal de Mira. Por outro lado, no canal de Ovar situado mais para o interior da Ria, eram observadas salinidades idênticas às do 1º segmento do canal principal. Estas observações levaram a alterar a sequência de ligação dos canais, tendo-se estabelecido a ligação do canal de

Ovar a um 1º segmento adicional que se localiza no mar, como é representado na Figura 4.3. Esta alteração da sequência de ligação dos canais pode ser interpretada com base nas diferenças temporais de inversão de maré entre os vários canais, que foram indicadas na Tabela 2.4. A inversão de correntes no canal de Ovar ocorre depois de todos os outros canais e por isso a água que sai deste canal no fim da vazante pode entrar nos outros canais onde já começou a enchente. Mais tarde quando principia a enchente, a possibilidade de retorno de água menos salgada para o canal de Ovar é menor que nos restantes canais.

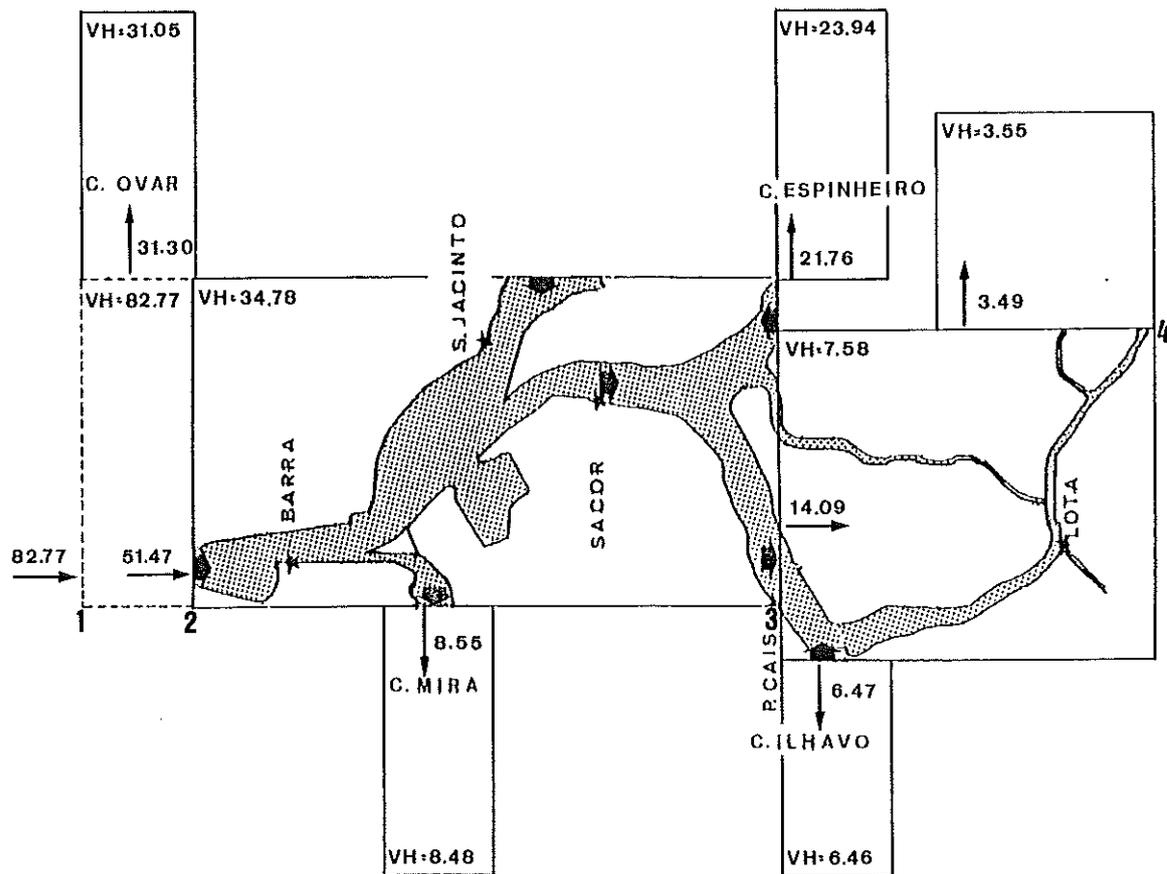


Figura 4.3. Esquema de ligação dos vários canais para aplicação do modelo de prisma de maré. São indicados os valores dos prismas de maré através de cada secção (Mm³) e os volumes em preia-mar dos segmentos VH (Mm³).

#### 4.3.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E CALIBRAÇÃO DOS COEFICIENTES DE RETORNO

O primeiro exercício de calibração foi realizado para os segmentos calculados com a maré de 7-Junho-1990. Os valores dos coeficientes de retorno obtidos foram apresentados por SILVA e RODRIGUES (1992). Concluiu-se então que a calibração conduzia a valores entre 0,8 e 0,95 para os coeficientes de retorno nas 2ª e 3ª secções de todos os canais. Nas primeiras secções, que separam canais diferentes, considerou-se que não podia ocorrer retorno sem mistura, uma vez que aí ocorre a junção de dois caudais. Verificou-se também que as diferenças entre os valores dos coeficientes resultantes da calibração com as várias séries de valores experimentais, não traduziam uma sensibilidade exagerada dos coeficientes à variação de condições entre as datas dessas séries.

Neste exercício de calibração analisou-se também a importância da evaporação para simular a evolução da salinidade durante o verão. Verificou-se que as previsões do modelo se aproximavam das observações. As salinidades máximas previstas pelo modelo aproximam-se dos valores máximos observados (cerca de 37 ‰) no interior dos canais de Ilhavo e de Ovar (3º segmento e seguintes). A concordância observada permite considerar razoável a representação da evaporação no modelo sendo aceitável o valor médio constante para a taxa de evaporação.

Depois de corrigida a estrutura do modelo, usando os volumes de água nos canais calculados para a maré de 24-Maio-1991 (Tabela 4.1), realizou-se nova calibração do modelo. As condições iniciais de salinidade foram já apresentadas na Tabela 3.1. As condições nas fronteiras do modelo são:

- Para o mar admitiu-se uma salinidade constante de 35,8 ‰.
- Para os rios e descargas, estimaram-se os caudais que afluíam à Ria naquela data (Tabela 4.2), e considerou-se a sua salinidade igual a zero.

Na primeira simulação com autocalibração foram mantidas constantes as condições de fronteira correspondentes a 24-Maio-1991, e realizadas correções aos coeficientes de

retorno após 15, 30, 50, 80, 120 ciclos de maré. Os valores da salinidade calculada pelo modelo são indicados na Tabela 4.4. Verificou-se que no processo de autocalibração foram atingidos valores constantes para os coeficientes de retorno. No entanto as salinidades calculadas a partir dos 2º segmentos não atingem valores estáveis. A variação lenta da salinidade é explicada pelo elevado tempo de residência da água nestes segmentos, que ultrapassa 10 dias. Na calibração, deve por isso ter-se em atenção, que o campo de salinidade observado num dado momento depende da variação do caudal de água doce afluente no período anterior.

Para melhorar a autocalibração começou-se por simular a variação do caudal doce entre 3-Abril e 24-Maio-1991. Apesar de neste período ocorrer uma grande variação de caudal dos rios, após 29 de Abril não foi registada precipitação. Usou-se para a nova calibração o caudal estimado para 10-Maio-1991 (Tabela 4.7), que corresponde aproximadamente ao médio do período sem chuva. Na Tabela 4.5 são indicadas as salinidades obtidas com o modelo e que, à excepção do canal do Espinheiro, são mais próximas das observadas. A maior diferença entre os resultados do modelo e das observações ocorre no canal de Mira. Várias hipóteses podem ser avançadas para justificar que no canal de Mira tenham sido observadas salinidades que, face ao caudal doce estimado, não são bem explicadas pelo modelo. A mais evidente refere-se à validade deste modelo numa situação em que ocorre uma significativa variação de salinidade dentro dos segmentos, como se conclui pelos desvios padrão da Tabela 3.1. Outra hipótese é admitir que entra no canal de Mira, a partir da península da Gafanha, um significativo caudal de água subterrânea. Uma terceira hipótese, que se traduz na existência de circulação residual entre o canal do Espinheiro e o canal de Mira, foi já contemplada na presente estrutura do modelo. A ligação do canal de Mira e do canal do Espinheiro ao mesmo segmento do canal principal (Figura 4.3) procura incluir esta hipótese na estrutura do modelo.

Tabela 4.4. Salinidades calculadas pelo modelo para 24-Maio-1991, usando os caudais dos rios observados nesta data. Os coeficientes de retorno são ajustados por autocalibração após o número de ciclos de maré indicado.

Segmento (km)	INICIAL	15 ciclos	30 ciclos	50 ciclos	80 ciclos	120 ciclos
<b>Canal Principal</b>						
S0 (-0,001 - 0,0)	35,8	35,5	35,5	35,5	35,5	35,5
S1 (0,0 - 5,4)	35,4	34,9	35,3	34,9	34,9	34,9
S2 (5,4 - 10,9)	32,9	34,8	33,4	33,7	34,1	34,3
S3 (10,9 - 13,5)	32,0	34,7	33,0	33,3	33,8	34,1
S4 (13,5 - 14,2)	31,6	34,2	32,5	32,8	33,3	33,6
<b>Canal de Mira</b>						
S1 (0,0 - 5,7)	31,5	34,8	35,2	34,9	34,9	34,9
S2 (5,7 - 10,9)	23,0	33,7	31,0	25,9	23,0	23,0
S3 (10,9 - 11,8)	9,5	29,4	16,0	10,3	9,9	10,0
S4 (11,8 - 13,3)	4,7	20,7	7,9	5,9	5,9	6,0
<b>Canal de Ovar</b>						
S1 (0,0 - 7,7)	34,8	35,4	35,4	35,5	35,5	35,5
S2 (7,7 - 12,3)	32,0	35,0	33,5	33,5	33,7	33,8
S3 (12,3 - 14,7)	30,7	34,1	32,4	32,5	32,8	32,9
S4 (14,7 - 15,9)	29,3	32,6	31,2	31,2	31,6	31,8
S5 (15,9 - 21,0)	27,5	30,6	29,2	29,4	29,9	30,2
<b>Canal do Espinheiro - Laranjo</b>						
S1 (0,0 - 6,7)	33,6	34,0	34,4	34,1	34,0	34,0
S2 (6,7 - 10,9)	28,4	33,0	28,9	27,8	27,5	27,3
S3 (10,9 - 12,1)	26,2	30,0	25,6	24,5	24,3	24,1
S4 (12,1 - 12,7)	25,4	22,0	21,5	20,8	20,5	20,4
<b>Canal de Ilhavo</b>						
S1 (0,0 - 4,8)	32,1	34,7	33,3	33,7	34,1	34,3
S2 (4,8 - 9,5)	28,3	34,4	32,8	33,2	30,2	30,7
S3 (9,5 - 11,0)	18,0	33,7	34,9	19,2	19,1	19,5
S4 (11,0 - 12,0)	5,5	32,1	9,8	6,3	6,7	7,0

Tabela 4.5. Salinidades calculadas pelo modelo para 24-Maio-1991, usando os caudais dos rios estimados para 10-Maio. Os coeficientes de retorno são ajustados por autocalibração após o numero de ciclos de maré indicado.

Segmento (km)	INICIAL	15 ciclos	30 ciclos	45 ciclos	60 ciclos	80 ciclos
Canal Principal						
S0 (-0,001 - 0,0)	35,8	35,2	35,3	35,3	35,3	35,3
S1 (0,0 - 5,4)	35,4	34,2	35,0	34,8	34,8	34,7
S2 (5,4 - 10,9)	32,9	34,1	33,2	33,2	33,3	33,4
S3 (10,9 - 13,5)	32,0	34,0	32,7	32,7	32,8	33,0
S4 (13,5 - 14,2)	31,6	33,0	32,0	32,1	32,3	32,5
Canal de Mira						
S1 (0,0 - 5,7)	31,5	34,0	34,8	34,7	34,7	34,6
S2 (5,7 - 10,9)	23,0	32,2	29,0	23,6	23,6	23,7
S3 (10,9 - 11,8)	9,5	25,8	12,0	10,3	10,3	10,5
S4 (11,8 - 13,3)	4,7	14,2	6,2	5,5	5,5	5,6
Canal de Ovar						
S1 (0,0 - 7,7)	34,8	35,1	35,2	35,2	35,2	35,2
S2 (7,7 - 12,3)	32,0	34,7	33,1	32,7	32,6	32,7
S3 (12,3 - 14,7)	30,7	33,5	31,8	31,5	31,3	31,4
S4 (14,7 - 15,9)	29,3	31,6	30,1	29,9	29,8	29,9
S5 (15,9 - 21,0)	27,5	28,9	27,8	27,7	27,6	27,7
Canal do Espinheiro - Laranjo						
S1 (0,0 - 6,7)	33,6	32,6	33,3	33,1	33,1	33,0
S2 (6,7 - 10,9)	28,4	30,9	27,0	26,9	26,9	26,6
S3 (10,9 - 12,1)	26,2	26,3	23,1	23,2	23,3	23,0
S4 (12,1 - 12,7)	25,4	15,6	17,3	17,3	17,4	17,1
Canal de Ilhavo						
S1 (0,0 - 4,8)	32,1	34,0	33,1	33,1	33,2	33,3
S2 (4,8 - 9,5)	28,3	33,4	32,3	31,9	29,2	29,4
S3 (9,5 - 11,0)	18,0	32,1	33,0	19,0	18,2	18,4
S4 (11,0 - 12,0)	5,5	29,0	8,9	6,6	6,5	6,7

Tabela 4.6. Coeficientes de retorno calculados pelo modelo para 24-Maio-1991, usando os caudais dos rios estimados para 10-Maio. Os coeficientes de retorno são ajustados por autocalibração após o número de ciclos de maré indicado.

Segmento (km)	INICIAL	15 ciclos	30 ciclos	45 ciclos	60 ciclos	80 ciclos
Canal Principal						
S0 (-0,001 - 0,0)	0,50	0,50	0,26	0,40	0,40	0,42
S1 (0,0 - 5,4)	0,50	0,50	0,93	0,94	0,95	0,95
S2 (5,4 - 10,9)	0,50	0,50	0,79	0,84	0,83	0,84
S3 (10,9 - 13,5)	0,50	0,50	0,28	0,14	0,03	0,00
S4 (13,5 - 14,2)	0,50	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00
Canal de Mira						
S1 (0,0 - 5,7)	0,50	0,50	0,85	0,94	0,94	0,94
S2 (5,7 - 10,9)	0,50	0,50	0,90	0,90	0,90	0,90
S3 (10,9 - 11,8)	0,50	0,50	0,56	0,57	0,57	0,57
S4 (11,8 - 13,3)	0,50	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00
Canal de Ovar						
S1 (0,0 - 7,7)	0,50	0,50	0,89	0,92	0,93	0,93
S2 (7,7 - 12,3)	0,50	0,50	0,63	0,65	0,65	0,65
S3 (12,3 - 14,7)	0,50	0,50	0,52	0,52	0,52	0,52
S4 (14,7 - 15,9)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
S5 (15,9 - 21,0)	0,50	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00
Canal do Espinheiro - Laranjo						
S1 (0,0 - 6,7)	0,50	0,50	0,89	0,89	0,89	0,89
S2 (6,7 - 10,9)	0,50	0,50	0,47	0,45	0,44	0,44
S3 (10,9 - 12,1)	0,50	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00
S4 (12,1 - 12,7)	0,50	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00
Canal de Ilhavo						
S1 (0,0 - 4,8)	0,50	0,50	0,60	0,78	0,94	0,94
S2 (4,8 - 9,5)	0,50	0,50	0,73	0,97	0,97	0,97
S3 (9,5 - 11,0)	0,50	0,50	0,97	0,97	0,97	0,97
S4 (11,0 - 12,0)	0,50	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00

#### 4.3.2 SIMULAÇÃO DA EVOLUÇÃO DA SALINIDADE ENTRE 3-ABRIL E 27-JULHO DE 1991

A validação de um modelo de qualidade da água deve anteceder a sua aplicação na simulação de situações novas em que à partida não é conhecida a resposta do sistema natural. Com o modelo calibrado para as condições existentes na Ria no final de Maio de 1991, foi simulada a variação da salinidade entre 4-Abril-1991 e 27-Julho-1991. Esta simulação baseia-se na variação das condições de fronteira impostas ao modelo. Como a salinidade do mar e dos rios foi considerada constante, a única variação que é considerada para a simulação é relativa ao caudal doce afluente à Ria, proveniente dos rios, e também da precipitação directa sobre a Ria. Como foi referido, a variação de caudal dos rios foi estimada considerando constante a taxa de variação do caudal unitário. O caudal resultante da precipitação directa sobre a Ria foi calculado com base na precipitação observada na estação meteorológica da Universidade de Aveiro. Um resumo da série de valores de caudal usados nesta simulação é apresentado na Tabela 4.7. As diferenças de caudais entre 3-Abril e 5-Abril resultam da ocorrência de 5,6 mm de precipitação em 5-Abril. As variações mais significativas ocorrem nos canais de Ovar, de Ilhavo e no canal Principal.

Na Tabela 4.8 comparam-se as salinidades médias observadas e as salinidades resultantes da simulação. As diferenças médias entre simulação e observações são de 0,5 ‰ em 24-Maio e 0,7 ‰ em 27-Julho. Existe pois uma pequena diferença que resulta de nas simulações serem sistematicamente obtidos resultados superiores aos observados. Esta diferença é mais acentuada no canal de Mira (2,9 ‰) e inverte-se no canal do Espinheiro (-0,9 ‰). O aumento da diferença média que se verificou na simulação para 27-Julho, numa altura em que a variação da salinidade nos canais é pequena, parece indicar que os valores dos coeficientes de retorno obtidos na calibração são um pouco altos. Nesta simulação foram obtidas algumas salinidades ligeiramente superiores à do mar, que resultam da evaporação em massas de água com tempos de residência elevados. As observações mostram também o aumento de salinidade para o interior de alguns canais, mas menos acentuado.

Tabela 4.7. Caudais de água doce afluentes à Ria no período entre 3-Abril e 27-Julho-1991. Os caudais são indicados em  $m^3s^{-1}$ , e correspondem aos rios e à precipitação directa na área molhada da Ria.

Segmento (km)	3-Abril	5-Abril	10-Maio	24-Maio	28-Junho	27-Julho
Canal Principal						
S1 (0,0 - 5,4)	0,04	0,41	0,01	0,00	0,00	0,00
S2 (5,4 - 10,9)	0,06	0,89	0,02	0,01	0,00	0,00
S3 (10,9 - 13,5)	0,06	0,34	0,02	0,01	0,00	0,00
S4 (13,5 - 14,2)	0,43	0,44	0,19	0,10	0,06	0,02
Canal de Mira						
S1 (0,0 - 5,7)	0,16	0,48	0,06	0,03	0,02	0,01
S2 (5,7 - 10,9)	0,25	0,35	0,10	0,04	0,03	0,02
S3 (10,9 - 11,8)	0,07	0,08	0,03	0,01	0,01	0,00
S4 (11,8 - 13,3)	3,44	3,36	1,41	0,60	0,39	0,23
Canal de Ovar						
S1 (0,0 - 7,7)	0,41	1,53	0,19	0,10	0,06	0,03
S2 (7,7 - 12,3)	0,17	0,81	0,08	0,04	0,02	0,01
S3 (12,3 - 14,7)	0,14	0,55	0,07	0,03	0,02	0,01
S4 (14,7 - 15,9)	0,06	0,26	0,03	0,01	0,01	0,00
S5 (15,9 - 21,0)	5,11	5,39	2,15	1,16	0,64	0,26
Canal do Espinheiro - Laranjo						
S1 (0,0 - 6,7)	44,02	44,28	20,67	10,62	5,81	1,73
S2 (6,7 - 10,9)	0,82	1,12	0,47	0,21	0,13	0,05
S3 (10,9 - 12,1)	4,77	4,75	2,27	1,27	0,77	0,36
S4 (12,1 - 12,7)	3,18	3,12	1,51	0,85	0,51	0,24
Canal de Ilhavo						
S1 (0,0 - 4,8)	0,20	0,53	0,07	0,02	0,01	0,00
S2 (4,8 - 9,5)	0,30	0,41	0,14	0,03	0,02	0,00
S3 (9,5 - 11,0)	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
S4 (11,0 - 12,0)	0,62	0,63	0,22	0,06	0,03	0,00

Tabela 4.8. Salinidades médias observadas e resultados da simulação entre 3-Abril e 27-Julho, usando os coeficientes de retorno obtidos na calibração.

Segmento (km)	3-Abril	sim. 15 ciclos	24-Maio	sim. 103 ciclos	27-Julho	sim. 130 ciclos
<b>Canal Principal</b>						
S0 (-0,001 - 0,0)		34,6		35,4		35,8
S1 (0,0 - 5,4)	30,1	33,7	35,4	35,1	35,5	35,7
S2 (5,4 - 10,9)	20,4	26,4	32,9	33,2	35,1	35,9
S3 (10,9 - 13,5)	12,5	23,5	32,0	32,7	35,2	36,0
S4 (13,5 - 14,2)		22,9		32,6		36,1
<b>Canal de Mira</b>						
S1 (0,0 - 5,7)	31,0	33,4	31,5	35,0	35,0	35,7
S2 (5,7 - 10,9)	16,8	16,3	23,0	24,8	31,1	33,0
S3 (10,9 - 11,8)	5,5	4,3	9,5	12,0	19,5	26,3
S4 (11,8 - 13,3)		1,3		7,4		23,0
<b>Canal de Ovar</b>						
S1 (0,0 - 7,7)	33,4	34,3	34,8	35,4	35,6	35,8
S2 (7,7 - 12,3)	24,6	25,2	32,0	31,8	35,1	36,0
S3 (12,3 - 14,7)	18,7	22,1	30,7	30,4	35,3	35,9
S4 (14,7 - 15,9)	14,2	18,9	29,3	28,9	35,5	35,8
S5 (15,9 - 21,0)		15,1		27,0		35,6
<b>Canal do Espinheiro - Laranjo</b>						
S1 (0,0 - 6,7)	18,1	30,4	33,6	34,1	35,5	35,5
S2 (6,7 - 10,9)	18,0	19,1	28,4	27,6	35,6	33,9
S3 (10,9 - 12,1)	14,2	14,4	26,2	25,1	35,4	33,0
S4 (12,1 - 12,7)		8,0		21,1		31,2
<b>Canal de Ilhavo</b>						
S1 (0,0 - 4,8)	31,1	26,2	32,1	33,2	35,5	35,9
S2 (4,8 - 9,5)	17,2	18,9	28,3	29,3	35,1	35,8
S3 (9,5 - 11,0)	5,6	7,8	18,0	17,6	32,6	32,8
S4 (11,0 - 12,0)		2,3		6,3		26,2

### 4.3.3 POTENCIALIDADES PARA DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE QUALIDADE DA ÁGUA DA RIA

O modelo de segmentos de prisma de maré que foi formulado e calibrado para a Ria de Aveiro, permite simular com razoável rigor o campo de salinidade da Ria. No entanto é limitado o detalhe espacial com que descreve o sistema, uma vez que próximo da barra os percursos de maré são longos. Além disso, a circulação residual prevista na formulação do modelo é unicamente a resultante da descarga de água afluente à Ria. A circulação residual que foi detectada entre o canal da Murtosa e o canal de Ovar só pode ser incluída no modelo definindo condições fronteira que a representem. Isto foi feito admitindo que  $1 \text{ Mm}^3$  de água é transferido em cada ciclo do 2º segmento do canal do Espinheiro para o 1º segmento do canal de Ovar. As variações do campo de salinidade simulado para 27-Julho são pouco significativas, o que não implica que o efeito da ligação entre estes canais não possa ser mais importante para outras variáveis de qualidade da água, cujo campo de concentrações difira do da salinidade.

Espera-se que as potencialidades do modelo sejam boas em zonas mais restritas da Ria. Nestes casos pode-se melhorar a resolução espacial da representação, realizando uma divisão da área em sub-bacias que satisfaçam os requisitos do modelo e definindo os segmentos com base nas condições de maré e de escorrência apropriadas. Para estes sub-modelos as condições de fronteira de jusante podem ser obtidas do modelo geral apresentado.

Algumas variáveis de qualidade da água que pode interessar simular para períodos longos são: - nutrientes de plantas; - metais pesados; - partículas em suspensão. Estes constituintes estão sujeitos a reacções bioquímicas que alteram as respectivas concentrações. Estas variações de concentração podem ser calculadas pelo modelo depois de calculado o transporte em cada ciclo de maré. O conjunto de interações que DIANA e OUTROS (1987) incluíram na versão do modelo que desenvolveram está

representado esquematicamente na Figura 4.4.

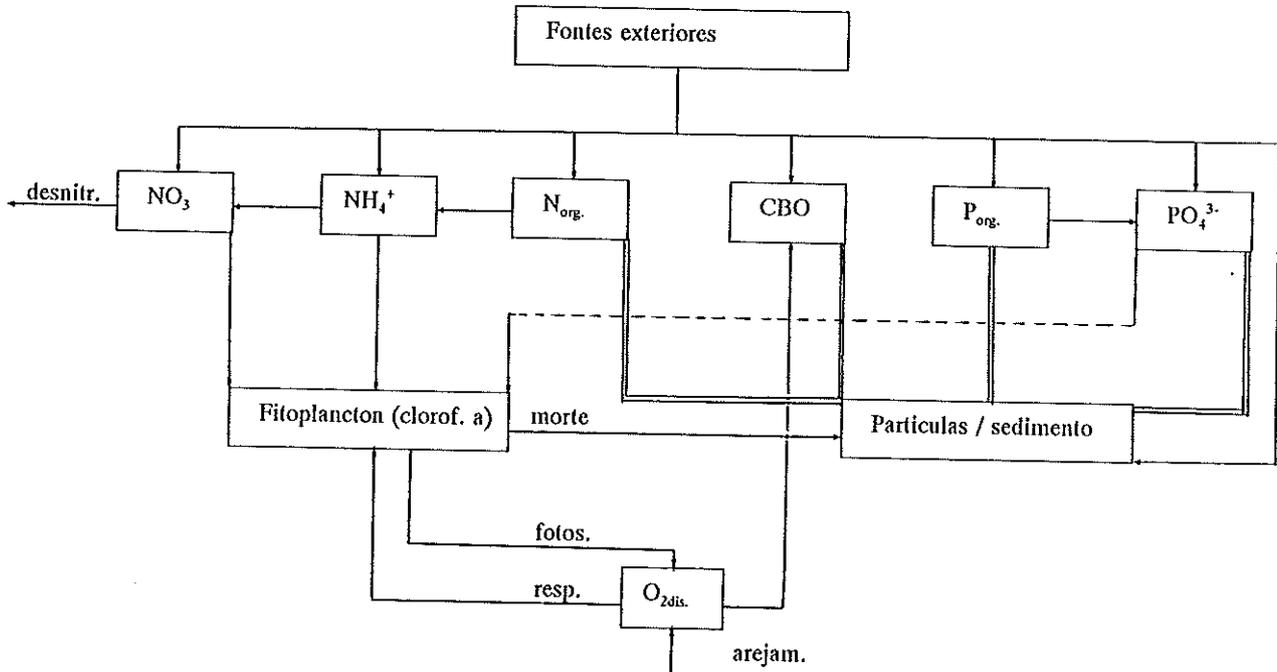


Figura 4.4. Esquema de interações entre variáveis de qualidade da água para cálculo das concentrações de: nitrato e nitrito ( $\text{NO}_3$ ), amónia ( $\text{NH}_4^+$ ), azoto orgânico ( $\text{N}_{\text{org.}}$ ), carência bioquímica de oxigénio (CBO), fósforo orgânico ( $\text{P}_{\text{org.}}$ ), fósforo inorgânico ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), oxigénio dissolvido ( $\text{O}_{2\text{dis.}}$ ), fitoplancton e partículas em suspensão.

No esquema foi dado relevo ao papel central das trocas com o plancton e com as partículas, no conjunto das interações entre as variáveis. A inclusão da concentração de oxigénio dissolvido, justificada por ser um constituinte que está envolvido em muitas reacções, não permite supor que o modelo possa simular com êxito o comportamento desta variável. É previsível que na Ria a sua concentração seja determinada pelo balanço entre arejamento e fotossíntese contra a respiração. Como a fotossíntese apresenta uma variação horária acentuada, a produção de oxigénio não pode ser rigorosamente representada neste modelo. A variação da concentração de oxigénio causada pela fotossíntese também altera a velocidade de arejamento. No entanto as trocas médias com o fitoplancton e com o sedimento podem ser estimadas com base em dados sobre as suas concentrações médias na coluna de água e em estimativas das taxas de reacção, que devem ser fornecidas ao modelo.

Um desenvolvimento que pode melhorar a representação da fotossíntese, implica usar formulação para cálculo da intensidade da radiação em intervalos mais curtos que o ciclo de maré. Este desenvolvimento também possibilita o cálculo da temperatura da água, fazendo o balanço térmico em cada segmento. Como consequência do conhecimento da temperatura seria também possível melhorar a representação da evaporação.

Os modelos de caixas de maré também podem ser usados para estimar a eficiência de retenção de sedimento fino nos estuários (BIGGS e HOWELL, 1984). O modelo desenvolvido para a Ria de Aveiro permite fazer o balanço de massa de sedimento em cada segmento, devendo contudo ser fornecida a taxa de transporte através da fronteira do leito do canal.

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objectivo geral do presente trabalho foi estudar a circulação da água na Ria de Aveiro, enquanto factor essencial da qualidade da sua água. O estudo foi planeado admitindo que a circulação da água é fundamentalmente causada pelas marés semidiurnas. A primeira conclusão deve por isso referir-se à validade desta hipótese.

O volume total de água doce transportada pelos rios, em média anual, foi estimado em 3 Mm<sup>3</sup> por ciclo de maré, enquanto que o volume movimentado numa maré média através da secção da barra foi calculado em 83 Mm<sup>3</sup>, atingindo o caudal de maré nesta secção 6000 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>. A diferença no verão ainda é mais acentuada, uma vez que nesta altura o volume de água doce afluente se reduz a cerca de 0,3 Mm<sup>3</sup>. Justifica-se por isso a hipótese formulada.

Pela análise da morfologia da Ria propôs-se a divisão em 5 sub-bacias ou ramos, designadamente:

- ramo do canal de Ovar
- ramo do canal do Espinheiro
- ramo do canal principal da Barra a Aveiro
- ramo do canal de Mira
- ramo do canal de Ilhavo.

Os limites estabelecidos na Ria entre estas bacias foram ajustados para corresponderem a barreiras físicas razoavelmente bem definidas entre as bacias. Os limites das bacias hidrográficas afluentes mostram que ao canal do Espinheiro corresponde cerca de 77% da área total que é drenada pela Ria.

Os rios mais importantes que afluem à Ria são o Vouga, Antuã e a vala de Mira. A comparação dos caudais observados nestes rios (Figura 1.6) mostra que o caudal do rio Vouga perde importância relativa à medida que o caudal diminui durante o verão. A localização das maiores entradas de água doce no centro da Ria, difere da maioria dos estuários em que o principal tributário entra num extremo do canal estuarino. Esta característica tem implicações na circulação da água e no campo de salinidade observado na Ria.

A análise que foi feita aos dados de alturas de maré, obtidos pelo Instituto Hidrográfico em vários pontos de Ria, mostrou que à frequência semi-diurna dominante nas marés da Ria se sobrepõem pequenas oscilações de período superior. Estas oscilações foram detectadas por ocorrerem variações regulares nos níveis médios registados em cada marégrafo.

Concluiu-se que os níveis médios diários calculados aumentam proporcionalmente com a distância à barra, sendo o declive médio da superfície livre da ordem de  $0,02 \text{ m km}^{-1}$ . Constatou-se que ocorrem variações significativas do declive médio da superfície livre entre as marés de quadratura e as marés de sizígia. Também ocorre uma variação sazonal do nível médio, que entre Outubro e Fevereiro é cerca de  $0,1 \text{ m}$  superior ao do período de Março a Setembro.

A variação quinzenal dos níveis médios corresponde a uma variação de volume de  $14 \text{ Mm}^3$ , que no verão é muito superior ao volume de água doce transportada pelos rios no mesmo intervalo, que é da ordem de  $8 \text{ Mm}^3$ . Os percursos realizados pelas partículas de água associados a esta variação de volume (Figura 2.10) são mais longos nas zonas médias dos canais de Ovar e de Ilhavo onde atingem  $2 \text{ km}$ .

O cálculo de caudais de maré mostrou que existem diferenças de tempo entre os momentos de inversão de correntes nas secções que dividem as sub-bacias. A inversão de correntes começa no canal de Mira e termina no canal de Ovar cerca de 1 hora depois. Estas diferenças de tempo na inversão de correntes aumentam a mistura de água

entre os canais. Também ocorrem diferenças de tempo na inversão de correntes ao longo dos canais, que ultrapassam 1 hora. Estas diferenças podem ser relacionadas com a energia da onda de maré que é dissipada e que provoca mistura da água.

Os comprimentos dos percursos realizados por partículas de água entre duas inversões de corrente, foram estimados a partir das variações de volume ao longo dos canais. Concluiu-se que partículas inicialmente situadas à entrada dos vários canais realizam percursos de 5 a 7 km. Estas estimativas não consideram o efeito do movimento lateral para os expriados de maré nem as perturbações causadas pela turbulência do escoamento. Estes factores determinam que partículas inicialmente vizinhas, realizem percursos diferentes, ocorrendo por isso mistura nos volumes limitados pelos percursos médios.

Foi apresentado um método para estimar as salinidades médias da água nos segmentos definidos a partir dos percursos médios de maré. O cálculo é feito com base em observações realizadas próximo dos momentos de inversão de correntes, e admite que o campo de salinidade é quase estacionário. Concluiu-se que, nas condições actuais, a salinidade da água da Ria é próxima da do mar na maior parte da sua área, e sempre que o caudal dos rios é inferior ao caudal médio. A área mais significativa onde se observa maior diluição da água do mar, ao longo de todo o ano, é o canal de Mira (Figura 3.12). Pelo contrário, nos canais de Ovar e de Ílhavo foram observadas no fim do verão salinidades ligeiramente superiores à do mar, revelando a importância da evaporação.

A diluição da água do mar observada implica que, em cada segmento, uma fracção do seu volume corresponde a água doce proveniente dos rios. Este volume, dividido pelo caudal correspondente, dá o tempo de residência da água doce no segmento. Os tempos de residência calculados refletem a especificidade da localização das maiores entradas de água doce na Ria. Assim, os tempos de residência mais baixos foram obtidos para o primeiro segmento do canal principal e segmentos do canal do Espinheiro. Nos restantes segmentos foram calculados tempos de residência mais elevados,

frequentemente superiores a 10 dias, com excepção do primeiro segmento do canal de Ovar, em que foram obtidos valores intermédios.

A circulação no canal da Murtosa - Espinheiro foi estudada com maior detalhe, para se testar a divisão proposta entre o canal de Ovar e o canal do Espinheiro. Observações de correntes de maré realizadas na secção do Chegado mostraram que a corrente de vazante predomina no lado norte do canal. A variação vertical mostra, por vezes, a influência da tensão do vento sobre a superfície, que então é mais importante que o efeito do atrito no fundo.

Por não se ter observado uma intensa circulação de água através do esteiro que liga este canal ao braço norte do rio Vouga, concluiu-se que a descarga de água proveniente do Vouga para o canal do Chegado é pequena. Observou-se no entanto uma flutuação de salinidade próximo da baixa-mar, que pode ser explicada pela mistura de águas com salinidades diferentes, entre o esteiro e o canal.

É o canal da Testada que liga os canais da Murtosa e do Espinheiro. Entre os canais da Murtosa e de Ovar existe também uma ligação larga, mas pouco profunda. A circulação observada na secção da Testada depende dos fluxos que ocorrem entre estes canais. As observações de correntes realizadas permitem concluir que os fluxos através da secção transportam um volume idêntico ao do prisma de maré no canal da Murtosa e largo do Laranjo. A corrente de enchente é mais demorada que a de vazante, e comparando os volumes de prisma de maré calculado com o volume que corresponde aos caudais medidos na enchente, concluiu-se serem estes um pouco maiores, o que indica que parte do volume na enchente entra no canal de Ovar.

A organização da circulação no canal da Murtosa obedece ao padrão definido pelo domínio da enchente nos lados sul - nascente, e pelo domínio da vazante nos lados norte - poente. Este padrão de circulação indica que deve existir no canal da Murtosa circulação residual, que roda no sentido retrógrado. O núcleo deste vórtice é marcado pelos bancos de areia que ocupam o centro do canal.

Os campos de salinidade e de concentração de partículas em suspensão dependem do regime de circulação da água e ajudam a identificar os tipos de circulação que os podem explicar. Na secção do Chegado, as diferenças laterais e verticais de salinidade são pequenas quando comparadas com a variação longitudinal observada durante o ciclo de maré. Concluiu-se por isso que o transporte residual de sal para montante é principalmente devido à interacção entre o gradiente longitudinal de sal e o gradiente vertical de velocidade, de que resulta um fluxo dispersivo. Observou-se que o vento, quando é contrário à corrente, altera o perfil vertical de velocidade, e por isso interfere no transporte de sal.

A concentração de partículas em suspensão apresentou grande variabilidade. A variação observada não se relaciona significativamente com a salinidade, mas está relacionada com o quadrado da velocidade de corrente. Esta relação indica que a ressuspensão é o factor mais importante para explicar a variação observada. A variação sazonal de concentração média pode, em parte, ser explicada pela variação de caudal do rio Antuã e ainda pela variação da concentração de clorofila-a. A ausência de um grande máximo de turbidez é coerente com uma circulação média em que domina o transporte dispersivo.

Na secção da Testada a variação de salinidade, quando o caudal dos rios é elevado, tem grande amplitude. Foi observado no fim da enchente o aumento da estratificação vertical, que pode ser atribuída à acção do vento contrário à corrente. Diferenças laterais e flutuações rápidas que foram observadas no fim da vazante, podem ser atribuídas à formação de uma frente de mistura ao longo do canal. Normalmente, quando o caudal dos rios é pequeno, não ocorrem grandes variações de salinidade na secção, mantendo-se o gradiente longitudinal de salinidade, o que permite concluir que o transporte dispersivo também é importante nesta secção.

A concentração de partículas em suspensão varia inversamente com a salinidade no ciclo de maré. Esta relação indica que as fontes mais importantes das partículas transportadas em suspensão se situam para o interior do canal, onde a salinidade é mais

baixa. A ressuspensão local de sedimento, embora também ocorra, tem menor importância. A biomassa do plancton também é menos importante como constituinte das partículas que passam nesta secção, como revelam os resultados de clorofila-a.

O balanço de massa resultante do transporte de substâncias entre segmentos dos canais foi representado por um modelo de segmentos de prisma de maré. No balanço de massa foi incluída a evaporação, uma vez que se concluiu que pode ser importante. O transporte entre segmentos inclui o caudal de água proveniente dos rios e de outras descargas, que é a única circulação residual considerada pelo modelo. O transporte dispersivo é representado pela mistura de água entre segmentos, sendo ajustável por calibração dos coeficientes de retorno do modelo.

O transporte pela circulação residual que foi detectada entre os primeiros segmentos dos vários canais, quer devida às diferenças nos momentos de inversão de correntes, quer à ligação entre os canais da Murtosa e de Ovar, é representado em conjunto com o transporte dispersivo.

Os tempos de residência que correspondem aos valores dos coeficientes de retorno obtidos na calibração do modelo, variam entre 1 e 5 dias no primeiro segmento do canal principal e no canal do Espinheiro, sendo mais elevados nos restantes segmentos. Uma vez que os tempos de residência são elevados, os resultados das simulações dependem das condições iniciais num número elevado de ciclos de cálculo. Propõe-se que a calibração seja por isso realizada ao longo de um período razoavelmente longo, durante o qual podem ocorrer variações das condições de fronteira. Por este processo aumenta-se a probabilidade de o modelo calibrado representar bem as condições médias determinantes do transporte de substâncias a longo termo.

O modelo simula razoavelmente o campo médio de salinidade da Ria, durante períodos longos, que podem facilmente ser estendidos à escala anual. Este modelo pode ser vantajoso para simular com detalhe várias áreas no interior dos canais, onde se faz sentir mais acentuadamente os efeitos da poluição. O modelo apresentado pode fornecer

as condições de fronteira necessárias para os submodelos dessas áreas.

Algumas variáveis importantes para caracterizar a qualidade da água da Ria de Aveiro podem ser simuladas com este modelo, designadamente as concentrações de: - matéria orgânica residual; - nutrientes de plantas; - partículas em suspensão; - metais vestigiais em solução e ligados a partículas.

A Ria de Aveiro é um sistema natural de grande riqueza biológica, em que os processos biológicos são provavelmente muito importantes para determinar a qualidade do ambiente lagunar. Particularmente, as reacções promovidas por microorganismos planctónicos e bênticos, devem ser consideradas no cálculo das concentrações referidas. O problema ambiental da Ria de Aveiro, a que se aludiu na Introdução do trabalho, não é redutível à questão da qualidade do seu ambiente. A produtividade biológica da Ria, que tem sustentado actividades económicas importantes na história da região, pode ser o objectivo mais geral, que as simulações com um modelo de qualidade do ambiente devem contribuir para avaliar.

## REFERÊNCIAS

ABECASIS, C.K., (1961). *As Formações Lagunares e Seus Problemas de Engenharia Litoral*, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

ANONIMO, (1980). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association, Washington, pp. 94-95.

BECK, M.B., (1983). A Procedure for Modeling. Em: *Mathematical Modeling of Water Quality: Streams, Lakes and Reservoirs*, G.T. Orlob (Ed.), Wiley, Chichester, pp. 11-41.

BIGGS, R.B. e B.A. HOWELL, (1984). The Estuary as a Sediment Trap: Alternate Approaches to Estimating its Filtering Efficiency. Em: *The Estuary as a Filter*, V.S. Kennedy (Ed.), Academic Press, New York, pp 107-129.

BOWMAN, M.J. e R.L. IVERSON, (1977). Estuarine and Plume Fronts. Em: *Oceanic Fronts in Coastal Processes*, M.J. Bowman e W.E. Esaias (Ed.), Springer-Verlag, Berlin, pp. 87-104.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION, (1973). *Measurement of flow in tidal channels*, B.S. 3680, Part 6.

BROWN, W.S. e E. ARELLANO, (1980). The Application of a Segmented Tidal Mixing Model to the Great Bay Estuary, N.H. *Estuaries*, 3(4), 248-257.

CENTRO FABRIL DE CACIA, PORTUCEL, (1992). *Caudal do Rio Vouga, desde Agosto 1981 (relatório interno)*, Centro Fabril de Cacia, Portucel, Cacia.

CHENG, R.T., S. FENG e P. XI, (1989). On Inter-tidal Transport Equation. Em: *Estuarine Circulation*, B.J. Neilson, A. Kuo e J. Brubaker (Ed.), Humana Press, Clifton, pp. 133-156.

COSTA, C.N.L., (1990). *Propagação da Maré na Ria de Aveiro*. Projecto MC.06.01.90, Divisão de Marés e Correntes, Instituto Hidrográfico, Lisboa.

DIANA, B., A.Y. KUO, B.J. NEILSON, C.F. CERCO e P.V. HYER, (1987). *Tidal Prism Model Manual*, Virginia Institute of Marine Science, Gloucester Point.

DRAKE, D.E., (1976). Suspended Sediment Transport and Mud Deposition on Continental Shelves. Em: *Marine Sediment Transport and Environmental Management*, D.J. Stanley e D.J.P. Swift (Ed.), Wiley, New York, pp. 127-158

DYER, K.R., (1973). *Estuaries: A Physical Introduction*, Wiley, London.

DYER, K.R. e P.A. TAYLOR, (1973). A Simple, Segmented Prism Model of Tidal Mixing in Well-mixed Estuaries. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 1, 411-418.

EISMA, D., 1986. The Mass Balance of Sediments in Estuaries, A Review. Em: *Estuarine Processes, An Application to the Tagus Estuary, 13-16 Dez. 1982*, Lisboa, p. 23-40.

FARIA, J.M.R. e M.J.S. MACHADO, (1976). *Contribuição para o Estudo Hidroclimatológico da Bacia Hidrográfica do Rio Vouga*, Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica, Lisboa.

FISCHER, H.B., E.J. LIST, R.C.Y. KOH, J. IMBERGER e N.H. BROOKS, (1979). *Mixing in Inland and Coastal Waters*, Academic Press, New York.

HALL, A., A.C. DUARTE, M.T.M. CALDEIRA and M.F.B. LUCAS, (1987). Sources and Sinks of Mercury In the Coastal Lagoon of Aveiro, Portugal, *The Science of Total Environment*, 64, 75-87.

INSTITUTO HIDROGRÁFICO, (1990). *Roteiro da Costa de Portugal*, 2ª Edição, Instituto Hidrográfico, Lisboa.

KJERFVE, B., L.H. STEVENSON, J.A. PROEHL, T.H. CHRZANOWSKI and W.M. KITCHENS, 1981. Estimation of Material Fluxes in an Estuarine Cross Section: A Critical Analysis of Spatial Measurement Density and Errors. *Limnology and Oceanography*, 26: 325-335.

KUO, A.Y. e B.J. NEILSON, (1988). A Modified Tidal Prism Model for Water Quality in Small Coastal Embayments. *Water Science Technology*, 20, 133-142.

LEITÃO, A.N., (1906). *A Bacia Hydrográfica de Aveiro e a Salubridade Pública*, Porto.

MATOS, M.H., (1989). Um Estudo do Balanço de Sal Num Estuário de Costa Plana - Caso da Ria de Aveiro. *Recursos Hídricos*, 10, 13-21.

MILLERO, F.J. (1984). The Conductivity - Density - Salinity - Chlorinity Relationships for Estuarine Waters. *Limnology and Oceanography*, 29(6), 1317-1321.

NOBRE, A., J. AFREIXO e J. MACEDO, (1912). *Relatório Oficial do Regulamento da Ria de Aveiro*, Lisboa.

NORBY, J., S. BUBENSTEIN, T. TUERKE, C. FARMER, R. FOROOD e J. BENNINGTON, (1992). *SigmaPlot, Scientific Graph System*, Jandal Scientific, Erkrath.

OFFICER, C.B., (1976). *Physical Oceanography of Estuaries (and Associated Coastal Waters)*, Wiley, New York.

- OFFICER, C.B., (1980). Box Models Revisited. Em: *Estuarine and Wetland Processes, With Emphasis on Modeling*, P. Hamilton e K.B. Macdonald (Ed.), Plenum Press, New York.
- ORLOB, G.T., (1983). Future Directions. Em: *Mathematical Modeling of Water Quality: Streams, Lakes and Reservoirs*, G.T. Orlob (Ed.), Wiley, Chichester, pp. 503-509.
- PARK, J.K. e A. JAMES, (1984). Tidal Variation of Salt Flux and Dispersion in a Polluted Estuary. *Water Science Technology*, 17, 1001-1015.
- PARKER, W.R., (1988). On The Role of Fine Sediment Behaviour in Pollutant Transfer Modelling. *Water Science Technology*, 20, 175-182.
- PARSONS, T.R., (1982). The New Physical Definition of Salinity: Biologists Beware. *Limnology and Oceanography*, 27(2), 384-385.
- PARSONS, T.R., Y. MAITA and C.M. LALLI, (1984). *A Manual of Chemical and Biological Methods for the Seawater Analysis*. Pergamon Press, Oxford.
- PRITCHARD, D.W., (1989). Estuarine Classification - A Help or a Hindrance. Em: *Estuarine Circulation*, B.J. Neilson, A. Kuo e J. Brubaker (Ed.), Humana Press, Clifton, pp. 1-38.
- SCHUBEL, J.R. e H.H. CARTER, (1984). The Estuary as a Filter for Fine-Grained Suspended Sediment. Em: *The Estuary as a Filter*, V.S. Kennedy (Ed.), Academic Press, New York, pp 81-105.
- SCHUBEL, J.R. e V.S. KENNEDY, (1984). The Estuary as a Filter: An Introduction. Em: *The Estuary as a Filter*, V.S. Kennedy (Ed.), Academic Press, New York, pp 1-11.
- SCRUDATO, R.J., G. YOGIS e G. HOCUTT, (1988). An In-Situ Integrated Suspended Sediment Stream Sampler (IS3). *Environmental Geology Water Science*, 12(3), 177-179.
- SERVIÇOS GEOLÓGICOS, (1968). *Carta Geológica de Portugal*, Escala 1:1000000, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- SERVIÇOS GEOLÓGICOS, (1970). *Carta Hidrogeológica de Portugal*, Escala 1:1000000, Serviços Geológicos, Lisboa.
- SERVIÇOS HIDRÁULICOS, HIDROMETRIA, (1976-1977). *Anuários dos Serviços Hidraulicos, Hidrometria*, Direcção Geral dos Recursos Naturais, Lisboa.
- SERVIÇOS HIDRÁULICOS, HIDROMETRIA, (1978-1990). *Anuários dos Serviços Hidraulicos, Hidrometria*, Direcção Geral dos Recursos Naturais, Lisboa.
- SHARP, J.H. e C.H. CULBERSON, (1982). The Physical Definition of Salinity: A Chemical Evaluation. *Limnology and Oceanography*, 27(2), 385-387.
- SILVA, J.F., (1985). O Moliço da Ria de Aveiro. Em: *Jornadas da Ria de Aveiro - Volume II: Recursos da Ria de Aveiro*, Camara Municipal de Aveiro (Ed.), Aveiro, pp. 223- 251.

SILVA, J.F. e D. RODRIGUES, (1992). Aplicação de um Modelo Matemático de Qualidade da Água a Uma Laguna Costeira, Considerando o Efeito da Evaporação. Em: *3ª Conferência Nacional Sobre a Qualidade do Ambiente, Volume 1*, Comissão de Coordenação da Região Centro, Coimbra, pp. 410-420.

TELES, M., M. NEGRO e D. RODRIGUES, (1991). Modelação Matemática da Ria de Aveiro. Elaboração de um Sistema de Modelos Matemáticos para Apoio da sua Gestão Integrada. Em: *Ria de Aveiro: Que Futuro?*, Comissão de Coordenação da Região Centro, Coimbra, pp. 131-144.

WARD, L.G. e R.R. TWILLEY, (1986). Seasonal Distributions of Suspended Particulate Material and Dissolved Nutrients in a Coastal Plain Estuary. *Estuaries*, 9(3), 156-168.

WILSON, T.R.S., (1975). Salinity and the Major Elements of Sea Water. Em: *Chemical Oceanography, Volume 1, 2ª Edição*, J.P. Riley e G. Skirrow (Ed.), Academic Press, New York, pp. 365-410.

WINDOM, H.L., S.J.SCHROPP, F.D. CALDER, J.D. RYAN, R.G.SMITH, L.C. BURNEY, F.G. LEWIS, and C.H. RAWLINSON, 1989. Natural Trace Metal Concentrations in Estuarine and Coastal Marine Sediments of Southeastern United States. *Environmental Science and Technology*, 23: 314-320.

WOOD, T., (1979). A Modification of Existing Simple Segmented Tidal Prism Models of Mixing in Estuaries. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 8, 339-347.

## ANEXO

### CÁLCULO DE VOLUMES E CAUDAIS DE MARÉ

O cálculo de volume de água ao longo dos canais foi feito a partir da representação da batimetria por malhas de células quadradas cujos lados têm direcção norte-sul e este-oeste. As matrizes com as sondas médias correspondentes ( $Z_{ij}$ ), foram escritas em ficheiros de dados em que as linhas correspondem à transversal ao eixo principal do canal, começando pelo extremo de jusante. O volume de água acumulado ao longo do eixo principal do canal ( $V$ ) foi calculado somando o volume em todas as linhas de células. O volume contido em cada célula foi obtido pelo produto da altura de água ( $Z_{ij}+H_i$ ) pela área da célula ( $A$ ). A elevação da superfície líquida numa linha foi obtida por interpolação entre as alturas de maré nos marégrafos existentes em cada canal ( $H_M$ ):

$$H_i = H_{M1} + (i - I_{M1}) \times \frac{H_{M2} - H_{M1}}{I_{M2} - I_{M1}}$$

$$v_i = \sum_{j=1}^m (Z_{i,j} + H_i) \times A \qquad V = \sum_{i=1}^I v_i$$

O cálculo do volume acumulado é repetido com as elevações fornecidas nos pontos  $I_M$  em momentos sucessivos do ciclo de maré. A diferença entre os volumes acumulados, nos momentos de inversão de correntes na barra dá o prisma de maré no canal ( $P$ ). Quando existem bacias laterais, os respectivos prismas de maré são adicionados ao do canal principal. Os caudais de maré foram obtidos repetindo o cálculo de volume a intervalos de 15 minutos, e dividindo as diferenças encontradas pelo tempo do intervalo. A profundidade média, por linha ou por segmento, é obtida dividindo o volume pela área correspondente. No cálculo da área podem ser excluídas as células com cota superior a um valor escolhido. Com o caudal e a profundidade média numa linha calculou-se a velocidade média do escoamento através da secção correspondente.

## CÁLCULO DE SALINIDADES MÉDIAS E DE TEMPOS DE RESIDÊNCIA.

A salinidade das amostras ( $S_M$ ) foi calculada a partir da condutividade ( $C$ ) e da temperatura ( $T$ ) (WILSON, 1975). Foi usado um polinómio para estimar a condutividade da água do mar de 35‰ à temperatura da amostra, válido na gama de 5 a 25 °C, que permite o cálculo da razão de condutividades  $R_T$ :

$$R_T = \frac{C}{28,992 + 0,87505 \times T + 0,00346 \times T^2}$$

$$R_{15} = R_T + R_T \times (R_T - 1) \times (T - 15) \times \\ \times [96,7 - 72 \times R_T + 37,3 \times R_T^2 - (0,63 + 0,21 \times R_T^2) \times (T - 15)] \times 10^{-5}$$

$$S_M = -0,08996 + 28,2970 \times R_{15} + 12,80832 \times R_{15}^2 - \\ - 10,67869 \times R_{15}^3 + 5,98624 \times R_{15}^4 - 1,32311 \times R_{15}^5$$

A salinidade na linha  $i$  ( $s_i$ ) foi calculada fazendo interpolação linear entre os locais onde as observações foram realizadas ( $I_M$ ):

$$s_i = S_{M1} + (i - I_{M1}) \times \frac{S_{M2} - S_{M1}}{I_{M2} - I_{M1}}$$

As observações foram repetidas próximo dos momentos de inversão das correntes, sendo calculadas as correspondentes salinidades médias no segmento  $I$ , em preia-mar ( $S_{P,I}$ ) e em baixa-mar ( $S_{B,I}$ ):

$$S_{P,I} = \frac{\sum_{i1}^{i2} S_i \times V_i)_{P,I}}{\sum_{i1}^{i2} V_i)_{P,I}} \quad S_{B,I} = \frac{\sum_{i1}^{i2} S_i \times V_i)_{B,I}}{\sum_{i1}^{i2} V_i)_{B,I}}$$

Se as condições forem quase estacionárias e o caudal dos rios muito pequeno, a salinidade média no segmento  $I$  em preia-mar, é aproximadamente igual à salinidade média no segmento  $I-I$  em baixa-mar. De acordo com esta hipótese a salinidade média no segmento  $\langle S_I \rangle$  pode ser calculada pela expressão seguinte:

$$\langle S_I \rangle = \frac{\left( \sum_{11}^{12} S_i \times V_i \right)_{P,I} + \left( \sum_{11}^{12} S_i \times V_i \right)_{B,I-1}}{\left( \sum_{11}^{12} V_i \right)_{P,I} + \left( \sum_{11}^{12} V_i \right)_{B,I-1}}$$

O desvio padrão da média no segmento ( $STD_I$ ) foi calculada a partir das variâncias das médias calculadas para o início e fim do ciclo ( $\sigma_{BI}$  e  $\sigma_{PI}$ ):

$$\sigma = \frac{\sum_{11}^{12} (S_i \times V_i)^2}{\sum_{11}^{12} V_i} - \left( \frac{\sum_{11}^{12} S_i \times V_i}{\sum_{11}^{12} V_i} \right)^2$$

$$STD_I = \left( \frac{\sigma_{P,I} \times N_{P,I} + \sigma_{B,I-1} \times N_{B,I-1}}{N_{P,I} + N_{B,I-1}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

A fracção de água doce ( $f_I$ ) e o tempo de renovação ( $t_{RI}$ ) foram calculados a partir da salinidade média nos segmentos e do caudal dos rios a montante do segmento ( $Q_I$ ):

$$f_I = \frac{\langle S_{I-1} \rangle - \langle S_I \rangle}{\langle S_{I-1} \rangle} \quad t_{RI} = \frac{\left( \sum_{11}^{12} V_i \right)_{P,I} \times f_I}{Q_I}$$

O conteúdo de cada segmento é aproximadamente homogéneo, devendo por isso o tempo de renovação da água doce corresponder ao tempo de renovação da água contida no segmento ( $V_I$ ). Uma vez que o caudal do rio é muito pequeno, o caudal que causa renovação da água no segmento, corresponde à fracção do prisma de maré que entra no segmento e que não é água que dele saiu na vazante anterior:

$$\frac{(1 - \alpha_I) \times P_I}{T}$$

onde  $P_I$  é o prisma de maré que entra no segmento,  $\alpha_I$  é o coeficiente de retorno, e  $T$  é o período da maré. Tendo em atenção que os segmentos foram definidos de forma que  $P_I = V_I$ , o tempo de renovação da água no segmento fica:

$$t_{RI} = \frac{V_I \times T}{(1 - \alpha_I) \times P_I} = \frac{T}{(1 - \alpha_I)}$$

## CÁLCULO DOS COEFICIENTES DE RETORNO DO MODELO DE SEGMENTOS DE PRISMA DE MARÉ

O procedimento de calibração automática que foi aplicado ao modelo de segmentos de prisma de maré, baseia-se no cálculo de um factor de correcção ( $C_{RI}$ ) dos valores dos coeficientes de retorno, com base na diferença entre a salinidade calculada ( $S_{CI}$ ) e a salinidade média observada ( $\langle S_I \rangle$ ):

$$C_{RI} = \frac{c_1 \times |S_{CI} - \langle S_I \rangle|}{c_2 + |S_{CI} - \langle S_I \rangle|}$$

Na Ria, existem ramificações dos canais, que possibilitam que em alguns casos a salinidade aumente para montante, ao contrário do que é normal em estuários simples. Na aplicação das correcções calculadas aos coeficientes de retorno foram por isso considerados dois casos:

- Caso em que a salinidade diminui para montante:

$$\begin{aligned} S_{CI} - \langle S_I \rangle &\geq 0,1 &\rightarrow \alpha_I + C_{RI} \\ S_{CI} - \langle S_I \rangle &< 0,1 &\rightarrow \alpha_I - C_{RI} \end{aligned}$$

- Caso em que a salinidade aumenta para montante:

$$\begin{aligned} S_{CI} - \langle S_I \rangle &\geq 0,1 &\rightarrow \alpha_I - C_{RI} \\ S_{CI} - \langle S_I \rangle &< 0,1 &\rightarrow \alpha_I - C_{RI} \\ &&\rightarrow \alpha_{I-1} - \frac{C_{RI}}{2} \end{aligned}$$