

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA BARRAGEM PEDRA DO CAVALO  
SOBRE A CIRCULAÇÃO ESTUARINA DO RIO PARAGUAÇU E BAÍA DE  
IGUAPE

por

FERNANDO GENZ

TESE DE DOUTORADO

ABRIL/2006

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA BARRAGEM PEDRA DO CAVALO  
SOBRE A CIRCULAÇÃO ESTUARINA DO RIO PARAGUAÇU E BAÍA DE  
IGUAPE

por

FERNANDO GENZ

TESE DE DOUTORADO

Submetida em satisfação parcial dos requisitos ao grau de

DOUTOR EM CIÊNCIAS  
GEOLOGIA

à

Câmara de Ensino de Pós-Graduação e Pesquisa  
da  
Universidade Federal da Bahia

Aprovado:

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

Data da Aprovação: ...../...../.....

Comissão Examinadora:

Dr. Guilherme Camargo Lessa (orientador)

Dr. Mauro Cirano

Dr. Lafayette Dantas da Luz

Dr. Carlos Eduardo Morelli Tucci

Dr. Luiz Bruner de Miranda

Grau conferido em: ...../...../.....

*“Não se apossa das descobertas porque não há nada que já não tenha sido pensado, vivido, usado ou sentido. Ocupe-se em usar corretamente o que descobriu.”*

*Lao Tsé*

## RESUMO

A entrada de água doce tem influência em todos os níveis básicos de interação de baías e de estuários, com conseqüências físicas, químicas e biológicas. Por outro lado, as intervenções humanas na bacia hidrográfica, como a construção de barragens, têm gerado várias alterações na magnitude e freqüência das vazões à jusante, bem como mudado a qualidade da água, a quantidade de sedimento e matéria orgânica e inorgânica afluentes ao estuário.

A Barragem Pedra do Cavalo foi construída na década de 80, na cabeceira do estuário do Rio Paraguaçu, promovendo mudanças no regime hidrológico e afetando a região estuarina. A análise das alterações hidrológicas decorrentes da barragem identificou a redução das vazões de praticamente todas as faixas da curva de permanência, com destaque para o grande número de vazões nulas e a redução das vazões médias mensais após o período de cheia.

A investigação da dinâmica do estuário do Rio Paraguaçu através de monitoramentos em campo mostrou importantes características de propagação da maré no baixo curso do rio associadas à presença do delta de cabeceira localizado na Baía de Iguape. As características de mistura e das correntes variam com a maré de sizígia e de quadratura. Em sizígia o perfil vertical médio de salinidade foi homogêneo, enquanto que em quadratura ocorreu um pequeno gradiente. Na maré de sizígia, com baixa vazão fluvial, os perfis de velocidade foram bem desenvolvidos em toda a coluna d'água e o campo residual apresentou cisalhamento lateral, apresentando uma assimetria positiva e o domínio das velocidades de vazante. Em quadratura, houve a formação de circulação gravitacional apesar do pequeno gradiente de sal, resultando em um campo residual em duas camadas, com simetria da maré enchente e vazante na duração e velocidade. Não foi verificada a influência da descarga fluvial (vazões até 191 m<sup>3</sup>/s) na dinâmica do estuário do Canal do Paraguaçu. No entanto, o baixo curso do rio e a Baía de Iguape são mais sensíveis às variações da vazão.

A partir da relação entre a penetração do sal no estuário, a descarga fluvial e a elevação da maré, os efeitos da Barragem Pedra do Cavalo foram caracterizados. Durante o período de operação da EMBASA entre 1985 e 2003, tanto o fechamento das comportas bem como liberação de uma vazão mínima de 11,2 m<sup>3</sup>/s (56 m<sup>3</sup>/s constante por 5 horas) devem ter permitido a maior penetração do sal. A operação da barragem para geração de energia elétrica na UHE Pedra do Cavalo, iniciada em 2005, simulada para a descarga de uma turbina (78

$\text{m}^3/\text{s}$ ) e duas turbinas ( $156 \text{ m}^3/\text{s}$ ), indicou importantes alterações na distribuição e penetração do sal no baixo curso do rio e Baía de Iguape quando comparadas à situação de operação da EMBASA após o período de cheia fluvial. A isohalina de 5, que para a vazão de mínima da EMBASA estava restrita ao baixo curso do rio, na baixa-mar deve recuar até a região central da Baía de Iguape. A salinidade no setor Norte da Baía de Iguape sofre redução em cerca de 4 psu para a vazão de uma turbina. Com a vazão de duas turbinas, na maré de quadratura, a redução da salinidade no setor Norte da Baía de Iguape pode chegar à 10 psu, bem como o início do setor Sul da Baía de Iguape. As vazões de cheia ( $> 900 \text{ m}^3/\text{s}$ ) bem como a vazão de operação da barragem para a não inundação de Cachoeira e São Félix ( $1.500 \text{ m}^3/\text{s}$ ), deve preencher de água doce o baixo curso do rio e a Baía de Iguape, gerando forte estratificação se coincidir com a maré de quadratura.

Os efeitos da Barragem Pedra do Cavalo sobre o estuário do Rio Paraguaçu mencionados acima têm suas causas ligadas: 1) à tática operacional adotada; e 2) aos dispositivos de descarga. A inexistência de um dispositivo de descarga de fundo limita a liberação de vazões baixas, compatíveis com o período de estiagem. As reduções nas vazões mensais no período úmido do Recôncavo foram decorrentes das regras operacionais adotadas pela EMBASA e poderiam ter sido evitadas com a abertura permanente de uma comporta.

A fim de minimizar os efeitos das novas descargas pela UHE, e considerando o regime hidrológico natural associado às características de penetração do sal, sugere-se que a operação busque utilizar as duas turbinas somente durante a ocorrência de cheias, bem como condicione a vazão a ser liberada com a vazão afluente ao reservatório quando uma turbina estiver trabalhando.

## ABSTRACT

The freshwater interferes with the physical, chemical and biological interactions in coastal waters, especially in bays and estuaries. Natural amounts and quality of the freshwater entering the coastal realm have, nevertheless, been altered by human activities, such as river damming, in the catchment areas. Pedra do Cavalo Dam, finished in 1985 at the headwaters of Paraguaçu River estuary, promoted drastic alterations of the fluvial hydrological regime that deeply affected the characteristics of the estuarine region. Hydrological changes include the discharge reduction at all levels of the flow duration curve, but especially the large number of days with zero discharge and the decrease of the month average discharge after the flood season.

The Paraguaçu river estuary (127.9 km<sup>2</sup>) is part of Todos os Santos Bay, a large estuarine system (~1200 km<sup>2</sup>), and consists the lower Paraguaçu River course (shallow, 16 km long), Iguape Bay (76.1 km<sup>2</sup>, being 57.3% intertidal) and Paraguaçu tidal channel (18 km long and 20 m deep), which provides the connection between Iguape Bay and Todos os Santos Bay.

Monitoring of the water level along the 40 km long Paraguaçu estuary system have shown significant effects of the fluvial delta at Baía de Iguape upon the tide wave propagation, that besides being partially truncated at spring low tides, undergoes a change in the asymmetry. The water column is well mixed at spring tides and slightly partially mixed during neap tides. Low fluvial discharge at spring tides is associated with lateral shear in the residual current and stronger ebbing flows. At neap tides gravitational circulation is established, although faster ebbing flows still prevail the barotropic field. Whereas Iguape Bay and the lower Paraguaçu river course are sensitive to small changes in the fluvial discharge, the hydrodynamics of Paraguaçu channel is not affected by fluvial discharges below 191 m<sup>3</sup>/s.

The extent of salt intrusion, fluvial discharge and water surface elevation have allowed for the assessment of effects of Pedra do Cavalo Dam upon the estuary circulation. Between 1985 e 2003, when dam management was in charge of the State Water Board, both the sluice closure and the delivery a minimum daily discharge of 11.2 m<sup>3</sup>/s (actually 56 m<sup>3</sup>/s for 5 horas) must have allowed a more extended salt intrusion. After 2003 a hydroelectric power facility was installed and the modulated discharges of 78 m<sup>3</sup>/s (one turbine) or 156 m<sup>3</sup>/s (two turbines) became frequent. The simulation of both discharges upon the estuarine flow

indicates important changes in salt intrusion, with the 5 psu zone moving downriver to the middle of Iguape Bay. The northern sector of Iguape Bay is likely to undergo a decrease of 4 psu with a discharge of 78 m<sup>3</sup>/s and 10 psu with a discharge of 156 m<sup>3</sup>/s. Discharges higher than 900 m<sup>3</sup>/s, associated with the control of the water level inside the dam prior to annual river floods, freshen the whole lower river course and Iguape Bay, causing strong stratification of the water column if it coincides with neap tides.

The impacts of the dam upon the estuary is mainly related to operational strategies and the inexistence of a discharge mechanism through the base of the dam that would allow low dam discharges during the dry river season. Considering the natural variability of the salt intrusion associated with the hydrological regime, it is proposed that: a) the two turbines are only to be opened during natural flood events, and b) that the river discharge to the reservoir is used as a measure for dam discharge when only one turbine is opened.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho somente foi possível devido à colaboração de muitos. Assim sendo, meus sinceros agradecimentos.

À Deus - Babaji.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Guilherme Camargo Lessa, e ao meu co-orientador Prof. Dr. Mauro Cirano, pelo incentivo e exemplos de dedicação à pesquisa científica.

Ao Prof. Dr. Ivan Soares do Departamento de Física – Fundação Universidade Federal de Rio Grande – FURG, pelas orientações fundamentais à modelagem e acolhida na FURG.

Aos colegas do curso de pós-graduação em Geologia que ajudaram nos extenuantes trabalhos de campo, bem como aqueles que compartilharam os momentos no Instituto.

À CAPES pela bolsa de estudos.

Ao CNPq /CT-Hidro pela bolsa de estudos e o apoio através do projeto de pesquisa n. 550205/2002-0.

Ao amigo Leonardo Santana Dias pelas dicas de uso do SIG. Aos professores e colegas Walter Collischonn e Lafayette Dantas da Luz pelo envio de artigos. Ao Oceanógrafo Carlos Eduardo Peres Teixeira pelas dicas do MATLAB.

À Empresa Baiana de Água e Saneamento – EMBASA. Eng. Ivonaldo de Almeida Sande, Geól. Jorge Amorim, Evaristo Carvalho dos Santos, Valdemar Mercedes dos Santos Maria Natividade da Silva e José Raimundo Miranda.

À Superintendência de Recursos Hídricos, FUNDIPESCA, HIDROMECA Ltda, HIDROBASA - Hidrometria da Bahia Ltda, Fazenda Flamboyant (em Coqueiros), PETROBRAS (unidade de São Roque).

À Votorantim Cimentos Ltda.

Em especial, a minha esposa e companheira Ana Paula (Hashimi), ao Núcleo Mahananda, Nikaya, Rahula e os Mestres da Fraternidade Branca Universal.

À Swami Shurimahananda.

À Rajendra.



## ÍNDICE

<b><u>1</u></b>	<b><u>INTRODUÇÃO</u></b>	<b><u>1</u></b>
1.1	OS EFEITOS DE BARRAGENS SOBRE OS ESTUÁRIOS E A ZONA COSTEIRA	3
1.2	O ESTABELECIMENTO DE VAZÕES MÍNIMAS PARA ESTUÁRIOS	6
1.3	OBJETIVOS	8
<b><u>2</u></b>	<b><u>CONCEITOS DA DINÂMICA ESTUARINA</u></b>	<b><u>9</u></b>
2.1	DEFINIÇÃO DE ESTUÁRIO	9
2.2	HIDRODINÂMICA DE ESTUÁRIOS	10
2.2.1	FENÔMENOS DA MISTURA NA CIRCULAÇÃO ESTUARINA	10
2.2.2	CLASSIFICAÇÃO DOS PADRÕES DE MISTURA	12
2.3	PADRÕES DE CIRCULAÇÃO	15
2.3.1	ESTUÁRIO ESTRATIFICADO OU CUNHA SALINA	15
2.3.2	ESTUÁRIO PARCIALMENTE MISTURADO	16
2.3.3	ESTUÁRIO BEM MISTURADO	18
2.4	PROPAGAÇÃO DA MARÉ EM ESTUÁRIOS	19
2.4.1	ASSIMETRIA DA ONDA DE MARÉ	20
<b><u>3</u></b>	<b><u>ÁREA DE ESTUDO</u></b>	<b><u>22</u></b>
3.1	TEMPO E CLIMA	24
3.2	GEOLOGIA	26
3.3	HIDROLOGIA	27
3.4	OCEANOGRAFIA	29
3.5	BARRAGEM PEDRA DO CAVALO	29
<b><u>4</u></b>	<b><u>CARACTERIZAÇÃO DO REGIME HIDROLÓGICO DO RIO PARAGUAÇU</u></b>	<b><u>32</u></b>
4.1	DADOS DISPONÍVEIS	32
4.2	METODOLOGIA DA ANÁLISE HIDROLÓGICA	35
4.2.1	CARACTERIZAÇÃO DO REGIME HIDROLÓGICO	35

4.2.2	AVALIAÇÃO DAS ALTERAÇÕES HIDROLÓGICAS	38
<b>4.3</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>41</b>
4.3.1	PRECIPITAÇÃO	41
4.3.2	VAZÕES	44
4.3.3	CARACTERÍSTICAS DOS HIDROGRAMAS DE CHEIA DO RIO PARAGUAÇU	46
4.3.4	ANÁLISE DA VARIABILIDADE INTERANUAL	47
4.3.5	AVALIAÇÃO DAS ALTERAÇÕES HIDROLÓGICAS	53
<b>4.4</b>	<b>DISCUSSÃO</b>	<b>65</b>
<b>5</b>	<b><u>HIDRODINÂMICA DO ESTUÁRIO DO RIO PARAGUACU</u></b>	<b>71</b>
<b>5.1</b>	<b>DADOS ANTERIORES</b>	<b>71</b>
<b>5.2</b>	<b>METODOLOGIA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS</b>	<b>72</b>
5.2.1	BATIMETRIA	73
5.2.2	MARÉ	74
5.2.3	PARÂMETROS HIDROGRÁFICOS	78
5.2.4	CORRENTES	82
5.2.5	DESCARGA FLUVIAL	87
<b>5.3</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>89</b>
5.3.1	BATIMETRIA	89
5.3.2	MARÉ	92
5.3.3	CAMPO DE CORRENTES, PERFIL VERTICAL DE CORRENTES E HIDROGRAFIA	101
5.3.4	HIDROGRAFIA - PERFIS LONGITUDINAIS	149
<b>5.4</b>	<b>DISCUSSÃO</b>	<b>163</b>
5.4.1	PROPAGAÇÃO DA MARÉ	163
5.4.2	MISTURA E CORRENTES	163
5.4.3	SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO	168
5.4.4	TEMPERATURA	169
5.4.5	TEMPO DE DESCARGA	170
5.4.6	INTRUSÃO SALINA E VAZÃO FLUVIAL	172
<b>6</b>	<b><u>MODELAGEM NUMÉRICA</u></b>	<b>176</b>
<b>6.1</b>	<b>DESCRIÇÃO DO MODELO</b>	<b>176</b>

6.1.1	EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS	176
6.1.2	SOLUÇÃO NUMÉRICA	178
6.1.3	IMPLANTAÇÃO DO MODELO	179
<b>6.2</b>	<b>CENÁRIOS</b>	<b>184</b>
6.2.1	PRÉ-BARRAGEM	185
6.2.2	PÓS-BARRAGEM	185
<b>6.3</b>	<b>EXPERIMENTOS NUMÉRICOS</b>	<b>186</b>
<b>6.4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>187</b>
6.4.1	VERIFICAÇÃO DAS SIMULAÇÕES	187
6.4.2	DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO SAL NO BAIXO CURSO DO RIO E BAÍA DE IGUAPE	197
<b>6.5</b>	<b>DISCUSSÃO</b>	<b>206</b>
6.5.1	DESEMPENHO DO MODELO	206
6.5.2	RELAÇÃO ENTRE A PENETRAÇÃO DO SAL E A VAZÃO	207
<b>7</b>	<b><u>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</u></b>	<b><u>210</u></b>
<b>8</b>	<b><u>BIBLIOGRAFIA</u></b>	<b><u>215</u></b>
	<b><u>ANEXO 1 – HIDROLOGIA</u></b>	<b><u>227</u></b>
	<b>PREENCHIMENTO DE FALHAS NAS SÉRIES DE VAZÕES</b>	<b>227</b>
	<b>SÉRIES DE VAZÕES MÉDIAS ANUAIS</b>	<b>228</b>
	<b>COEFICIENTE DA CURVA DE RECESSÃO DOS HIDROGRAMAS DE CHEIA</b>	<b>229</b>
	<b>VAZÕES MÉDIAS MENSAS DE PROJETO DA BARRAGEM PEDRA DO CAVALO</b>	<b>231</b>
	<b>ANÁLISE DAS ALTERAÇÕES HIDROLÓGICAS – MÉTODO IHA</b>	<b>232</b>
	<b><u>ANEXO 2 – HIDROGRAFIA</u></b>	<b><u>234</u></b>
	<b>PARÂMETROS PARA O PROCESSAMENTO DOS DADOS DE CORRENTE ATRAVÉS DA ROTINA</b>	
	<b><i>ADCP_PROCESSING</i></b>	<b>234</b>
	<b>PERFIS HIDROGRÁFICOS</b>	<b>235</b>
	<b>NÚMERO DE RICHARDSON - <math>Ri_L</math></b>	<b>244</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Principais características da barragem Pedra do Cavalo (CBDB, 2004). .....	30
Tabela 4.1 Postos fluviométricos de interesse. ....	33
Tabela 4.2 Postos pluviométricos de interesse. ....	34
Tabela 4.3 Vazões máximas anuais ( $m^3/s$ ) para diversos Tempos de Retorno (Tr) (BAHIA, 1996).....	36
Tabela 4.4 Resumo dos parâmetros hidrológicos usados pelo IHA método (Richter, 1999). ....	40
Tabela 4.5 Periodicidades identificadas na análise espectral.....	52
Tabela 4.6. Características das vazões médias anuais [ $m^3/s$ ] – Barragem Pedra do Cavalo.....	53
Tabela 5.1. Informações das estações maregráficas. ....	77
Tabela 5.2. Monitoramento do estuário do Rio Paraguaçu.....	78
Tabela 5.3. Equações para determinação da concentração de sedimentos em suspensão [ $mg/l$ ].....	81
Tabela 5.4. Parâmetros de configuração do ADCP Rio Grande 600 kHz - estuário do Rio Paraguaçu. ....	84
Tabela 5.5. Áreas características – estuário do Rio Paraguaçu.....	89
Tabela 5.6. Volumes característicos – estuário do Rio Paraguaçu. ....	89
Tabela 5.7. Profundidades características – estuário do Rio Paraguaçu. ....	92
Tabela 5.8. Número de forma (K) e componentes harmônicas das estações maregráficas. ....	94
Tabela 5.9. Altura da maré [m] na BTS e estuário do Rio Paraguaçu. ....	95
Tabela 5.10. Defasagem de tempo de ocorrência da preamar (PM) e baixa-mar (BM). ....	95
Tabela 5.11. Tempo de enchente e vazante em 14 e 21/11/2001 [hora:minuto]. ....	97
Tabela 5.12. Relação entre as componentes harmônicas M2 e M4. ....	98
Tabela 5.13. Resumo com os valores característicos dos ciclos monitorados no Canal do Paraguaçu. ....	103
Tabela 5.14. Resumo com os valores característicos dos ciclos monitorados no Canal do Paraguaçu a montante da Ilha do Francês – seção III .....	120
Tabela 5.15. Resumo com os valores característicos dos ciclos monitorados na Baía de Iguape - 2004. ....	131
Tabela 5.16. Informações básicas para o cálculo do tempo de descarga. ....	171
Tabela 5.17. Tempo de descarga em função da vazão.....	171
Tabela 6.1. Comparação da maré prevista e calculada pelo POM ao longo do estuário. ....	189
Tabela 6.2. Posição da isohalina de 5 obtida pelo POM para diversas condições de maré e vazão. ....	208

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Diagrama esquemático dos efeitos da entrada de água doce nos estuários (Alber, 2002).....	1
Figura 1.2. Efeitos da regularização das vazões no regime hidrológico: (a) sem retirada de água do sistema fluvial (extraído de Tucci, 1993) e (b) com consumo de água para abastecimento ou irrigação .....	5
Figura 2.1. Delimitação funcional de um sistema estuarino. Características geomorfológicas e os processos na zona sob influência fluvial, zona de mistura e zona sob influência do oceano (S = salinidade) (adaptado de Miranda <i>et al.</i> , 2002).....	10
Figura 2.2. Tipos de estuário segundo a classificação de Pritchard (1952), junto ao padrão de variação vertical da salinidade em 4 diferentes pontos ao longo do estuário (modificado de Miranda <i>et al.</i> , 2002). .....	13
Figura 2.3. Diagrama de Hansen e Rattray (1966) (Kjerfve, 1989a) mostrando a classificação para alguns estuários do globo (MR- Rio Mississipi; VE- estuário de Vellar, Índia; NI- North Inlet, SC; SS- South Santee, SC; JR - Rio James, VA; NM- estreitos do estuário de Mersey, UK; JF- Estreito de Juan de Fuca, WA; SB- Baía de Silver, AK).....	15
Figura 2.4. Exemplo da circulação gravitacional na Baía de Chesapeake: a) a água doce (R) que entra na camada superficial do estuário se mistura à camada salina do fundo pela ação da maré ou vento. Devido ao gradiente de pressão, a camada superficial, menos densa, escoia para o oceano e a camada do fundo, mais densa, vai em direção ao continente; b) perfil de velocidade residual resultante; c) perfil de salinidade residual (adaptado de Kjerfve, 1989a).....	17
Figura 2.5. Modos de circulação para condições de parcial mistura - estuário de Potomac, Virgínia: 1) clássica; 2) reversa; 3) três camadas, saindo pelo meio; 4) três camadas reversa, entrando pelo meio; 5) descarga; 6) armazenamento (Elliott, 1976 apud Kjerfve, 1989a). .....	18
Figura 2.6. Diagrama esquemático ilustrando a onda de maré no oceano (linha contínua) e a distorção da onda de maré que pode ser observada dentro de um estuário, com pequena (linha tracejada – assimetria negativa) e grande área de inundação (Ai) (linha em negrito – assimetria positiva). .....	21
Figura 3.1. Localização da bacia hidrográfica do Rio Paraguaçu e a área de estudo, com a subdivisão da Baía de Iguape(BI) em três setores (Norte, Central e Sul). .....	23
Figura 3.2 Esquema das anomalias das circulações de Hadley e Walker em relação com as TSMs: (a) Pacífico quente, Atlântico Norte quente e Atlântico Sul frio – fluxo de ar descendente no NEB; (b)Pacífico frio, Atlântico Norte frio e Atlântico Sul quente – fluxo de ar ascendente no NEB (Aragão, 1994).....	25
Figura 3.3. Mapa geológico da Baía de Iguape (Carvalho, 2000) .....	27
Figura 3.4. Distribuição de fácies sedimentares na Baía de Iguape e Canal do Paraguaçu (Dias, 2003) .....	28
Figura 3.5 Vista da barragem Pedra do Cavalo (CBDB, 2004). .....	30
Figura 4.1 Rede de monitoramento fluviométrico na bacia do Rio Paraguaçu. Coordenadas UTM. ....	33
Figura 4.2 Localização dos postos pluviométricos na região estuarina e entorno. As isoietas foram determinadas por BAHIA(2003). As eventuais discrepâncias da chuva anual dos postos em relação às isoietas decorrem, provavelmente, da utilização de dados de diferentes postos e períodos.....	34
Figura 4.3 Distribuição sazonal da precipitação no estuário e na bacia hidrográfica. ....	42
Figura 4.4 Ecorregiões definidas pelo Plano Estadual de Recursos Hídricos (BAHIA, 2003) e isoietas da precipitação anual destacam a variabilidade climática ao longo da bacia hidrográfica do Rio Paraguaçu. Destaca-se a localização do posto Porto (01241017) no limite da Chapada Diamantina. ....	43
Figura 4.5. Variabilidade da precipitação anual no estuário, considerando os pontos São Felix e Pedra do Cavalo. Linha em negrito representa a curva de média móvel de 3 anos e indica que o período mais crítico, de anos sequenciais de baixa precipitação, ocorreu na década de 1950. ....	43
Figura 4.6 Vazões mensais médias: Rio Paraguaçu (Argoim) e Rio Jacuípe (Ponte Rio Branco). ....	44
Figura 4.7 Vazões mensais históricas máximas: Rio Paraguaçu (Argoim) e Rio Jacuípe (Ponte Rio Branco). ....	45
Figura 4.8 Vazões mensais históricas mínimas: Rio Paraguaçu (Argoim) e Rio Jacuípe (Ponte Rio Branco). ....	45
Figura 4.9. Variabilidade das vazões média anuais: Rio Paraguaçu (Argoim) e Rio Jacuípe (Ponte Rio Branco). .....	46

Figura 4.10. Características dos hidrogramas de cheia dos Rio Paraguaçu e Jacuípe: a) duração da recessão das vazões do Rio Paraguaçu (Argoim) [dias] em relação à vazão máxima; b) variação do coeficiente de recessão $k$ (equação 4.2) em relação à vazão máxima (cheias simultâneas foram aquelas em que a vazão máxima ocorreu no mesmo dia em ambos os rios, cujos hidrogramas formavam a cheia principal afluente ao estuário). Quanto maior o valor de $k$ mais acentuada é a redução da vazão de um dia para o outro. ....	46
Figura 4.11 Exemplo de um hidrograma de cheia nos rios Paraguaçu (Argoim) e Jacuípe (Ponte Rio Branco). A menor capacidade de armazenamento da bacia hidrográfica do Rio Jacuípe se reflete na rápida redução das vazões após o pico da cheia e no maior valor de $k$ .....	47
Figura 4.12. Série de vazões médias anuais normais – Argoim e Itaeté. ....	48
Figura 4.13 Vazões anuais normais acumuladas – Itaeté e Argoim. ....	49
Figura 4.14 Vazões anuais normais acumuladas – Itaeté e Ponte Rio Branco. ....	49
Figura 4.15 Vazões em Itaeté e precipitação em Porto – curvas normais acumuladas. ....	49
Figura 4.16. Gradiente médio das vazões acumuladas (Gt) – intervalo de 5 anos. Vazão média anual (Q <sub>anual</sub> ) em Itaeté. ....	50
Figura 4.17. Gradiente médio das vazões acumuladas (Gt) – intervalo de 11 anos. Vazão média anual (Q <sub>anual</sub> ) em Itaeté. ....	51
Figura 4.18 Periodogramas do Rio Paraguaçu em Itaeté: a) de 2 a 34 anos; b) de 2 a 10 anos . FFT (não paramétrico) e AR (paramétrico).....	52
Figura 4.19 Vazões normais – Rio Paraguaçu em Itaeté. Filtros: Henderson-13 e FFT 7-14. ....	53
Figura 4.20. Vazão média anual afluente a Barragem Pedra do Cavalo (Montante PC) e vazão média anual liberada ao estuário do Rio Paraguaçu (Jusante PC).....	54
Figura 4.21 Diferença entre os valores médios mensais de precipitação (P) e evaporação (Ev) sobre o reservatório da Barragem Pedra do Cavalo – 1986 a 2003. ....	55
Figura 4.22 Curvas de permanência a montante e jusante da Barragem Pedra do Cavalo (PC) entre 10 e 100% – período 1986 a 2003. ....	56
Figura 4.23 Exemplo de operação da Barragem Pedra do Cavalo para águas baixas a montante. ....	56
Figura 4.24 Curvas de permanência a montante e jusante da Barragem Pedra do Cavalo entre 10 e 100% – período 1997 a 2003. ....	57
Figura 4.25 Comportamento para as vazões de menor permanência à montante e jusante da Barragem Pedra do Cavalo – 1986 a 2003. ....	57
Figura 4.26 Exemplo de controle de cheia realizada pela Barragem de Pedra do Cavalo – março/1997. ....	58
Figura 4.27 Exemplo de operação de rebaixamento da cota do reservatório para gerar volume de espera às enchentes – novembro/2001.....	58
Figura 4.28 Percentual de mudança (Pc) da vazão para as várias permanências (Pc < 0 indica a redução das vazões e Pc > 0 indica aumento das vazões). ....	59
Figura 4.29 Alterações na distribuição sazonal das vazões mensais de entrada e saída da Barragem Pedra do Cavalo (barras indicam os limites do RVA). ....	60
Figura 4.30 Vazões mensais – Junho, à montante e jusante da Barragem Pedra do Cavalo - 1987 a 2003.....	60
Figura 4.31 Taxa de crescimento das vazões, à montante e a jusante da barragem.....	61
Figura 4.32 Taxa de decréscimo das vazões, à montante e a jusante da barragem.....	61
Figura 4.33 Número de reversões das vazões – a montante e a jusante da barragem.....	62
Figura 4.34 Número de pulsos de vazão baixa – situação a montante e jusante da barragem – 15º percentil.....	63
Figura 4.35 Duração dos pulsos de vazão baixa – situação a montante e jusante da barragem - 15º percentil. ....	63
Figura 4.36 Número de pulsos de vazão alta – situação a montante e jusante da barragem – 30º percentil. O limite inferior do RVA de montante superpõe-se à mediana. ....	63
Figura 4.37 Duração dos pulsos de vazão alta – situação a montante e jusante da barragem - 30º percentil. ....	64

Figura 4.38 Maiores alterações hidrológicas nas vazões devido à Barragem Pedra do Cavalo. O grau de alteração hidrológica de determinada vazão é definido pelo IHA como: $(Q_{obs} - Q_{esp})/Q_{esp}$ , onde $Q_{esp}$ = a frequência com que os valores anuais se situam na faixa do RVA correspondente aos valores pré barragem; e $Q_{obs}$ = a frequência com que os valores anuais do período pós barragem estão dentro da faixa do RVA estabelecido.....	64
Figura 4.39. Filtro espectral FFT 7-14 anos – componentes de baixa frequência das vazões adimensionais no Estado da Bahia (Genz <i>et al.</i> , 2003). O Rio Paraguaçu está inserido no Litoral Sul.....	65
Figura 4.40 Componentes de baixa frequência. Vazões no Rio Paraguaçu (FFT 7-14) e índice TAMG (extraído de Méllice e Servain, 2003). .....	66
Figura 4.41. Filtro espectral 7-14 anos – atividade solar e vazões no Rio Paraguaçu. ....	67
Figura 5.1. Dados batimétricos no baixo curso do Rio Paraguaçu (DHN, 1999), Canal do Paraguaçu e BTS (carta náutica 1107 – BTS Oeste – DHN) e os levantamentos realizados na Baía de Iguape em 2002 e 2005. ....	74
Figura 5.2. Vista dos marégrafos instalados: a) Cachoeira; b) Coqueiros; c) São Roque. ....	75
Figura 5.3. Localização dos marégrafos na BTS. ....	76
Figura 5.4. Pontos de monitoramento do estuário do Rio Paraguaçu: baixo curso do rio; Baía de Iguape (BI); Canal do Paraguaçu. Cinco pontos do perfil longitudinal são coincidentes e estão sobrepostos por pontos de medição em direção ao setor Norte da BI (próximos da seção transversal III). ....	80
Figura 5.5. Estrutura para o CTD, à esquerda, com suporte de madeira/metal + haste e roldana, e operação do equipamento (direita). ....	81
Figura 5.6. Relação ente turbidez e concentração de sedimentos – sondas CTD. ....	81
Figura 5.7. Foto ilustrativa do correntômetro SD-30.....	83
Figura 5.8. Barco equipado para o monitoramento de seção transversal com ADCP e CTD.....	83
Figura 5.9. Estrutura de fixação do ADCP adaptada à embarcação de alumínio de 5 m (esquerda) e ao barco da FUNDIPESCA com 15 m de comprimento (direita). ....	83
Figura 5.10. Hidrograma gerado pela operação das comportas da barragem. ....	88
Figura 5.11. Vazões a montante e jusante da Barragem Pedra do Cavalo – janeiro e fevereiro de 2004. ....	89
Figura 5.12. Batimetria do estuário do Rio Paraguaçu. ....	90
Figura 5.13. Curva hipsométrica – Canal do Paraguaçu.....	91
Figura 5.14. Curva hipsométrica – Baía de Iguape.....	91
Figura 5.15. Curva hipsométrica – Baixo curso do rio. ....	91
Figura 5.16. Variação de amplitude [m] e fase [°] da componente M2. ....	93
Figura 5.17. Altura média da maré na BTS e estuário do Rio Paraguaçu – sizígia e quadratura – 2003.....	95
Figura 5.18. Desigualdade da altura de maré – estação S18.....	96
Figura 5.19. Deformação da onda de maré observada em Cachoeira (a) e Coqueiros (b) – quadratura.....	96
Figura 5.20. Variação média da proporção de $t_e/t_v$ [%] em função da elevação da maré (nível médio arbitrário). ....	97
Figura 5.21. Maré e vazão liberada pela Barragem Pedra do Cavalo – 11/2001 .....	99
Figura 5.22. Maré prevista e observada durante o evento de cheia – 11/2001: a) Cachoeira e b) Coqueiros.....	99
Figura 5.23. Variações no nível médio da maré 2001/2002 – filtro de 72 horas. Vazão média diária liberada na barragem Pedra do Cavalo (PC).....	100
Figura 5.24. Variações no nível médio da maré em Coqueiros em 2005 (filtro de 72 horas e 30 dias) e vazão liberada pela UHE PC. ....	101
Figura 5.25. Variação do nível médio em Coqueiros em 2005 sem correlação com a descarga da UHE PC. ....	101
Figura 5.26. Velocidade média na seção I e maré prevista em S18 – 26/10/2003 – sizígia – $Q= 15,6 \text{ m}^3/\text{s}$ . ....	102

Figura 5.27. Campos de velocidades [m/s] característicos– 26/10/2003 – sizígia – Q= 15,6 m <sup>3</sup> /s. Seção I – Canal do Paraguaçu (Figura 5.4).....	104
Figura 5.28. Velocidade média na seção I e maré prevista – 02/11/2003 – quadratura – Q= 15,6 m <sup>3</sup> /s.....	105
Figura 5.29. Campos de velocidades [m/s] característicos – 02/11/2003 – quadratura – Q= 15,6 m <sup>3</sup> /s. . Seção I – Canal do Paraguaçu (Figura 5.4).....	106
Figura 5.30. Velocidade média na seção I e maré prevista – 29/08/2003 – sizígia – Q= 191 m <sup>3</sup> /s. ....	107
Figura 5.31. Campos característicos de correntes – 29/08/2003 – sizígia e Q = 191 m <sup>3</sup> /s. Seção I – Canal do Paraguaçu (Figura 5.4).....	108
Figura 5.32. Variação temporal da salinidade (a), temperatura (b), velocidade (c), e sedimentos em suspensão (d) – 26/10/2003 – CTD 2 - Canal do Paraguaçu – sizígia e Q = 15,6 m <sup>3</sup> /s. ....	110
Figura 5.33. Variação temporal da salinidade (a), temperatura (b), velocidade (c), e sedimentos em suspensão (d) – 26/10/2003 – CTD 1 - Canal do Paraguaçu – sizígia e Q = 15,6 m <sup>3</sup> /s. ....	110
Figura 5.34. Variação temporal da salinidade (a), temperatura (b), velocidade (c), e sedimentos em suspensão (d) – 02/11/2003 – CTD 2 - Canal do Paraguaçu – quadratura e Q = 15,6 m <sup>3</sup> /s – seção I.....	111
Figura 5.35. Variação temporal da salinidade (a), temperatura (b), velocidade (c), e sedimentos em suspensão (d) – 29/08/2003 – CTD 2 - Canal do Paraguaçu – sizígia e Q = 191 m <sup>3</sup> /s – seção I. ....	113
Figura 5.36. Salinidade na superfície e variação da maré observada em São Roque (a). Perfil da salinidade às 17 e 17,5 horas (b). Seção II – sizígia.....	113
Figura 5.37. Velocidade média e máxima e maré – estação fixa - sizígia – seção II – Canal do Paraguaçu.....	114
Figura 5.38. Distribuição temporal das velocidade (a) e perfil residual (b) – estação fixa – sizígia - seção II – Canal do Paraguaçu.....	114
Figura 5.39. Css na superfície (a) e perfil de Css às 17 e 17,5 horas (b) - sizígia – seção II – Canal do Paraguaçu. ....	115
Figura 5.40. Variação temporal da salinidade (a), temperatura (b), velocidade (c), e sedimentos em suspensão (d) – 20/11/2001 – quadratura – seção II – Canal do Paraguaçu. ....	116
Figura 5.41. Velocidade e maré (a) e perfil residual (b) -quadratura –seção II – Canal do Paraguaçu. Maré medida em São Roque. ....	117
Figura 5.42. Perfis médios de salinidade (a), temperatura (b), velocidade (c) e sedimentos em suspensão (d) – Canal do Paraguaçu – seção I. ....	118
Figura 5.43. Diagrama de estratificação e circulação – Canal do Paraguaçu – seção I. ....	119
Figura 5.44. Variação da velocidade e da maré prevista – 31/01/2004 – quadratura – Seção III – Canal do Paraguaçu.....	120
Figura 5.45. Campo de correntes [m/s] (a, b, c). Vetores de $\bar{u}$ na seção transversal mostrando o fluxo de águas na maré vazante vindo da BI Norte para o CS, destacados pela elipse (d) . Canal do Paraguaçu a montante da Ilha do Francês – quadratura – Q= 331 m <sup>3</sup> /s – seção III. ....	121
Figura 5.46. Variação da velocidade e da maré prevista – 08/02/2004 – sizígia – Seção III – Canal do Paraguaçu. ....	122
Figura 5.47. Campo de correntes [m/s] (a,b,c). Vetores de $\bar{u}$ na seção transversal mostrando o efeito da Ilha do Francês na maré enchente (d) – Canal do Paraguaçu a montante da Ilha do Francês – sizígia – Q= 236 m <sup>3</sup> /s – Seção III.....	123
Figura 5.48. Variação temporal da salinidade (a), velocidade (b), temperatura (c) e sedimentos em suspensão (d) – 31/01/2004 – Canal Norte – quadratura e Q = 331 m <sup>3</sup> /s – Seção III.....	125
Figura 5.49. Variação temporal da salinidade (a), velocidade (b), temperatura (c) e sedimentos em suspensão (d) – 31/01/2004 – Canal Sul – quadratura e Q = 331 m <sup>3</sup> /s – Seção III.....	126
Figura 5.50. Variação temporal da salinidade (a), velocidade (b), temperatura (c) e sedimentos em suspensão (d) – 08/02/2004 – Canal Norte – sizígia e Q = 236 m <sup>3</sup> /s – Seção III.....	127



Figura 5.51. Variação temporal da salinidade (a), velocidade (b), temperatura (c) e sedimentos em suspensão (d) – 08/02/2004 – Canal Sul – sizígia e $Q = 236 \text{ m}^3/\text{s}$ – Seção III. ....	128
Figura 5.52. Perfis médios de salinidade (a), temperatura (b), velocidade (c) e sedimentos em suspensão (d) – Canal do Paraguaçu a montante da Ilha do Francês – Seção III. ....	129
Figura 5.53. Diagrama de circulação e estratificação - Canal do Paraguaçu a montante da Ilha do Francês – Seção III. ....	129
Figura 5.54. Velocidade média na Seção IV e maré prevista em S18 – 31/01/2004 – quadratura. ....	130
Figura 5.55. Campo de correntes [m/s] – Baía de Iguape – Setor Sul – quadratura– $Q = 331 \text{ m}^3/\text{s}$ –Seção IV. ...	132
Figura 5.56. Velocidade média na Seção IV e maré prevista em S18 – 08/02/2004 – sizígia.....	133
Figura 5.57. Campo de correntes [m/s] – Baía de Iguape – Setor Sul – sizígia – $Q = 236 \text{ m}^3/\text{s}$ – seção IV.....	134
Figura 5.58. Velocidade média na Seção V e maré prevista – 07/02/2004 – Sizígia .....	135
Figura 5.59. Campo de correntes [m/s] – Baía de Iguape – Setor Norte – sizígia – $Q = 258 \text{ m}^3/\text{s}$ – seção V. ....	136
Figura 5.60. Variação temporal da salinidade (a), velocidade (b), temperatura (c) e sedimentos em suspensão (d) – 31/01/2004 – BI Sul – quadratura - $Q = 331 \text{ m}^3/\text{s}$ – Seção IV. ....	137
Figura 5.61. Variação temporal da salinidade (a), velocidade (b), temperatura (c) e sedimentos em suspensão (d) – 08/02/2004 – BI Sul – sizígia e $Q = 236 \text{ m}^3/\text{s}$ – seção IV.....	138
Figura 5.62. Variação temporal da salinidade (a), velocidade (b), temperatura (c) e sedimentos em suspensão (d) – 07/02/2004 – BI Norte – sizígia e $Q = 258 \text{ m}^3/\text{s}$ – seção V.....	140
Figura 5.63. Perfis médios de salinidade (a), temperatura (b), velocidade (c) e sedimentos em suspensão (d) – Setores Sul e Norte da BI – Seção IV e V.....	141
Figura 5.64. Diagrama de circulação e estratificação – setores Sul e Norte da BI – Seção IV e V.....	142
Figura 5.65. Velocidade média na Seção VI e a maré prevista – 27/08/2003 – Sizígia. ....	143
Figura 5.66. Velocidade média na Seção VI e maré prevista – 22/05/2005 – Sizígia. ....	143
Figura 5.67. Campo de correntes [m/s] – Baixo Curso do Rio Paraguaçu – sizígia – $Q = 78 \text{ m}^3/\text{s}$ – Seção VI. ...	145
Figura 5.68. Variação temporal da salinidade (a), velocidade (b), temperatura (c) e sedimentos em suspensão (d) – 27/08/2003 – Baixo curso do rio – sizígia e $Q = 0 \text{ m}^3/\text{s}$ – Seção VI. ....	146
Figura 5.69. Variação temporal da salinidade (a), velocidade (b), temperatura (c) e sedimentos em suspensão (d) – 22/05/2005 – Baixo curso do rio – sizígia e $Q = 78 \text{ m}^3/\text{s}$ – Seção VI. ....	147
Figura 5.70. Perfis médios de salinidade (a), temperatura (b), velocidade (c) e sedimentos em suspensão (d) – Baixo Curso do Rio Paraguaçu .....	148
Figura 5.71. Diagrama de circulação e estratificação – Baixo curso do Rio Paraguaçu – Seção VI. ....	149
Figura 5.72. Perfis longitudinais – comportamento da salinidade devido à ocorrência do hidrograma de cheia – nov/2001. ....	150
Figura 5.73. Gradiente longitudinal de salinidade – superfície – novembro/2001. ....	151
Figura 5.74. Perfis longitudinais – comportamento da salinidade à ocorrência da vazão máxima das turbinas de geração de energia – ago/2003 (os gráficos apresentam somente a zona amostrada - linha pontilhada representa o fundo do estuário). ....	152
Figura 5.75. Perfil longitudinal – salinidade após ocorrência de uma grande cheia do rio – jan/2004.....	152
Figura 5.76. Perfis de salinidade – Sizígia – Baía de Iguape – 2003.....	154
Figura 5.77. Perfis de salinidade – sizígia (a) e quadratura (b) – Baía de Iguape – 2004.....	154
Figura 5.78. Evolução do perfil vertical de salinidade – estação 301 – 2004. As vazões liberadas pela barragem nos dias de medição foram, respectivamente: $341 \text{ m}^3/\text{s}$ , $384 \text{ m}^3/\text{s}$ , $410 \text{ m}^3/\text{s}$ e $236 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	155
Figura 5.79. Perfil longitudinal de sedimentos em suspensão - baixa-mar: 13/11/2001 – antes da cheia (a) e 15/11/2001 – após a vazão máxima (b).....	156
Figura 5.80. Perfil longitudinal de sedimentos em suspensão - preamar – 19/11/2001 (a) e 20/11/2001 (b).....	156

Figura 5.81. Perfil longitudinal de sedimentos em suspensão – agosto/2003 e janeiro/2004.....	157
Figura 5.82. Perfil longitudinal de sedimentos em suspensão na Baía de Iguape – 2003.....	158
Figura 5.83. Perfil longitudinal de sedimentos em suspensão na Baía de Iguape – 2004.....	159
Figura 5.84. Perfil de distribuição vertical de sedimentos em suspensão – estação 301 – 2004. As vazões liberadas pela barragem nos dias de medição foram, respectivamente: 341 m <sup>3</sup> /s, 384 m <sup>3</sup> /s, 410 m <sup>3</sup> /s e 236 m <sup>3</sup> /s.....	159
Figura 5.85. Perfil de sal e sedimentos em suspensão – estação 301: quadratura (a) e sizígia (b). .....	160
Figura 5.86. Perfil longitudinal de temperatura – representativo da situação de verão - baixa-mar: 13/11/2001 – antes da cheia (a) e 15/11/2001 – após a vazão máxima (b). .....	160
Figura 5.87. Perfil longitudinal de temperatura – representativo da situação de inverno.....	161
Figura 5.88. Temperatura na Baía de Iguape – baixa vazão – sizígia e quadratura.....	162
Figura 5.89. Temperatura na Baía de Iguape – sob influência de descarga fluvial – agosto/2003 (sizígia) e janeiro/2004 (30/01 – quadratura e 08/02 – sizígia). .....	162
Figura 5.90. Variação do número de Richardson ( $Ri_L$ ) ao longo do ciclo de maré. Canal do Paraguaçu: quadratura (a) e sizígia (b). Baía de Iguape setor Sul: quadratura (c) e sizígia (d). .....	166
Figura 5.91. Desigualdade dos ciclos de maré junto com a maré altura medida em Coqueiros em 2005. Valores positivos da desigualdade indicam que a altura na maré enchente foi maior que da maré vazante, enquanto que valores negativos indicam o oposto.....	168
Figura 5.92. Variação do tempo de descarga em função da vazão fluvial.....	171
Figura 5.93. Relação entre a vazão e a penetração do sal (isohalina 5) segundo a equação 5. 9.....	173
Figura 5.94. Intrusão salina (isohalina 5) – maré de sizígia – Q1 = 13 m <sup>3</sup> /s e Q2 = 160 m <sup>3</sup> /s (PM – preamar; BM – baixa-mar). Ponto e número indicam a distância em km. ....	174
Figura 5.95. Intrusão salina (isohalina 5) – maré de quadratura– Q1 = 13 m <sup>3</sup> /s e Q2 = 160 m <sup>3</sup> /s (PM – preamar; BM– baixa-mar). Ponto e número indicam a distância em km. ....	174
Figura 6.1. Esquema ilustrando a discretização da coluna d’água em coordenadas Sigma.....	178
Figura 6.2. Grade retangular ilustrativa com tamanho das células crescendo em progressão aritmética a partir do canto superior esquerdo. Na realidade cada célula está dividida em dez partes em cada direção, totalizando 6.980 células de água. ....	180
Figura 6.3. Configuração final do estuário do Rio Paraguaçu adotada para os experimentos numéricos com o POM. Círculos indicam áreas de “estrangulamento” do fluxo. ....	181
Figura 6.4. Sal e temperatura em função da distância da desembocadura. A variação foi obtida pela média do perfis hidrográficos realizados em 13/11/2001 e 27/08/2003, quando as vazões eram 13 m <sup>3</sup> /s e nula, respectivamente. ....	183
Figura 6.5. Condição inicial de distribuição espacial da salinidade no estuário. Valores homogêneos na coluna d’água. Grade de elementos em $i(x) - 0$ a 200 e $j(y) - 0$ a 300.....	183
Figura 6.6. Condição inicial de distribuição espacial da temperatura no estuário (superfície). Grade de elementos em $i(x) - 0$ a 200 e $j(y) - 0$ a 300. ....	184
Figura 6.7. Maré prevista e calculada com o POM em S18 – 22/10 a 3/11/2003. Nas primeiras 54 horas o modelo está em fase de aquecimento.....	187
Figura 6.8. Comparação da maré prevista e calculada pelo POM ao longo do estuário em maré de sizígia.....	188
Figura 6.9. Comparação da maré prevista e calculada pelo POM em maré de quadratura.....	189
Figura 6.10. Comparação dos resultados obtidos com o POM e os valores medidos no ciclo de maré de sizígia de 26/10/2003 no Canal do Paraguaçu – seção I. Velocidade (a), vazão (b) , salinidade observada (c) e salinidade calculada (d).....	190
Figura 6.11. Comparação dos resultados obtidos com o POM e os valores medidos no ciclo de maré de quadratura de 02/11/2003 no Canal do Paraguaçu – seção I. Velocidade (a), vazão (b), salinidade observada (c) e salinidade calculada (d). ....	191

Figura 6.12. Comparação dos resultados obtidos com o POM e os valores medidos no ciclo de maré de sizígia de 27/08/2003 no baixo curso do rio – seção VI. Descarga fluvial nula. Velocidade (a), vazão (b), salinidade observada (c) e salinidade calculada (d). .....	192
Figura 6.13. Comparação dos resultados obtidos com o POM e os valores medidos no ciclo de maré de sizígia de 22/05/2005 no baixo curso do rio – seção VI. Descarga fluvial de 78 m <sup>3</sup> /s. Velocidade (a), vazão .....	193
Figura 6.14. Perfis longitudinais de sal no estuário do Rio Paraguaçu. Observado em 13/11/2001 – sizígia – vazão de 13 m <sup>3</sup> /s (a) e simulado (b). .....	194
Figura 6.15. Perfis longitudinais de sal no estuário do Rio Paraguaçu. Observado em 27/08/2003 – sizígia – vazão nula (a) e simulado (b). .....	195
Figura 6.16. Perfis longitudinais de sal no estuário do Rio Paraguaçu. Observado em 19/11/2001 – transição para quadratura – preamar -vazão de 58 m <sup>3</sup> /s (a) e simulado – vazão de 78 m <sup>3</sup> /s - quadratura (b). .....	195
Figura 6.17. Perfis longitudinais de sal nos canais dos setores Norte e Sul da Baía de Iguape – 26/10/2003 – maré de sizígia e vazão de 15,6 m <sup>3</sup> /s. Perfil da baixa-mar observado (a) e simulado (c); perfil da preamar observado (b) e simulado (d). Distâncias negativas correspondem ao canal do setor Sul, enquanto que as distâncias positivas são no canal do setor Norte. ....	196
Figura 6.18. Perfis longitudinais de sal nos canais dos setores Norte e Sul da Baía de Iguape – 02/11/2003 – maré de quadratura e vazão de 15,6 m <sup>3</sup> /s. Perfil observado na baixa-mar (a) e preamar (b). Distâncias negativas = canal do setor Sul e distâncias positivas = no canal do setor Norte. ....	197
Figura 6.19. Distribuição de sal e campo de correntes na superfície – sizígia – preamar (a) e baixa-mar (b) na entrada do baixo curso do rio Paraguaçu – Cenário 1 .....	198
Figura 6.20. Distribuição de sal e campo de correntes na superfície – quadratura – preamar (a) e baixa-mar (b) na entrada do baixo curso do rio Paraguaçu – Cenário 1. ....	198
Figura 6.21. Distribuição de sal e campo de correntes na superfície – sizígia – preamar (a) e baixa-mar (b) na entrada do baixo curso do rio Paraguaçu – Cenário 2. ....	199
Figura 6.22. Distribuição de sal e campo de correntes na superfície – quadratura – preamar (a) e baixa-mar (b) na entrada do baixo curso do rio Paraguaçu – Cenário 2. ....	199
Figura 6.23. Distribuição de sal e campo de correntes na superfície – sizígia – preamar (a) e baixa-mar (b) na entrada do baixo curso do rio Paraguaçu – Cenário 3. ....	200
Figura 6.24. Distribuição de sal e campo de correntes na superfície – sizígia – preamar (a) e baixa-mar (b) na entrada do baixo curso do rio Paraguaçu – Cenário 4. ....	201
Figura 6.25. Distribuição de sal e campo de correntes na superfície – quadratura – preamar (a) e baixa-mar (b) na entrada do baixo curso do rio Paraguaçu – Cenário 4. ....	201
Figura 6.26. Distribuição de sal e campo de correntes na superfície – sizígia – preamar (a) e baixa-mar (b) na entrada do baixo curso do rio Paraguaçu – Cenário 5. ....	202
Figura 6.27. Distribuição de sal e campo de correntes na superfície – quadratura – preamar (a) e baixa-mar (b) na entrada do baixo curso do rio Paraguaçu – Cenário 5. ....	202
Figura 6.28. Distribuição de sal e campo de correntes na superfície – sizígia – preamar (a) e baixa-mar (b) na entrada do baixo curso do rio Paraguaçu – Cenário 6. ....	203
Figura 6.29. Distribuição de sal e campo de correntes na superfície – quadratura – preamar (a) e baixa-mar (b) na entrada do baixo curso do rio Paraguaçu – Cenário 6. ....	204
Figura 6.30. Distribuição de sal e campo de correntes na superfície – sizígia – preamar (a) e baixa-mar (b) na entrada do baixo curso do rio Paraguaçu – Cenário 7. ....	205
Figura 6.31. Distribuição de sal e campo de correntes na superfície – quadratura – preamar (a) e baixa-mar (b) na entrada do baixo curso do rio Paraguaçu – Cenário 7. ....	205
Figura 6.32. Posição da isohalina observada em campo e simulada pelo POM. ....	208

## **ABREVIATURAS e SÍMBOLOS**

BTS - Baía de Todos os Santos.

BI – Baía de Iguape.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

UFBA – Universidade Federal da Bahia.

EMBASA - Empresa Baiana de Saneamento S.A.

SRH - Superintendência de Recursos Hídricos.

ANA - Agência Nacional da Águas.

SUDENE – Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste.

DHN - Diretoria de Hidrografia e Navegação.

BNDO - Banco Nacional de Dados Oceanográficos.

RMPG - Rede Maregráfica Permanente para Geodésia do IBGE.

PC – Barragem Pedra do Cavalo.

UHE – Usina Hidrelétrica.

PERH – Plano Estadual de Recursos Hídricos.

MW – MegaWatts.

DE - densidade espectral.

FFT – Transformada rápida de Fourier.

FFT 7-14 - filtro de banda espectral entre 7 e 14 anos baseada na FFT.

P – precipitação.

Ev – evaporação.

NEB - região Nordeste do Brasil.

ENOS - El Niño Oscilação Sul.

LNOS - La Niña Oscilação Sul.

TSM - Temperatura da Superfície do Mar.

TAMG – “Tropical Atlantic Meridional Gradient”.

SOI – Índice da Oscilação Sul.

NATL – TSM no Atlântico Norte.

SATL – TSM no Atlântico Sul.

Tr – Tempo de retorno [anos]

$Gt$  - gradiente da vazão anual acumulada [ $m^3/s/ano$ ].

$Pc$  - percentual de mudança da vazão diária de uma determinada permanência [%].

IHA - Indicadores de regime Hidrológico Alterado.

RVA - regime de variação admissível.

ADCP – “Acoustic Doppler Current Profile”.

CTD – sonda hidrográfica para medir profundidade, temperatura, salinidade e turbidez.

ME – margem esquerda.

$u$  - velocidade normal à seção transversal (velocidade longitudinal) [m/s].

$\bar{u}$  - velocidade média em uma vertical [m/s].

$U$  - velocidade média em toda a seção transversal [m/s].

$\bar{U}$  - velocidade média na maré enchente/vazante [m/s].

$t_e$  – tempo de duração da maré enchente [horas].

$t_v$  – tempo de duração da maré vazante [horas].

$AI_{DV}$  – Índice de assimetria da maré proposto por Mantovanelli *et al.* (2004).

Q – vazão.

PM – preamar.

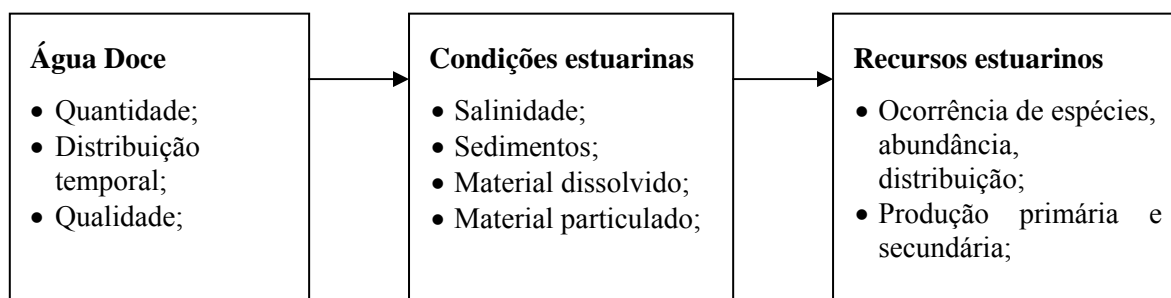
BM – baixa-mar.

Z – profundidade adimensional.

POM – Princeton Ocean Model.

# 1 INTRODUÇÃO

A entrada de água doce é um elemento essencial aos estuários e a forçante que mais afeta a estrutura e a função dos ambientes transicionais da costa (Sklar e Browder, 1998). Alber (2002) e Sklar e Browder (1998) mostram que a entrada de água doce tem influência em todos os níveis básicos de interação de baías e de estuários, com conseqüências físicas, químicas e biológicas (Figura 1.1). Efeitos positivos são associados à geração dos padrões de circulação estuarina, na formação do gradiente de salinidade, no transporte de sedimentos, no fornecimento de nutrientes e na produção de peixes importantes. Já os efeitos negativos, em sua maioria, estão relacionados ao transporte de componentes tóxicos, poluentes e organismos patogênicos vindos das bacias hidrográficas adjacentes (Powell *et al.*, 2002).



**Figura 1.1. Diagrama esquemático dos efeitos da entrada de água doce nos estuários (Alber, 2002)**

As alterações das vazões ou da sazonalidade com que estas chegam aos estuários podem gerar profundas modificações na circulação e condições físico-químicas, como relacionado a seguir:

## *a) Redução das vazões*

De maneira geral, a redução das vazões pode resultar: 1) em maior extensão da intrusão salina e maior salinidade ao longo do gradiente estuarino; 2) no aumento da altura da maré no estuário; 3) na formação de uma zona de turbidez máxima; 4) no aumento do tempo de residência no estuário, e conseqüente potencial de degradação da qualidade das águas; 5) na redução do aporte de sedimentos, que pode implicar na alteração de profundidades e da configuração da desembocadura, na perda de deltas de maré, comunidades bentônicas e ambientes intermareais; 6) no aumento da concentração de poluentes e elementos

patogênicos, colocando em risco de contaminação a biota e os seres humanos; 7) na redução do aporte de material dissolvido e em suspensão (nutrientes, matéria orgânica), que por sua vez influenciam na quantidade de luz que penetra no ambiente e por isso afetam a produção de fitoplâncton; 8) no aumento de macrófitas aquáticas, podendo mudar a cadeia trófica, de pelágica para bentônica, bem como o balanço entre herbívoros e detritívoros (Alber, 2002; Reddering, 1988; Sklar e Browder, 1998).

#### *b) Aumento das vazões*

O aumento da vazão pode levar: 1) à estratificação da coluna d'água; 2) à redução da turbidez e da concentração de nutrientes; 3) à alta produção e biomassa de fitoplâncton; 4) à aceleração da corrente residual (Alber, 2002); 5) ao deslocamento da zona estuarina em direção ao mar; 6) ao domínio da circulação gravitacional na circulação residual; 7) à mudança de tipo bem misturado para parcialmente estratificado; e 8) à deposição de sedimentos, com assoreamento de regiões portuárias (Kjerfve, 1989b).

A correlação entre a quantidade de água doce e de nutrientes é geralmente positiva, ou seja, o aumento das vazões implica em aumento da carga de nutrientes (Alber, 2002). Embora vazões extremas possam "lavar" os sedimentos e matéria orgânica acumulada de baías e lagoas, mais freqüentemente elas aumentam a sedimentação, diminuem os invertebrados, criam rápidas mudanças na salinidade, afastam os peixes e deslocam estruturas comunitárias de plantas. Às grandes variações na salinidade devido ao aumento das vazões estão associados (Sklar e Browder, 1998): i) a redução da vegetação submersa dos canais de maré, a exemplo do que os autores observaram a jusante dos Everglades; ii) a supressão da diversidade e densidade de organismos bentônicos e várias espécies de peixes residentes; iii) o declínio na produtividade ótima de gramíneas marinhas; iv) a baixa diversidade e biomassa de animais.

#### *c) Distribuição temporal da descarga fluvial*

O padrão de distribuição temporal e espacial da salinidade de um determinado estuário, se por um lado está diretamente relacionado com a magnitude das vazões, por outro *é um determinante crítico para as características do habitat estuarino* (Alber, 2002). Segundo o modelo de sobreposição (Browder e Moore, 1981) o potencial de produtividade do ecossistema estuarino é uma função da área de sobreposição, onde características dinâmicas favoráveis (e.g. salinidade) interagem com características de habitats permanentes favoráveis (e.g. tipo de fundo). Então, o deslocamento das isohalinas nas direções de montante e jusante, devido às alterações na descarga fluvial, pode resultar na redução de áreas na quais as

condições favoráveis de salinidade se sobrepõem às feições favoráveis de fundo ou de linha de costa.

A alteração da distribuição temporal da vazão, seja ela no intervalo diurno, mensal ou sazonal, além das mudanças relacionadas acima, pode implicar em impactos biológicos: i) prejuízo na desova e no desenvolvimento de peixes e moluscos; ii) aumento do estresse fisiológico de bentos e plantas; iii) alterações nos mangues e gramíneas marinhas; iv) mudanças na biologia do zooplâncton (Alber, 2002; Sklar e Browder, 1998).

### **1.1 Os efeitos de barragens sobre os estuários e a zona costeira**

Dentre as atividades humanas com potencial de gerar pronunciados efeitos sobre o comportamento dos rios, destacam-se: a canalização, as barragens (Hopkinson e Vallino, 1995) e o desmatamento (Sklar e Browder, 1998). Dentre estas, as barragens tem conseqüências marcantes, pois além de alterar fortemente o tempo de resposta da vazão, também mudam a quantidade de sedimento e matéria orgânica e inorgânica liberadas para jusante, uma vez que a retenção de sedimentos nos reservatórios pode ser grande, a depender das características do regime hidrossedimentológico. Como exemplos de situação extrema, a Barragem High Aswan reteve 98% da carga sedimentar do Rio Nilo (Hopkinson e Vallino, 1995) e em grandes reservatórios da região semi-árida dos Estados Unidos foi quase total (99%) (Williams e Wolman, 1984).

A magnitude e a variação temporal da descarga fluvial induzem profundos efeitos na forma de mistura e circulação de água e substâncias no ambiente estuarino. Sendo assim, a instalação de barragens provoca alterações no sistema natural dos estuários.

A expansão da construção de grandes barragens ocorreu principalmente na segunda metade do século XX. Segundo o ICOLD (1988 apud Brandt, 2000), em 1900, existiam 427 grandes barragens (com altura maior a 15 m), em todo o mundo, enquanto que em 1950 e 1986, totalizaram 5268 e aproximadamente 39.000, respectivamente. As regiões de maior implantação de grandes barragens entre 1975 e 1990 foram a América Central, a América do Sul, a Ásia e a Oceania.

No Brasil, em 2000 existiam 823 grandes barragens, segundo o Comitê Brasileiro de Barragens (2000). Destas, 50% encontram-se localizadas na região Nordeste e aproximadamente 240 são específicas para geração de energia elétrica (90% da matriz energética – 59.475 MW). O primeiro projeto de barragem foi elaborado entre os anos de



1877 e 1880, devido à ocorrência de uma seca severa no Nordeste. Até a primeira metade do século XX constavam 140 grandes barragens no Cadastro Brasileiro de Barragens, sendo que o período de intensa mobilização e construção ocorreu entre 1950 e 1980. Nos anos 80 muitas obras foram interrompidas devido à crise econômica, sendo que as mais importantes foram retomadas na última década, depois da entrada da iniciativa privada no setor.

Segundo o *World Register of Dams* (ICOLD, 1998), das 18.000 barragens construídas com finalidade única em todo o mundo, 48% se destinam à irrigação, 15% ao abastecimento doméstico e industrial, 20% à geração de energia, 8% para o controle de cheia, 4% à recreação e outros variados. O predomínio de uso para irrigação e abastecimento implica na extração de água, com reposição reduzida em quantidade e qualidade.

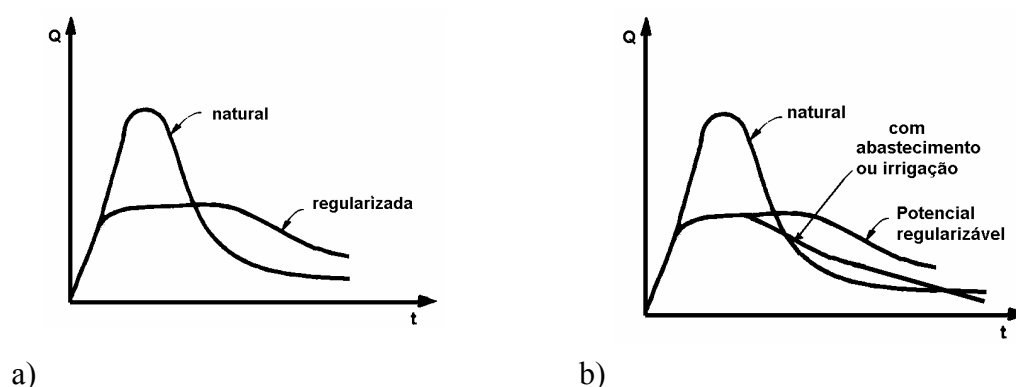
A expansão do número de barragens trouxe aspectos positivos e negativos à sociedade. Os aspectos positivos se referem: 1) ao fornecimento de energia elétrica de baixo custo; 2) à melhoria da navegação; 3) à ausência ou controle de enchentes devastadoras; 4) à redução das secas; 5) ao abastecimento de água para o consumo humano e animal. Tais fatos possibilitaram o desenvolvimento da sociedade e a ocupação de áreas que de outra forma não poderiam ser habitadas (Collier *et al.*, 2000).

Os aspectos negativos são decorrentes da alteração do sistema natural e sua readequação a uma nova situação de fluxo energético. Em termos gerais, os efeitos sobre o regime das vazões naturais decorrentes da implantação de barragens de acumulação são (Tucci, 1993):

- Redução da magnitude das vazões máximas, que vai depender do tamanho do reservatório e do volume disponível antes do período chuvoso;
- Aumento das vazões médias e mínimas.

Dessa forma, ocorre uma alteração na frequência e magnitude das vazões (Figura 1.2a). Um exemplo de redução das cheias e aumento da vazão média a jusante ocorre no complexo de barragens no médio e baixo curso do Rio São Francisco (Medeiros *et al.*, 1999). No entanto, a depender do tipo de uso de água predominante e do grau de extração com relação à vazão média, essa situação pode não ser verificada, a exemplo da retirada para abastecimento urbano e irrigação, quando parte da vazão regularizada não segue para jusante (Figura 1.2b). Outros exemplos de alterações no regime de vazões são apresentados por Collier *et al.* (2000), para alguns rios do Leste dos Estados Unidos, entre eles o Salt, Rio Grande, Chattahoochee, Green e Colorado.

Além da alteração na quantidade de água liberada para jusante e o amortecimento das cheias, podem ocorrer padrões de escoamento diário ou anual completamente diferentes. A geração de energia, por exemplo, geralmente trabalha com variações diárias. Se existe estação de chuva com período bem marcado o regime anual será afetado com o armazenamento durante a época úmida e liberação na seca (Brandt, 2000). Algumas barragens podem provocar grandes flutuações de descarga em função das regras e limitações operacionais.



**Figura 1.2. Efeitos da regularização das vazões no regime hidrológico: (a) sem retirada de água do sistema fluvial (extraído de Tucci, 1993) e (b) com consumo de água para abastecimento ou irrigação**

Devido à retenção dos sedimentos no reservatório, a água limpa que escoar para jusante da barragem (sem os nutrientes transportados pelo sedimento), provocará modificações na fauna e flora, com reflexos ambientais em todo o curso d'água, bem como na foz do rio (Carvalho, 1994). Segundo ICOLD (1989, apud Carvalho 2000), a comunidade biológica no canal de jusante pode ser muito afetada pelo aumento de material de maior diâmetro no leito do canal e por mudança no crescimento da vegetação ao longo das margens.

Os efeitos de barragens sobre os estuários estão relacionados às alterações na magnitude e distribuição temporal das vazões que de modo geral foram relatadas no item 1.1. As alterações nas vazões variam em função do tamanho do reservatório, das necessidades de uso da água, dos dispositivos de descarga e de limitações à jusante. Entre as alterações em estuários decorrentes de barragens encontrados na literatura, destacam-se: 1) a expansão ou retração da penetração do sal (Guillén e Palanques, 1992; Vieira e Bordalo, 2000; Wolanski *et al.*, 2001; Meyer *et al.*, 2003); 2) a mudança nas características de propagação da maré (Wolanski *et al.*, 2001); 3) a maior salinidade ao longo do ano (Scharler e Baird, 2000); 4) a geração de condições hipersalinas nos trechos superiores do estuário de regiões áridas (Scharler e Baird, 2000); 4) o assoreamento devido ao desequilíbrio na dinâmica das marés e enchentes fluviais (Wolanski *et al.*, 2001).

No que se refere ao assoreamento, o adequado gerenciamento das vazões consegue impedir que o processo de assoreamento no estuário ocorra, desde que a política de liberação de água assegure no baixo curso do rio e estuário uma maior taxa de descarga do que a anterior e exista pouco suprimento de sedimento pelos tributários a jusante da barragem (Garland e Moleko, 2000).

As modificações biológicas em estuários associadas à existência de barragens à montante foram: 1) o declínio dos manguezais (corte e a redução da dispersão das sementes) devido a redução das enchentes (Rubin *et al.*, 1998); 2) a interrupção do movimento da biota aquática 3) a alteração na qualidade da água; 4) as flutuações no nível e vazão; 5) os efeitos adversos diretamente sobre a população de peixes (Patty *et al.*, 1999); 6) o decréscimo na abundância de peixes (Plumstead, 1990); 7) redução/aumento na pesca de camarão (Alber, 2002; Sklar e Browder, 1998); 7) a redução da vegetação intermareal e emergente (Sklar e Browder, 1998).

## **1.2 O estabelecimento de vazões mínimas para estuários**

Embora as ações humanas provoquem alterações nas vazões que chegam aos estuários é raro que os efeitos destas alterações sejam considerados na tomada de decisões para o gerenciamento dos recursos hídricos. Existe, de forma geral, pouca noção de que as regras operacionais de montante estão definindo a entrada de água doce nos estuários.

Com objetivo de promover a sustentabilidade dos estuários, recentemente surgiram propostas para o gerenciamento e controle da afluência de água doce nos estuários utilizando diferentes abordagens (Alber, 2002; Flannery *et al.*, 2002, Powell *et al.*, 2002, Kimmerer, 2002, Adams *et al.*, 2002, Mattson, 2002):

- Com base na vazão de entrada: a vazão é mantida dentro de limites prescritos, assumindo que a retirada além deles é prejudicial ao estuário;
- Condicionado: padrões de vazão são estabelecidos para manter uma condição específica (ex. salinidade) em um dado local do estuário;
- Com base nos recursos: padrões de vazão são estabelecidos segundo a necessidade de recursos específicos (ex. determinadas espécies de peixes);
- Com base nos habitats: padrões de vazão são estabelecidos segundo a necessidade de habitats específicos (ex. mangues, banco de corais).

Independente do tipo de abordagem, usualmente são estabelecidas conexões, diretas ou indiretas, entre a afluência de água doce e os recursos de valor dos estuários.

Desta maneira, o desafio para o gerenciamento está na existência de outros fatores na “equação” de manejo de barragens, que são aqueles voltados para a ecologia da área de jusante (Collier *et al.*, 2000). Segundo a Comissão Mundial de Barragens (World Commission on Dams) (2000), que tomou uma postura contrária à construção de grandes barragens, os esforços para mitigar os impactos sobre os ecossistemas tiveram sucesso limitado devido: 1) ao descaso em se prever e evitar tais impactos; 2) à má qualidade e pouca confiabilidade dos prognósticos; 3) à dificuldade de enfrentar todos os impactos; e 4) à implantação e sucesso apenas parcial das medidas mitigadoras. A Comissão destaca que a mitigação eficiente dos impactos deletérios resulta de uma boa base de informações, da cooperação antecipada entre ecologistas, projetistas da barragem e pessoas afetadas, e do monitoramento e acompanhamento regular da eficácia das medidas. Em função dessa falta de informações, os tomadores de decisão criam leis ambientais simplistas ou ignoram o efeito das alterações na bacia hidrográfica sobre os ecossistemas costeiros (Sklar e Browder, 1998).

Por outro lado, além dos exemplos de medidas relacionadas à mitigação dos impactos das barragens sobre a qualidade da água e vazão (Patty *et al.*, 1999), as propostas de modelos de gerenciamento da entrada de água doce nos estuários (Alber, 2002, Flannery *et al.*, 2002, Powell *et al.*, 2002, Kimmerer, 2002, Adams *et al.*, 2002, Mattson, 2002) demonstram a importância da busca de regras operacionais nas barragens que respeitem as características dos ambientes estuarinos e costeiros, e estabeleçam um planejamento integrado entre bacia hidrográfica e a zona costeira.

Neste sentido a Lei Federal 9.433 de 08/01/97, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, apresenta como diretriz geral "*a integração da gestão das bacias hidrográficas com a dos sistemas estuarinos e zonas costeiras*". No entanto, são raros aqueles rios brasileiros onde os impactos das barragens sobre a zona costeira ou estuário foram de alguma forma avaliados. As publicações encontradas na literatura brasileira sobre o assunto se resumem a três dissertações de mestrado (Rio Paraíba do Sul/RJ - Costa, 1994; Rio Joanes/BA - Oliveira, 1999; Rio de Contas/BA - Campos, 2001) e um artigo em anais de congresso (Rio São Francisco - Medeiros *et al.*, 1999). Com exceção de Campos (2001), os trabalhos são focados principalmente nos efeitos das barragens sobre a morfologia da desembocadura do rio.

Um dos estuários brasileiros cujo fluxo de água doce foi severamente afetado pela implantação de barragem é o Rio Paraguaçu. O estuário do Rio Paraguaçu está atualmente com o regime das vazões afluente totalmente controlado pela Barragem de Pedra do Cavalo (4,631 bi m<sup>3</sup>) localizada na cabeceira do estuário. A água da barragem tem usos múltiplos, sendo a parcela mais significativa, até o momento, destinada para abastecimento humano, juntamente com o controle de cheia para as cidades de Cachoeira e São Félix, logo a jusante. A vazão regularizada de projeto (79 m<sup>3</sup>/s com 95% de garantia) quando comparada à vazão média de longo prazo de 110 m<sup>3</sup>/s (1946 a 1975) dá indícios de alto controle sobre as vazões a serem liberadas para o estuário. Em 2005, iniciou-se a geração de energia elétrica na Barragem de Pedra do Cavalo (160MW), alterando novamente a descarga das vazões para a zona estuarina.

### **1.3 Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo caracterizar a hidrodinâmica do estuário do Rio Paraguaçu e avaliar o impacto da construção da Barragem Pedra do Cavalo no padrão de circulação estuarino.

Para alcançar esse objetivo, o estudo estabeleceu as seguintes metas:

- ✓ Caracterizar os hidrogramas naturais de cheia;
- ✓ Analisar as condições hidrológicas históricas;
- ✓ Avaliar as alterações hidrológicas decorrentes da construção da barragem;
- ✓ Caracterizar a dinâmica estuarina, através de medidas em campo e modelagem numérica;
- ✓ Propor uma estratégia de gerenciamento da liberação de vazões da barragem compatível com o regime hidrológico natural e as características estuarinas.

## 2 CONCEITOS DA DINÂMICA ESTUARINA

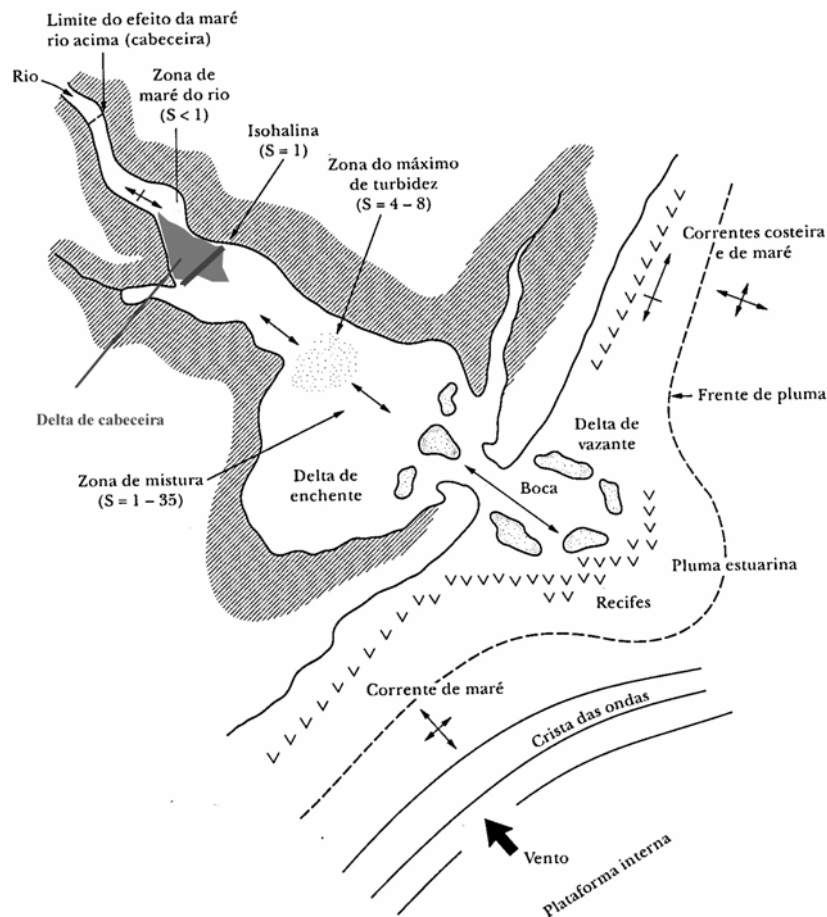
### 2.1 DEFINIÇÃO DE ESTUÁRIO

Os estuários são ambientes caracterizados pela mistura das águas continentais e marinhas e, em termos geológicos, constituem feições costeiras efêmeras. Os estuários atuais se formaram a partir do último estágio interglacial, iniciado há 15.000 anos atrás. Neste período o nível do mar subiu 120 m até o presente nível, que foi alcançado há cerca de 5000 anos. As glaciações e interglaciações têm ocorrido regularmente durante os últimos dois milhões de anos, causando mudanças na posição das linhas costeiras no mundo inteiro, bem como a localização dos estuários. (Kjerfve, 1989a).

Existem várias definições propostas para estuário (Cameron e Pritchard, 1963; Dionne, 1963; Kjerfve, 1989a; Dalrymple *et al.*, 1992; Perillo, 1995), segundo a revisão de Perillo (1995). De acordo com a definição proposta por Perillo (1995):

*“Estuário é um corpo de água costeiro semifechado que se estende seu limite até a influência da maré, dentro do qual a água marinha que entra por uma ou mais conexões com o mar aberto, ou qualquer outro corpo de água salina, é significativamente diluída com água doce proveniente da drenagem do continente, e pode sustentar espécies biológicas eurohalinas em parte ou em todo o seu ciclo de vida”.*

A Figura 2.1 associa as características geomorfológicas e os processos nas três zonas estuarinas que constam nas definições de Dionne (1963) e Kjerfve (1989a): 1) zona sob influência fluvial; 2) zona de mistura; e 3) zona sob influência do oceano. Destas, destacamos a zona fluvial e a zona de mistura. Na zona fluvial os movimentos são unidirecionais e a água é integralmente de origem fluvial. Na transição entre a zona fluvial e zona de mistura ocorre uma região onde a velocidade resultante é praticamente nula e associada à alta concentração de sedimentos (zona de turbidez máxima). Os deltas de cabeceira são feições comuns na transição da zona fluvial e a zona de mistura em estuários com grande espaço de acomodação (Dalrymple *et al.*, 1992). Devido ao processo de floculação dos sedimentos e a diminuição da energia do ambiente, materiais de origem mineral e orgânica são retidos, gerando uma zona de turbidez máxima (Miranda *et al.*, 2002).



**Figura 2.1. Delimitação funcional de um sistema estuarino. Características geomorfológicas e os processos na zona sob influência fluvial, zona de mistura e zona sob influência do oceano ( $S =$  salinidade) (adaptado de Miranda *et al.*, 2002).**

## 2.2 HIDRODINÂMICA DE ESTUÁRIOS

A circulação das águas nos estuários é governada por variações do nível do mar, pela descarga de água doce, pelo gradiente de pressão devido à influência termohalina da salinidade sobre a densidade, pela circulação da plataforma continental e pelo vento agindo diretamente sobre a superfície livre. Essas forçantes são funções do espaço e do tempo e atuam simultaneamente sobre o corpo de água estuarino (Miranda *et al.*, 2002).

### 2.2.1 Fenômenos da mistura na circulação estuarina

A escala de tempo da resposta do corpo de água estuarino às forçantes é ampla e foi separada em movimentos nos domínios da alta e baixa frequência, na qual o limite é a frequência da maré, já considerada como de alta frequência. Ainda entram no domínio de alta frequência as ondas geradas pelo vento. As descargas fluviais, dependendo das características da bacia hidrográfica (tamanho, solo, geologia) podem pertencer tanto ao domínio de alta bem

como à de baixa frequência. No domínio da baixa frequência, com períodos de dias a semanas, ocorrem de forma aleatória ondas de plataforma continental, oscilações de pressão atmosférica e ventos associados às tempestades. Na escala mensal, os meandros e vórtices das correntes oceânicas podem propagar-se através da plataforma continental, atingindo as regiões costeiras. Os processos meteorológicos marcadamente sazonais, como a variação da direção dos ventos predominantes ou de condições barométricas da atmosfera sobre a plataforma continental são forçantes de oscilações anuais do nível do mar na boca dos estuários. Em escalas temporais maiores, da ordem de anos e até décadas, ocorrem as variabilidades climáticas globais (e.g. El Niño e processos no Oceano Atlântico) (Miranda *et al.*, 2002).

A massa de água estuarina consiste da mistura de água doce e do mar, em proporções que variam de um ponto a outro. Devido ao aumento da salinidade estuário abaixo, o gradiente horizontal de densidade gera uma pressão que sempre induz o movimento da água estuário acima (componente baroclínico) e sua intensidade aumenta com a profundidade. O componente barotrópico é forçado pela maré, que associado ao componente baroclínico e à descarga fluvial intensifica os movimentos estuário abaixo e acima, agitando ciclicamente a massa de água estuarina e gerando os processos de mistura.

A mistura decorre do transporte da substância (sal) pelo movimento médio ou macroscópico (gerado pela maré, descarga fluvial e diferenças de densidade), chamado de *advectivo*, e por fluxos aleatórios em escala microscópica da *difusão molecular* e *turbulenta*. Desta maneira, os processos de mistura das águas no ambiente estuarino estão relacionados a três fenômenos:

*Advecção*: É o fenômeno de transporte de uma substância pelo campo de velocidades do meio fluido que o contém. É prática comum supor-se que a velocidade da substância seja igual à velocidade do fluido envolvente, embora isto nem sempre seja correto. Isto é particularmente notável no caso do transporte de sedimentos que se precipitam ao longo da direção vertical com uma velocidade diferente do fluido (Eiger, 1991).

*Difusão*: A difusão ou dispersão (Lewis, 1997) de uma substância dissolvida descreve sua diluição através da mistura com o fluido envolvente, sendo necessário a existência de um gradiente de concentração. Quando um fluido está em movimento na natureza, como no caso dos estuários, onde em geral o regime de escoamento é turbulento, ocorre a difusão turbulenta. A difusão turbulenta provoca a erosão do gradiente vertical de salinidade, que migra ao longo da coluna de água de acordo com a intensidade do movimento. Esse processo de mistura estuarina é a combinação da turbulência gerada internamente, por camadas de água



que se movem com velocidades diferentes, e a turbulência gerada nas interfaces do estuário (água-fundo submarino e água-margens) (Miranda *et al.*, 2002), resultando em cisalhamento.

*Entrainamento*: Quando a água doce se move persistentemente na superfície em direção ao oceano, devido à diferença de densidade, elementos da água do mar são arrastados para a camada superficial, aumentando a salinidade. Essa transferência de água da camada inferior para a superior devido ao cisalhamento é unidirecional e o fenômeno é denominado de *entranhamento* (“entrainment”) (Miranda *et al.*, 2002). Devido ao entrainment, a descarga em direção ao mar torna-se maior e produz um aumento compensatório no fluxo de fundo em direção ao continente, resultando no escoamento residual em duas camadas (Dyer, 1973).

Um importante indicador da turbulência é o *número de Richardson* (Ri), que compara a capacidade estabilizadora do gradiente vertical de densidade com aquela desestabilizadora do cisalhamento da velocidade. A transição entre o regime laminar e turbulento ocorre em  $Ri = 0,25$ . Quando  $Ri < 0,25$ , a turbulência sobrepuja a estratificação de densidade gerando mistura vertical (Miranda *et al.*, 2002). Em geral, para facilitar o cálculo, utiliza-se o número de Richardson por camada ( $Ri_L$ ), o qual é definido por:

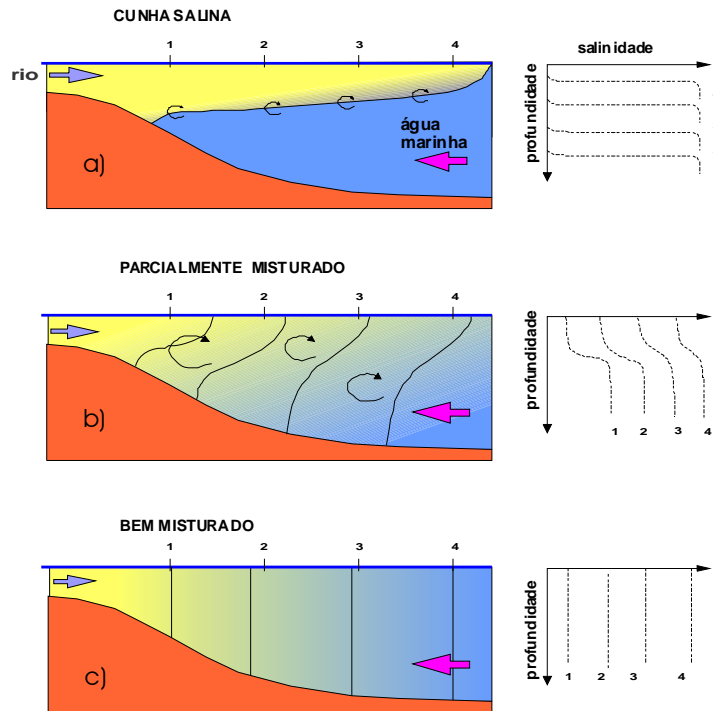
$$Ri_L = \frac{gh\beta\Delta S_v}{\bar{u}^2} \quad \text{(Equação 2.1)}$$

onde:  $g$  = aceleração da gravidade ( $9,8\text{m/s}^2$ );  $h$  = profundidade local;  $\beta$  = coeficiente da equação de estado da água do mar;  $\Delta S_v$  = é a diferença entre a salinidade do fundo e da superfície e  $\bar{u}$  = velocidade média na coluna d’água, medidos ao longo de um ciclo de maré.

Segundo Bérghamo *et al.* (2002) quando  $Ri_L < 2$  há instabilidade, se  $2 < Ri_L < 20$  a estabilidade é fraca e para  $Ri_L > 20$  ocorre alta estabilidade vertical.

### 2.2.2 Classificação dos padrões de mistura

A classificação baseada nos padrões de variação de salinidade foi introduzida por Pritchard (1952). Os estuários foram classificados como: **a)** de cunha salina, **b)** parcialmente misturados e **c)** verticalmente homogêneos (Figura 2.2). O tipo **c** pode ser ainda subdividido em **c1** - verticalmente homogêneo com escoamento reverso na lateral; e **c2** - vertical e lateralmente homogêneo.



**Figura 2.2.** Tipos de estuário segundo a classificação de Pritchard (1952), junto ao padrão de variação vertical da salinidade em 4 diferentes pontos ao longo do estuário (modificado de Miranda *et al.*, 2002).

Com o objetivo de comparar processos físicos em diferentes tipos de estuário, esforços foram realizados no sentido de estabelecer métodos quantitativos de classificação. Hansen e Rattray (1966) propuseram a classificação com base em um diagrama de circulação-estratificação adimensional (Figura 2.3). O parâmetro de estratificação é simplesmente a proporção entre a diferença de salinidade entre a superfície e o fundo pela salinidade média na coluna d'água. Essas salinidades devem ser calculadas por um ou mais ciclos completos de maré (Kjerfve, 1989a). O parâmetro de circulação baseia-se na relação entre a velocidade média na superfície e velocidade da descarga fluvial ( $u_f$ ). Quando a descarga fluvial não é adequadamente conhecida, em vez de  $u_f$  utiliza-se o valor médio da velocidade na coluna d'água medido durante um ciclo completo de maré.

As hipóteses utilizadas na dedução teórica do Diagrama Estratificação-circulação foram a homogeneidade lateral, aplicando-se com mais rigor para estuários estreitos, e condições estacionárias. Os parâmetros estratificação  $\left(\frac{\delta S}{S}\right)$  e circulação  $\left(\frac{u_s}{u_f}\right)$  estão teoricamente relacionados com uma grandeza não-dimensional denotada por  $\nu$  que, representando a fração do fluxo de sal estuário acima gerado pela maré, permite obter a proporção relativa dos processos advectivo e de difusão turbulenta para o transporte de sal (Miranda *et al.*, 2002).

A equação que relaciona  $\nu$  com os parâmetros de estratificação e circulação é dada por (Miranda *et al.*, 2002):

$$\left(\frac{\delta S}{S}\right)^{-1} \left[ 210 + 252 \left( \frac{u_s}{u_f} - 1,5 \right) \right] \nu^2 + \left[ 32 - \left(\frac{\delta S}{S}\right)^{-1} \left( 210 + 252 \left( \frac{u_s}{u_f} - 1,5 \right) \right) + 76 \left( \frac{u_s}{u_f} - 1,5 \right) + \frac{152}{3} \left( \frac{u_s}{u_f} - 1,5 \right)^2 \right] \nu = 0 \quad \text{Equação 2.2}$$

A determinação da contribuição relativa dos processos difusivo (dispersivo) gerado pela maré ( $\nu$ ) e o advectivo dos efeitos combinados da descarga fluvial e da circulação gravitacional ( $1-\nu$ ) é indicada da seguinte maneira:

- a) Quando  $\nu = 1$ , não existe circulação gravitacional e o transporte de sal estuário acima é realizado totalmente por difusão turbulenta (dispersão);
- b) Quando  $\nu \rightarrow 0$ , a difusão turbulenta torna-se desprezível e o processo advectivo é integralmente responsável pelo transporte de sal.

Hansen e Rattray (1966) descobriram que a maioria dos estuários poderia ser agrupada em quatro regiões do diagrama. Estuários da *Classe 1* englobam tanto as lagoas como os estuários barrados por restingas. A Classe 1a é verticalmente misturada enquanto que 1b exibe mais estratificação vertical, sendo que em ambos não ocorre circulação gravitacional. A maioria dos estuários estudados caem na *Classe 2* que abrange estuários de planícies costeiras (estuários parcialmente misturados).

A *Classe 2* foi dividida em fracamente estratificado (2a) e altamente estratificado (2b). Esta classe é caracterizada por uma razoavelmente bem desenvolvida circulação gravitacional e mistura longitudinal, tanto por mecanismos de dispersão quanto por advecção.

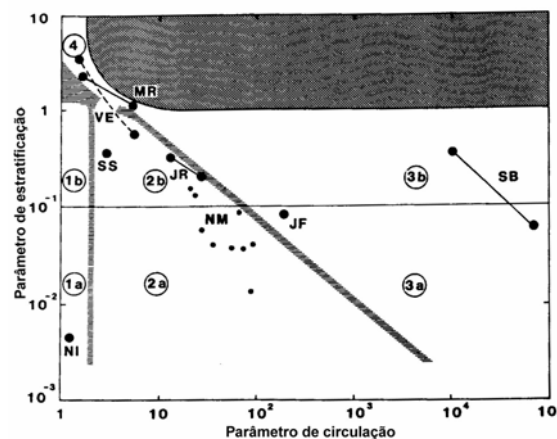
Estuários da *Classe 3*, por um lado, são dominados pelo processo de mistura por advecção, sendo desprezíveis os efeitos de dispersão. A maioria dos sistemas nesta classe mostra moderada a forte estratificação, sendo caracterizada por uma bem desenvolvida circulação gravitacional. Esta classe inclui a maioria dos fjords e alguns fjards, e um certo número de estreitos (Kjerfve, 1989a).

Estuários da *Classe 4* coincidem com o tipo **a** da classificação de Pritchard (1952), ou seja, do tipo cunha salina. A mistura vertical é limitada e a circulação gravitacional é pobre ou inexistente.

A condição de estratificação em estuários pode ocorrer em duas situações:

1) Fraca ação das marés, isto é, pequena altura de maré e/ou forte gradiente do fundo, e, por conseqüência, pequeno volume de armazenamento de maré. A estratificação pode ocorrer somente na maré de quadratura, passando em sizígia para parcialmente misturado (McDowell e O'Connor, 1977).

2) Altas descargas fluviais, acarretando velocidade muito maior da camada superior de água em relação ao movimento da cunha salina estuário acima. Nesse tipo de estuário, a difusão turbulenta pode ser importante na camada sobrejacente à haloclina, quando a influência do cisalhamento do vento não for desprezível. Havendo a homogeneidade lateral da salinidade, os termos dominantes no balanço de sal são as parcelas de natureza advectiva longitudinal e vertical (Miranda *et al.*, 2002).



**Figura 2.3.** Diagrama de Hansen e Rattray (1966) (Kjerfve, 1989a) mostrando a classificação para alguns estuários do globo (MR- Rio Mississippi; VE- estuário de Vellar, Índia; NI- North Inlet, SC; SS- South Santee, SC; JR - Rio James, VA; NM- estreitos do estuário de Mersey, UK; JF- Estreito de Juan de Fuca, WA; SB- Baía de Silver, AK).

Os limites de cada tipo de estuário nunca são bem definidos. Na verdade, os diferentes tipos são estágios de uma seqüência, que será dominada de certa forma pela relação da descarga fluvial com a maré.

## 2.3 PADRÕES DE CIRCULAÇÃO

Associado aos padrões de mistura das massas d'água fluvial e marinha em um estuário ocorrem padrões de circulação de água.

### 2.3.1 Estuário Estratificado ou Cunha Salina

Estuários estratificados ou com cunha salina apresentam uma divisão clara entre massas de água. Na camada superior escoam água doce oriunda da descarga fluvial, e na

camada inferior, a água é salina, mais densa. A massa de água salina se apresenta quase homogênea e com salinidade muito próxima à da região costeira adjacente, gerando um acentuado gradiente vertical de salinidade (*haloclina*) na interface entre essas camadas, de modo que as duas massas de água não se misturam facilmente. No entanto, o cisalhamento na interface devido à velocidade das correntes de diferentes magnitudes e direção gera a tensão de atrito que, pelo processo de entranhamento, transporta parcelas de água do mar para a parte superior, misturando-as com aquela da descarga fluvial (Miranda *et al.*, 2002).

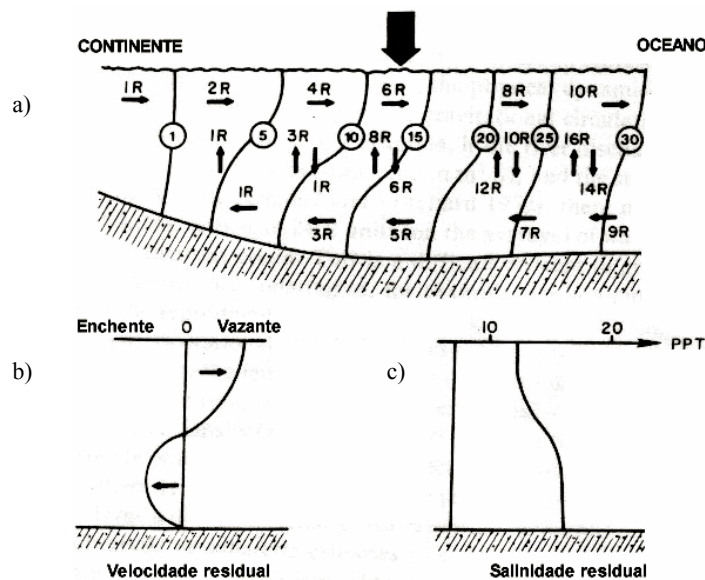
Buchard e Baumert (1998), além da circulação gravitacional, destacam outros dois mecanismos para analisar a existência da contra-corrente em estuários estratificados com macro-maré: a assimetria na velocidade da maré e a assimetria da mistura decorrente da maré. A assimetria na velocidade da maré se refere à maior intensidade da corrente junto ao fundo na enchente, enquanto que na vazante é mais intensa na superfície. Isso decorre da maior velocidade da cunha salina movendo-se sob uma camada mais lenta de água doce ou salobra. A assimetria da mistura decorrente da maré está relacionada à diferença de mistura vertical durante a maré enchente e a maré vazante. Na maré vazante a mistura vertical não ocorre na haloclina, de forma que o sedimento resuspendido é mantido na camada de baixo, podendo resultar em um transporte residual de sedimentos em suspensão para o continente. Os experimentos numéricos indicaram que a assimetria na velocidade da maré é mais relevante que a circulação gravitacional.

A posição da cunha salina no estuário varia com a descarga fluvial e a condição de maré. Por exemplo, no South West Pass do Rio Mississippi, a intrusão da cunha salina se estende por mais de 170 km quando a vazão é baixa, enquanto que descargas fluviais altas empurram a cunha para próximo à desembocadura (Dyer, 1986).

### **2.3.2 Estuário Parcialmente Misturado**

Tradicionalmente, na maioria dos estuários, concebia-se que a circulação era do tipo de duas camadas, com o escoamento saindo pela camada da superfície e entrando na camada inferior, devido ao gradiente de densidade. Em estuários parcialmente misturados, o fluxo em toda a camada d'água orienta-se para o continente na maré enchente e para o oceano na maré vazante. No entanto, a velocidade do fluxo na superfície é maior que a do fundo de forma mais acentuada na maré vazante, causando uma velocidade residual em direções diferentes após um ciclo de maré.

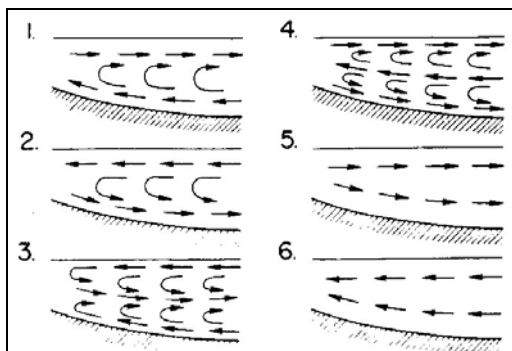
Na circulação clássica de um estuário parcialmente misturado (Figura 2.4a) a água doce tende a permanecer na camada superficial do estuário. No entanto, por efeito da maré e do vento ocorre a mistura na coluna d'água, provocando a troca vertical entre a água doce da camada superficial e a água mais salgada, de baixo (Figura 2.4c). A força da gravidade (pressão) faz com que a camada menos densa da superfície escoem em direção ao mar, provocando uma descarga (R – Figura 2.4a). A camada de sal flui para o continente, direcionando o escoamento para montante. Em algum ponto no meio da coluna, a pressão se equilibra, ou seja, forma-se uma superfície equipotencial, onde a força gravitacional é constante. Na superfície equipotencial o escoamento líquido ou a circulação se esvai e fica sem movimento, podendo se inclinar levemente na seção devido ao efeito de rotação da terra, ou em um canal, em curva. O resultado é que a camada superficial de tais estuários é caracterizada por um escoamento residual em direção ao mar e, o fundo, por um escoamento em direção ao continente (Figura 2.4b) (Kjerfve, 1989a).



**Figura 2.4. Exemplo da circulação gravitacional na Baía de Chesapeake: a) a água doce (R) que entra na camada superficial do estuário se mistura à camada salina do fundo pela ação da maré ou vento. Devido ao gradiente de pressão, a camada superficial, menos densa, escoam para o oceano e a camada do fundo, mais densa, vai em direção ao continente; b) perfil de velocidade residual resultante; c) perfil de salinidade residual (adaptado de Kjerfve, 1989a)**

Estudos sobre o fluxo das águas no estuário de Potomac, Virgínia, identificaram seis modos de circulação residual para condições de parcial mistura (Elliott, 1976 apud Kjerfve, 1989a) (Figura 2.5). Dos seis modos de circulação, o mais comum foi o clássico (43%), seguido pela circulação de armazenamento (22%) e circulação reversa (21%). A circulação

em três camadas reversa ocorreu em 7% das vezes, a circulação de descarga em 6% e com somente 1% a circulação em três camadas (Elliott, 1976 apud Kjerfve, 1989a).



**Figura 2.5. Modos de circulação para condições de parcial mistura - estuário de Potomac, Virgínia: 1) clássica; 2) reversa; 3) três camadas, saindo pelo meio; 4) três camadas reversa, entrando pelo meio; 5) descarga; 6) armazenamento (Elliott, 1976 apud Kjerfve, 1989a).**

A densidade da água marinha depende tanto do sal como da temperatura. Geralmente, a faixa de variação da salinidade em estuários é muito maior que da temperatura e, por isso, a temperatura teria, relativamente, uma pequena influência na densidade. No entanto, as águas superficiais em estuários tropicais, sem descarga fluvial no período seco, e em Fjords, no inverno, podem estar sujeitas à ocorrência de circulação vertical devido à mudança de densidade pela temperatura. Essa circulação é conhecida como *Convecção termohalina* (Dyer, 1973).

### 2.3.3 Estuário Bem Misturado

Este estuário é característico de regiões com pequena descarga fluvial, de tal sorte que os movimentos da massa de água e os processos de mistura são dominados pela maré. O gradiente vertical de salinidade é praticamente desprezível (Miranda *et al.*, 2002).

Em função da variação batimétrica dos estuários, a interação da corrente com o fundo raramente é idêntica em dois locais do estuário. Isto se manifesta na diferença de duração e velocidade máxima entre os períodos de vazante e enchente. A resultante da distribuição espacial de correntes, tanto na horizontal quanto na vertical, é chamada de circulação de maré, devido ao "bombeamento" da maré ("tidal pumping"). (Kjerfve, 1989a).

O vetor médio das correntes (velocidade residual) da maré pode variar lateralmente em uma seção transversal, resultando no predomínio das correntes de enchente e vazante em lados opostos. Segundo Kjerfve (1989a), tal fato se deve mais à interação com os contornos (fundo e margens) do que à força de Coriolis.

## 2.4 PROPAGAÇÃO DA MARÉ EM ESTUÁRIOS

A onda de maré é gerada globalmente nos oceanos devido às forças astronômicas, sendo responsável por intensos processos advectivos e difusivos, variáveis espacialmente e condicionados pela geometria estuarina.

As variações do nível do mar podem ocorrer em escala de tempo de segundos (ondas geradas pelo vento), horas (ondas geradas pela maré astronômica), dias (ondas geradas por influências meteorológicas), meses (meandros e vórtices das correntes oceânicas), anual (variações sazonais nos processos de interação oceano-atmosfera, nível estérico do mar, ondas geradas pela maré astronômica) e interanual (alterações climáticas geradas por processos globais do tipo El Niño). Essas diferentes ondas têm influências variadas no comportamento hidrodinâmico dos estuários (Miranda *et al.*, 2002).

As oscilações diurnas ou semi-diurnas são denominadas de *alta frequência*. As demais variações do nível do mar passam a ser referidas como *baixa frequência* ou *submaré* (oscilações com frequência inferior à frequência da maré) (Miranda *et al.*, 2002).

Ao se propagar ao longo de um estuário, a onda de maré sofre distorções, causadas pela variação da topografia de fundo, descarga fluvial e reflexão da energia nos limites estuarinos. Estas distorções se manifestam na forma de assimetrias verticais e horizontais da onda. A convergência das margens do estuário faz com que a onda de maré seja comprimida lateralmente, podendo ocasionar o aumento da altura da maré. Por sua vez, em estuário muito raso o atrito causa o decréscimo da altura da maré (Dyer, 1997). De acordo com a importância relativa do atrito e afunilamento do estuário, três situações podem ocorrer (Nichols and Biggs, 1985):

- A altura de maré aumenta - em estuários com forma afunilada a convergência lateral da energia excede a perda por atrito. Como consequência, a altura da maré e a velocidade das correntes aumentam em direção à cabeceira. Na ZR a convergência diminui, o efeito do atrito torna-se maior e a altura da maré diminui. Estes estuários são denominados hiper-síncronos;
- A altura de maré se preserva – estuários onde os efeitos do atrito e da convergência estão em balanço, e a altura da maré permanece constante até a ZR. Estes estuários são denominados síncronos;



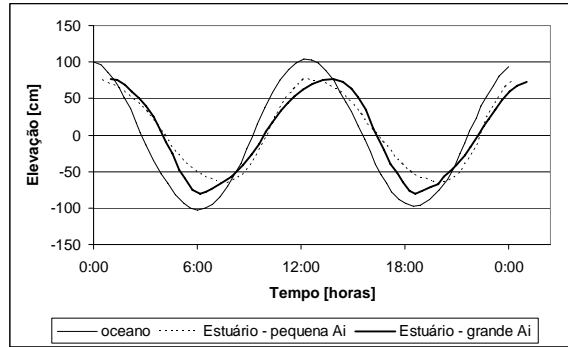
- A altura de maré decresce – em estuários onde o efeito do atrito excede o da convergência e, em consequência, a altura da maré diminui ao longo do estuário. Estes estuários são denominados hiposíncronos.

#### 2.4.1 Assimetria da onda de maré

A assimetria da onda de maré pode ocorrer na duração e na velocidade das marés de vazante e enchente. A assimetria de duração é caracterizada por diferentes tempos de enchente e vazante. A assimetria é dita *positiva*, quando o tempo de enchente é maior que o tempo de vazante, e *negativa* na situação oposta (Boon e Byrne, 1981).

A assimetria de duração geralmente resulta em intensidades de corrente diferenciadas entre a vazante e a enchente (assimetria na velocidade). Por uma simples questão de continuidade, desde que haja pouca influência de descarga fluvial, as ondas de maré caracterizadas por um tempo de subida do nível d'água menor que a descida induzem correntes de enchente mais fortes que as de vazante (se o volume de água que entra no estuário com a maré enchente é o mesmo que aquele que sai durante a maré vazante, então o menor intervalo de tempo envolvido na maré enchente causa fluxos mais velozes). Da mesma forma uma onda de maré caracterizada por uma queda do nível d'água mais rápida, induzirá correntes de vazante mais fortes. Estes aspectos trazem como consequência a formação de deltas de maré do lado de dentro da embocadura, no caso de estuário com correntes de enchente mais fortes, e do lado de fora da embocadura, no caso de correntes de vazante mais fortes. Além disso, como em estuários com assimetria na onda de maré, os valores médios da velocidade da corrente de enchente e vazante são discrepantes, ocorre um maior transporte de água na direção da corrente preponderante, o que gera uma sobre-elevação ou depressão do nível médio d'água nas seções à montante (onde a assimetria da maré tende a ser mais evidente) (Lessa, 2000).

De uma forma bastante generalizada, se a onda de maré (Figura 2.6 - linha contínua) se propaga ao longo de um estuário com *pequenas* variações da área inundada durante o ciclo de maré, a assimetria é caracterizada por uma subida da maré mais rápida e ocorre atraso na baixa-mar (Figura 2.6 - linha tracejada). Por outro lado, caso ocorra uma *grande* variação da área inundada do estuário durante o ciclo de maré, o oposto é observado (Figura 2.6 - linha em negrito), com a fase descendente da maré sendo mais rápida que a fase ascendente (assimetria inversa), apresentando atraso da preamar. Em ambos ocorre a atenuação da maré dentro do estuário (altura menor que no oceano).



**Figura 2.6. Diagrama esquemático ilustrando a onda de maré no oceano (linha contínua) e a distorção da onda de maré que pode ser observada dentro de um estuário, com pequena (linha tracejada – assimetria negativa) e grande área de inundação (Ai) (linha em negrito – assimetria positiva).**

A análise da assimetria na maré pode ser auxiliada pelo índice  $t_e/t_v$ , que relaciona o tempo de enchente ( $t_e$ ) e o tempo de vazante ( $t_v$ ). Mantovanelli *et al.* (2004) propôs o Índice de Assimetria ( $AI_{DV}$ ), que combina as assimetrias da duração e da velocidade da maré (propostas anteriormente por Lincoln e FitzGerald, 1988) obtidas durante o monitoramento de um ciclo completo de maré, através da seguinte formulação:

$$AI_{DV} = A_D + A_V; \quad A_D = (t_v - t_e)/(t_v + t_e); \quad A_V = (\bar{u}_v - |\bar{u}_e|)/(\bar{u}_v + |\bar{u}_e|) \quad \text{Equação 2.3}$$

onde:  $t_v$  = tempo de vazante;  $t_e$  = tempo de enchente;  $\bar{u}_v$  = velocidade média de vazante;  $\bar{u}_e$  = velocidade média de enchente. Segundo Mantovanelli *et al.* (2004) o  $AI_{DV}$  foi capaz de explicar de maneira eficiente a direção da corrente residual e o transporte de água nos ciclos de marés analisados. Se  $AI_{DV} > 0$ , a circulação residual e o transporte de água são dominantes de vazante; caso contrário, sendo  $AI_{DV} < 0$ , são dominantes de enchente. Quando  $AI_{DV} = 0$ , a onda de maré é simétrica, tanto na duração quanto na velocidade.

Outra forma de avaliar a assimetria da maré é a análise da relação entre as constantes harmônicas  $M_4$  e  $M_2$ . Segundo Boon e Byrne (1981), as combinações de  $M_4$  e  $M_2$  são suficientes para explicar as diferenças de duração da maré enchente e vazante na maioria dos sistemas de águas rasas. Aubrey e Friedrich (1988) propõem uma parametrização utilizando as relações: a)  $M_4/M_2$  e b)  $2M_2 - M_4$ . Enquanto  $M_4/M_2$  indica o grau de assimetria, a relação  $2M_2 - M_4$  mostra o sentido da assimetria. Os valores de  $2M_2 - M_4$  entre  $180^\circ$  e  $360^\circ$  correspondem à assimetria positiva, enquanto que valores entre  $0^\circ$  e  $180^\circ$  referem-se à assimetria negativa.

### 3 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo se localiza no extremo oeste da Baía de Todos os Santos (BTS), englobando o baixo curso do Rio Paraguaçu, a Baía de Iguape e o Canal do Paraguaçu, entre as latitudes 12° 35' e 12° 60' e entre as longitudes 38° 45' e 39° 00' (Figura 3.1).

O baixo curso do Rio Paraguaçu se desenvolve em um vale encaixado de rochas cristalinas que sustentam um relevo abrupto, com altitudes de até 220 m. Sua atual extensão é de 16 km, iniciando logo a jusante da Barragem Pedra do Cavalo até chegar à desembocadura na Baía de Iguape (BI). O baixo curso apresenta uma batimetria muito irregular, com várias depressões e bancos arenosos. Enquanto as depressões podem chegar a profundidades de 10 m, um grande número de bancos de areia aflora na baixa-mar de sizígia. Neste caso, o escoamento é limitado a um sistema de canais pequenos, rasos e meandrantos, de difícil navegação.

A Baía de Iguape (BI) tem uma área total de 76,1 km<sup>2</sup>, sendo composta por três setores: Norte, Central e Sul (Carvalho, 2000). Os setores Norte e Sul têm canais de maré com largura média de 200m e profundidades entre 5 e 10m, se estendendo por cerca de 11 km e 7 km, respectivamente. O setor Central é raso, com grandes bancos de areia alongados e paralelos a corrente de maré, em exposição na maré baixa de sizígia, correspondendo ao delta fluvial do Rio Paraguaçu (Lessa *et al.*, 2000). As maiores profundidades ocorrem nos canais de escoamento de maré nas laterais norte e sul, sendo observadas profundidades superiores a 18 m no trecho entre São Francisco do Paraguaçu e a Ilha do Francês e na entrada do Canal do Paraguaçu. A Baía de Iguape apresenta extensa área intermareal vegetada (28,1 km<sup>2</sup>) e não vegetada (~16 km<sup>2</sup>). A área vegetada é composta por mangues, onde predominam bosques de *Laguncularia racemosa* (mangue branco) (Carvalho, 2000). A área de manguezais corresponde a 36,9% da Baía de Iguape e 80,7% da área de mangue de todo o estuário do Rio Paraguaçu.

O Canal do Rio Paraguaçu, com uma extensão de 18 km, contados da desembocadura na BTS até a Ilha do Francês, apresenta a isóbata de 20 m quase em todo o trecho. A parte menos profunda se localiza em frente a São Roque, enquanto que as maiores profundidades são encontradas em frente à Ponta Salamina, onde a profundidade máxima de 44 m é atingida (Carta Náutica da BTS - Parte Oeste - No. 1107 - 2ª edição, DHN - 1978).

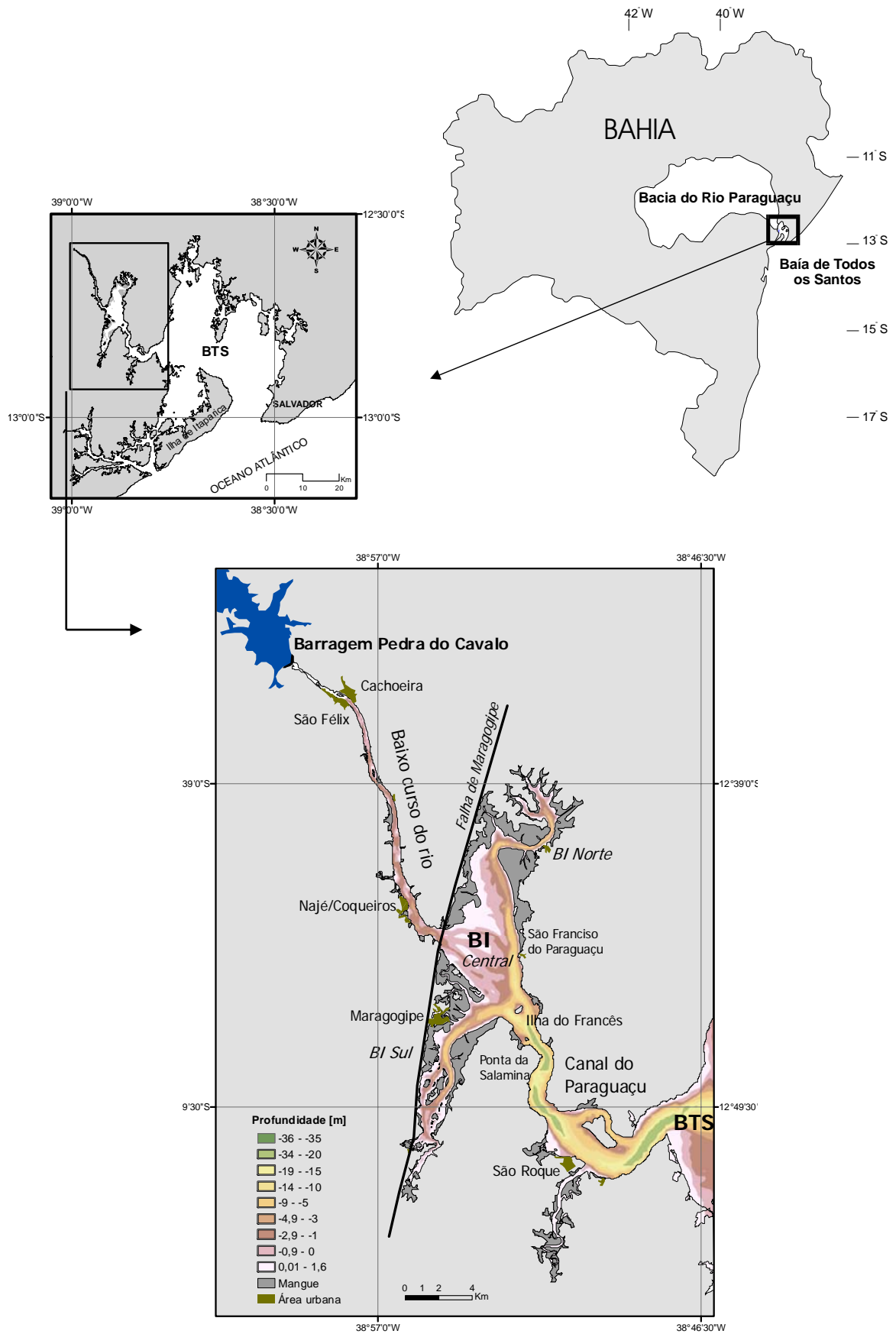


Figura 3.1. Localização da bacia hidrográfica do Rio Paraguaçu e a área de estudo, com a subdivisão da Baía de Iguape (BI) em três setores (Norte, Central e Sul).

### 3.1 TEMPO E CLIMA

As características gerais de tempo e clima da região Nordeste do Brasil (NEB) foram descritas por Aragão (2004), destacando seis sistemas atmosféricos que produzem precipitação significativa:

- Zona de Convergência Intertropical (ZCIT);
- Frentes Frias;
- Distúrbios de Leste;
- Ciclones na Média e alta Troposfera (conhecidos como Vórtices Ciclônicos de Ar Superior - VCAS);
- Brisas Terrestre e Marítima; e
- Oscilações de 30-60 dias.

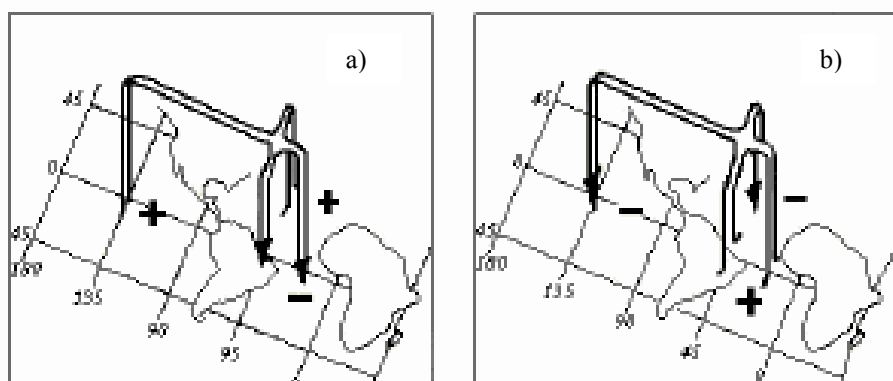
Na parte norte do NEB (entre 2° e 12° S e 36° e 43 ° W) o sistema mais importante é a ZCIT (chuvas de fevereiro a maio), seguido pelas Frentes Frias. No entanto, as Frentes Frias são determinantes nas chuvas do sul da Bahia (novembro a fevereiro). Os Distúrbios de Leste atuam sobre a zona costeira, mas podem penetrar até 400 km dentro do continente (entre abril e agosto). Os VCAS atuam nos meses de novembro a fevereiro e sua ocorrência é bastante irregular. As Brisas podem influenciar a precipitação na faixa litorânea, principalmente entre maio e julho. As Oscilações de 30-60 dias ainda não são bem conhecidas, mas estão ligadas a ocorrências de veranicos prolongados. Considerando que os fenômenos estão interligados em escala planetária, deve-se mencionar o fenômeno ENOS (El Niño Oscilação Sul)/ LNOS (La Niña Oscilação Sul) e o fenômeno do Dipolo do Atlântico (Aragão, 2004).

No que se refere à variação interanual, muito grande no Nordeste, existe uma dependência principalmente de dois fenômenos: ENOS/LNOS e Dipolo do Atlântico. O ENOS é o aquecimento da água do mar do Pacífico tropical da costa do Peru/Equador até o oeste do Pacífico. O LNOS é o oposto (resfriamento). Apenas os eventos moderados a fortes parecem influenciar nas chuvas do Nordeste (Aragão, 2004). O ENOS tem sido associado à baixa precipitação, sendo o LNOS associado à alta precipitação.

O Dipolo do Atlântico é a mudança diferencial anômala das águas do Atlântico tropical norte e Atlântico tropical e equatorial sul. Esse fenômeno muda a circulação meridional da atmosfera (célula de Hadley) e inibe ou aumenta a formação de nuvens, causando anomalias na precipitação do Nordeste (Aragão, 2004). As mudanças nas

circulações de Hadley e Walker são caracterizadas pela subsidência anormal durante os anos secos e movimento ascendente anormal durante os anos úmidos sobre o Nordeste. A Figura 3.2 mostra um esquema do resultado da mudança da circulação atmosférica devido à forçante anômala das temperaturas da superfície do mar (TSM). Desse modo, as flutuações interanuais na precipitação do Nordeste são devidas principalmente aos dois oceanos tropicais, Pacífico (ENOS) e Atlântico (Dipolo) com dois modos principais:

- Pacífico positivo (Pacífico quente) e Dipolo negativo (Atlântico Sul frio e Atlântico Norte quente) correspondendo a episódios de seca;
- Pacífico negativo (Pacífico frio) e Dipolo positivo (Atlântico Sul quente e Atlântico Norte frio) correspondente a anos com excesso de chuva.



**Figura 3.2** Esquema das anomalias das circulações de Hadley e Walker em relação com as TSMs: (a) Pacífico quente, Atlântico Norte quente e Atlântico Sul frio – fluxo de ar descendente no NEB; (b) Pacífico frio, Atlântico Norte frio e Atlântico Sul quente – fluxo de ar ascendente no NEB (Aragão, 1994).

A bacia do Rio Paraguaçu, segundo o Plano Diretor de Recursos Hídricos do Médio e Baixo Rio Paraguaçu (BAHIA, 1996), está numa região de tempo complexa e de transição entre vários sistemas meteorológicos. As principais cheias são registradas entre novembro e fevereiro, e, portanto, devem estar associadas à atuação de Frentes Frias e VCAS (BAHIA, 2004). Por outro lado, o período chuvoso (outono-inverno) na zona estuarina está associado a ZCIT, aos Distúrbios de Leste e às Brisas.

Em termos de clima, a região do estuário do Rio Paraguaçu pertence à classe As' (Köppen), quente e úmido, com chuvas de outono-inverno. Verifica-se um alto gradiente de precipitação do litoral úmido para o interior, mais seco. Uma redução de 400mm anuais (de 1600mm para 1200mm) (BAHIA, 2003) é observada entre a saída do Canal do Paraguaçu e a Barragem Pedra do Cavallo.

A temperatura média anual na região do estuário é de 24°C, com amplitude térmica anual de 5°C, sendo a média mensal mínima de 21°C e a máxima de 26°C. Os meses de novembro a março são os que apresentam maiores temperaturas e julho e agosto as menores. A umidade relativa do ar apresenta dois períodos distintos: 1) o período chuvoso, de abril a setembro, com mais de 78%, chegando ao máximo de 85% em julho; 2) o período seco, de outubro a março, com menos de 75%, baixando para o mínimo de 72% de novembro a janeiro (BAHIA, 1984).

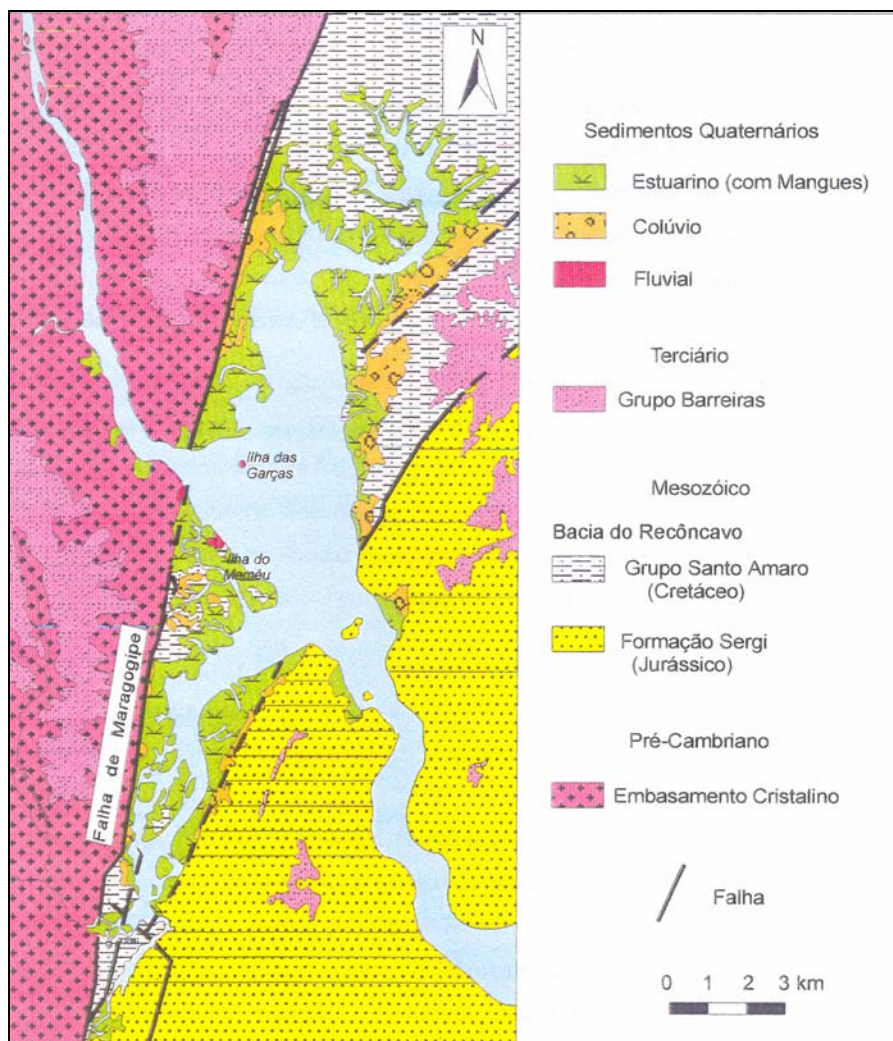
Os ventos na BTS seguem um padrão diário de fortes brisas marinhas (Leste) durante o dia e brisas continentais calmas durante a noite (Norte). A velocidade média foi de 3,2m/s. No período de inverno (velocidade média de 4m/s), com a chegada de Frentes Frias, os ventos de Sudeste apresentam maior variabilidade de intensidade e direção (Cirano e Lessa, 2002).

### **3.2 GEOLOGIA**

O trecho final do Rio Paraguaçu (baixo curso), após a Barragem de Pedra do Cavalo, se desenvolve no sentido NO – SE nos primeiros 5 km, para depois infletir em direção N-S, percorrendo cerca de 15 km sobre rochas ígneas e metamórficas (de idade pré-cambriana) até a falha de Maragogipe, no limite oeste da Baía de Iguape. A leste da falha ocorrem as rochas sedimentares da Bacia do Recôncavo (Figura 3.3), em especial os folhelhos do Grupo Santo Amaro e os arenitos da Formação Sergi, esta última cortada pelo Canal do Paraguaçu (Brichta, 1977).

As rochas do embasamento e da Bacia do Recôncavo são capeadas discordantemente pelos sedimentos terciários do Grupo Barreiras, compostos de areias fina a grossa, argilas de coloração variegada e de arenitos grossos a conglomeráticos (Barbosa e Domingues, 1996 apud Carvalho, 2000)

Nas margens da Baía de Iguape existem depósitos de mangue, localmente recobertos por depósitos coluvionares. Os depósitos de mangue são predominantemente lamosos e os colúvios constituem-se basicamente de fragmentos de rochas metamórficas, de quartzo e de feldspato ou de areia quartzosa média a grossa. Depósitos fluviais são encontrados na margem direita do rio, nas ilhas do Memêu e das Garças, localizadas na desembocadura do Rio Paraguaçu (Figura 3.3) (Carvalho, 2000).



**Figura 3.3. Mapa geológico da Baía de Iguape (Carvalho, 2000)**

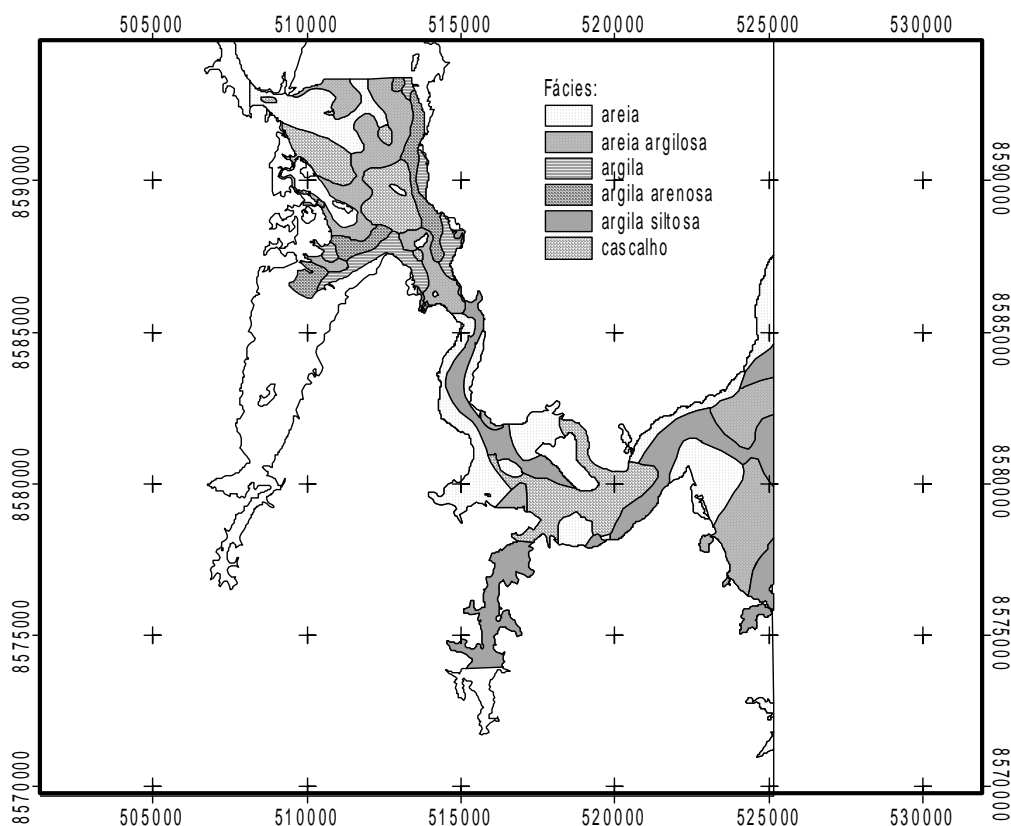
Os sedimentos de fundo da região do estuário do Rio Paraguaçu foram definidos por Avanzo (1977) e Brichta (1977), respectivamente para a Baía de Iguape e Canal do Paraguaçu. Dias (2003) reavaliou as fácies texturais de fundo da Baía de Todos os Santos, sendo que as classes que ocorreram na área de estudo foram: argila, argila siltosa, argila arenosa, areia, areia argilosa e cascalho (Figura 3.4). Na Baía de Iguape, as fácies arenosas formam o delta fluvial (Avanzo, 1977).

### 3.3 HIDROLOGIA

O Rio Paraguaçu é o principal afluente da Baía de Todos os Santos. A bacia de drenagem tem cerca de 55.317 km<sup>2</sup>, apresentado climas diferenciados. Enquanto as nascentes estão localizadas na Chapada Diamantina, num clima de montanha, a parte média é dominada pelo clima semi-árido e no baixo curso, ao se aproximar do litoral, muda novamente as



características climáticas. O principal afluente do Rio Paraguaçu é o Rio Jacuípe, que entra diretamente no lago da Barragem Pedra do Cavallo.



**Figura 3.4. Distribuição de fácies sedimentares na Baía de Iguape e Canal do Paraguaçu (Dias, 2003)**

O regime hidrológico mostra forte sazonalidade, sendo que vazões altas ocorrem durante os meses de dezembro a abril, com as enchentes acontecendo principalmente de dezembro a fevereiro. No restante do ano hidrológico, isto é, de maio a outubro, predominam as vazões baixas, sendo que Rio Jacuípe apresenta maior intermitência do que o Rio Paraguaçu. A vazão média anual no Rio Paraguaçu é de  $83 \text{ m}^3/\text{s}$  (1947 a 2003), enquanto que no Rio Jacuípe chega a  $9,5 \text{ m}^3/\text{s}$  (1930 a 2003).

Com a construção da Barragem de Pedra do Cavallo em 1986, o regime hidrológico do Rio Paraguaçu que aflui para o estuário e a Baía de Todos os Santos está quase totalmente controlado pela operação das comportas, conforme será descrito no item 3.5. A jusante da Barragem de Pedra do Cavallo a contribuição de água doce é pequena. A área é drenada por pequenos riachos que somam uma área de drenagem de  $455,7 \text{ km}^2$ , destacando-se o Rio Capivara ( $316 \text{ km}^2$ ).

Os valores médios de vazão fluvial são pequenos em relação ao prisma de maré da BTS, representando apenas cerca de 0,08 % deste (Lima e Lessa, 2002). Embora a vazão média dos rios Paraguaçu e Jacuípe seja pequena, na época das enchentes as descargas máximas tomam valores proporcionais ao tamanho da área de drenagem e provavelmente têm grande impacto sobre a zona estuarina.

### **3.4 OCEANOGRAFIA**

De acordo com Lessa *et al.* (2001) a maré tem influência em toda a área de estudo, propagando pela BTS até chegar ao limite da cidade de Cachoeira, logo a jusante da Barragem de Pedra do Cavalo. As marés na região são caracteristicamente semi-diurnas, com número de forma variando entre 0,11 (mar aberto) e 0,04 (Najé) (Figura 3.1). Ao se propagar pela BTS, a onda de maré é amplificada, alcançando em maré de sizígia 2,54 m em Itaparica, para 2,71 m em Najé. Um ligeiro decréscimo é então observado nos 15 km à montante deste ponto, até a cidade de Cachoeira. Concomitante à amplificação da maré, ocorre uma defasagem de tempo média de 1,5 horas entre a preamar no oceano e aquela em Cachoeira.

Em geral, o estuário apresenta uma condição de bem misturado para baixas vazões do Rio Paraguaçu, com águas de salinidade superior a 30 penetrando em quase todo o Canal do Paraguaçu e até próximo da Ilha do Francês, a partir de onde se forma um intenso gradiente de salinidade na Baía de Iguape, reduzindo os valores de salinidade para 3,2 cerca de 3 km adentro do baixo curso do rio (Moura, 1979; Wolgemuth *et al.*, 1981).

### **3.5 BARRAGEM PEDRA DO CAVALO**

A Barragem de Pedra do Cavalo (Figura 3.5) tem um volume de armazenamento de 4,631 km<sup>3</sup> (na cota 120 m), com vazão regularizada de projeto de 79 m<sup>3</sup>/s, para 95% de garantia de atendimento à demanda. A vazão de cheia com tempo de retorno de 10.000 anos é igual a 12.430 m<sup>3</sup>/s, sendo a descarga máxima do vertedor igual a 12.000 m<sup>3</sup>/s (BAHIA, 1984).

A Barragem de Pedra do Cavalo, desde seu projeto, foi concebida para usos múltiplos da água do reservatório. De fato, somente a captação de água para abastecimento urbano (região metropolitana de Salvador e outras cidades próximas à barragem) e o controle de enchentes a jusante, nas cidades de Cachoeira e São Félix, foram efetivamente utilizados até 2005, quando a geração de energia elétrica passou a ocorrer.

O controle de cheia pelo reservatório da Barragem Pedra do Cavalo foi concebido em decorrência de duas cidades históricas situadas a jusante da barragem de Pedra do Cavalo (cerca de 4 km): Cachoeira, na margem esquerda e São Félix, na direita. Antes da implantação da barragem, em 1985, estas duas cidades sofriam com enchentes praticamente todos os anos, durante o período de chuvas na bacia hidrográfica. Os efeitos das cheias eram, por vezes, quase catastróficos, como nos anos de 1948, 1960, 1964, 1969 e 1980, entre outros cujos registros não estão disponíveis. O critério estabelecido durante o projeto básico do empreendimento, foi o de garantir a proteção das cidades para cheias de até 30 anos de recorrência (Coelba/Odebrecht, 2001). As principais características da barragem constam na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1 Principais características da barragem Pedra do Cavalo (CBDB, 2004).**

Barragem Principal	Reservatório (N.A. Máx Normal = 120 m)	Vertedor
Tipo: Enrocamento com núcleo	Área: 163 km <sup>2</sup>	Tipo: Superfície
Comprimento: 460	Volume: 4.631 km <sup>3</sup>	Comporta: 05 (15 x 18 m)
Cota: 126 m	Comprimento: 48 km	Capacidade: 12000 m <sup>3</sup> /s



**Figura 3.5 Vista da barragem Pedra do Cavalo (CBDB, 2004).**

As operações do reservatório são realizadas em função das vazões afluentes, do nível do reservatório e da chuva ocorrida e prevista. No período de operação da EMBASA (1986 a 2004), existiam duas situações básicas de operação:

- Período de estiagem:
  - 1) Se a vazão afluyente ao reservatório fosse menor que  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  a vazão média diária liberada para o estuário era de  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
  - 2) Se vazão afluyente fosse maior que  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  então a vazão média diária efluente era  $12,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
- Período de cheia: Segundo dados do projeto (DESENVALE, 1984), o volume reservado para o controle de enchente corresponde ao intervalo da cota 120 a 124m ( $0,699 \text{ km}^3$ ). Com esse volume a cheia de projeto de 30 anos de tempo de retorno ( $4.510 \text{ m}^3/\text{s}$ ) poderia ser amortecida para a descarga máxima de  $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$ , que no projeto foi considerada como limite de inundação de Cachoeira/São Félix. Na prática foi adotada a vazão de  $1.700 \text{ m}^3/\text{s}$ . Para amortecer a cheia de 100 anos de tempo de retorno ( $5.940 \text{ m}^3/\text{s}$ ), para o limite de inundação de projeto, seria necessário guardar volume a partir da cota 116,6 m.

Destaca-se que as vazões diárias do período de estiagem eram geradas pela abertura do primeiro estágio das comportas com descargas entre  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $60 \text{ m}^3/\text{s}$  constantes durante cerca de 5 horas.

A implantação da Usina Hidrelétrica (UHE) Pedra do Cavalo ( $165,3 \text{ MW}$ ) em 2005 modificou a operação da barragem. Trata-se de uma usina de ponta, contendo duas turbinas de eixo vertical com  $82,65 \text{ MW}$  de potência e vazão máxima de  $80 \text{ m}^3/\text{s}$  cada. A produção de energia equivale a  $700.000 \text{ MWh/ano}$ , sendo suficiente para abastecer uma cidade de 250 mil habitantes. O nível do reservatório deve oscilar entre as cotas 108 m e 120 m, sendo 114,5 m a cota de referência ao longo do ano para a operação normal da geração de energia. A vazão afluyente ao estuário vai depender da operação das turbinas, podendo liberar até  $80 \text{ m}^3/\text{s}$  (1 turbina) ou chegar próximo de  $160 \text{ m}^3/\text{s}$  (2 turbinas). No período de estiagem, são gerados pulsos de vazão constante liberada por uma turbina durante algumas horas do dia para chegar à vazão média diária de  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ , adotada como vazão sanitária.

## **4 CARACTERIZAÇÃO DO REGIME HIDROLÓGICO DO RIO PARAGUAÇU**

As características hidrológicas do Rio Paraguaçu, incluindo sua variabilidade interanual, são importantes para a definição do grau de modificação da descarga fluvial no estuário, antes e após a construção da Barragem Pedra do Cavalo. Neste capítulo será apresentada a análise do seu regime hidrológico.

A avaliação das condições hidrológicas anteriores e posteriores à barragem abrangem as seguintes etapas:

- Verificação da disponibilidade de dados;
- Caracterização do regime hidrológico;
- Análise das alterações hidrológicas.

### **4.1 DADOS DISPONÍVEIS**

Na bacia hidrográfica do Rio Paraguaçu existe uma rede de monitoramento hidrológico considerável. A maior parte dos postos fluviométricos e pluviométricos com séries de dados extensas pertencem a Agência Nacional da Águas (ANA). Recentemente (2 anos), a Superintendência de Recursos Hídricos (SRH) do Estado da Bahia instalou novos postos, com objetivo de complementar a rede nacional.

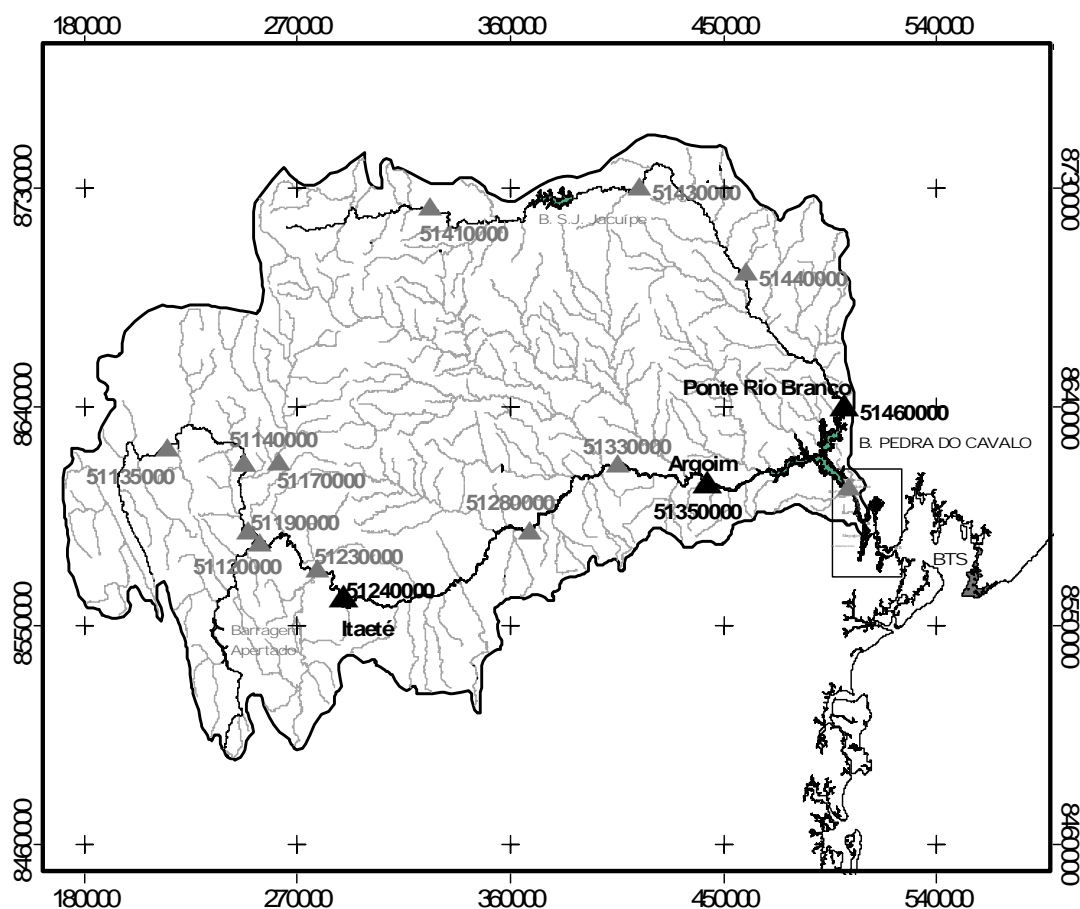
Os principais postos para a análise das vazões afluentes ao estuário do Rio Paraguaçu são dois: 51350000 – Argoim e 51460000 – Ponte Rio Branco. Estes postos monitoram as águas dos dois afluentes mais importantes da Barragem Pedra do Cavalo (Rio Paraguaçu e Rio Jacuípe), um pouco antes de entrarem no reservatório. A Tabela 4.1 mostra as características destes postos, bem como dos postos localizados a montante (postos de apoio), com destaque para posto 51240000 – Itaeté, que servirá de apoio à análise da variabilidade interanual, pois tem série de dados mais extensa que a de Argoim. Um único posto a jusante, 51490000 – Pedra do Cavalo, não será utilizado, pois esteve sob efeito da barragem de Bananeiras que ficou submersa no lago da Barragem Pedra do Cavalo (Figura 4.1).

Outros dados importantes são as vazões liberadas pelas comportas da Barragem Pedra do Cavalo, constituindo praticamente a totalidade da entrada de água doce para o estuário, já

que a barragem está na cabeceira do mesmo. As vazões afluentes ao reservatório são monitoradas também pela Empresa Baiana de Saneamento SA – EMBASA - através dos postos fluviométricos 51350000 e 51460000, que juntamente com a análise da variação do volume do reservatório, permite contabilizar a contribuição das bacias hidrográficas sem monitoramento. Ambas as séries foram disponibilizada pela EMBASA, entidade operadora da barragem, e mais recentemente (2005) pela Votorantim Cimentos Ltda.

**Tabela 4.1 Postos fluviométricos de interesse.**

Código	Nome do posto	Rio	Coordenadas		Entidade	Área de drenagem (km <sup>2</sup> )	Período de observação	
			UTM[m]	UTM[m]			início	Fim
51240000	Itaeté	Paraguaçu	288494	8562038	ANA	13.610	04/31	12/03
51280000	Iaçu	Paraguaçu	367180	8588680	ANA	21.621	11/29	12/03
51330000	Fazenda Santa Fé	Paraguaçu	404383	8616029	ANA	31.488	03/66	12/03
51350000	Argoim	Paraguaçu	442301	8608716	ANA	37.345	07/46	12/03
51420000	São José do Jacuípe	Jacuípe	413659	8730888	ANA	4.000	5/68	2/74
51430000	Gavião II	Jacuípe	458601	8695519	ANA	4.375	06/68	12/03
51440000	Riachão do Jacuípe	Jacuípe	500000	8640257	ANA	6.795	05/65	12/03
51460000	Ponte Rio Branco	Jacuípe	502172	8607082	ANA	10.560	12/29	12/02
51490000	Pedra do Cavalo	Paraguaçu	288494	8562038	ANA	53.866	01/40	02/79

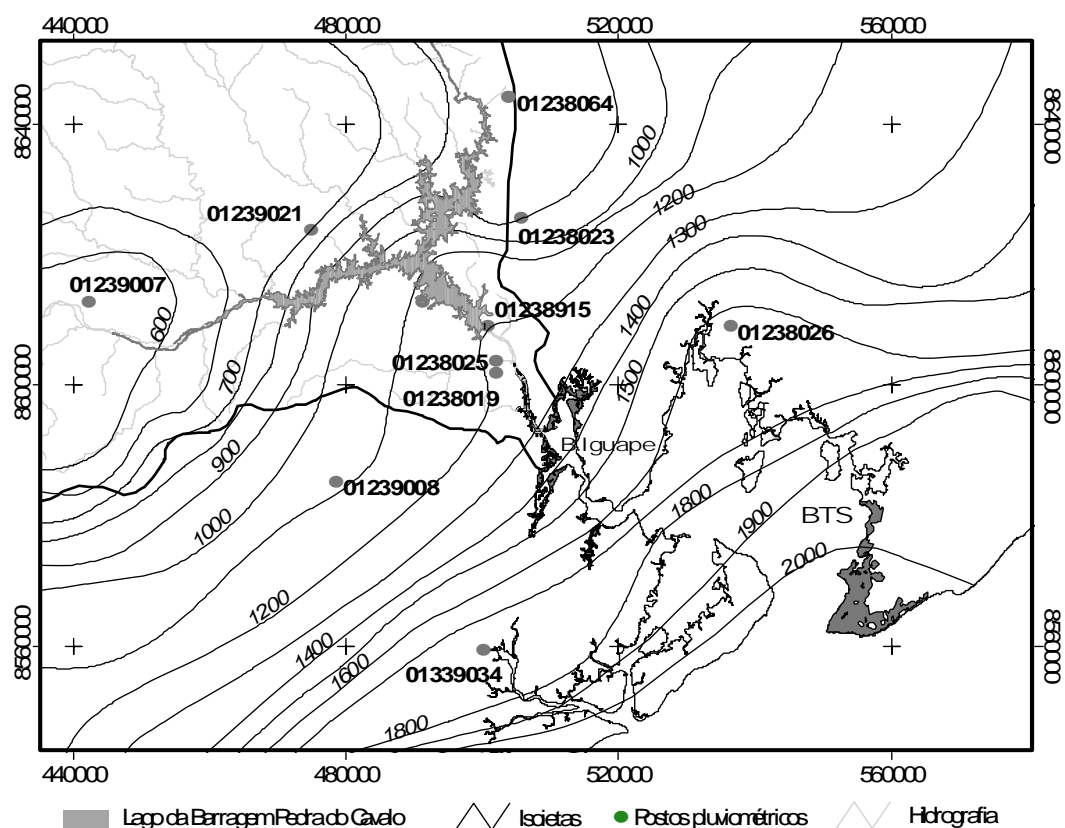


**Figura 4.1 Rede de monitoramento fluviométrico na bacia do Rio Paraguaçu. Coordenadas UTM.**

Em termos de pluviometria, os postos de interesse para o estuário do Rio Paraguaçu são apresentados na Tabela 4.2. Eles englobam a região do estuário e do lago do reservatório da Barragem de Pedra do Cavalo (Figura 4.2). A relação inclui também o posto 01241017 – Porto, localizada no município de Lençóis, na Chapada Diamantina, para permitir a caracterização da chuva na bacia hidrográfica.

**Tabela 4.2 Postos pluviométricos de interesse.**

Nome	Código	Entidade	Coordenadas		Dados		Precipitação anual [mm]
			UTM [m]	UTM [m]	Início	Fim	
Muritiba	01238019	SUDENE	501810	8601553	01/1946	09/1988	1315
São Gonçalo dos Campos	01238023	SUDENE	505434	8625512	01/1964	11/1990	1148
São Félix	01238025	SUDENE	501810	8603396	08/1945	08/1991	1181
São Bento das Lages	01238026	SUDENE	536208	8608902	03/1936	12/1964	1878
Feira de Santana	01238064	SUDENE	503625	8643943	07/1936	08/1988	988
Pedra do Cavalo	01238915	EMBASA	500556	8608974	03/1984	12/2003	1198
Usina Bananeiras	01239004	SUDENE	490947	8612610	08/1927	04/1971	1102
Argoim	01239007	ANA	442059	8612553	01/1975	12/2002	655
Conceição do Almeida	01239008	SUDENE	478294	8584957	02/1965	06/1989	1194
Santo Estevão	01239021	SUDENE	474641	8623658	07/1941	05/1965	1366
Nazaré	01339034	ANA	500000	8559161	05/1943	12/2003	1863
Porto	01241017	SUDENE	246383	8618867	01/1949	04/1999	951



**Figura 4.2** Localização dos postos pluviométricos na região estuarina e entorno. As isoietas foram determinadas por BAHIA(2003). As eventuais discrepâncias da chuva anual dos postos em relação às isoietas decorrem, provavelmente, da utilização de dados de diferentes postos e períodos.

## 4.2 METODOLOGIA DA ANÁLISE HIDROLÓGICA

### 4.2.1 Caracterização do regime hidrológico

O regime hidrológico do estuário do Rio Paraguaçu será descrito em suas características diárias, mensais, anuais e interanuais. As vazões diárias serão objeto de análise para o conhecimento da magnitude e forma das cheias que chegavam ao estuário antes da construção da Barragem Pedra do Cavalo. Em termos mensais, a precipitação permitirá apresentar a variabilidade sazonal da chuva tanto no estuário quanto na bacia hidrográfica. O regime das vazões mensais que chegam ao estuário será representado através dos valores médios, máximos e mínimos. A seguir proceder-se-á ao estabelecimento das vazões médias anuais dos postos Argoim (51350000) e Ponte do Rio Branco (51460000).

É importante adotar o ano hidrológico estabelecido segundo a sazonalidade climática, que normalmente se diferencia do ano civil. O ano hidrológico começa no mês onde, em média, inicia o período de chuvas, terminando doze meses após. No caso da bacia do Rio Paraguaçu, o início das chuvas ocorre geralmente no mês de outubro, de modo que o ano hidrológico se estende de outubro (ano anterior) a setembro (do ano especificado).

Ainda, para definir as vazões anuais, será necessário realizar o preenchimento da série, utilizando dados diários, mensais e anuais. Os postos de montante servirão de apoio às análises de correlação através de regressões lineares, procedimento este bastante comum nas aplicações hidrológicas (Clarke, 1993).

#### 4.2.1.1 Definição das características dos hidrogramas de cheia do Rio Paraguaçu

A análise das cheias do Rio Paraguaçu será realizada com objetivo caracterizar a forma do hidrograma, mais especificamente a fase de recessão, de maneira que os efeitos das enchentes sobre o estuário possam ser avaliados durante a caracterização hidrodinâmica.

A fase de recessão é considerada neste estudo pelas vazões compreendidas no período entre o dia da vazão máxima e o dia em que a vazão tem magnitude igual ou próxima daquela que escoava antes da cheia. A recessão de um hidrograma pode ser representada por uma equação exponencial do tipo:

$$Q_t = Q_0 e^{-k \cdot dt} \quad \text{Equação 4.1}$$

onde  $Q_t$  = a vazão após  $t$  intervalos de tempo;  $Q_0$  = vazão de referência no tempo 0 (vazão máxima);  $k$  = o coeficiente de recessão; e  $dt$  = intervalo de tempo entre  $Q_0$  e  $Q_t$ . Adotando o intervalo de tempo de um dia, o valor de  $k$  pode ser calculado por:



$$k = \ln(Q_0) - \ln(Q_t)$$

**Equação 4.2**

Estabeleceu-se que dentre os eventos de cheia registrados nas estações seriam selecionados aqueles em que a vazão máxima no Rio Paraguaçu fosse igual ou superior a 350 m<sup>3</sup>/s, valor que corresponde a vazões de frequência anual (50% da vazão com Tr = 2 anos) ou superior, conforme indica a Tabela 4.3.

**Tabela 4.3 Vazões máximas anuais (m<sup>3</sup>/s) para diversos Tempos de Retorno (Tr) (BAHIA, 1996).**

Posto Fluviométrico	Tr=2 anos	Tr=5 anos	Tr=10 anos	Tr=20 anos	Tr=50 anos	Tr= 100 anos
Argoim	700	1200	1626	2066	2706	3239
Ponte Rio Branco	200	650	1158	1903	3329	4832

#### 4.2.1.2 Análise da variabilidade interanual

A análise da variabilidade interanual é fundamental para a gestão dos recursos hídricos no que se refere ao abastecimento humano, irrigação, geração de energia e controle de cheias (Tucci, 2002; Franks e Wagener, 2005), bem como para o gerenciamento de reservatórios, a previsão hidrológica, a regulamentação da outorga de direito de uso da água e a análise de alterações hidrológicas, sejam estas decorrentes de mudança climática ou da intervenção humana na bacia hidrográfica.

O comportamento interanual está diretamente ligado à variabilidade climática, sendo responsável por alterações hidrológicas naturais, influenciando as condições de umidade e escoamento na bacia hidrográfica.

Nos estudos de variabilidade climática (e.g. Robertson e Mechoso, 1998; Mélice e Servain, 2003; Pekárová *et al.*, 2003) procede-se à normalização da série para definir a chamada *anomalia*, que considera a variação do parâmetro em torno da média, em proporção a um desvio padrão. No caso das vazões a anomalia é calculada por:

$$Anomalia = \frac{(Q - Q_m)}{\sigma}$$

**Equação 4.3**

onde: Q = vazão anual; Q<sub>m</sub> = Vazão média de longo período; σ = desvio padrão.

##### 4.2.1.2.1 Curva de vazões anuais acumulada

O uso de gráfico de vazões acumuladas, também chamado de gráfico de massa ou diagrama de Rippl, era comum nos antigos estudos de dimensionamento do volume de reservatórios. Porém, esse mesmo gráfico pode servir para definir períodos de diferentes

condições hídricas, à medida que a maior ou menor inclinação da curva corresponde a anos sequenciais mais chuvosos, mais secos ou médios.

A comparação entre diferentes rios, postos fluviométricos de um mesmo rio ou mesmo com postos pluviométricos pode ser realizada através da divisão da vazão/precipitação acumulada pela respectiva média, tornando os valores adimensionais. Desta maneira, proporcionam-se mais opções de escolha na definição do posto fluviométrico representativo do regime hidrológico da bacia e até mesmo na identificação de mudanças na tendência das vazões quando comparadas com a precipitação.

O comportamento da curva acumulada pode ser mais bem representado através do cálculo do gradiente médio entre um certo número de anos (e.g. 3, 5, 7, 11 anos), conforme as periodicidades climáticas. A equação que define o gradiente médio é dada por:

$$Gt = (Qac_{i+n} - Qac_i) / (Ano_{i+n} - Ano_i) \quad \text{(Equação 4.4)}$$

onde:  $Gt$  = gradiente [ $m^3/s/ano$ ];  $Qac_i$  = vazão acumulada no ano  $i$  [ $m^3/s$ ];  $Qac_{i+n}$  = vazão acumulada no ano  $i$  mais o intervalo de  $n$  anos [ $m^3/s$ ];  $Ano_i$  = ano  $i$ ;  $Ano_{i+n}$  = ano  $i$  mais o intervalo de  $n$  anos.

#### 4.2.1.2.2 *Análise de periodicidades das vazões*

A variação da vazão fluvial é decorrente da interação de vários fatores físicos, mas principalmente da precipitação. A variação da precipitação obedece a fenômenos que variam de escala regional a planetária. As frequências de flutuações da precipitação e vazão fluvial abrangem desde as variações sazonais até decênios. Apesar dos estudos de variabilidade climática trabalhar, em geral, com a precipitação, a utilização da vazão é justificada pelos seguintes motivos (Pekárová *et al.*, 2003):

- As mudanças na vazão acentuam as alterações ocorridas na precipitação;
- O balanço hídrico na bacia não depende somente da precipitação, mas também da temperatura, insolação, evapotranspiração;
- As medidas de vazão na saída da bacia hidrográfica são mais simples e mais precisas em comparação com a determinação da precipitação média na bacia;
- As análises das oscilações de longo prazo em grandes rios eliminam as variações na precipitação e na temperatura decorrentes de processos orográficos locais.

Segundo estudo de Pekárová *et al.* (2003), a análise estatística de séries extensas de grandes rios do planeta mostrou ciclos de 3, 6, 7, 13-14, 20-22 e 28-32 anos para os eventos

de cheias extremas. A identificação destas diferentes frequências depende obviamente do tamanho da série temporal, sendo que ciclos de 28-32 anos só foram observados em locais com séries temporais superiores a 100 anos.

A ocorrência de fenômenos cíclicos na hidrologia será avaliada através de filtros de média móvel, simples ou modificados, e pela análise espectral.

Pekárová *et al.* (2003) utilizou vários tipos de filtros na busca de identificar tendências de longo prazo. Dentre eles serão aplicados os filtros de média móvel ponderada de Henderson (Abraham e Ledolter, 1983) e Spencer (Weisstein, 2004).

A análise espectral será aplicada com métodos paramétricos (Emery e Thomson, 1997; Ghill *et al.*, 2002) e não paramétricos (Emery e Thomson, 1997). Os métodos *paramétricos* analisam a variabilidade da série, determinando parâmetros. Os métodos baseados na convencional transformada de Fourier são chamados de *não paramétricos* e definidos independentemente da série temporal. Os métodos paramétricos são indicados para análise de séries curtas (poucos ciclos da oscilação de interesse) enquanto que os métodos não paramétricos destinam-se às séries longas (vários ciclos da oscilação de interesse) (Emery e Thomson, 1997).

#### **4.2.2 Avaliação das alterações hidrológicas**

As alterações hidrológicas de um rio podem ser decorrentes da variabilidade climática (fenômeno natural) ou das intervenções humanas na bacia hidrográfica, sendo que neste trabalho o enfoque é para as alterações devidas à construção de uma grande barragem.

A análise das alterações hidrológicas será desenvolvida utilizando três métodos:

- 1) Grau de regularização;
- 2) Curva de permanência;
- 3) Indicadores de regime Hidrológico Alterado.

##### **4.2.2.1 Grau de regularização**

Uma das características de todo reservatório é a sua capacidade de regularizar as vazões. A vazão regularizada é aquela vazão que o reservatório pode suprir, inclusive no período crítico, dentro da garantia de atendimento, à demanda estabelecida. O grau de regularização de um reservatório pode ser definido pela seguinte relação:

$$GR = \frac{Q_{reg} - Q_{min}}{Q_m - Q_{min}} \cdot 100 \qquad \text{Equação 4.5}$$

onde,  $GR$  = grau de regularização [%];  $Q_m$  = vazão média de longo período [ m<sup>3</sup>/s];  $Q_{min}$  = mínima vazão mensal [m<sup>3</sup>/s];  $Q_{reg}$  = vazão regularizada [m<sup>3</sup>/s], com determinada garantia de atendimento à demanda. Normalmente são utilizadas as garantias de 95% e 90% para os projetos de abastecimento humano e irrigação, respectivamente. A máxima vazão que pode ser regularizada em um rio é a  $Q_m$ , então neste caso  $GR = 100\%$ .

Como a vazão regularizada é um dado de projeto, o grau de regularização de um reservatório pode servir como um indicador do potencial de alteração hidrológica, inclusive na etapa de avaliação dos impactos.

#### 4.2.2.2 Mudanças na curva de permanência

A curva de permanência analisa a frequência de ocorrência das vazões em um determinado ponto do rio. Ela apresenta o tempo em que uma determinada vazão é igualada ou superada, ou seja, a permanência da vazão. Abrangendo toda a amplitude de vazões da série histórica, a forma da curva da permanência das vazões permite caracterizar o regime hidrológico de um rio. As vazões com alta permanência (as vazões menores), têm sido bastante utilizadas como vazão de referência para o gerenciamento dos recursos hídricos.

Benn e Erskine (1994), analisando os efeitos da construção da barragem de Windamere (368 milhões m<sup>3</sup>) no Cudgegong River (área da bacia = 1070 km<sup>2</sup>), Austrália, propuseram a avaliação das alterações hidrológicas utilizando as curvas de permanência, através da comparação do comportamento entre uma estação de controle, sem influência de barragens e com condição hidrológica semelhante, com relação a uma estação sob impacto de barragem. Para tornar a comparação mais exata, além da comparação gráfica, os autores sugerem a seguinte equação:

$$P_c = \left\{ \left[ \frac{(X_2 / X_1)}{(Y_2 / Y_1)} \right] - 1 \right\} \cdot 100 \quad \text{Equação 4.6}$$

onde:  $P_c$  = percentual de mudança da vazão diária de uma determinada permanência;  $X_1$  e  $X_2$  = vazão média diária de uma determinada permanência no posto fluviométrico sob impacto de barragem para os períodos pré e pós-barragem, respectivamente;  $Y_1$  e  $Y_2$  = vazão média diária de uma determinada permanência no posto de referência para os períodos pré e pós-barragem, respectivamente. Quando a vazão pós-barragem ( $X_2$ ) é zero,  $P_c$  nas equações 5.2 e 5.3 resulta em  $-100\%$ , independente do valor da vazão pré-barragem ( $X_1$ ).

É importante destacar que a formulação proposta por Benn e Erskine (1994) considera eventuais diferenças de magnitude das vazões devido à variabilidade climática.

#### 4.2.2.3 Indicadores de regime Hidrológico Alterado (IHA)

A avaliação dos efeitos de barragens pode ser mais bem qualificada se as alterações hidrológicas forem identificadas com clareza. Richter *et al.* (1996,1999) propuseram o método de análise de Indicadores de regime Hidrológico Alterado - IHA ("Indicators of Hydrologic Alterations"). O IHA é dividido em cinco grupos principais de análise, cada um enfocando diferentes características do regime hidrológico relacionadas com aspectos dos ecossistemas aquáticos. Dentro de cada grupo vários parâmetros são analisados (Tabela 4.4).

**Tabela 4.4 Resumo dos parâmetros hidrológicos usados pelo IHA método (Richter, 1999).**

Grupo	Característica	Parâmetro
1. Magnitude das vazões mensais	Magnitude	1 a 12. Vazão média mensal (doze meses)
	Distribuição temporal	
2. Magnitude e duração de vazões anuais extremas	Magnitude	13. Vazão máxima diária
		14. Vazão mínima diária
	Duração	15. Vazão máxima de 3 dias
		16. Vazão mínima de 3 dias
		17. Vazão máxima de 7 dias
		18. Vazão mínima de 7 dias
		19. Vazão máxima de 30 dias
		20. Vazão mínima de 30 dias
		21. Vazão máxima de 90 dias
		22. Vazão mínima de 90 dias
		23. Número de dias com vazão nula
		24. Vazão mínima de 7 dias dividida pela vazão média anual (escoamento de base)
3. Época das vazões anuais extremas	Época de ocorrência	25. Dia Juliano de cada vazão máxima diária anual
4. Freqüência e duração dos pulsos de vazões altas e baixas	Magnitude	26. Dia Juliano de cada vazão mínima diária anual
		27. Número de eventos de cheia em cada ano
	Freqüência	28. Número de eventos de seca em cada ano
		29. Duração média dos eventos de cheia anual
5. Taxa/Freqüência de mudanças no hidrograma	Duração	30. Duração média dos eventos de seca anual
		31. Média de todas as diferenças positivas de dias consecutivos
	Freqüência da taxa de mudança	32. Média de todas as diferenças negativas de dias consecutivos
		33. Número de reversões

Dos 33 parâmetros, dezessete são direcionados para a análise da magnitude, duração, tempo de ocorrência e freqüência de eventos extremos - grupos 2, 3, 4 (n. 27 e 28) e 5 (n. 33) - devido à forte influência sobre o ecossistema e a geomorfologia. Os demais parâmetros medem a tendência central, tanto da magnitude como da taxa de variação.

Em termos de avaliação das alterações hidrológicas, o IHA possibilita destacar mudanças na distribuição temporal das vazões (grupos 1, 2 e 3), além de variações nas características de forma do hidrograma (grupos 4 e 5), enquanto que a análise da curva de permanência apresenta as alterações em termos de magnitude do comportamento hidrológico geral do rio.

A partir das avaliações do método IHA, com base no paradigma de manutenção do regime hidrológico natural, Richter *et al.* (1997) adotaram uma sistemática de análise que considera um regime de variação admissível – RVA (“Range Variability Approach”). O método RVA usa como valor padrão ou inicial a média  $\pm$  um desvio padrão para definir o limite da faixa de variação, ou a mediana e os valores para os percentis de 25 e 75%. No entanto, segundo os autores, outros limites podem ser escolhidos (p. ex. vazões ecológicas conhecidas, vazões extremas ou com determinada permanência, 2 desvios padrões) a depender das características de cada sistema, podendo ser diferente nos vários parâmetros do IHA.

O grau de alteração hidrológica de determinada vazão é definido por:

$$IHA = (Q_{obs} - Q_{esp})/Q_{esp} \quad \text{Equação 4.7}$$

onde:  $Q_{esp}$  = a frequência com que os valores anuais se situam na faixa do RVA correspondente aos valores pré barragem; e  $Q_{obs}$  = a frequência com que os valores anuais do período pós barragem estão dentro da faixa do RVA estabelecido

A análise do IHA no caso da Barragem de Pedra do Cavalo, em lugar de comparar de forma tradicional dois períodos distintos da série de vazões, tal como a curva de permanência, será realizada através dos dados de monitoramento das vazões afluentes (montante) e defluentes (jusante), fornecidas pela EMBASA, que correspondem ao período de 1987 a 2003, segundo o ano hidrológico. Isso permitirá avaliar diretamente os efeitos da barragem sobre o regime hidrológico. O RVA será definido com base na mediana e os percentis de 25 e 75%.

## 4.3 RESULTADOS

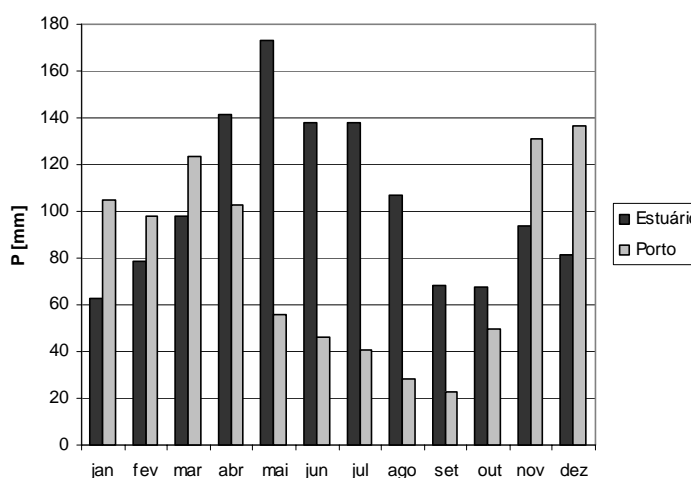
### 4.3.1 Precipitação

O estuário do Rio Paraguaçu está localizado em uma região que apresenta um alto gradiente de redução da precipitação desde o litoral, passando pela BTS, em direção ao

interior do continente (Figura 4.2). Considerando o trecho do estuário desde a Barragem Pedra do Cavalo até o fim do Canal do Paraguaçu, a precipitação varia de 1.200 a 1.600 mm (isoietas anuais definidas no PERH por BAHIA, 2003) (Figura 4.2).

Para determinar a precipitação anual e caracterizar a sazonalidade da precipitação no estuário, os seguintes postos no trecho do baixo curso do Rio Paraguaçu foram selecionados (Tabela 4.2): 01238025 – São Félix e 01238915 – Pedra do Cavalo.

A distribuição das precipitações ao longo do ano é apresentada na Figura 4.3. O período chuvoso principal vai de março a agosto, enquanto que o mês mais seco, na média, é janeiro, sendo que os meses de setembro e outubro constituem um outro período de chuvas baixas. Devido à variabilidade das condições climáticas que são encontradas na bacia hidrográfica do Rio Paraguaçu (Figura 4.4), a precipitação do estuário tem uma distribuição diferenciada daquela que gera cheias no rio. O posto de Porto, localizado no município de Lençóis, na borda da Chapada Diamantina (Figura 4.4), ilustra o período chuvoso na bacia hidrográfica (novembro a abril) (Figura 4.3).



**Figura 4.3 Distribuição sazonal da precipitação no estuário e na bacia hidrográfica.**

A precipitação média anual foi de 1.228 mm, com desvio padrão de 277 mm. A variabilidade interanual é apresentada na Figura 4.5. A maior precipitação ocorreu em 1974 (1877 mm) e a menor em 1993 (653 mm).

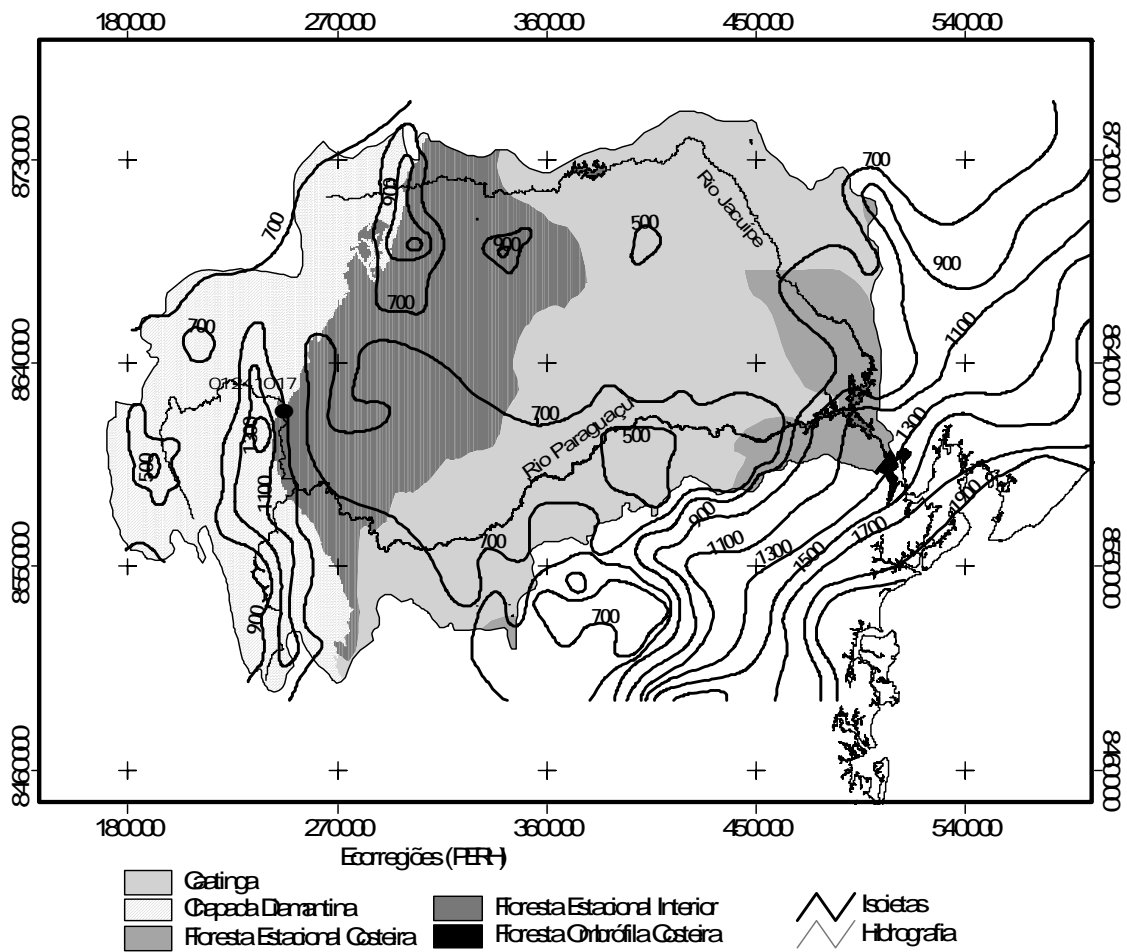


Figura 4.4 Ecorregiões definidas pelo Plano Estadual de Recursos Hídricos (BAHIA, 2003) e isoietas da precipitação anual destacam a variabilidade climática ao longo da bacia hidrográfica do Rio Paraguaçu. Destaca-se a localização do posto Porto (01241017) no limite da Chapada Diamantina (●).

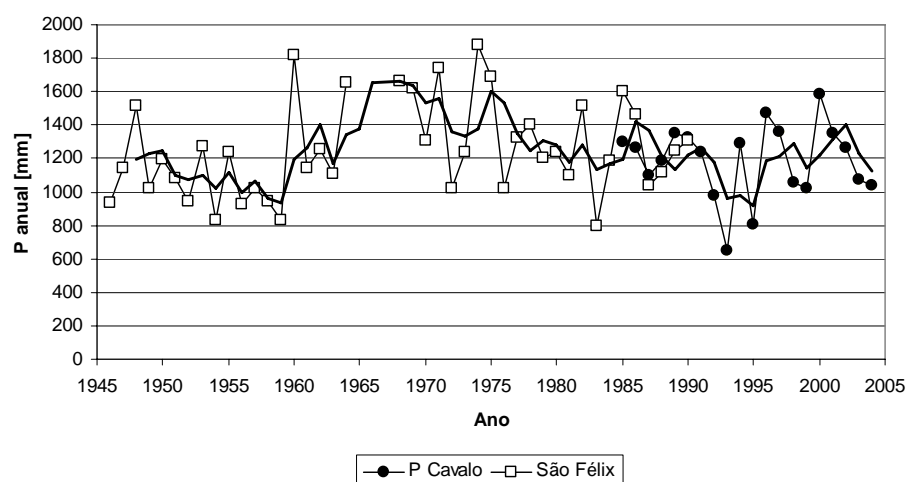


Figura 4.5. Variabilidade da precipitação anual no estuário, considerando os potos São Felix e Pedra do Cavallo. Linha em negrito representa a curva de média móvel de 3 anos e indica que o período mais crítico, de anos sequenciais de baixa precipitação, ocorreu na década de 1950.



### 4.3.2 Vazões

As séries de vazões médias mensais e anuais foram definidas para os postos fluviométricos Argoim - 51350000 – Rio Paraguaçu (1947 a 2003) e Ponte do Rio Branco – 51460000 – Rio Jacuípe (1947 a 2002) (vide Tabela 4.1 e Figura 4.1), após o preenchimento das falhas (ver Anexo 1).

#### 4.3.2.1 Vazões mensais

A vazão média mensal afluyente à Barragem Pedra do Cavalo (Figura 4.6) é representada através dos postos fluviométricos Argoim e Ponte Rio Branco. O período de maiores vazões vai de novembro a maio (entre 59 m<sup>3</sup>/s e 174 m<sup>3</sup>/s no Rio Paraguaçu e entre 6 m<sup>3</sup>/s e 28 m<sup>3</sup>/s no Rio Jacuípe). As enchentes acontecem freqüentemente em dezembro, podendo ocorrer também em janeiro, fevereiro e março (Figura 4.7). O período de vazões menores abrange os meses de junho a outubro, sendo o mês de setembro o de menor vazão (22,9 m<sup>3</sup>/s – Rio Paraguaçu e 0,8 m<sup>3</sup>/s – Rio Jacuípe).

Nas vazões mensais mínimas (Figura 4.8) destaca-se o regime intermitente do Rio Jacuípe, que pode apresentar vazão nula durante todos os dias de qualquer mês do ano. O Rio Paraguaçu registrou os maiores valores de vazões mensais mínimas históricas nos meses de junho e julho (5,9 m<sup>3</sup>/s e 8,7 m<sup>3</sup>/s, respectivamente), embora estejam dentro do período de vazões médias mensais baixas. Nesses meses as vazões são influenciadas pelos sistemas que atuam no inverno (Distúrbios de Leste). A menor vazão mensal foi registrada no mês de outubro (0,8 m<sup>3</sup>/s), seguida pelo mês de março (1,8 m<sup>3</sup>/s).

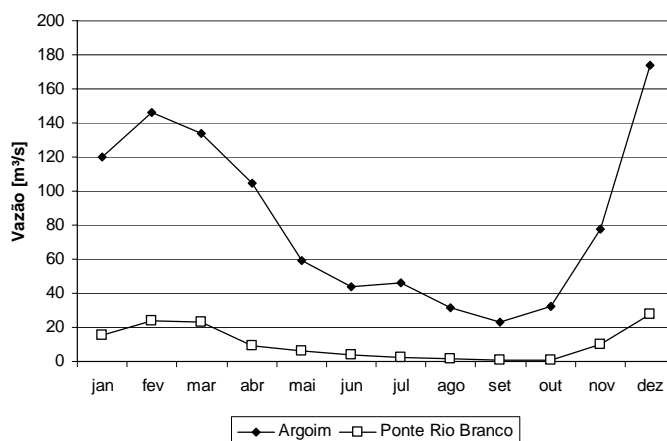
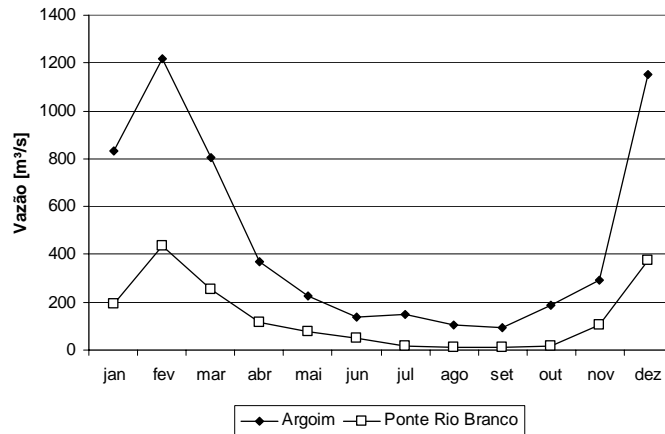
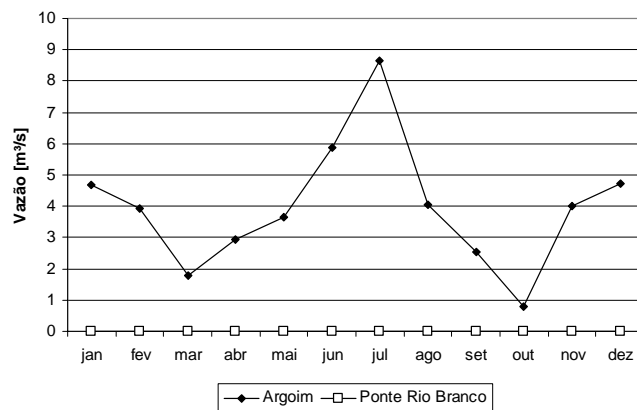


Figura 4.6 Vazões mensais médias: Rio Paraguaçu (Argoim) e Rio Jacuípe (Ponte Rio Branco).



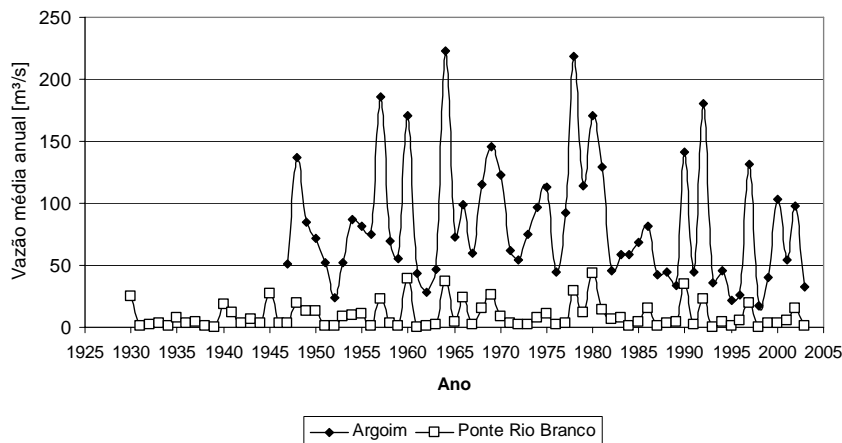
**Figura 4.7 Vazões mensais históricas máximas: Rio Paraguaçu (Argoim) e Rio Jacuípe (Ponte Rio Branco).**



**Figura 4.8 Vazões mensais históricas mínimas: Rio Paraguaçu (Argoim) e Rio Jacuípe (Ponte Rio Branco).**

#### 4.3.2.2 Vazões médias anuais

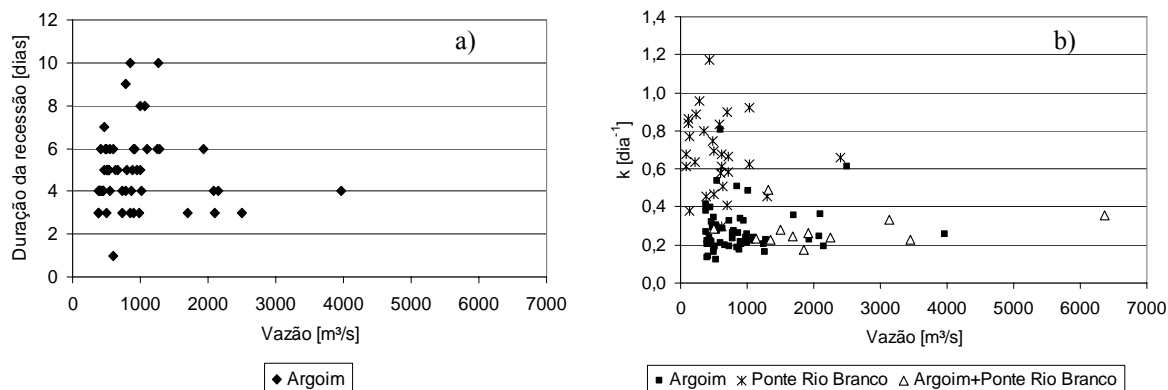
As vazões médias anuais para os rio Paraguaçu e Jacuípe, definidas para o ano hidrológico, são apresentadas na Figura 4.9 e no Anexo 1. A vazão de longo período, ou seja, a média dos valores anuais, no Rio Paraguaçu (Argoim) é de 83 m<sup>3</sup>/s (1947 a 2003), com desvio padrão de 50,1 m<sup>3</sup>/s. A vazão média anual máxima foi de 223 m<sup>3</sup>/s (1964) e a mínima de 17 m<sup>3</sup>/s (1998). A vazão específica (vazão de longo período/área da bacia de drenagem) em Argoim resultou em 2,22 l/s/km<sup>2</sup>. No Rio Jacuípe, em Ponte do Rio Branco, com uma bacia hidrográfica cerca de 3,5 vezes menor que de Argoim, as magnitudes das vazões são inferiores, apresentando uma vazão de longo período de 9,51 m<sup>3</sup>/s e desvio padrão de 10,5 m<sup>3</sup>/s. A vazão média anual máxima foi de 43 m<sup>3</sup>/s (1980) e a mínima de 0,28 m<sup>3</sup>/s (1993). A vazão específica em Ponte Rio Branco resultou em 0,88 l/s/km<sup>2</sup>. A variabilidade interanual das vazões será analisada no item 4.3.4.



**Figura 4.9. Variabilidade das vazões média anuais: Rio Paraguaçu (Argoim) e Rio Jacuípe (Ponte Rio Branco).**

### 4.3.3 Características dos hidrogramas de cheia do Rio Paraguaçu

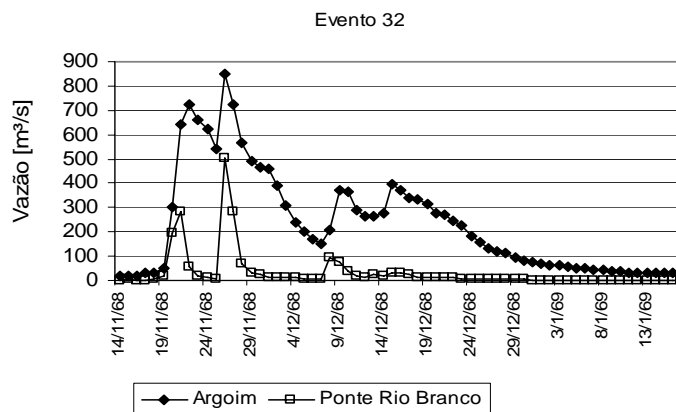
A caracterização dos hidrogramas de cheia do Rio Paraguaçu foi feita com base em 59 eventos do período anterior a construção da barragem, incluindo cheias simultâneas nos dois rios (ver Anexo 1). As vazões máximas variaram de 375 m<sup>3</sup>/s a 3972 m<sup>3</sup>/s no posto Argoim - Rio Paraguaçu, entre 86 m<sup>3</sup>/s e 2400 m<sup>3</sup>/s no posto Ponte Rio Branco - Rio Jacuípe e de 507 a 6372 m<sup>3</sup>/s nas cheias simultâneas (Figura 4.10a). O tempo de duração da recessão em média foi de 5 dias, variando de 1 a 10 dias (Figura 4.10b).



**Figura 4.10. Características dos hidrogramas de cheia dos Rio Paraguaçu e Jacuípe: a) duração da recessão das vazões do Rio Paraguaçu (Argoim) [dias] em relação à vazão máxima; b) variação do coeficiente de recessão  $k$  (equação 4.2) em relação à vazão máxima (cheias simultâneas foram aquelas em que a vazão máxima ocorreu no mesmo dia em ambos os rios, cujos hidrogramas formavam a cheia principal afluente ao estuário). Quanto maior o valor de  $k$  mais acentuada é a redução da vazão de um dia para o outro.**

A média de  $k$  para os eventos do Rio Paraguaçu em Argoim foi de 0,28, enquanto que para o Rio Jacuípe resultou em 0,68. Esses valores refletem as condições hidrológicas diferenciadas das bacias hidrográficas. O Rio Jacuípe é fortemente intermitente enquanto que o Rio Paraguaçu seca somente em estiagens extremas (Figura 4.11).

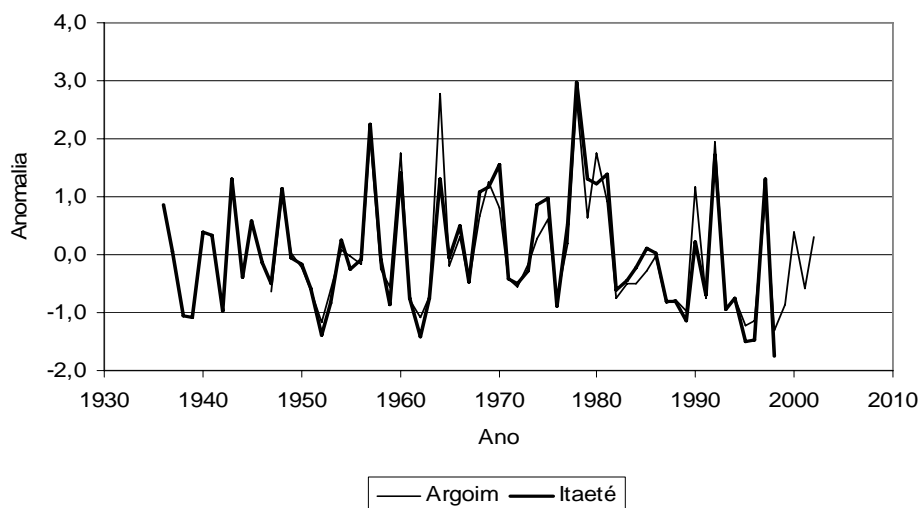
Com relação à fase de ascensão do hidrograma de cheia, a análise indicou ainda que ela pode ser muito rápida, passando de dezenas para várias centenas ou alguns milhares de metros cúbicos no intervalo de um dia.



**Figura 4.11 Exemplo de um hidrograma de cheia nos rios Paraguaçu (Argoim) e Jacuípe (Ponte Rio Branco). A menor capacidade de armazenamento da bacia hidrográfica do Rio Jacuípe se reflete na rápida redução das vazões após o pico da cheia e no maior valor de  $k$ .**

#### 4.3.4 Análise da variabilidade interanual

As séries de vazões normais dos postos Argoim e Itaeté são apresentadas na Figura 4.12. Embora Argoim seja o posto de referência para a avaliação das alterações na curva de permanência, a série de vazões normais do posto Itaeté tem maior extensão (1936 a 1998) e foi utilizada na análise espectral, como será visto adiante. A vazão média em Itaeté foi de 65 m<sup>3</sup>/s e o desvio padrão igual a 28,3 m<sup>3</sup>/s, sendo responsável por cerca de 70% da vazão média anual do rio, apesar de drenar uma área de 13.610 km<sup>2</sup> (~25% da área total da bacia). Embora os postos Argoim e Itaeté estejam afastados em cerca de 150 km a correlação entre as séries de vazões normais é alta ( $R^2 = 0,917$ ), devido à pequena contribuição à vazão anual da área de drenagem intermediária inserida no semi-árido (corresponde às ecorregiões Caatinga e Floresta Estacional Interior - Figura 4.4). A série de vazões em Itaeté foi limitada até 1998, pois o período posterior pode estar sob influência das modificações hidrológicas devido à conclusão da Barragem de Apertado (108,89 hm<sup>3</sup>), no alto curso do Rio Paraguaçu (Chapada Diamantina), no final de 1998.



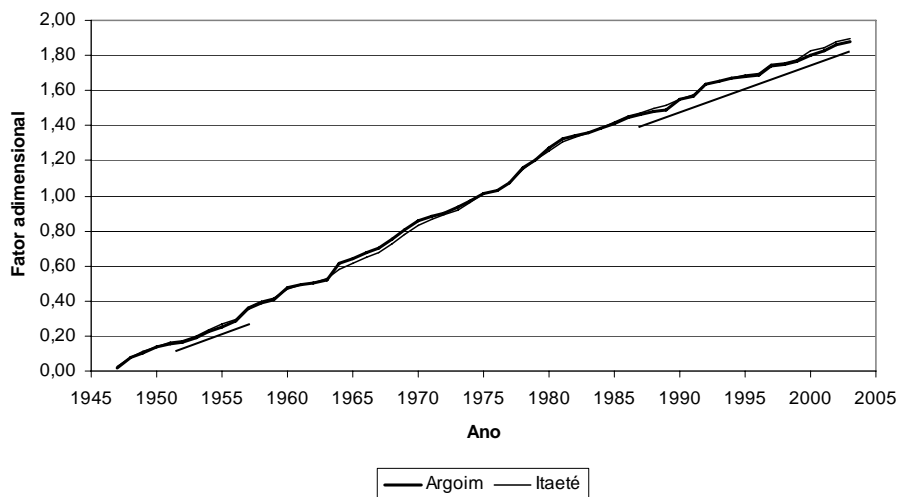
**Figura 4.12. Série de vazões médias anuais normais – Argoim e Itaeté.**

Utilizando a série de Itaeté, verificou-se que os três eventos de maior anomalia positiva ocorreram, em ordem decrescente, nos anos de 1978 ( $2,96 = 146,9 \text{ m}^3/\text{s}$ ), 1957 ( $2,24 = 126,7 \text{ m}^3/\text{s}$ ) e 1992 ( $1,72 = 112,1 \text{ m}^3/\text{s}$ ). No caso das anomalias negativas, os três eventos extremos ocorreram na década de 1990, a saber: 1998  $-1,76 = 14,9 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 1995  $-1,5 = 22,1 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 1996  $-1,48 = 22,8 \text{ m}^3/\text{s}$ . Outros dois eventos de anomalia negativa se destacaram: em 1952 ( $-1,38 = 25,4 \text{ m}^3/\text{s}$ ) e em 1962 ( $-1,42 = 24,4 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

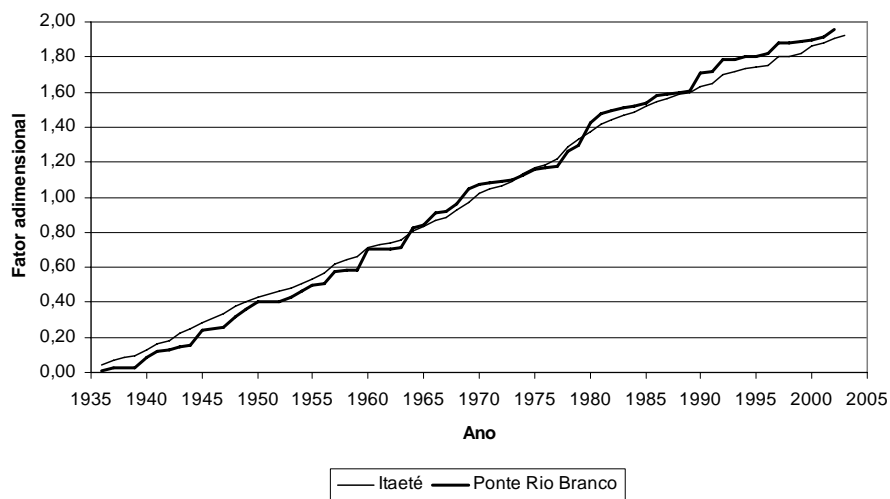
#### **4.3.4.1 Curva de vazões anuais acumuladas**

O comportamento dos postos Itaeté e Argoim, com base no gráfico de vazões normais acumuladas (Figura 4.13), para o período de dados coincidente, é praticamente o mesmo, o que permitiu fazer algumas análises com a série de dados mais extensa (Itaeté - limitada ao ano de 1998). O Rio Jacuípe, devido ao regime intermitente acentuado e a construção da Barragem de São Jose do Jacuípe (década de 1980), apresentou maiores oscilações (Figura 4.14).

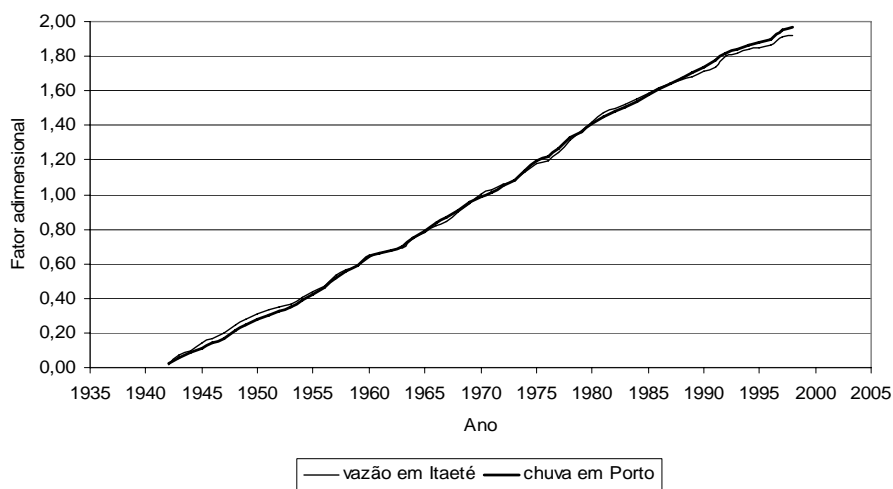
A semelhança entre a curva acumulada das vazões em Itaeté e a precipitação do posto Porto (Figura 4.15) demonstram que não houve mudança significativa na tendência das vazões anuais em virtude de intervenções na bacia hidrográfica e as variações da vazão são consequência da variabilidade climática no período analisado (sem o período pós Barragem Apertado).



**Figura 4.13** Vazões anuais normais acumuladas – Itaeté e Argoim.



**Figura 4.14** Vazões anuais normais acumuladas – Itaeté e Ponte Rio Branco.

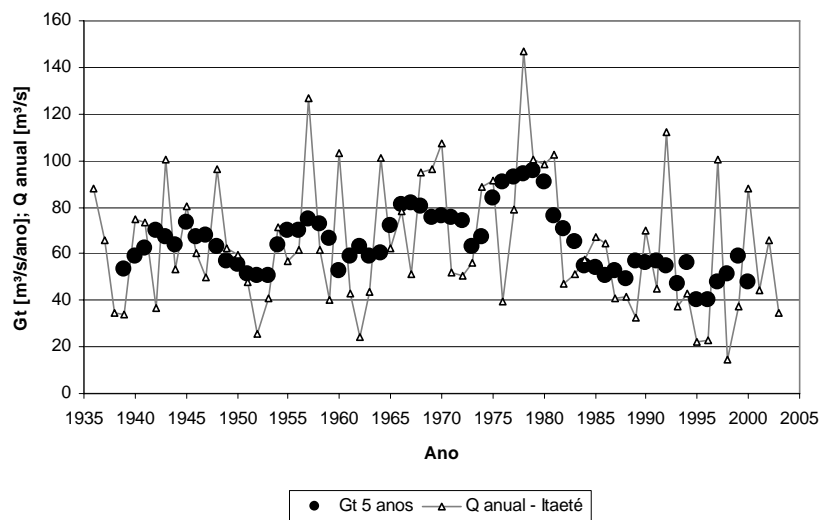


**Figura 4.15** Vazões em Itaeté e precipitação em Porto – curvas normais acumuladas.

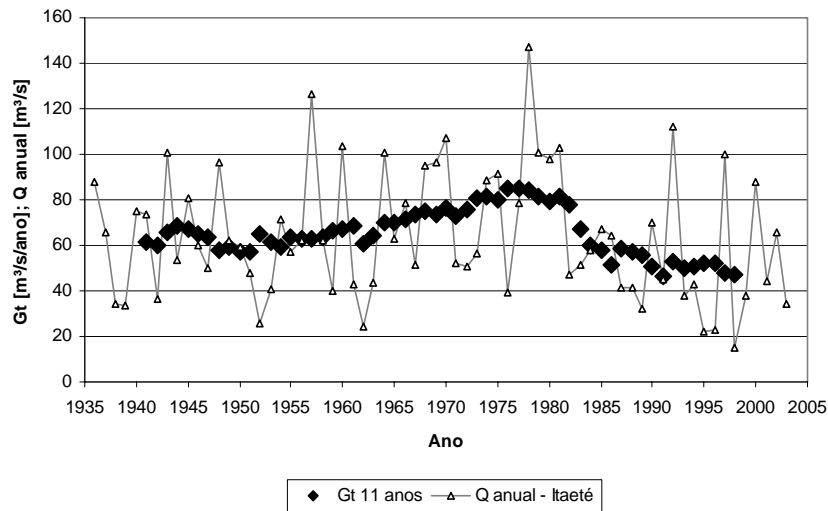
Os gradientes médios das vazões acumuladas foram determinados para os intervalos 5 anos e 11 anos (Figura 4.16 e Figura 4.17), segundo as periodicidades encontradas no item 4.3.4.2, e de maneira que permitissem identificar o comportamento da variabilidade interanual de forma mais abrangente.

Os gradientes para o intervalo de 5 anos (Figura 4.16) mostra que o período de maiores vazões anuais sequenciais ocorreu na segunda metade da década de 1970, estabelecendo um marco divisório na série de dados. Enquanto entre 1939 e 1975 o gradiente apresentou valor médio de  $66 \text{ m}^3/\text{s}/\text{ano}$  e desvio padrão de  $11 \text{ m}^3/\text{s}/\text{ano}$ , no período de 1980 a 2001 o valor médio foi de  $55 \text{ m}^3/\text{s}/\text{ano}$  e com desvio padrão de  $12 \text{ m}^3/\text{s}/\text{ano}$ .

A existência de um período mais úmido (gradientes maiores) e com tendência crescente até 1980 e bem mais seco, com tendência decrescente, nas vazões após 1981 fica mais claro nos gradientes com intervalo de 11 anos (Figura 4.17). Destaca-se ainda na Figura 4.17 que os gradientes do período 1985 a 1998 são praticamente todos inferiores àqueles do período anterior a 1980, indicando uma situação de menor vazão tanto no intervalo de variação quinquenal quanto decenal.



**Figura 4.16. Gradiente médio das vazões acumuladas (Gt) – intervalo de 5 anos. Vazão média anual (Qanual) em Itaeté.**



**Figura 4.17. Gradiente médio das vazões acumuladas (Gt) – intervalo de 11 anos. Vazão média anual (Qanual) em Itaeté.**

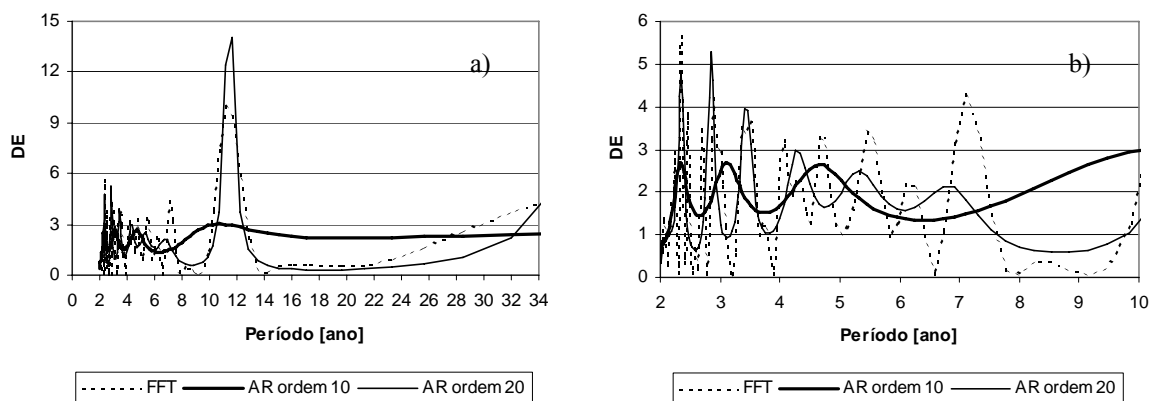
#### 4.3.4.2 Análise de periodicidades das vazões

Os dados de vazão do Rio Paraguaçu em Itaeté, por apresentar uma série mais extensa do que Argoim, foram submetidos à análise de periodicidade, abrangendo o período de 1936 a 1998, que desconsidera os anos posteriores à construção da Barragem de Apertado. Como foi visto nas curvas de vazões acumuladas, o comportamento do Rio Paraguaçu em Itaeté e Argoim é semelhante.

Os periodogramas obtidos com análise espectral realizada com os métodos não paramétricos (FFT) destacam e são concordantes em apontar a densidade espectral (DE) marcante para o período entre 10 e 11 anos (Figura 4.18 a). Nos períodos menores, as diferenças ocorrem em torno de 7 anos, quanto à “energia” da DE, e entre 4 e 5 anos, no que se refere ao período de ocorrência (Figura 4.18 b).

A análise espectral pelo método paramétrico através dos algoritmos de Yule e Burg foi realizada em ambiente MATLAB®, enquanto que o aplicativo SSA-MTM (Ghil *et al.*, 2002) calculou as densidades espectrais pelo método da Entropia Máxima (MEM). Verificou-se que os modelos autoregressivos (AR) de mesma ordem ( $p = 5, 10$  ou  $20$ ), os periodogramas obtidos com os métodos aplicados são praticamente iguais. Entre as ordens, o modelo de  $p = 5$  apresenta um periodograma quase sem picos e o modelo com  $p = 10$  ainda suave. Para  $p = 30$  a resolução aumenta, como era teoricamente esperado. Os resultados são concordantes com um pico destacado em torno de 10 e 11 anos e, para os períodos menores, o modelo com  $p = 20$  tem um comportamento próximo da FFT (Figura 4.18 a, b – não consta modelo de  $p=5$ ).





**Figura 4.18** Periodogramas do Rio Paraguaçu em Itaeté: a) de 2 a 34 anos; b) de 2 a 10 anos . FFT (não paramétrico) e AR (paramétrico).

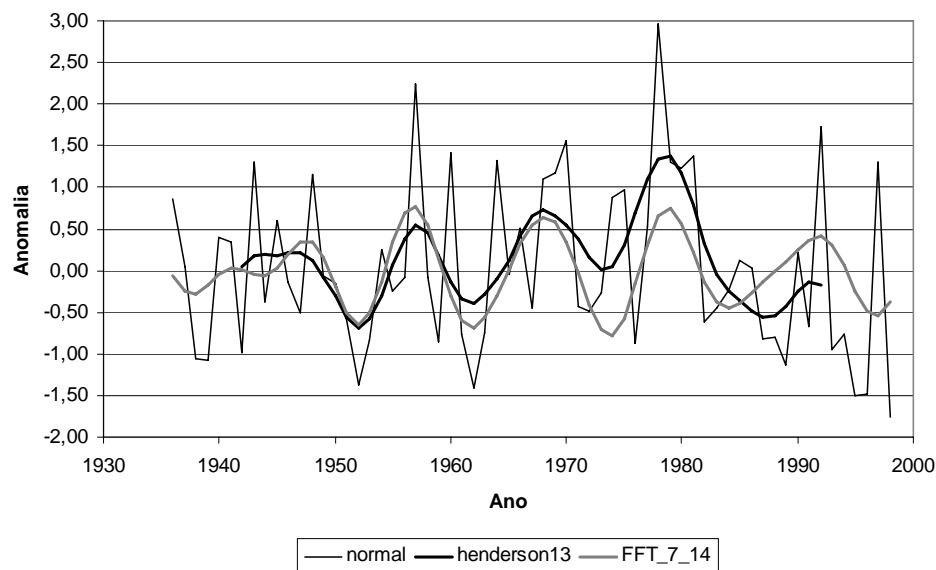
A Tabela 4.5 mostra os resultados dos métodos paramétricos e não paramétricos. Em virtude da pequena variação na posição da frequência obtida com os diferentes métodos, foram determinados os valores médios dos períodos com picos de DE.

**Tabela 4.5** Periodicidades identificadas na análise espectral.

FFT Retangular	FFT hanning	AR e MEM p = 10	AR e MEM p = 20	Média [anos]
11,1	11,1	10,7	11,6	<b>11,1</b>
7,1	7,1		6,9	<b>7,0</b>
5,4	5,1	4,7	5,3	<b>5,1</b>
4,7	4,3		4,3	<b>4,4</b>
3,4	3,5	3,1	3,5	<b>3,3</b>
2,9	2,9		2,8	<b>2,9</b>
2,3		2,3	2,3	<b>2,3</b>

No caso das vazões do Rio Paraguaçu, procurou-se confirmar através de filtros de média móvel a existência do ciclo de 11 anos, que é pouco citado na ocorrência de fenômenos climáticos, bem como caracterizar a sua magnitude e ocorrência ao longo da série.

Utilizando os filtros de Henderson com a média móvel de 13 anos de dados e o de Spencer com a média móvel de 15 anos de dados, o ciclo de 11 anos se torna visível. O filtro de Henderson (Figura 4.19) e Spencer (não apresentado) resultaram praticamente coincidentes. O gráfico da Figura 5.14 também apresenta um filtro de banda espectral entre 7 e 14 anos, baseado no método da FFT que, por se tratar de uma recomposição com base nos componentes periódicos da banda correspondente, abrange toda a extensão da série. As diferenças observadas nos resultados obtidos pelos filtros de Henderson e Spencer com relação ao filtro FFT 7-14 se devem ao fato de que nos primeiros as variações relativas a processos de menor frequência permanecem nos valores médios, enquanto que o filtro FFT 7-14 elimina as variações de menor e maior frequência fora da faixa de 7 a 14 anos.



**Figura 4.19 Vazões normais – Rio Paraguaçu em Itaeté. Filtros: Henderson-13 e FFT 7-14.**

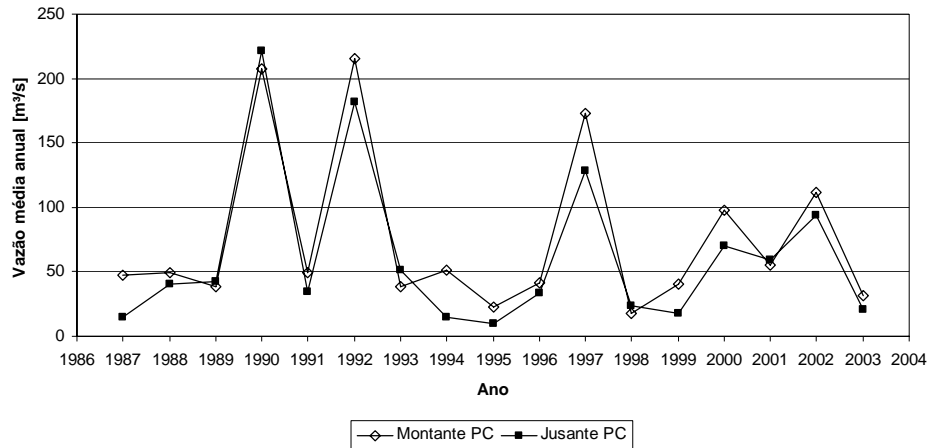
O tempo médio de ocorrência entre os valores extremos para os filtros de Henderson e Spencer é de 11 anos. Já para a FFT 7-14 resultou na média de 10,6 anos. Desta forma, a existência de um ciclo com periodicidade em torno de 11 anos é mais uma vez corroborada.

#### **4.3.5 Avaliação das alterações hidrológicas**

As alterações hidrológicas devido à Barragem Pedra do Cavalo podem ser observadas na vazões anuais afluentes ao estuário do Rio Paraguaçu (Tabela 4.6 e Figura 4.20). Segundo os dados da EMBASA, entre 1987 e 2003 a vazão média anual que entrou no reservatório foi de 75,8 m<sup>3</sup>/s, enquanto que a vazão liberada para jusante foi de 62,4 m<sup>3</sup>/s, representando uma redução de 17,7% (13,4 m<sup>3</sup>/s). A máxima vazão anual das águas que entraram na barragem ocorreu em 1992 (215,2 m<sup>3</sup>/s), enquanto que a jusante foi em 1990 (221,7 m<sup>3</sup>/s). A vazão mínima a montante deu-se em 1998 (17,8 m<sup>3</sup>/s) e a jusante em 1995 (9,9 m<sup>3</sup>/s). Desta maneira, além da alteração na magnitude da vazão média anual, houve modificação na distribuição temporal das vazões críticas (Figura 4.20).

**Tabela 4.6. Características das vazões médias anuais [m<sup>3</sup>/s] – Barragem Pedra do Cavalo**

Vazão anual	Montante PC	Jusante PC
Media	75,8	62,4
Mínima	17,8	9,9
Máxima	215,2	221,7



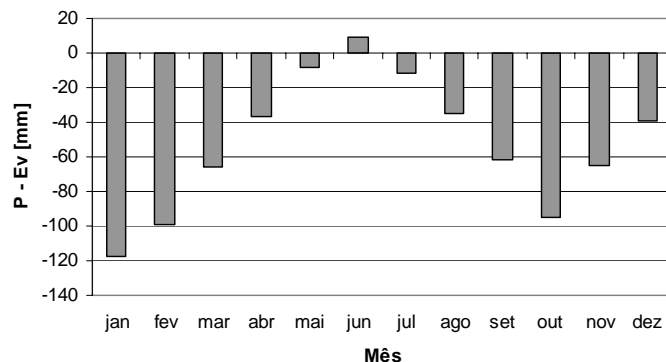
**Figura 4.20. Vazão média anual afluenta a Barragem Pedra do Cavalo (Montante PC) e vazão média anual liberada ao estuário do Rio Paraguaçu (Jusante PC)**

#### 4.3.5.1 Grau de regularização

O projeto da Barragem Pedra do Cavalo (BAHIA, 1984), com base em uma série de 1930 a 1975, definiu a  $Q_{reg}$  igual a  $79 \text{ m}^3/\text{s}$  para a garantia de 100%,  $Q_m = 111,4 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{min} = 6,31 \text{ m}^3/\text{s}$  (novembro/1951) (ver Anexo 1). Neste caso, o GR (equação 4.4) fica igual a 69,2%. No entanto, os usos múltiplos da água do reservatório nunca foram completamente implantados.

A vazão realmente consumida ou regularizada poderia ser no máximo igual à diferença entre a vazão média de montante e de jusante da barragem entre 1986 e 2003 ( $13,4 \text{ m}^3/\text{s}$  - Tabela 4.6), pois esse valor tem embutido a precipitação e a evaporação.

Procedeu-se à estimativa da vazão retirada do sistema através do balanço hídrico no reservatório, utilizando os dados de nível e volume médio mensal de água armazenada, mais os dados de precipitação e evaporação. A precipitação foi calculada pela média entre o posto de Argoim e Pedra do Cavalo (vide Tabela 4.2), apresentando um valor médio mensal de 67,7 mm. A evaporação foi estimada com base nos dados do Tanque Classe A da barragem (1992 a 1998), resultando em uma média anual de 1800mm. Os valores mensais foram corrigidos pelo coeficiente de 0,80 (ONS, 2003) para corresponder à evaporação no lago. O valor médio de evaporação mensal resultou em 120 mm. Nos períodos sem medições (1987 a 1991 e 1999 a 2003), as médias mensais de evaporação foram consideradas. A diferença entre os valores médios mensais de precipitação ( $P$ ) e evaporação ( $Ev$ ) ao longo do ano (Figura 4.21) totalizou uma perda média anual de 627 mm de lâmina de água do reservatório, sendo que os meses de maior diferença entre  $P$  e  $Ev$  foram janeiro, fevereiro e outubro.

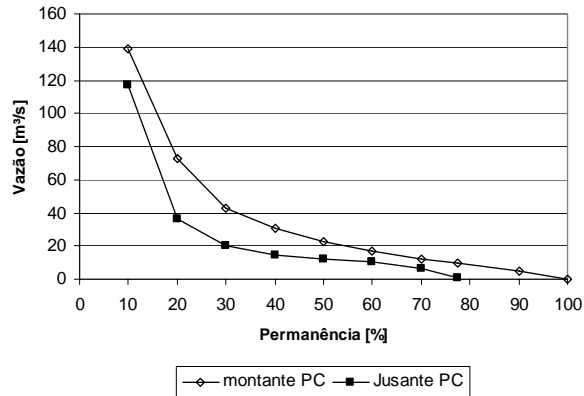


**Figura 4.21** Diferença entre os valores médios mensais de precipitação (P) e evaporação (Ev) sobre o reservatório da Barragem Pedra do Cavallo – 1986 a 2003.

O volume médio do reservatório para os anos hidrológicos de 1987 a 2003 foi de 3.956,9 hm<sup>3</sup>. O volume médio anual de saída de água pela evaporação foi de 197,4 hm<sup>3</sup> (6,26m<sup>3</sup>/s) e de entrada pela precipitação chegou a 112,37 hm<sup>3</sup> (3,56 m<sup>3</sup>/s), totalizando uma perda líquida de 2,7 m<sup>3</sup>/s. Desta forma, abatendo-se esse valor da diferença entre a vazão média a montante e a jusante da barragem (13,4 m<sup>3</sup>/s), chegou-se a estimativa de um consumo médio de 10,7 m<sup>3</sup>/s. Tomando a vazão mínima de 0,86m<sup>3</sup>/s (outubro/1998), a vazão média de projeto e essa vazão consumida, o GR resultou em somente 9%. Se a vazão média de 1987 a 2003 fosse levada em conta (75,8 m<sup>3</sup>/s), o GR passaria para 14%.

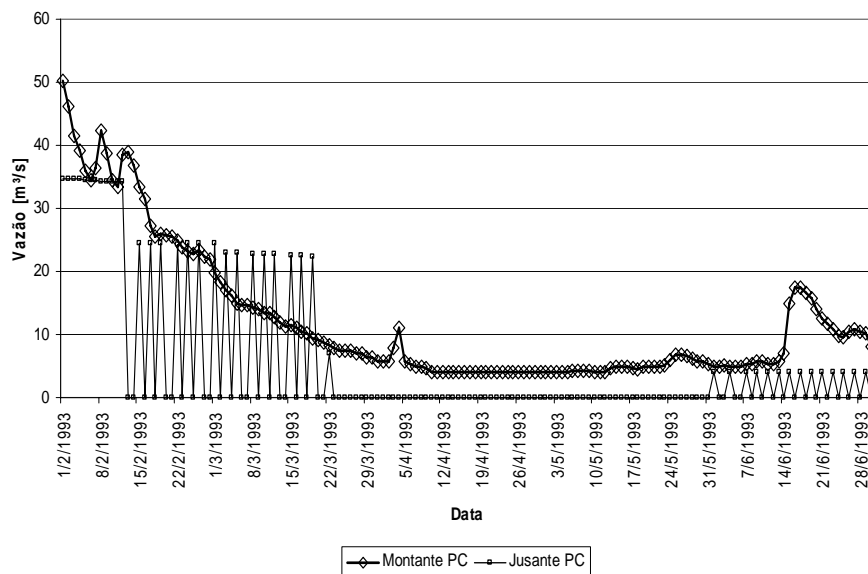
#### 4.3.5.2 Mudanças na curva de permanência

As curvas de permanência das séries de vazões afluentes (montante) e defluentes (jusante) da barragem (série da EMBASA) (Figura 4.22) apresentaram diferenças significativas em toda faixa de variação. É marcante a introdução de vazões nulas, passando de quase inexistentes nas vazões que entram no reservatório da Barragem Pedra do Cavallo (montante PC) para 22% de permanência das vazões na saída do reservatório (jusante PC). Tal fato é resultante do fechamento das comportas da barragem. A Figura 4.23 apresenta um exemplo da operação realizada para um período de vazões baixas entrando no reservatório, mostrando a intermitência da descarga fluvial para o estuário e até mesmo um período com mais de 30 dias de fechamento contínuo das comportas.

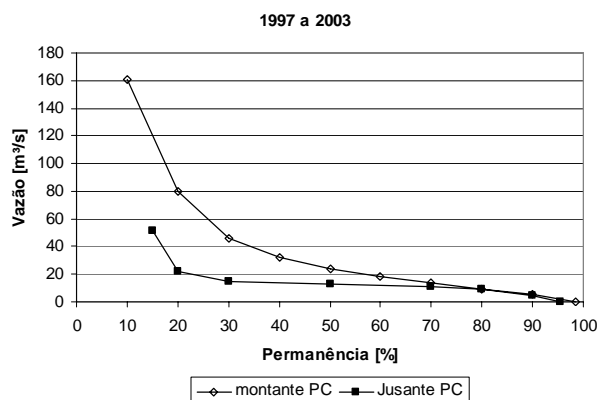


**Figura 4.22** Curvas de permanência a montante e jusante da Barragem Pedra do Cavallo (PC) entre 10 e 100% – período 1986 a 2003.

A partir de 1997 ocorreram alterações na operação da barragem, que passou a manter uma vazão média diária de no mínimo 11m³/s, em atendimento às condicionantes estabelecidas pela licença ambiental de operação. O resultado (Figura 4.24) foi a modificação das permanências acima de 70%, que passaram a ter mais semelhança com a tendência das vazões afluentes ao reservatório. Sabe-se, no entanto, que esta vazão mínima é o valor médio de vazões entre 50m³/s e 60m³/s, liberadas em valor constante por um período de 4 a 5 horas.



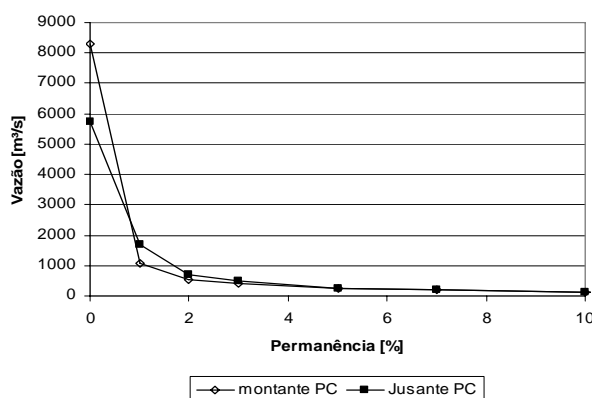
**Figura 4.23** Exemplo de operação da Barragem Pedra do Cavallo para águas baixas a montante.



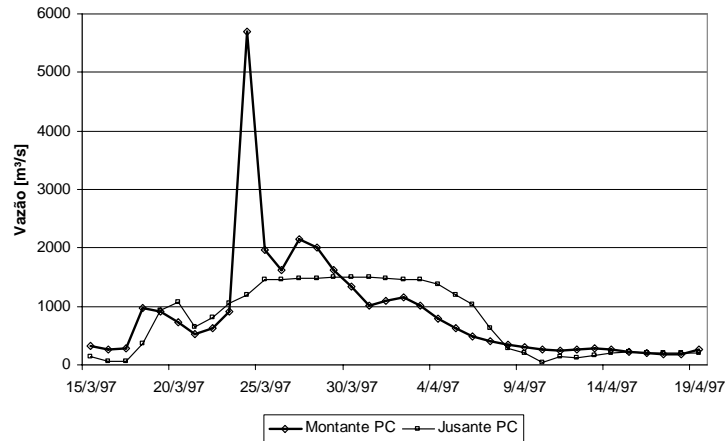
**Figura 4.24** Curvas de permanência a montante e jusante da Barragem Pedra do Cavalo entre 10 e 100% – período 1997 a 2003.

O trecho de menor permanência das vazões mostrou o aumento das vazões de jusante para as permanências entre 3% e 1% (Figura 4.25), enquanto as vazões máximas de cheia (< 1%) diminuíram em consequência da operação voltada para o controle de enchentes das cidades de Cachoeira e São Félix. A Figura 4.26 apresenta o exemplo de operação da barragem para controle de cheias e o efeito de armazenamento das águas no reservatório (redução da vazão de pico e liberação do volume posteriormente).

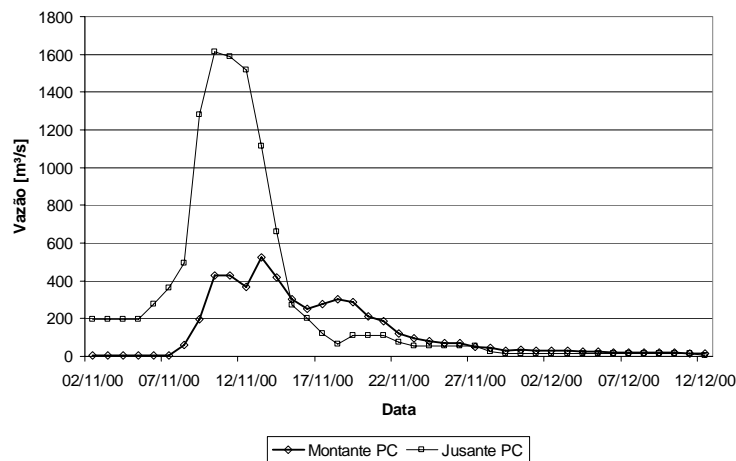
Uma das causas para a ocorrência de vazões maiores a jusante para permanências entre 3% e 1%, além do controle das cheias, foi a operação da barragem para o rebaixamento do nível no reservatório. O procedimento é necessário para formar um volume de espera para possíveis enchentes, sendo realizada normalmente no período anterior ao período úmido, ou seja, entre outubro e início de dezembro. A EMBASA costumava aproveitar a oportunidade para “limpar” a calha do rio e intimidar a ocupação da área de inundação, com a liberação de vazões de até 1.600m<sup>3</sup>/s durante maré de sizígia (Figura 4.27).



**Figura 4.25** Comportamento para as vazões de menor permanência à montante e jusante da Barragem Pedra do Cavalo – 1986 a 2003.



**Figura 4.26** Exemplo de controle de cheia realizada pela Barragem de Pedra do Cavallo (PC)– março/1997.



**Figura 4.27** Exemplo de operação de rebaixamento da cota do reservatório para gerar volume de espera às enchentes – novembro/2001.

Destacam-se os valores da vazão com permanência de 90% ( $Q_{90}$ ) afluyente ao estuário na condição natural para os diferentes períodos relacionados com o evento da barragem: 1) 1947 a 2003 -  $Q_{90} = 9\text{m}^3/\text{s}$ ; 2) 1947 a 1985 -  $Q_{90} = 11,9\text{m}^3/\text{s}$ ; e 3) 1986 a 2003 -  $Q_{90} = 5,9\text{m}^3/\text{s}$ .

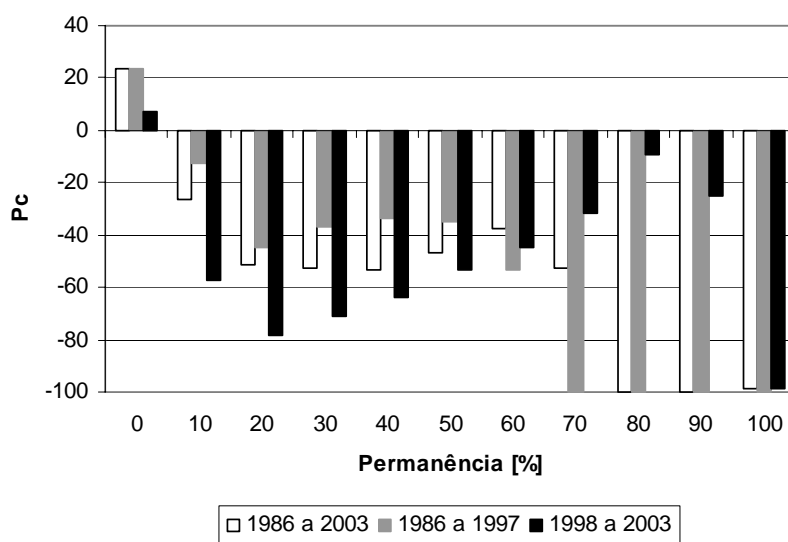
#### 4.3.5.2.1 Avaliação das alterações hidrológicas na permanência das vazões

O posto fluviométrico Argoim (51350000) foi utilizado como posto de referência. As vazões efluentes da Barragem compõem a série de vazões sob impacto da barragem (1986 a 2003). A série correspondente ao posto sob impacto para o período anterior a barragem será obtida pela soma das vazões dos postos 51350000 e 51460000 (1946 a 1985).

Os resultados do índice de mudança das vazões diárias ( $P_c$  – equação 4.5) indicam profundas alterações nas permanências das vazões (Figura 4.28). Os valores de  $P_c$  são

negativos ( $> 20\%$  no período de 1986 a 2003) e indicam a redução das vazões à jusante da barragem, com exceção das vazões com permanência abaixo de 10%.

As mudanças nas vazões entre 1986 e 1997 para as permanências de 70 a 100 % são dramáticas e correspondem às descargas nulas registradas após a construção da barragem, resultantes do fechamento completo das comportas, conforme destacado anteriormente. O reflexo da adoção da operação de liberação de uma vazão mínima para jusante é verificado no período posterior, entre 1998 e 2003, pois as alterações nas vazões de permanência de 70% a 90% são menores (de -9,3% a 31,4%). Ainda assim foram observados vários dias de vazões nulas (veja alteração na permanência de 100%). Por outro lado, acentuaram-se as alterações nas vazões (reduções entre 49% e 81%) correspondentes às permanências entre 10% e 60%.



**Figura 4.28 Percentual de mudança (Pc) da vazão para as várias permanências (Pc < 0 indica a redução das vazões e Pc > 0 indica aumento das vazões).**

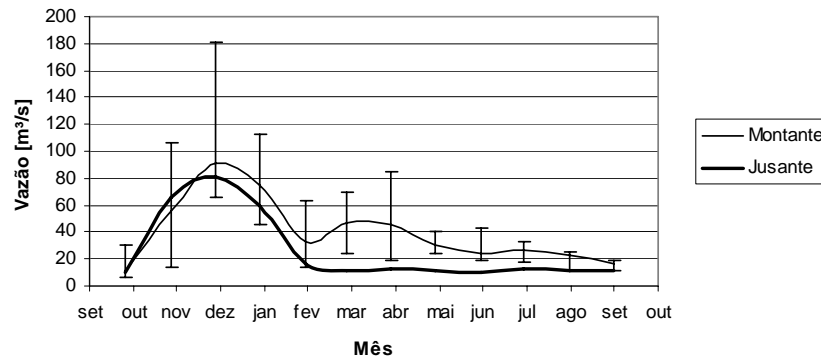
#### 4.3.5.3 Indicadores de regime Hidrológico Alterado - IHA

O método do IHA permitiu avaliar 32 parâmetros hidrológicos. Dentre os resultados obtidos (Anexo 1), cabe destacar os principais. As quatro maiores alterações hidrológicas, em ordem decrescente, foram o número de dias com vazão zero, as vazões mínimas de 1 dia, as vazões mínimas de 3 dias e o número de pulsos de vazões baixas. Essas alterações estão relacionadas à operação da barragem para o período de estiagem, como foi destacado na análise da curva de permanência.

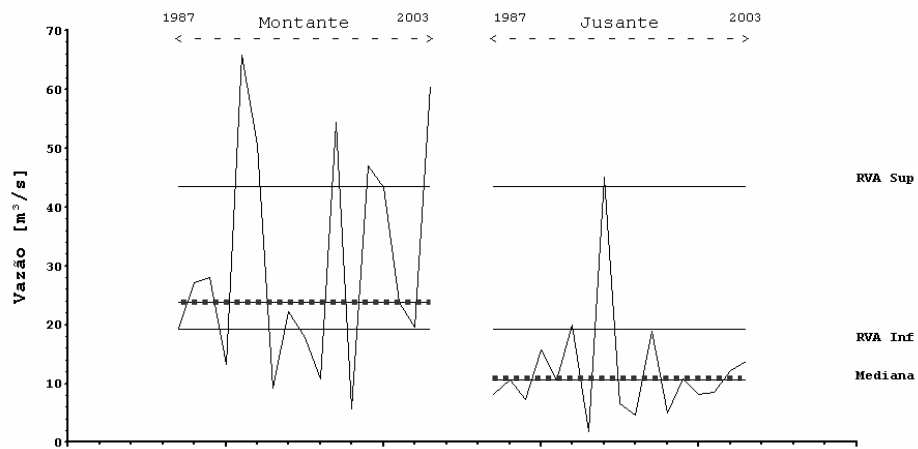
O grau de alteração também se mostrou significativo para as vazões mensais. As modificações são marcantes em todo o período em que não ocorrem as cheias anuais (Figura



4.29), com uma redução generalizada das vazões médias abaixo dos limites inferiores do RVA de cada mês. Observando-se a série das vazões mensais do mês de junho, a situação ocorrida fica mais clara (Figura 4.30). Nota-se que a barragem armazenou as vazões durante todo o período de operação e com raras exceções liberou uma vazão superior àquela afluente (a exemplo de junho de 1994).



**Figura 4.29** Alterações na distribuição sazonal das vazões mensais de entrada e saída da Barragem Pedra do Cavalo (barras indicam os limites do RVA).



**Figura 4.30** Vazões mensais – Junho, à montante e jusante da Barragem Pedra do Cavalo - 1987 a 2003.

Os parâmetros dos grupos 4 e 5 estão relacionados às características das variações diárias das vazões. A análise do Grupo 4 depende dos valores de limites do RVA adotados, enquanto o Grupo 5 não. O Grupo 5 utiliza parâmetros que estão relacionados à forma do hidrograma, seja pela taxa ou pelo o número de reversões na ascensão ou recessão das vazões. Em relação à taxa de crescimento (Figura 4.31), ocorreu a redução das taxas máximas, porém com um aumento da mediana em consequência da freqüente ocorrência de valores acima do

limite superior do RVA. Nas taxas de decréscimo as alterações são mais marcantes (Figura 4.32), com valores máximos 100% superiores àqueles da situação de montante, passando a mediana de -8 m<sup>3</sup>/s/dia para -29 m<sup>3</sup>/s/dia.

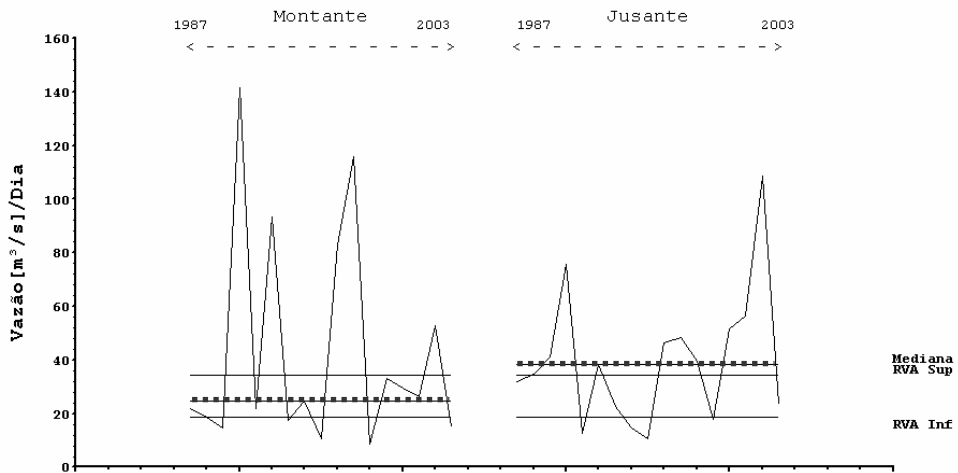


Figura 4.31 Taxa de crescimento das vazões, à montante e a jusante da barragem.

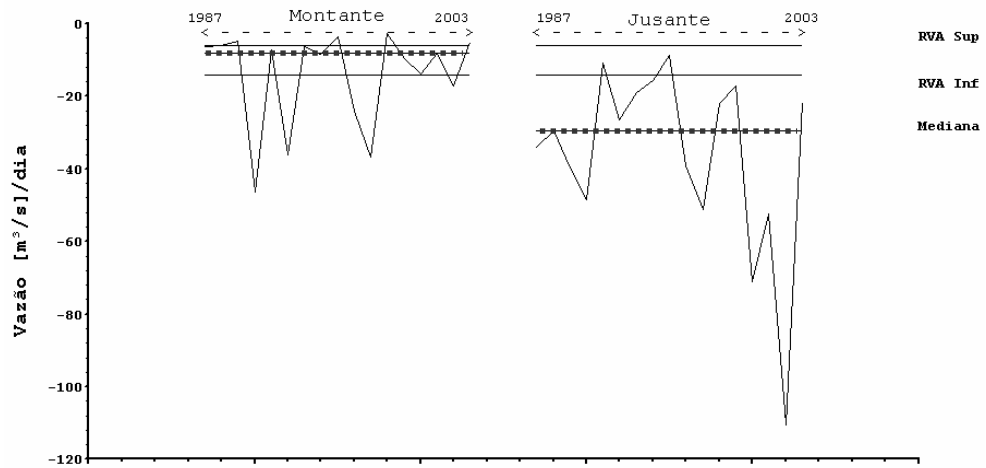
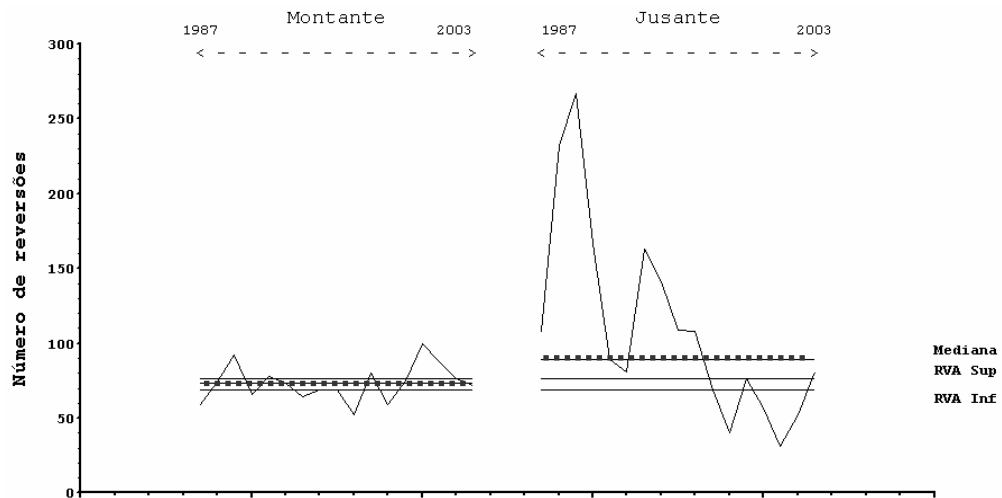


Figura 4.32 Taxa de decréscimo das vazões, à montante e a jusante da barragem.

As alterações no número de reversões foram marcantes (Figura 4.33). Enquanto a montante o número de reversões anuais permaneceu oscilando entre o mínimo de 52 e o

máximo de 100 vezes, à jusante a mediana passou para 91 vezes, com número máximo de 267 vezes e mínimo de 31 vezes.



**Figura 4.33 Número de reversões das vazões – a montante e a jusante da barragem.**

Em relação ao Grupo 4 (frequência e duração de pulsos de vazão), diferentes limites para o RVA foram adotados de forma a caracterizar os efeitos de algumas condições operacionais da barragem, entre elas:

- 1) Pulsos de vazões baixas  $< 14 \text{ m}^3/\text{s}$  – descarga durante o período de estiagem – 85% de permanência: Os procedimentos operacionais no período de estiagem anual, de 1987 a 1997, levaram a ocorrência de um número excessivos de pulsos de baixa vazão, de pequena duração (Figura 4.34 e Figura 4.35). Posteriormente, o número de pulsos passou a ter características semelhantes àquele de montante, porém a duração das baixas vazões cresceu. Em 2003, o número de pulsos novamente foi alto (29), refletindo na redução da duração. Esta é uma outra maneira de ver as alterações identificadas pela curva de permanência.
  
- 2) Pulsos de vazões altas  $> 68 \text{ m}^3/\text{s}$  – descarga de uma turbina da UHE – 30% de permanência: em consequência da barragem, houve uma redução no número de pulsos de vazões maiores que  $68 \text{ m}^3/\text{s}$  em todos os anos, com exceção de 1989 (Figura 4.36). A mediana passou de 6 para 3. A duração desses pulsos aumentou, em menor proporção, com a mediana subindo de 10 dias para 12 dias (Figura 4.37), mas os extremos foram acentuados.

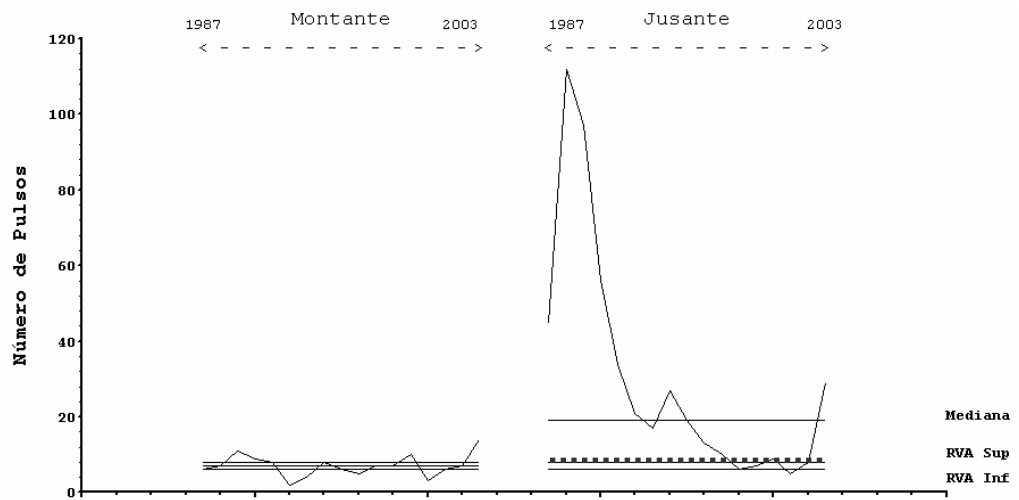


Figura 4.34 Número de pulsos de vazão baixa – situação a montante e jusante da barragem – 15º percentil.

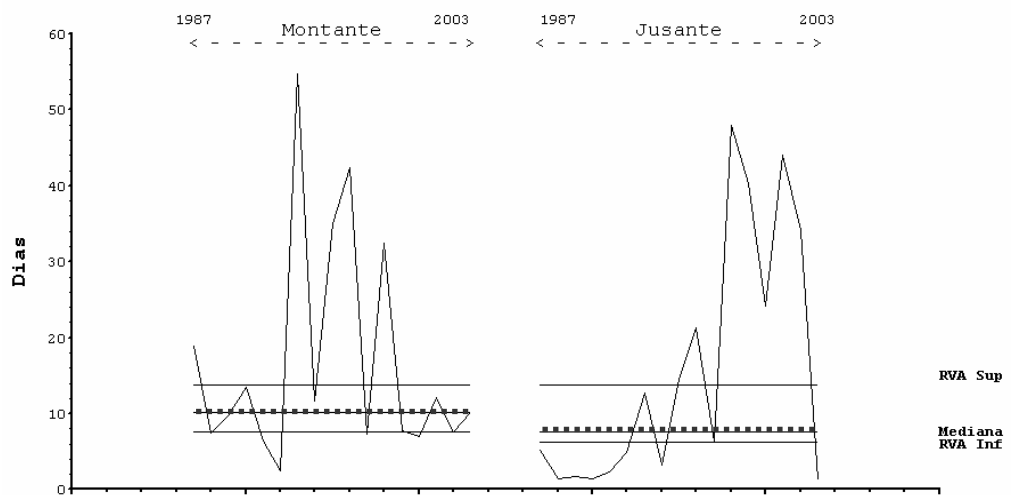


Figura 4.35 Duração dos pulsos de vazão baixa – situação a montante e jusante da barragem - 15º percentil.

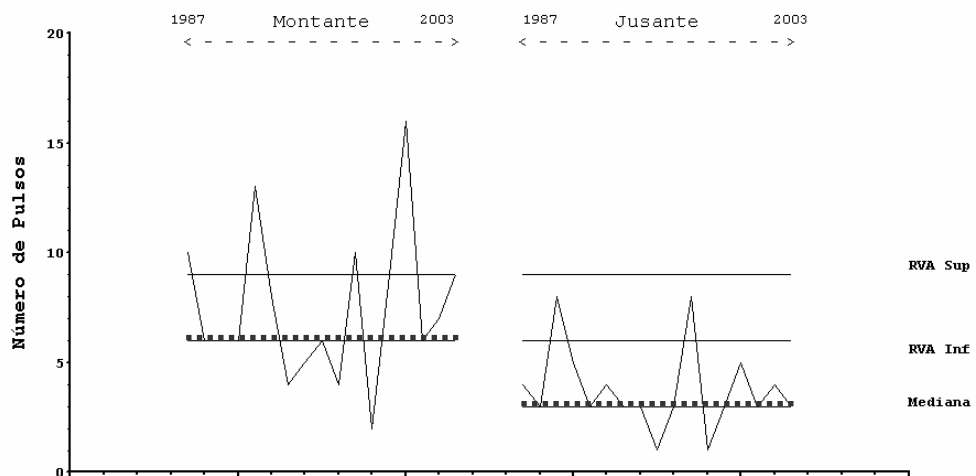


Figura 4.36 Número de pulsos de vazão alta – situação a montante e jusante da barragem – 30º percentil.

O limite inferior do RVA de montante superpõe-se à mediana.

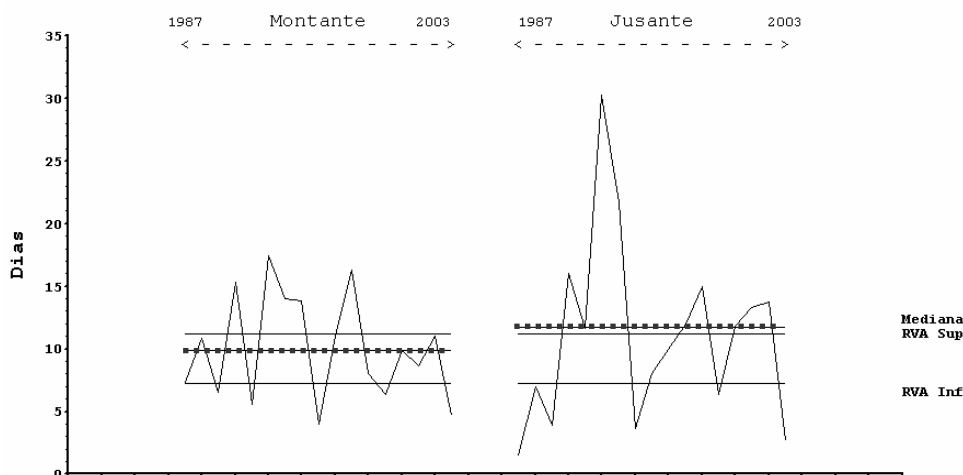


Figura 4.37 Duração dos pulsos de vazão alta – situação a montante e jusante da barragem - 30º percentil.

Resumidamente os resultados das maiores alterações nos 32 parâmetros analisados podem ser visualizados na Figura 4.38 (detalhes no Anexo 1).

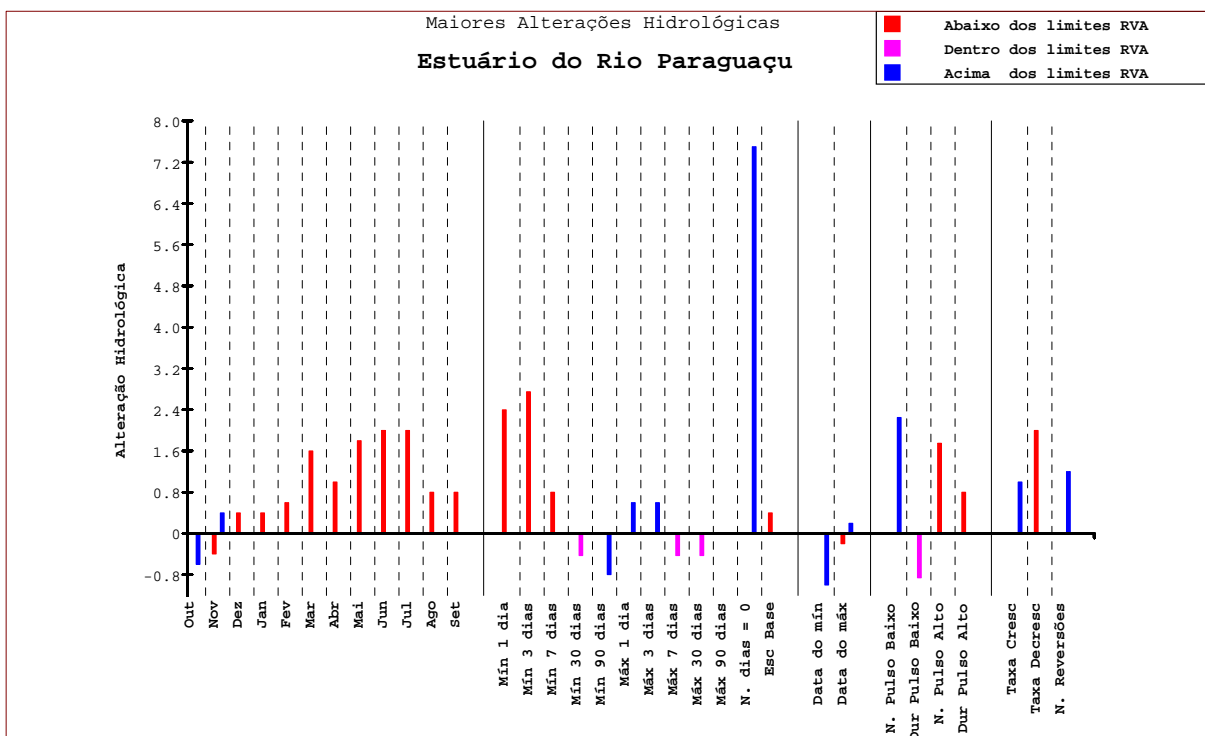


Figura 4.38 Maiores alterações hidrológicas nas vazões devido à Barragem Pedra do Cavallo. O grau de alteração hidrológica de determinada vazão é definido pelo IHA como:  $(Q_{obs} - Q_{esp})/Q_{esp}$ , onde  $Q_{esp}$  = a frequência com que os valores anuais se situam na faixa do RVA correspondente aos valores pré barragem; e  $Q_{obs}$  = a frequência com que os valores anuais do período pós barragem estão dentro da faixa do RVA estabelecido.

#### 4.4 DISCUSSÃO

A variabilidade climática naturalmente impõe diferentes características hidrológicas às vazões do Rio Paraguaçu, destacando-se os períodos pré e pós Barragem Pedra do Cavalo. A vazão média anual do Rio Paraguaçu em Argoim no período pós-barragem ( $64,3 \text{ m}^3/\text{s}$ ) foi 29% inferior àquela do período pré-barragem. Com exceção de cinco anos (1990, 1992, 1997, 2000 e 2002) as vazões anuais de 1987 a 2003 foram inferiores a média anual da série completa.

A variabilidade da série de vazões anuais em Itaeté mostrou, através da análise do gradiente médio das vazões acumuladas, uma tendência geral de crescimento das vazões até 1980 e de descréscimo no período posterior, coincidente com a instalação da barragem. Para caracterizar a variabilidade interanual das vazões do Rio Paraguaçu, procedeu-se o estudo de periodicidade através da análise espectral e de filtros de média móvel. Identificou-se a presença de oscilações interanuais entre 2,4 e 7 anos e uma oscilação decenal de 11 anos. Anteriormente, Genz *et al.* (2003), utilizando séries de vazões adimensionais (vazão anual dividida pela média de longo prazo) e os filtros de banda espectral FFT, indicaram a presença de componentes cíclicos marcantes em torno de 10 e 12 anos para as vazões dos principais rios do Litoral da Bahia (Figura 4.39). É possível que esse ciclo esteja relacionado à processos climáticos ligados com as oscilações da TSM no Oceano Atlântico, onde já foram identificados padrões de variação de recorrência decenal (Robertson e Mechoso, 1998; Mélice e Servain, 2003).

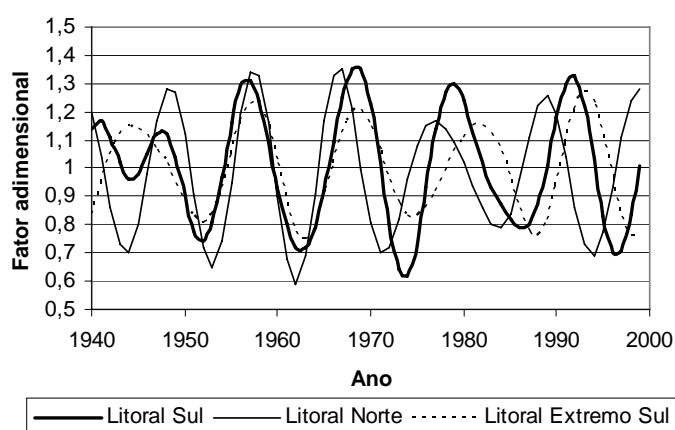
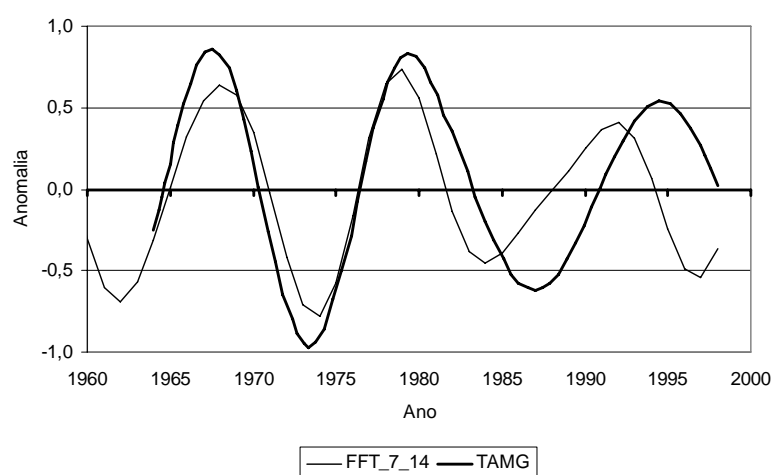


Figura 4.39. Filtro espectral FFT 7-14 anos – componentes de baixa frequência das vazões adimensionais no Estado da Bahia (Genz *et al.*, 2003). O Rio Paraguaçu está inserido no Litoral Sul.

Méllice e Servain (2003) determinaram a componente de baixa frequência para as oscilações da TSM no Oceano Atlântico, ao qual preferem chamar de Gradiente Meridional do Atlântico Tropical (TAMG – “Tropical Atlantic Meridional Gradient”), pois as diferenças de TSM não formam um dipolo, mas apresentam um gradiente.

As componentes de baixa frequência do Rio Paraguaçu (posto Itaeté – FFT 7-14) e do TAMG foram comparadas neste trabalho para o período entre 1964 e 1998. Observou-se que existe um comportamento semelhante até 1984, quando as séries estão em fase (correlação linear  $R^2 = 0,955$ ) (Figura 4.40). A partir de 1984 a TAMG passa a apresentar uma defasagem de 3 anos em relação à componente de 11 anos das vazões do Rio Paraguaçu.



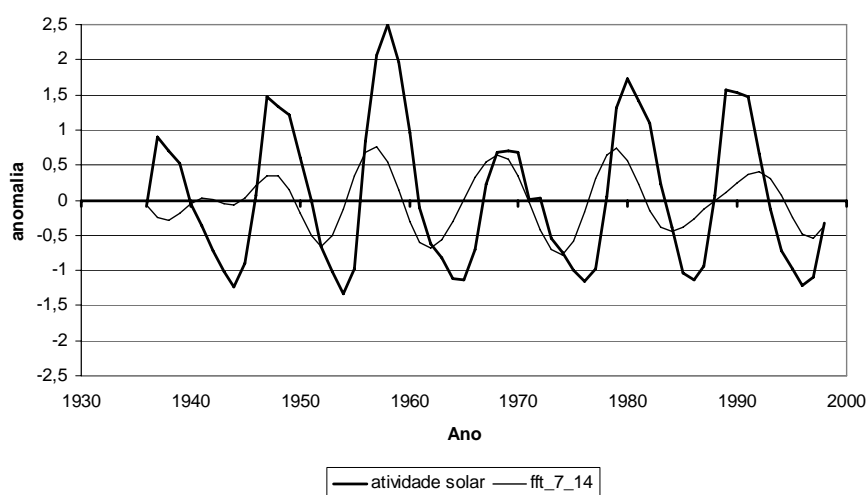
**Figura 4.40 Componentes de baixa frequência. Vazões no Rio Paraguaçu (FFT 7-14) e índice TAMG (extraído de Méllice e Servain, 2003).**

Souza Filho e Lall (2004) destacam que a análise espectral das vazões afluentes ao reservatório de Orós (Rio Jaguaribe/CE – dados de 1914 a 2000) mostrou eventos de ocorrência interanual (3-6 anos) e interdecenal (12 anos). Segundo os autores, a análise espectral da TSM nas células Niño-3 apresenta uma estrutura interanual similar a do Orós, enquanto que a do Dipolo do Atlântico corresponde ao modo interdecenal.

Molion (2003) comenta que o ciclo de 11 anos nas vazões do Rio São Francisco estaria ligado ao conhecido ciclo das atividades solares. Avaliando a resposta espectral dos dados de atividade solar com o filtro FFT de 7-14 anos, observa-se (Figura 4.41) que os picos do ciclo decenal das vazões no Rio Paraguaçu ocorreram na fase de crescimento das atividades solares até a década de 1980, sendo que na década de 90 houve uma defasagem. A melhor correlação linear ( $R^2=0,549$ ) é obtida com uma defasagem de quatro anos entre as séries.

As oscilações interanuais do Rio Paraguaçu têm periodicidades semelhantes às aquelas apresentadas por Labat *et al.* (2004) para os índices climáticos SOI (Oscilação Sul), NATL (TSM no Atlântico Norte) e SATL (TSM no Atlântico Sul), inclusive com relação a menor energia (DE) no periodograma (NATL e SATL). A oscilação decenal do Rio Paraguaçu tem um padrão compatível com a dos índices NATL e SATL, reforçada pela correlação encontrada com a oscilação de baixa frequência do índice TAMG determinado por Mélite e Servain (2003). Desta maneira, destaca-se que dentro das periodicidades encontradas nas vazões do Rio Paraguaçu, o ciclo decenal é marcante e deve estar relacionado a processos climáticos ligados com as oscilações da TSM no Oceano Atlântico tropical.

Além de o ciclo decenal ter uma periodicidade marcante, a magnitude dessa componente nos momentos de máximo e mínimo foi significativa, superando em 50% a anomalia das vazões anuais.



**Figura 4.41. Filtro espectral 7-14 anos – atividade solar e vazões no Rio Paraguaçu.**

As curvas de vazão e precipitação acumulada, que expressam a tendência do comportamento hidrológico anual, não indicam alterações significativas no comportamento de das vazões médias anuais, ou seja, as alterações hidrológicas no Rio Paraguaçu a montante da Barragem Pedra do Cavalo até 1998 são decorrentes da variabilidade climática.

As alterações hidrológicas devidas à Barragem Pedra do Cavalo e identificadas pela análise da curva de permanência não correspondem ao modelo teórico de redução das vazões máximas e aumento das vazões mínimas, como é o caso da Barragem Windamere, Austrália (Been e Erkin, 1994). A Barragem Windamere, cujo principal objetivo foi a regularização de vazão para jusante, reduziu entre 20% e 73% as vazões com permanência menor que 70% e, por outro lado, aumentou em 58% e 496% as vazões com permanência de 80% e 90%,



respectivamente. Em decorrência da Barragem Pedra do Cavalo houve a redução da descarga fluvial ao estuário em praticamente todas as permanências, devido à baixa frequência de extravazamento, com destaque para a grande ocorrência de vazões nulas.

Outras alterações hidrológicas devido a Barragem Pedra do Cavalo puderam ser identificadas através dos Indicadores de regime Hidrológico Alterado (IHA). O método possibilita destacar mudanças na distribuição temporal das vazões, além de variações nas características de forma do hidrograma. No Rio Paraguaçu ocorreu uma redução das vazões médias mensais em todo o período em que não ocorrem as cheias anuais (entre 30% e 74%) e com vazões abaixo dos limites inferiores do RVA. Essa alteração foi diferente no Rio Savannah (Carolina do Norte, EUA), onde houve a redução das vazões no período úmido e o aumento no período seco (Meyer *et al.*, 2003). No caso do Rio Roanoke, outro rio da Carolina do Norte, EUA, em sete meses houve redução da média mensal (de 6% a 26%) e em apenas 3 meses o acréscimo foi significativo (entre 12% e 33%) (Richter *et al.*, 1996).

Em relação às características de forma dos hidrogramas a jusante de Pedra do Cavalo, a taxa de crescimento máximo das vazões foi menor, porém a mediana foi elevada acima do limite superior do RVA, enquanto que a taxa de decréscimo ficou 3 vezes maior. As mudanças no número de reversões das vazões foram marcantes a jusante de Pedra do Cavalo (também ocorreram nas barragens dos rios Roanoke e Savannah). Os pulsos de vazão baixa liberados por Pedra do Cavalo cresceram e as suas durações diminuíram (semelhante ao caso do Rio Roanoke). O contrário ocorreu em relação aos pulsos de vazão alta (redução do número e aumento da duração), o que não foi verificado nos rios Roanoke e Savannah. Cabe ressaltar que as diferenças nas alterações hidrológicas decorrentes de barragens dependem também das características dos reservatórios, do regime hidrológico do rio, do objetivo e do esquema operacional adotado.

A análise do grau de regularização (GR) da Barragem Pedra do Cavalo, indicou que ela está subutilizada em relação ao que foi projetado, mesmo considerando que o período mais seco da história foi registrado na década de 90 e que não fez parte do estudo de regularização. Ou seja, ainda existe uma disponibilidade de uso das águas do reservatório, que já está ocorrendo com o início da geração de energia elétrica em 2005 ou outras que venham a existir, podendo implicar em maiores alterações hidrológicas nas vazões afluentes ao estuário do Rio Paraguaçu.

Vale destacar que a Barragem Pedra do Cavalo impôs uma perda líquida de 3,56% na vazão média (1987 a 2003) devido à evaporação. Na Barragem Thurmond, no Rio Savannah

(EUA) a evaporação provocou uma redução de 10% na vazão média (Meyer *et al.*, 2003) e no caso das barragens da UHE de Sobradinho e Itaparica no Rio São Francisco, a perda por evaporação foi estimada em 460 m<sup>3</sup>/s (Molion, 2003), cerca de 17% da vazão média anual em Sobradinho. Mesmo sendo a evaporação uma perda real do sistema, esta não tem sido considerada pelos órgãos gestores de recursos hídricos para definição das vazões mínimas a serem mantidas a jusante de barragens.

Os efeitos das barragens sobre o regime hidrológico, além da tática operacional e dos usos do reservatório, dependem dos dispositivos de descarga. No caso da Barragem Pedra do Cavalo, a inexistência de um dispositivo de descarga de fundo dificulta a liberação de vazões baixas compatíveis com o período de estiagem, pois que o primeiro estágio de uma comporta gera uma vazão entre 50 e 60 m<sup>3</sup>/s, a depender do nível do reservatório. Na época do seu projeto sequer existiam as leis que hoje ordenam o gerenciamento dos recursos hídricos na Bahia (Decreto Estadual nº 6.296/97). Esta limitação levou ao grande número de vazões nulas no período posterior à barragem. As reduções nas vazões mensais no período úmido do Recôncavo foram decorrentes das regras operacionais adotadas pela EMBASA e poderiam ter sido evitadas através da liberação de vazão compatível por uma comporta.

Após um período de quase 20 anos de operação voltada ao abastecimento e controle de cheias uma nova estratégia de gerenciamento está sendo implantada para a geração de energia elétrica. Infelizmente, o estudo realizado com vista à motorização da barragem (Coelba/Odebrecht, 2001) também não levou em conta as características naturais do regime hidrológico do Rio Paraguaçu, muito menos a existência de um estuário a jusante. As condicionantes operacionais preliminares para a geração de energia foram estabelecidas com base nesse estudo, e contemplaram, a jusante, somente as restrições de enchente às cidades de Cachoeira e São Félix (1.500 m<sup>3</sup>/s) e a vazão mínima de 10 m<sup>3</sup>/s, considerada como vazão sanitária, já adotada anteriormente pela EMBASA a partir de 1997. No entanto, as condicionantes operacionais definitivas ainda estão em fase de elaboração. É importante destacar que o concessionário da geração de energia, neste caso a Votorantim Cimentos Ltda, não tem autonomia sobre a operação e segue as solicitações do Operador Nacional do Sistema (ONS) em função da demanda e com base nos condicionantes operacionais existentes até o momento.

Ainda assim, como o período de geração de energia vai ocorrer, em geral, após o enchimento do reservatório na época das cheias, e a descarga mínima é a de uma turbina (~80 m<sup>3</sup>/s), bem superior às vazões médias liberadas durante a operação da EMBASA (< 12 m<sup>3</sup>/s) e

às vazões médias naturais dos meses de março em diante ( $< 46 \text{ m}^3/\text{s}$ ), uma nova situação a jusante vai ser estabelecida. Por outro lado, é provável que o número de pulsos de vazões baixas diminua, considerando que a geração de energia seja contínua durante a época de cheias e no inverno, enquanto o nível do reservatório permitir. As reversões nas vazões poderão ocorrer em qualquer dia, já que quantidade de energia a ser gerada é imposta pelo Operador Nacional do Sistema (ONS). No período de estiagem vão continuar os pulsos de duração de poucas horas, que já ocorriam no período de operação da EMBASA ( $50$  a  $60 \text{ m}^3/\text{s}$  constantes durante 4 a 5 horas), porém com magnitude superior ( $\sim 80 \text{ m}^3/\text{s}$  constantes por 3 horas).

# 5 HIDRODINÂMICA DO ESTUÁRIO DO RIO PARAGUAÇU

## 5.1 DADOS ANTERIORES

Os dados oceanográficos de interesse ao estudo correspondem às informações sobre maré, corrente, salinidade, temperatura e batimetria na Baía de Todos os Santos (BTS) e região do baixo curso do Rio Paraguaçu.

Os dados existentes sobre a maré consistem em dois pontos da costa oceânica (Morro de São Paulo e Praia do Forte), em 7 pontos internos da Baía (Porto de Salvador, Terminal da USIBA, Porto de Aratu, Porto de Madre de Deus, Terminal da Petrobrás, Ponta de Itaparica e São Francisco do Conde), em um ponto no canal de Paraguaçu (São Roque), em 2 locais ao longo do Rio Paraguaçu (Najé e Cachoeira) e em um local próximo a saída sul do Canal de Itaparica (Cacha-Prego). Os dados originam-se de campanhas de medições executadas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) entre os anos de 1947 e 1985, e estão disponíveis no Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO-DHN). Exceção aplica-se às informações sobre a maré de Cacha-Prego, derivadas de um trabalho executado pelo Laboratório de Estudos Costeiros (UFBA) e do monitoramento intensivo de duas semanas realizado em duas campanhas pelo Projeto de Saneamento Ambiental da BTS (08 estações) (BAHIA, 2000).

Os dados obtidos no BNDO são formados de séries temporais de elevação do nível d'água, em geral de 15 a 30 dias, e principais constantes harmônicas. O Porto de Salvador é o local com série temporal mais extensa, cobrindo quase 1 ano completo. Apenas os dados relativos a São Francisco do Conde e terminal da Petrobrás, em Madre de Deus, consistem unicamente das constantes harmônicas. As séries temporais existentes para a baía cobrem períodos distintos, e uma simultaneidade nas medições existe somente para os registros (de quinze dias) relativos a São Roque (Canal do Paraguaçu), Najé e Cachoeira, sendo estas duas últimas dentro do rio Paraguaçu, que é o trecho de interesse do estudo. Atualmente se encontra em operação somente o marégrafo da DHN instalado na Ilha de Itaparica (BAHIA, 2000). Estes dados foram analisados por Lessa *et al.* (2001). Dentro do projeto da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG) do Instituto Brasileiro de Geografia e

Estatística (IBGE) foi instalado um marégrafo em Salvador, na Capitania do Portos, com registrador digital operando desde outubro de 2004.

Com relação a dados de corrente, poucas informações estão disponíveis para a BTS e nenhuma para a área de estudo. As principais medidas na BTS foram realizadas pelo Projeto de Saneamento Ambiental da BTS, em duas diferentes estações (verão e inverno), com a utilização de 17 estações, incluindo correntômetros mecânicos, eletromecânicos e ADCP's (Acoustic Doppler Current Profile). Esses dados foram analisados por Cirano e Lessa (2002) e Cirano *et al.* (2006).

Assim como a corrente, os dados de salinidade e temperatura disponíveis se referem principalmente a BTS (Pina, 1976; Moura, 1979; Wolgemuth *et al.*, 1981; Barreto, 1995), tendo sido recentemente revisados e analisados por Lessa *et al.* (2001) e Cirano e Lessa (2002) e Cirano *et al.* (2006).

Em relação à batimetria, a maior parte da BTS já foi mapeada pela DHN, estando disponíveis as cartas 1110 – BTS Geral (escala 1:65.000); 1104 – BTS NE, 1106 – BTS N, 1107 – BTS O (todas na escala ~ 1:30.000) e Ilhês a Itariri – 1100 (escala 1:300.000). O baixo curso do Rio Paraguaçu foi mapeado em 1999 pela DHN, incluindo o canal que passa ao norte da Ilha das Garças na Baía de Iguape em direção a São Francisco do Paraguaçu. Na Baía de Iguape somente a parte central contém dados de batimetria, porém desatualizados (1976).

Os dados meteorológicos existentes na área e proximidades são oriundos da estação de Madre de Deus (PETROBRAS) e da Barragem de Pedra do Cavalo, pertencente à SRH, porém com dados antigos da EMBASA. Cirano e Lessa (2002) analisaram os dados de vento coletados durante o Projeto de Saneamento Ambiental da BTS.

A área de estudo conta com dados cartográficos de relevo em escala 1:25.000 e 1:100.000, fotos aéreas em escala 1:60.000 e imagens de satélite Landsat TM 5 e TM 7, órbitas 215-69 e 216-69.

## **5.2 METODOLOGIA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS**

A aquisição de dados necessitou a execução das seguintes atividades: 1) digitalização dos dados batimétricos existentes; 2) mapeamento da batimetria na Baía de Iguape; 3) instalação de marégrafos; 4) medições hidrográficas; 5) medições de correntes.

### 5.2.1 Batimetria

O mapeamento da batimetria da área de estudo é deficiente, com apenas 40% desta sendo coberta nas cartas da DHN. Para digitalização das informações existentes, as cartas náuticas da DHN para a BTS foram capturadas para formato digital e geo-referenciadas no ArcView (ESRI co.), em coordenadas geográficas, tendo com referência o datum Córrego Alegre. Em seguida procedeu-se a vetorização das isóbatas e pontos cotados. A batimetria do baixo curso do Rio Paraguaçu foi gentilmente cedida pela INTERTECHNE em formato digital, necessitando apenas o ajuste para o datum adotado.

As áreas de mangue e linha de costa foram delimitadas através da imagem de satélite Landsat TM 7, bandas RGB 453, de 5/2/2000, a qual tornou-se a base de referência para os trabalhos em geoprocessamento.

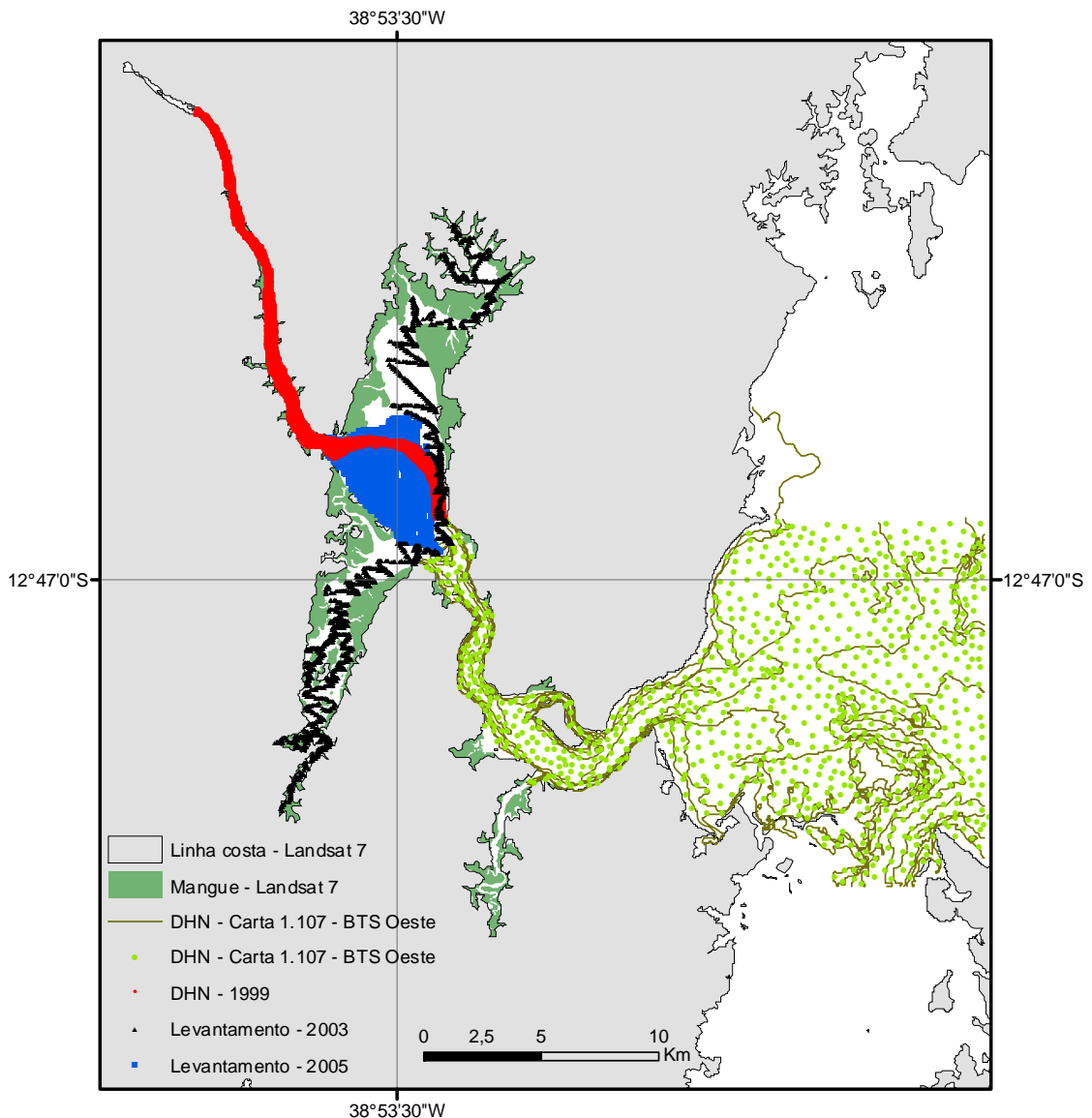
O levantamento batimétrico da Baía de Iguape foi realizado em janeiro e fevereiro de 2002, sendo efetuado detalhamento na sua região central em junho de 2005. Utilizou-se uma ecosonda (200 KHz), acoplada a computador portátil e GPS, instalados sobre barco de alumínio (Figura 5.1).

A variação da maré foi corrigida e a redução dos dados de batimetria realizados a partir de registros maregráficos em Coqueiros. O Nível de Redução (NR) da DHN para Coqueiros foi definido com base no NR de Najé estabelecido pela DHN. Em Najé, o NR está 1,66m abaixo do nível médio (NM = 2,52m). O NM de Coqueiros no período de 2001/2002 foi de 1,64m, enquanto que para os dados de 2005 foi de 2,40m. Subtraindo o valor do NR de Najé do NM de Coqueiros, chegou-se a  $NR = -0,02m$  para 2001/2002 e  $NR = 0,63m$  para 2005. A correção das profundidades foi realizada através da adição ou subtração do nível da maré registrada em Coqueiros (referenciada ao NR), podendo matematicamente ser definida por:

$$H_c = H_m - h_r \quad (\text{Equação 5.1})$$

onde:  $H_c$  = profundidade corrigida;  $H_m$  = profundidade medida com a ecosonda;  $h_r$  = elevação da maré reduzida.

A última etapa de processamento da batimetria consistiu da geração da superfície representativa do fundo, através do uso de interpoladores de dados espaciais, módulo de geoprocessamento do programa Surface Water Modeling System (Environmental Modeling Research Laboratory - Brigham Young University, versão 7.0).



**Figura 5.1. Dados batimétricos no baixo curso do Rio Paraguaçu (DHN, 1999), Canal do Paraguaçu e BTS (carta náutica 1107 – BTS Oeste – DHN) e os levantamentos realizados na Baía de Iguape em 2002 e 2005.**

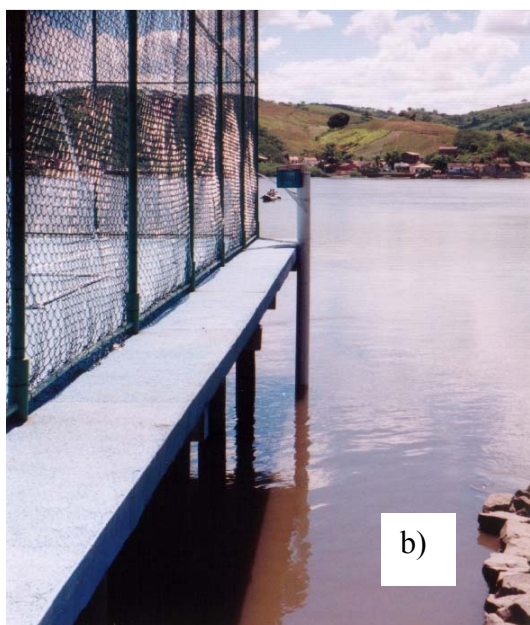
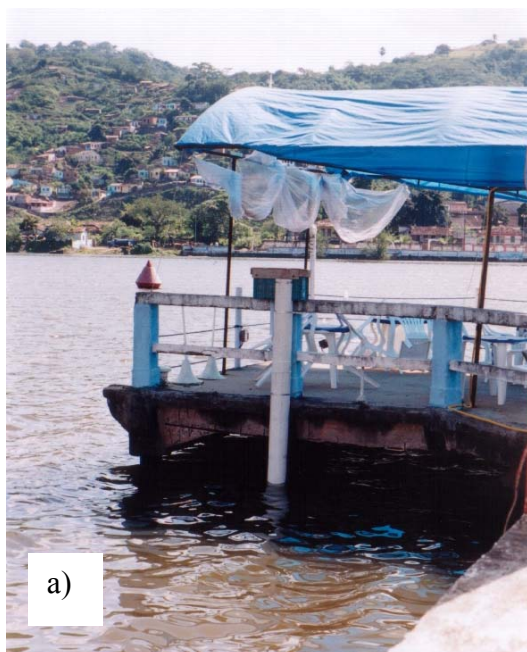
### 5.2.2 Maré

As informações sobre a variação da maré foram obtidas por três estações maregráficas, bem como os dados de maré prevista destas e outras estações que já existiram na BTS. Foram utilizados marégrafos analógicos (2001 e 2002) e sensores de pressão (2005).

Os marégrafos analógicos foram do tipo linógrafo de bóia e contrapeso, com registrador gráfico em papel, movido por mecanismo de relojoaria de alta precisão, da marca Hidrologia, modelo LNG – 7, e se localizaram nos seguintes pontos (Figura 5.2 e Figura 5.3):

- Em Cachoeira, no cais do Baiana's Bar;

- Em Coqueiros/Najé, na margem esquerda em frente a Coqueiros, na quadra de esportes da Fazenda Flamboyant;
- Em São Roque, no cais da PETROBRAS, junto do tubo de tranquilização do antigo marégrafo.



**Figura 5.2. Vista dos marégrafos instalados: a) Cachoeira; b) Coqueiros; c) São Roque.**

A escolha dos locais foi determinada pela existência de alguns poucos dados medidos em 1976 e pela necessidade de estabelecer pontos de controle do sistema estuarino. A estação em Cachoeira permite verificar as condições de entrada das águas liberadas pela barragem e a interação com a maré. Através da estação em Coqueiros/Najé é possível monitorar o efeito de

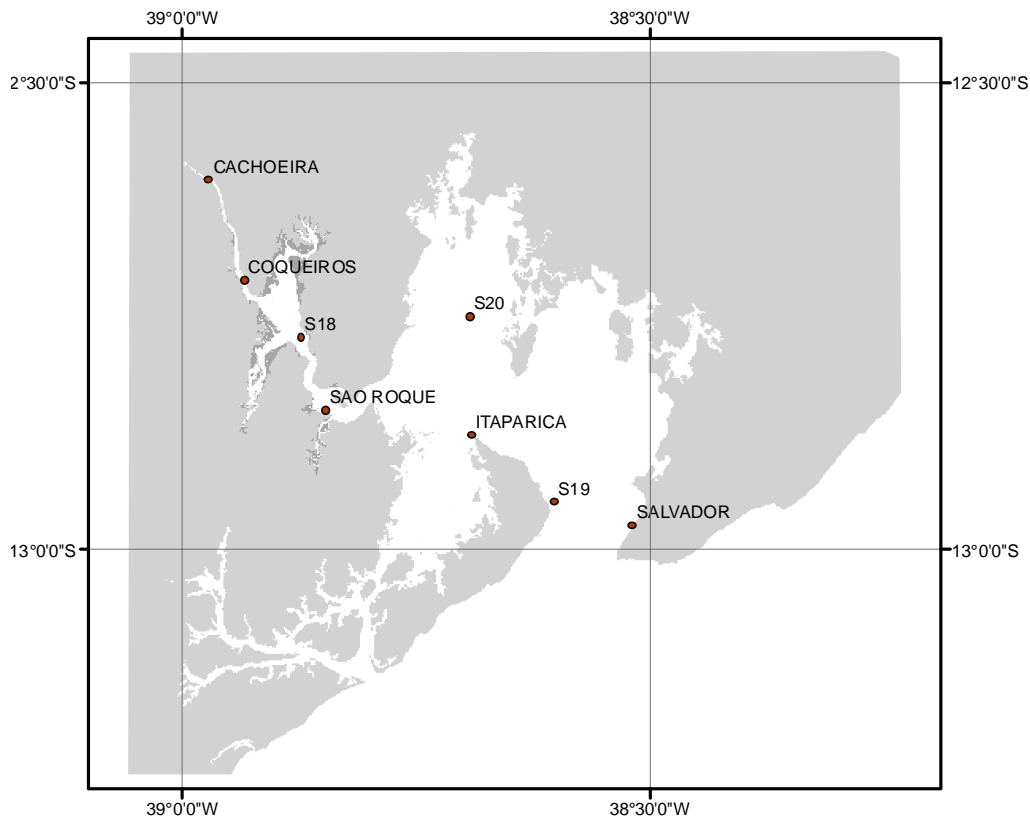


propagação da vazão fluvial antes de atingir a Baía de Iguape. No extremo, em São Roque, temos o monitoramento da maré no início do Canal do Paraguaçu, estabelecendo outra condição de controle.

Os equipamentos foram instalados nos dias 12 e 13/11/2001 e retirados em diferentes datas: Cachoeira – 4/01/2002; Coqueiros/Najé – 19/02/2002; São Roque – 7/01/2002. Em Coqueiros/Najé o marégrafo com sensor de pressão e registro digital foi instalado de 23/05/2005 a 22/12/2005 no mesmo local do marégrafo analógico. As principais características técnicas são: a) faixa de medição: 0 a 4,50 m; b) precisão global 0,2% da escala total = 0,009 m; c) intervalo de tempo de registro utilizado: 5 minutos.

Os registros dos marégrafos foram digitalizados, após a revisão das falhas associadas ao mau funcionamento do aparato mecânico do marégrafo.

A determinação das componentes harmônicas foi realizada de acordo com Franco (1988), com o apoio do aplicativo PACMARÉ (Franco, 2003). As marés para dos demais pontos de interesse (Salvador, S19, Itaparica, S20 e S18 - Figura 5.3) foram previstas com o módulo de previsão do PACMARÉ (Franco, 2003), baseado nas constantes harmônicas existentes. A Tabela 5.1 apresenta as informações das estações maregráficas.



**Figura 5.3. Localização dos marégrafos na BTS.**

Os dados medidos em Coqueiros/Najé e Cachoeira foram ajustados para o nível médio ( $Z_0$ ) previsto pelas componentes harmônicas oriundas dos dados de 1976 e determinadas pela DHN, utilizando o período de 27/11 a 2/12, no qual a vazão do rio foi pequena (13 m<sup>3</sup>/s). No caso de São Roque foi utilizado o período de 13 a 21/11, devido às imprecisões das medidas após o dia 21/11.

A análise das variações do nível médio da água na frequência submaré terá como objetivo principal avaliar se existe a influência da descarga fluvial oriunda da Barragem Pedra do Cavalo que resultem em alterações significativas do nível da maré no baixo curso do rio e na região central da Baía de Iguape. A variação no nível médio pode ser chamada de maré meteorológica quando é resultado de um evento meteorológico, sendo definida como a diferença entre o nível de água observado e o nível de água previsto pela maré astronômica. Em estuários, as causas desse fenômeno são, principalmente, as variações da pressão atmosférica, o efeito do vento sobre a superfície da água e a descarga fluvial devido à precipitação na bacia hidrográfica.

A determinação da maré meteorológica e outras possíveis oscilações nos registros de maré em Cachoeira e Coqueiros utilizará um filtro de baixa frequência baseado no método de FFT, segundo recomendam Walters e Heston (1982). Os dados foram interpolados em intervalos fixos de 15 minutos e utilizou-se o filtro de 72 h, eliminando os efeitos da maré astronômica. Os registros com qualidade em São Roque ficaram restritos à 10 dias (12 a 22/11/2001) e foram descartados das análises.

**Tabela 5.1. Informações das estações maregráficas.**

Estação	Latitude		Longitude		Período de monitoramento	Nível médio( $Z_0$ ) [m]	
	[° ]	[° ]	[° ]	[° ]		Cadastro <sup>2</sup>	Previsão 2001
Salvador	12°	58,40'S	38°	31,00'W	01/01 a 23/12/1960	1,31	
Ilha de Itaparica	12°	52,60'S	38°	41,30'W	06/08 a 06/09/1974	1,54	
S19 <sup>1</sup>	12°	56,90'S	38°	36,00'W	11 a 26/1/1999		
S20 <sup>1</sup>	12°	45,04'S	38°	41,42'W	11 a 26/1/1999		
São Roque	12°	51,00'S	38°	50,70'W	07 a 21/5/1976 13/11/2001 a 7/1/2002	1,63	1,619
S18 <sup>1</sup>	12°	46,31'S	38°	52,26'W	11 a 26/1/1999		
Najé	12°	42,60'S	38°	55,90'W	07 a 21/5/1976	1,66	1,638
Coqueiros	12°	42,65'S	38°	55,88'W	13/11/2001 a 19/2/2002		
Cachoeira	12°	36,20'S	38°	58,20'W	07 a 21/5/1976 12/11/2001 a 4/1/2002	1,67	1,683

<sup>1</sup> - BAHIA (2000); <sup>2</sup> - FEMAR (2005)

### 5.2.3 Parâmetros hidrográficos

A caracterização das condições de mistura do estuário do Rio Paraguaçu foi realizada durante cinco (05) ocasiões, para diferentes condições de maré, descarga fluvial e locais de monitoramento. A Tabela 5.2 apresenta um resumo dessas situações.

A primeira campanha, em novembro de 2001, foi realizada com objetivo de caracterizar o estuário para condições próximas da situação anterior à construção da barragem de Pedra do Cavalo, aproveitando a ocasião da operação de rebaixamento do nível do reservatório para a geração de um hidrograma de cheia.

**Tabela 5.2. Monitoramento do estuário do Rio Paraguaçu**

N.	Data	Monitoramento	Local	Seção	Maré	Estágio da maré	Q [ m <sup>3</sup> /s]
1	13/11/2001	Longitudinal	Eixo principal		Sizígia	BM	13
	14/11/2001	Transversal	Canal do Paraguaçu	II	Sizígia	Ciclo completo	367*
		Longitudinal	Eixo principal			BM	
	15/11/2001	Longitudinal	Eixo principal		Sizígia	PM/BM	402
	16/11/2001	Longitudinal	Eixo principal		Transição	BM	278
	17/11/2001	Longitudinal	Eixo principal		Transição	BM	167
	18/11/2001	Longitudinal	Eixo principal		Transição	BM	108
	19/11/2001	Longitudinal	Eixo principal		Transição	PM	58
	20/11/2001	Transversal	Canal do Paraguaçu	II	Quadratura	Ciclo completo	48
		Longitudinal	Eixo principal			PM	
	21/11/2001	Longitudinal			Quadratura	PM	13
2	26/08/03	Longitudinal	Eixo principal		Sizígia	BM	0
	27/08	Transversal	Baixo curso	VI		Ciclo completo	0
		Longitudinal	Eixo principal			PM/BM	0
	28/08	Longitudinal	Baía de Iguape		Sizígia	BM	183
	29/08	Transversal	Canal do Paraguaçu	I	Sizígia	Ciclo completo	191
		Longitudinal	Eixo principal e Baía de Iguape			PM/BM	
3	26/10/03	Transversal	Canal do Paraguaçu	I	Sizígia	Ciclo completo	15,6
		Longitudinal	Baía de Iguape			PM/BM	
4	02/11/03	Transversal	Canal do Paraguaçu	I	Quadratura	Ciclo completo	15,6
		Longitudinal	Eixo principal			PM/BM	
5	29/01/04	Longitudinal	Eixo principal e BI		Quadratura	BM	890
	30/01/04	Longitudinal	Baía de Iguape		Quadratura	PM/BM	341
	31/01/04	Transversal	BIC e BIS	III e IV	Quadratura	Ciclo completo	331
	7/02/04	Transversal	BIN	V	Sizígia	Ciclo completo	258
	8/02/04	Transversal	BIC e BIS	III e IV	Sizígia	Ciclo completo	236
		Longitudinal	Baía de Iguape		Sizígia	PM/BM	236
	9/02/04	Amostras para calibração	Variado		Sizígia	Vazante	340
	22/05/2005	Transversal	Baixo curso	VI		Ciclo completo	78

Q = Descarga fluvial; PM = Preamar; BM = Baixa-mar; BI = Baía de Iguape (S = Sul, C = Central e N = Norte); Seções I, II, III, IV, V e VI – ver Figura 5.4; \* vazão média considerada até o momento da sondagem hidrográfica no início do baixo curso – Coqueiros. A vazão média do dia 14/11 foi 656 m<sup>3</sup>/s, enquanto que a vazão máxima instantânea foi de 1534 m<sup>3</sup>/s de 13 às 16 horas.

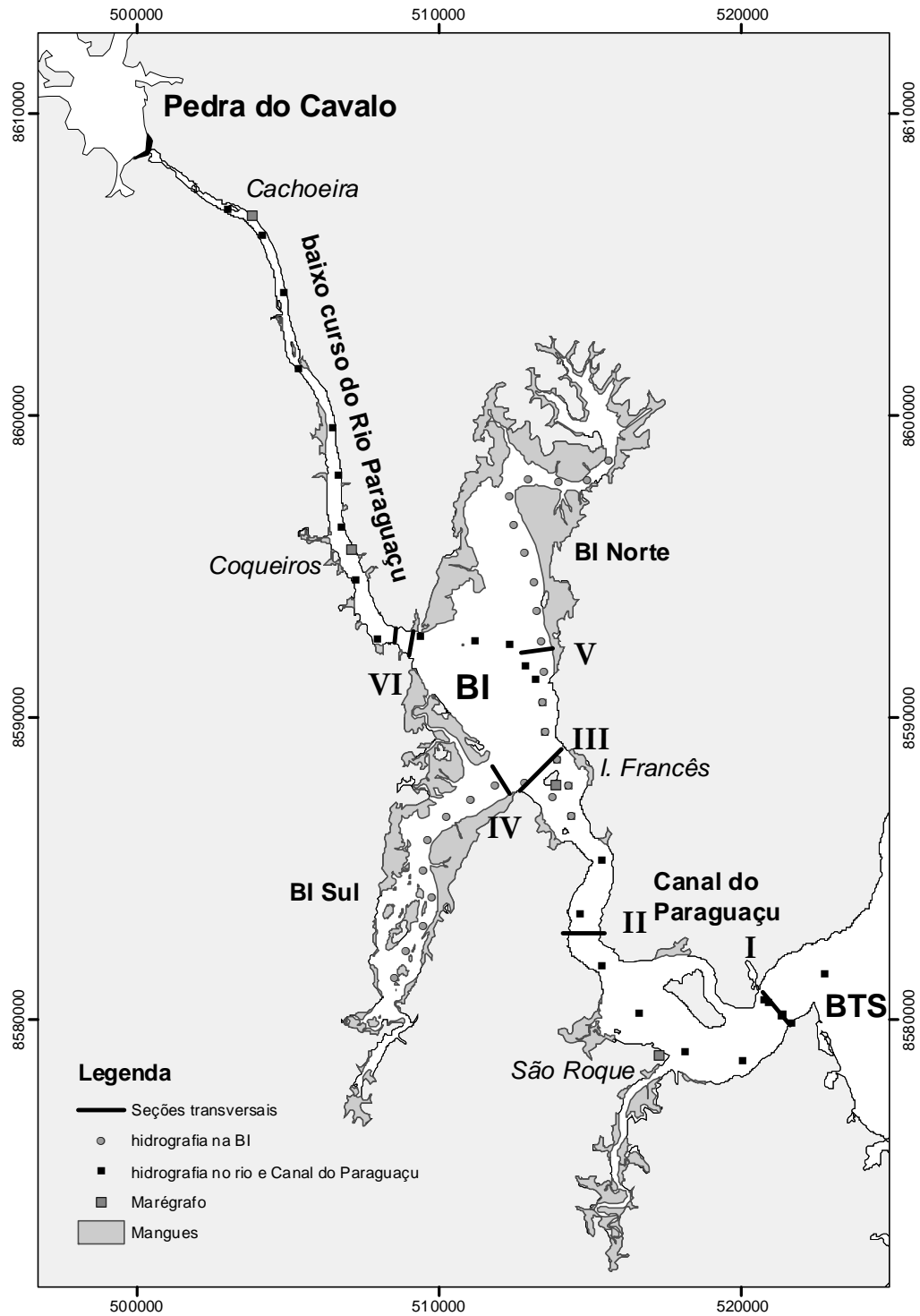
As campanhas de 2003 embora ainda se ocupassem da caracterização do estuário como um todo, através do monitoramento das correntes no Canal do Paraguaçu – seção transversal I – Figura 5.4, passaram também a monitorar as condições hidrográficas nos canais principais da Baía de Iguape. Em janeiro/2004, o objetivo do monitoramento foi detalhar as características de circulação da Baía de Iguape, uma vez que os dados de novembro/2001 indicaram ser ela uma região importante para a dinâmica do estuário. Os pontos de monitoramento dos perfis longitudinais, bem como as seções de medição transversal, são indicados na Figura 5.4.

O monitoramento dos parâmetros hidrográficos, mais especificamente a salinidade, a temperatura e os sedimentos em suspensão, foi realizado utilizando as sondas portáteis HORIBA, modelo U-10, e Sea-Bird, modelo SBE 19plus, esta última comumente chamada de CTD.

As sondas HORIBA, gentilmente cedida pela Superintendência de Recursos Hídricos (SRH), medem pH, oxigênio dissolvido, condutividade, turbidez, temperatura e salinidade. Estes tiveram todos os seus parâmetros calibrados segundo os procedimentos padrões indicados no manual do equipamento. Não foi possível calibrar o oxigênio dissolvido, pois o sensor apresentou defeito. As medidas de salinidade e de turbidez foram verificadas em laboratório com soluções padrões, abrangendo a faixa de zero a 36 para salinidade, e zero a 800 NTU para turbidez.

O CTD (Figura 5.5) mede profundidade, temperatura, salinidade e turbidez, fornecendo no arquivo de saída os valores de densidade correspondentes. A taxa de amostragem foi feita a uma frequência de 4 Hz, com velocidade de descida de aproximadamente 0,20m/s. A medição da salinidade é do tipo ativa, com a água sendo constantemente bombeada através da sonda. O sensor de turbidez é auxiliar, não fazendo parte da configuração básica.

A turbidez medida pelas sondas HORIBA foi convertida em concentração através de equações obtidas em laboratório a partir de soluções com concentração de argila conhecida, abrangendo a faixa de 5 a 700 mg/l. A relação entre a turbidez e concentração foi ajustada por trechos, com equações lineares, sendo os resultados apresentados na Tabela 5.3. Como o sedimento utilizado foi somente argila, as relações obtidas entre turbidez e concentração devem ser consideradas apenas como uma aproximação.



**Figura 5.4. Pontos de monitoramento do estuário do Rio Paraguaçu: baixo curso do rio; Baía de Iguape (BI); Canal do Paraguaçu. Cinco pontos do perfil longitudinal são coincidentes e estão sobrepostos por pontos de medição em direção ao setor Norte da BI (próximos da seção transversal III).**



Figura 5.5. Estrutura para o CTD, à esquerda, com suporte de madeira/metal + haste e roldana, e operação do equipamento (direita).

Tabela 5.3. Equações para determinação da concentração de sedimentos em suspensão [mg/l].

Sonda	Turbidez	Equação	R <sup>2</sup>
U-10 1995	0 a 40	$C_{ss} = 2,0922 * Turb$	0,9917
	41 a 530	$C_{ss} = 1,2757 * Turb + 19,119$	0,9978
U-10 1997	0 a 40	$C_{ss} = 2,0637 * Turb$	0,9983
	41 a 530	$C_{ss} = 1,2615 * Turb + 18,808$	0,9981

A calibração das sondas CTD foi realizada através da coleta de amostras em campo (9/2/2004), acompanhadas de medidas simultâneas das sondas. As amostras foram devidamente acondicionadas para transporte e levadas para laboratório, onde foram determinadas as concentrações de sedimentos em suspensão. A relação entre a turbidez e concentração resultante (Figura 5.6) foi:

$$C_{ss} [mg/l] = 1,6 * Turb [FTU] - 2 \quad (R^2 = 0,95) \quad (\text{Equação 5.2})$$

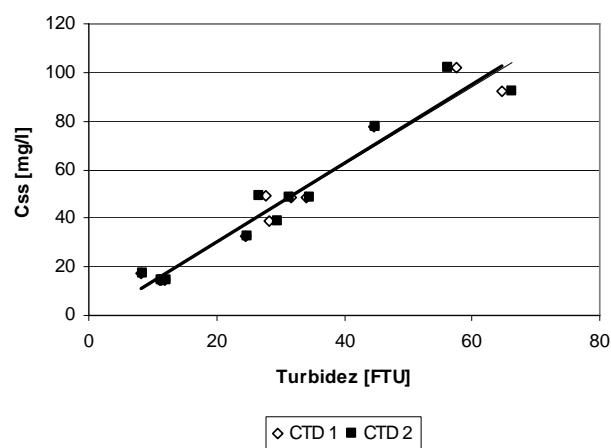


Figura 5.6. Relação ente turbidez e concentração de sedimentos – sondas CTD.

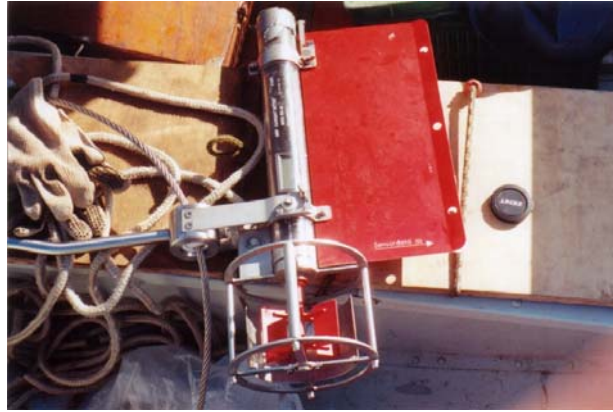
A grande quantidade de informações sobre a hidrografia, obtida com a sonda CTD Sea-Bird nos perfis verticais, exigiu o desenvolvimento de rotinas de processamento dos

dados de forma automatizada. As rotinas foram elaboradas em ambiente de programação do MATLAB, onde as medições pontuais foram interpoladas espacialmente. No caso dos perfis longitudinais a representação gráfica dos resultados experimentais foi feita em relação ao eixo ortogonal ( $Oxz$ ), com o eixo  $Ox$  orientado para a boca do estuário. A superfície da água foi adotada como a origem e os valores de profundidades são negativos. Os resultados obtidos nos ciclos de maré são apresentados em profundidade adimensional ( $Z$ ), a cada  $0,1Z$ .

#### 5.2.4 Correntes

As correntes foram medidas durante o monitoramento de ciclos completos de maré em seções transversais definidas na Tabela 5.2 e Figura 5.4. A representação gráfica dos resultados experimentais foi feita em relação ao eixo ortogonal ( $Oyz$ ). Adotou-se a margem esquerda (ME - sentido oceano) como a margem de referência, e valores positivos (negativos) para os valores da velocidade durante a maré vazante (enchente). A componente da velocidade normal à seção transversal (velocidade longitudinal) foi denotada de  $u$  e velocidade média em uma vertical foi representada por  $\bar{u}$ . A velocidade média em toda a seção transversal foi denominada por  $U$ , enquanto que a velocidade média na maré enchente/vazante ficou representada por  $\bar{U}$ . Considerou-se que as estofas correspondem à  $U=0$ . A velocidade no fundo foi considerada nula, assumindo o princípio de aderência (atrito máximo). As médias temporais de velocidade, bem como de salinidade, temperatura e concentração de sedimentos em suspensão foram determinadas para cada décimo da profundidade adimensional ( $Z$ ), conforme metodologia apresentada em Miranda *et al.* (2002).

Inicialmente, a velocidade e a direção das correntes foram medidas utilizando-se o correntômetro de rotor com eixo vertical, marca Sensordata, modelo SD-30 (Figura 5.7), com médias de 30 segundos em cada profundidade. Neste caso, somente um perfil de velocidade na seção transversal foi determinado. As profundidades de medições seguiram o padrão sugerido por Hume e Bell (1993), que estabelece espaçamentos não equidistantes. Assim, foram realizadas medições próximas da superfície, a 2 m da superfície, a 1 m acima do fundo e 2 m acima do fundo. No trecho intermediário os pontos de medição foram espaçados a cada 4 m de variação vertical. Em caso de inclinação do cabo do correntômetro, devido às altas velocidades, o ângulo com relação a vertical foi anotado para posterior correção das profundidades. As medições iniciaram na baixa-mar ou preamar, espaçados em intervalos de tempo constante. O SD-30 foi somente utilizado no monitoramento de novembro de 2001, na seção II (Figura 5.4).

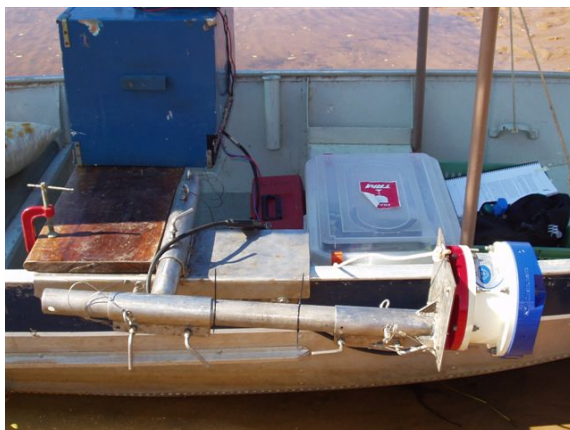


**Figura 5.7.** Foto ilustrativa do correntômetro SD-30.

Um ADCP da RD Instruments, modelo Rio Grande, 600 kHz (Figura 5.8 e Figura 5.9), permitiu o monitoramento das seções transversais I, III, IV, V e VI em toda sua extensão, com exceção da seção VI em agosto de 2003 (Figura 5.4).



**Figura 5.8.** Barco equipado para o monitoramento de seção transversal com ADCP e CTD.



**Figura 5.9.** Estrutura de fixação do ADCP adaptada à embarcação de alumínio de 5 m (esquerda) e ao barco da FUNDIPESCA com 15 m de comprimento (direita).



Os parâmetros mais importantes na configuração do ADCP são o modo de medição (WM), a altura da célula (WS), a distância abaixo do transdutor para localização da primeira célula (WF), o tempo entre “pings” (TP) e o número de “pings” por “ensemble” (WP). Os parâmetros adotados nos monitoramentos do estuário do Rio Paraguaçu são apresentados na Tabela 5.4. O modo de medição (WM) 1 pode apresentar, no caso de “ping” simples, erros com desvio padrão de 0,181 m/s para células de 0,5 m e 0,066 m/s para células de 1 m. Quando mais “pings” são utilizados para calcular a velocidade média o desvio padrão reduz na razão de  $WP^{-0,5}$  (RD Instrumets, 2002). O erro randômico das medidas depende de fatores internos tais como a frequência do ADCP, altura da célula, número de “pings” usados para definir o valor médio e a geometria dos “beams”. A estimativa do erro randômico na seção transversal é obtida pelo desvio padrão da “error velocity” definida em cada célula (RD Instrumets, 1996). O erro percentual ocorrido durante um ciclo completo de maré é sintetizado pelo erro gerado no prisma.

**Tabela 5.4. Parâmetros de configuração do ADCP Rio Grande 600 kHz - estuário do Rio Paraguaçu.**

<i>Local</i>	<i>WM</i>	<i>WS</i> [m]	<i>WF</i> [m]	<i>TP [s]</i>	<i>WP</i>
Seção I	1	1,00	0,25	0,2 (5 Hz)	20
Seção III a VI	1	0,50	0,25	0,2 (5 Hz)	10 a 20

Os perfis transversais foram realizados em intervalo de 1 hora durante um ciclo completo de maré determinado pela recorrência da vazão registrada no início do monitoramento. A seção V foi a única monitorada com intervalo de 0,5 hora. Normalmente, o monitoramento era iniciado momentos antes da estofa ser atingida.

A grande quantidade de informações fornecidas pelo ADCP ao longo da seção transversal, em ciclo de maré completo, exigiu o desenvolvimento de rotinas de processamento dos dados de forma automatizada. As rotinas foram elaboradas em ambiente de programação do MATLAB.

A operacionalização do processamento das correntes foi realizada através da rotina *adcp\_processing* (Genz *et al.*, 2005), que prescreve a definição, ainda em campo, de uma seção transversal bem delimitada (e.g. bóias de sinalização), de modo que não ocorra variação na largura da seção de medição durante o ciclo de maré. Durante o monitoramento, a trajetória do barco entre as bóias deve ser a mais direta possível de maneira que a seção transversal medida não sofra grandes alterações.

A preparação dos dados medidos pelo ADCP segue as seguintes etapas:

- a) O aplicativo WinRiver (disponibilizado pelo fabricante junto com o ADCP– v 1.03) em modo *Playback* é utilizado para inspeção visual dos dados adquiridos pelo ADCP, permitindo a anotação do sentido de travessia (ME → MD (margem direita) ou MD → ME) e a eliminação de eventuais trechos indesejáveis da trajetória de navegação (ex. movimento circular antes de iniciar a rota definitiva à outra margem).
- b) Ainda no WinRiver os dados são exportados no formato P-files.
- c) Cria-se o arquivo de entrada da rotina *adcp\_processing*, formato texto, contendo:
  - i) o nome de cada arquivo gerado pelo WinRiver (P-files), em ordem temporal, ii) hora do perfil, iii) se é necessário inverter o sentido de travessia da seção, e iv) distância, se o início da medição ultrapassou a posição da bóia de sinalização.
- d) Define-se o ângulo existente entre o eixo longitudinal do canal e o Norte, a partir de mapa ou pela observação da direção de corrente dominante durante a maré vazante ou enchente.

A rotina *adcp\_processing* permite:

- 1) Calcular a intensidade de corrente **perpendicular** à seção transversal (*u*);
- 2) Eliminar os dados falhos (“*bad ensembles*”) registrados na medição do ADCP;
- 3) Extrapolar os dados de corrente brutos até superfície e o fundo, preenchendo a região não medida pelo ADCP (função *interp1* com o método *nearest*);
- 4) Filtrar os dados brutos aplicando uma média entre três células horizontais adjacentes (opcional);
- 5) Estabelecer uma malha regular dos dados de corrente com correspondência espacial entre todas as medições durante o ciclo de maré;
- 6) Interpolar espacialmente os dados de corrente em toda a seção transversal, com exceção da região entre as bóias e a margem (função *interp2* com o método *linear*);
- 7) Usar um filtro média móvel ponderado entre três células horizontais adjacentes para eliminar efeitos de turbulência localizada (pesos 0,25 0,5 0,25 ou seja 1 2 1);
- 8) Realizar a média entre as correntes, célula por célula, caso exista mais de uma medição por estágio de maré;
- 9) Calcular a área total da seção, pela soma das células com dados de velocidade;
- 10) Calcular a vazão célula por célula, integrando na seção para obter a vazão total;

- 11) Determinar a velocidade média ( $U$ ) na seção através da razão entre a vazão total e a área total;
- 12) Calcular as velocidades em profundidade adimensional ( $Z$ );
- 13) Definir o campo de velocidade residual, integrando temporalmente as medições efetuadas ao longo do ciclo de maré.
- 14) Extrair o perfil de velocidades em profundidades  $Z$  adimensionais da(s) vertical(is) onde tenha(m) sido realizada(s) a(s) sondagem(ns) de parâmetros hidrográficos. Basta informar a distância do local de sondagem em relação a ME.

As saídas fornecidas pela rotina são:

- I. Campo de corrente de cada intervalo de tempo (matriz de dados e figura);
- II. Arquivo texto contendo a velocidade média, área da seção e a vazão total;
- III. Arquivo texto contendo a velocidade vertical média ( $\bar{u}$ ), utilizável por exemplo para calibração de modelos numéricos bi-dimensionais integrados na vertical;
- IV. Campo residual de correntes (matriz de dados e figura);
- V. Matriz com os perfis de velocidades em profundidades  $Z$  adimensionais da(s) vertical(is) onde tenha(m) sido realizada(s) a(s) sondagem(ns) de parâmetros hidrográficos.

Outro aspecto importante da rotina foi realizar a interpolação de campos de correntes para intervalos de tempo iguais entre o início e o fim do ciclo de maré, segundo a proposta de Miranda *et al.* (2002). Após a interpolação espacial das velocidades nas mesmas posições  $u(i,j)$  de todas as seções medidas, as profundidades ( $i$ ) de cada coluna da matriz ( $j$ ) são passadas para  $Z$  adimensional. A seguir, os campos de correntes são interpolados para intervalos de tempo iguais, permitindo a integração temporal e a definição da velocidade residual pela equação (Miranda *et al.*, 2002):

$$\langle u_{i,j} \rangle = \frac{1}{n} \left[ \frac{u_i(Z_j, t_0)}{2} + \sum_k u_i(Z_j, t_k) + \frac{u_i(Z_j, t_n)}{2} \right] \quad \text{Equação 5.3}$$

onde:  $i$  = número da vertical;  $Z_j$  = posição na vertical (0,1,2,...,10);  $k = 1,2,\dots,n-1$ ;  $t_n - t_0 = T$ ;  $T$  = período de maré;  $\Delta t$  = intervalo de tempo de interpolação;  $n = T/\Delta t$  – número de intervalos de tempo.  $T$  é determinado pela rotina, por interpolação das vazões obtidas, definindo a hora em que a vazão no final do ciclo se iguala a vazão do  $t_1$ . Adotou-se  $n=25$  para evitar subestimação dos campos próximos aos picos de enchente e vazante.

O valor da velocidade média na vertical ( $\bar{u}$ ), bem como das demais propriedades (salinidade, temperatura e concentração de sedimentos em suspensão), foi calculado por (Miranda *et al.*, 2002):

$$\bar{p}(t) = \frac{1}{10} \left[ \frac{P_{Z0,t}}{2} + \sum_j P_{Zj,t} + \frac{P_{Z1,t}}{2} \right] \quad \text{Equação 5.4}$$

onde:  $\bar{p}$  = valor médio propriedade na coluna d'água;  $P$  = valor da propriedade na posição  $Z_j$ , no tempo  $t$ .

Os parâmetros de entrada para a rotina (ângulo do rio, número de verticais, altura de célula vertical e posição do CTD) são apresentados no Anexo 2.

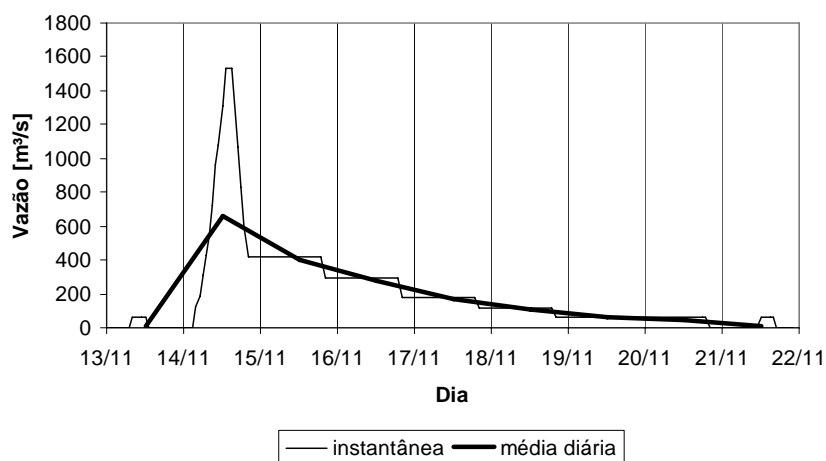
As informações dos perfis verticais de velocidade extraídos pelo *adcp\_processing* na posição correspondente à sondagem com CTD foram processadas em conjunto com os dados de salinidade, temperatura e sedimentos em suspensão, auxiliadas pelas rotinas desenvolvidas por Bérghamo *et al.* (2002).

Nas seções transversais da Baía de Iguape (III e V) e do baixo curso do Rio Paraguaçu (VI) foi estabelecida uma vertical de medição das características hidrográficas, no ponto de maior profundidade, enquanto que na seção do Canal do Paraguaçu (I e IV) foram utilizadas duas verticais.

### 5.2.5 Descarga fluvial

As informações da descarga fluvial ocorrida durante as campanhas de monitoramento hidrográfico se referem, basicamente, às vazões liberadas pela Barragem Pedra do Cavalo, fornecidas pela EMBASA SA. No primeiro monitoramento, 12 a 21/11/2001, procurou-se simular um hidrograma de cheia, com características naturais do rio, sendo necessário considerar: 1) o volume disponível no reservatório; 2) as regras operacionais das comportas; 3) a vazão máxima a jusante, sem causar inundação em Cachoeira e São Felix (~1.600 m<sup>3</sup>/s); e 4) as condições de maré (sizígia). O hidrograma de cheia foi programado para 8 dias de duração, vazão de pico prevista para 1600 m<sup>3</sup>/s e recessão do hidrograma com base em características dos eventos naturais (Capítulo 5). As comportas foram abertas às 4:00 horas do dia 14/11, em maré de sizígia, chegando ao pico de 1534 m<sup>3</sup>/s às 13:00 horas. Após às 16:00 horas, a operação de comportas reduziu, a uma taxa de 200 m<sup>3</sup>/s por hora, para 423 m<sup>3</sup>/s às 20:00 horas. Nos dias que se seguiram, as reduções foram calculadas com base no coeficiente de depleção determinado no estudo dos hidrogramas da série histórica de vazões (item 4.3.3).

O hidrograma produzido teve vazões médias diárias de 13, 656, 402, 278, 167, 108, 58, 48 e 13 m<sup>3</sup>/s, respectivamente para os dias 13 a 21/11/2001 (Figura 5.10). A vazão média diária de pico do hidrograma (656 m<sup>3</sup>/s) corresponde a uma vazão de cheia com frequência anual (Capítulo 4).



**Figura 5.10. Hidrograma gerado pela operação das comportas da barragem.**

O segundo monitoramento hidrográfico, de 26 a 29/08/2003, ocorreu em período de vazões baixas na bacia hidrográfica, embora na região do estuário fosse um período úmido. Novamente em maré de sizígia, duas situações de vazões liberadas pela barragem foram estabelecidas: 1) comportas fechadas nos dias 26 e 27/08; 2) comportas liberando vazões de 183 m<sup>3</sup>/s no dia 28 e de 191 m<sup>3</sup>/s nos dias 29 e 30/08, compatíveis com a vazão máxima de operação das turbinas para geração de energia. Nos dias que antecederam os trabalhos de campo, a precipitação registrada na Barragem Pedra do Cavalo foi de 66,5mm (acumulada entre os dias 20 a 25/08).

O terceiro monitoramento hidrográfico, ocorrido em 26/10 e 02/11/2003, abrangeu um período seco tanto no estuário quanto na bacia hidrográfica do Rio Paraguaçu. As vazões liberadas pela barragem são aquelas usuais do período seco: 15,6 m<sup>3</sup>/s.

O quarto monitoramento hidrográfico foi realizado entre 29/01 e 09/02/2004, encontrando o Rio Paraguaçu em uma época de cheia (Figura 5.11). A operação da barragem controlou uma enchente com vazão máxima com mais de 15 anos de tempo de retorno (3.367 m<sup>3</sup>/s – dia 19/01), liberando vazões entre 1391 m<sup>3</sup>/s e 1614 m<sup>3</sup>/s, entre 19/01 e 28/01. Nos três primeiros dias de monitoramento, as vazões foram 890 m<sup>3</sup>/s, 331 m<sup>3</sup>/s e 341 m<sup>3</sup>/s, respectivamente para 29, 30 e 31/01, estando a maré em quadratura. No período entre 1/2 e 6/2, as vazões variaram entre 354 m<sup>3</sup>/s e 410 m<sup>3</sup>/s, sendo reduzidas para 258 m<sup>3</sup>/s, 236 m<sup>3</sup>/s e 340 m<sup>3</sup>/s, respectivamente, nos dias 7, 8 e 9/2, quando a maré estava em sizígia.

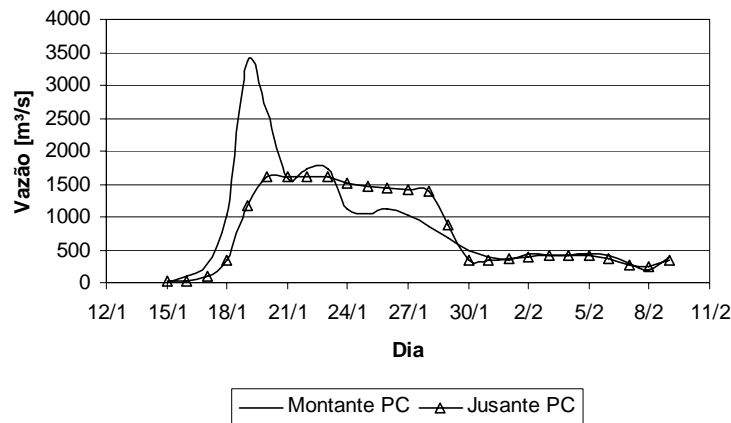


Figura 5.11. Vazões a montante e jusante da Barragem Pedra do Cavalo – janeiro e fevereiro de 2004.

## 5.3 RESULTADOS

### 5.3.1 Batimetria

A batimetria resultante do processamento dos dados disponíveis e coletados é apresentada na Figura 5.12. Em termos gerais, o estuário tem uma área total de 127,9 km<sup>2</sup>, da qual 33,6% (43 km<sup>2</sup>) estão no Canal do Paraguaçu, 59,5% (76,1 km<sup>2</sup>) na Baía de Iguape e 6,9% (8,8 km<sup>2</sup>) no baixo curso do rio. A área de inundação corresponde a 46% da área total (58,8 km<sup>2</sup>). Desta área de inundação, 74% se encontra na Baía de Iguape, a qual abriga 80,7% da área total (34,8 km<sup>2</sup>) de mangue do sistema (Tabela 5.5).

Tabela 5.5. Áreas características – estuário do Rio Paraguaçu.

	Área [km <sup>2</sup> ]				Área [%]		
	Total	Prof < 0m	Inundável	Manguezais	Total	Inundação	Mangue
Canal do Paraguaçu	43,0	29,0	14,0	5,55	33,6	32,6	12,9
Baía de Iguape	76,1	32,5	43,6	28,10	59,5	57,3	36,9
Baixo curso do rio	8,8	7,6	1,2	1,17	6,9	13,3	13,3
<i>Estuário</i>	<i>127,9</i>	<i>69,1</i>	<i>58,8</i>	<i>34,8</i>	<i>100,0</i>	<i>46,0</i>	<i>27,2</i>

Em termos de volume, o estuário pode acumular até 595,7x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, dos quais 193,8x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> são armazenados na área de inundação da maré (prisma de maré de sizígia). O Canal do Paraguaçu comporta a maior parte do volume total (69,4%) (ver Tabela 5.6).

Tabela 5.6. Volumes característicos – estuário do Rio Paraguaçu.

	Volume [x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ]			Volume [%]	
	Total	Prof < 0m	Inundável	Total	Inundação
Canal do Paraguaçu	413,2	306,4	106,8	69,4	25,8
Baía de Iguape	171,9	86,7	85,3	28,9	49,6
Baixo curso do rio	10,6	8,9	1,7	1,8	16,1
<i>Estuário</i>	<i>595,7</i>	<i>401,9</i>	<i>193,8</i>	<i>100,0</i>	<i>32,5</i>

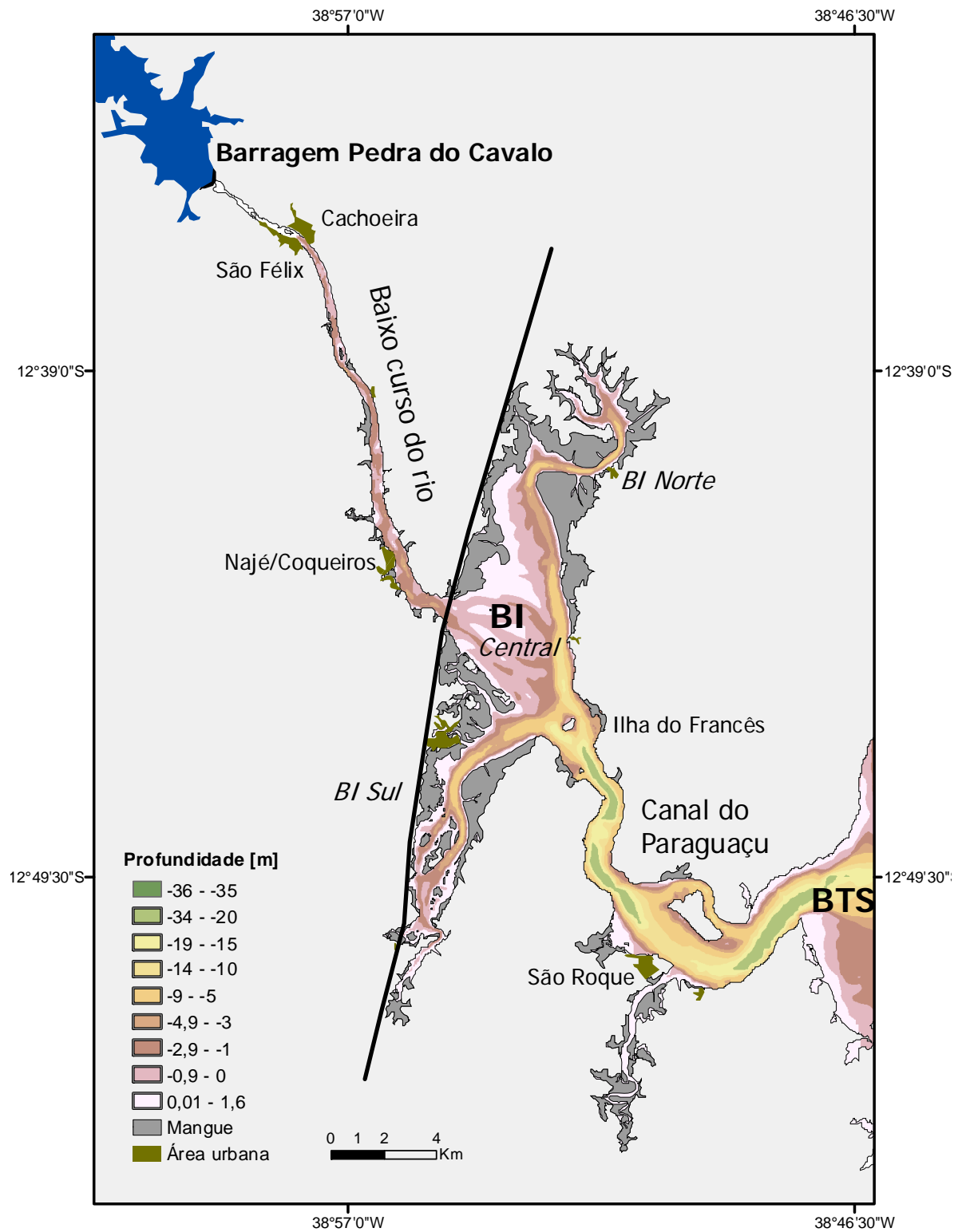
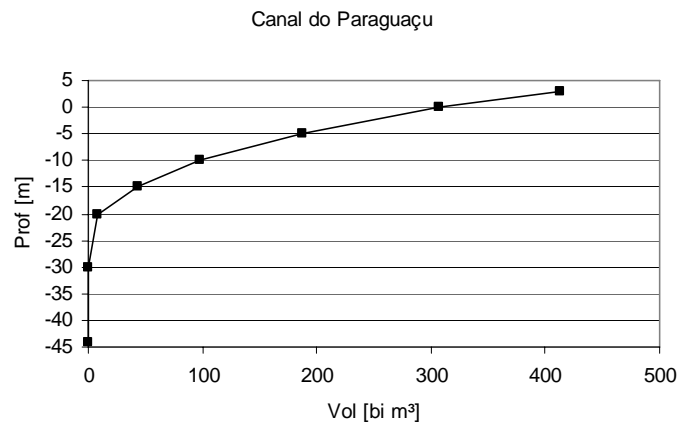
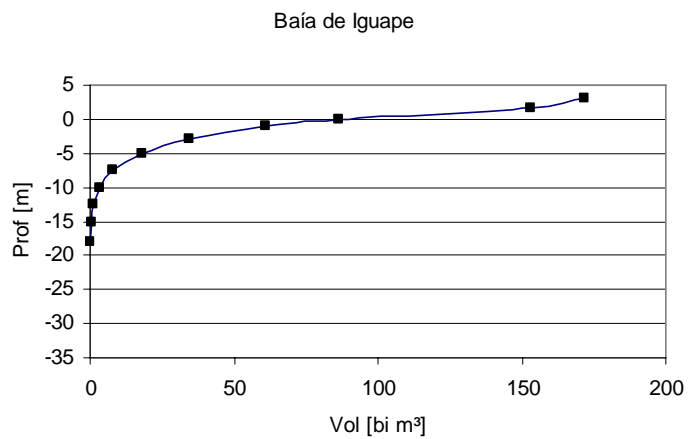


Figura 5.12. Batimetria do estuário do Rio Paraguaçu.

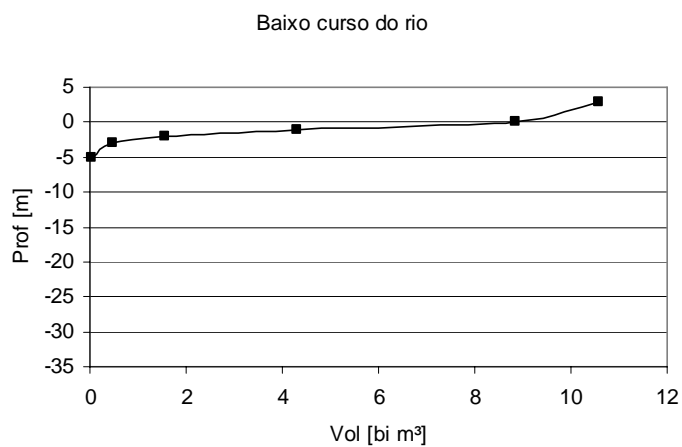
Devido às diferentes características, a hipsometria do estuário foi determinada para três áreas: Canal do Paraguaçu, Baía de Iguape e baixo curso do rio. As curvas hipsométricas resultantes são apresentadas na Figura 5.13, Figura 5.14 e Figura 5.15.



**Figura 5.13. Curva hipsométrica – Canal do Paraguaçu.**



**Figura 5.14. Curva hipsométrica – Baía de Iguape.**



**Figura 5.15. Curva hipsométrica – Baixo curso do rio.**



No Canal do Paraguaçu, embora a profundidade possa chegar aos -44m, a ocorrência de áreas mais profundas que -20 m se dá junto à garganta situada logo a jusante da Ilha do Francês. As profundidades mais rasas que -20 m são mais representativas, sendo -4,35 m a profundidade correspondente a 50% da área. Na Baía de Iguape, a grande área de inundação tem influência marcante sobre a hipsometria, sendo 0,60 m a profundidade correspondente a 50% da área. O ponto mais profundo foi de -19,7 m (próximo a Ilha do Francês), sendo que as profundidades abaixo de -3 m são representativas da área dos canais dos setores Norte e Sul da baía. O baixo curso do rio apresentou o menor percentual de área inundável (~15%), sendo a profundidade correspondente a 50% da área igual a -0,84 m (Tabela 5.7).

**Tabela 5.7. Profundidades características – estuário do Rio Paraguaçu.**

	Profundidade máxima [m]	Profundidade média (50%)
Canal do Paraguaçu	-44,0	-4,35
Baía de Iguape	-19,7	0,60
Baixo curso	-7,6	-0,84

As áreas de inundação no Canal do Paraguaçu e no baixo curso do rio estão associadas aos vales e pequenos rios afluentes ao estuário principal. Enquanto no baixo curso os mangues são reduzidos (menores que 0,35 km<sup>2</sup>), no Canal do Paraguaçu se destacam as áreas de manguezais dos estuários dos rios Cerqueira (0,97 km<sup>2</sup>) e Batatã (3,52 km<sup>2</sup>) que deságuam na margem direita, respectivamente a montante e jusante de São Roque, e juntos compreendem 81% dos manguezais no Canal.

A batimetria na parte central da Baía de Iguape (delta do rio) de 2005, em comparação com o mapeamento da DHN (1978), mostrou um aprofundamento entre 0 e 1m na profundidade em cerca de 86% da área do delta do Rio Paraguaçu.

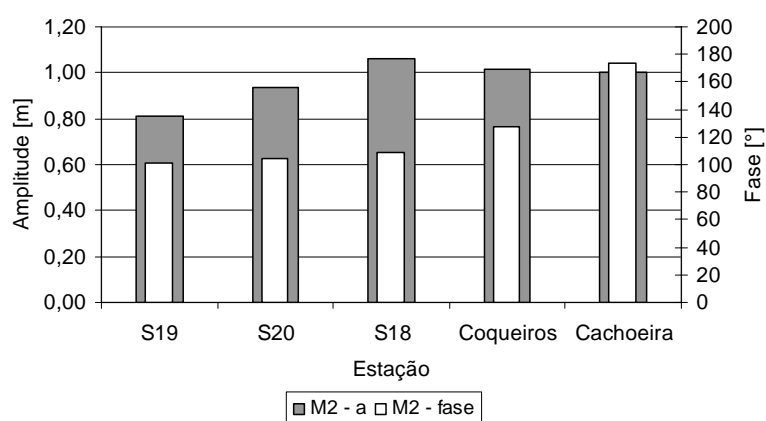
### 5.3.2 Maré

As marés na região são caracteristicamente semi-diurnas, com número de forma  $K = (O_1 + K_1) / (M_2 + S_2)$  (Pond & Pickard 1983) variando entre 0,094 (S19) e 0,062 (Coqueiros em 2005) (Tabela 5.8).

As componentes harmônicas para as estações de interesse (Figura 5.3) são apresentadas na Tabela 5.8. A geração de componentes harmônicas de qualidade para São Roque foi inviável, devido a problemas nos registros. As componentes harmônicas das estações Ilha de Itaparica e Salvador também foram descartadas. No caso da Ilha de Itaparica a altura média obtida em sizígia foi excessiva (2,91m) e aparentemente incompatível com as demais estações. Na estação de Salvador, a incoerência está no tempo, com preamares e

baixa-mares ocorrendo depois daquelas de S19 e S20, o que é fisicamente inconsistente. Desta forma, somente serão utilizadas para a descrição do comportamento da maré as estações S19, S20, S18, Coqueiros e Cachoeira, principalmente as três últimas estações que estão no interior da região de estudo.

A componente de maior amplitude, a lunar principal ( $M_2$ ), variou entre 0,81 m e 1,06 m, apresentando uma amplificação de 0,25 m entre S19 e S18 e amortecimento de 0,047 m de S18 para Coqueiros e de 0,013 m de Coqueiros para Cachoeira, ou seja, uma propagação de estuário hipersíncrono até S18, passando para hiposíncrono no baixo curso do rio. A fase de  $M_2$  mostrou um aumento significativo em Cachoeira ( $174^\circ$ ) em comparação às demais estações (100 a  $128^\circ$ ) (Tabela 5.8 e Figura 5.16), o que representa uma defasagem no tempo entre 1:32 horas e 2:28 horas. Convém destacar que na análise harmônica de 2005 outras duas componentes, que não haviam aparecido nas anteriores,  $MU_2$  e  $SK_3$  (não apresentadas) tiveram valores de amplitude (fase) de 0,061 m ( $152^\circ$ ) e 0,02 m ( $280^\circ$ ), respectivamente.



**Figura 5.16. Variação de amplitude [m] e fase [°] da componente  $M_2$ .**

Utilizando-se os dados de maré prevista para o ano de 2003, os valores médios da altura da maré em sizígia e quadratura foram determinados nas cinco estações, considerando a maior sizígia e a menor quadratura de cada mês. Os valores, na maré de sizígia, demonstram uma amplificação de 0,81 m desde S19 até Coqueiros, na entrada do baixo curso do Rio Paraguaçu. Daí até Cachoeira a maré sofre amortecimento de 0,26 m (Tabela 5.9 e Figura 5.17). Em quadratura, uma amplificação de 0,28 m ocorre até a estação S18, na Ilha do Francês, depois amortece em 0,05 m até Coqueiros (possivelmente devido a grande área de expansão proporcionada pela Baía de Iguape e seus manguezais), e por fim, cresce em 0,06 m até Cachoeira.

**Tabela 5.8. Número de forma (K) e componentes harmônicas das estações maregráficas.**

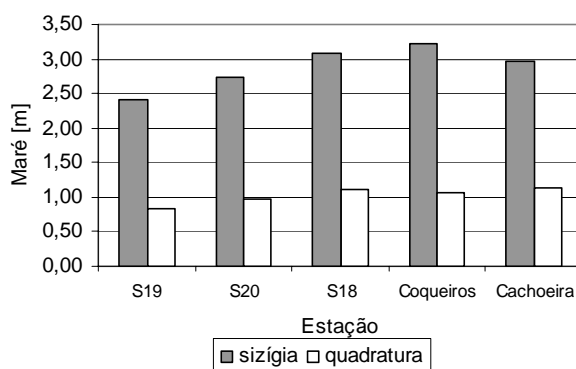
	Salvador <sup>3</sup>		Itaparica <sup>3</sup>		S19 <sup>1</sup>		S20 <sup>1</sup>		S18 <sup>1</sup>		Coqueiros 2001 <sup>2</sup>		Coqueiros 2005 <sup>2</sup>		Cachoeira <sup>2</sup>	
<i>N. de Forma (K)</i>																
	0,099		0,091		0,094		0,090		0,074		0,084		0,062		0,088	
<i>Componentes Harmônicas</i>																
	a [m]	fase[°]	a [m]	fase[°]	a [m]	fase[°]	a [m]	fase[°]	a [m]	fase[°]	a [m]	fase[°]	a [m]	fase[°]	a [m]	fase[°]
Q <sub>1</sub>	0,019	87,0	0,020	93,3	0,024	100,4	0,027	101,7	0,030	111,5			0,022	110,4		
O <sub>1</sub>	0,066	122,2	0,070	122,2	0,069	125,7	0,073	131,2	0,067	136,9	0,060	141,3	0,062	135,3	0,049	174,9
P <sub>1</sub>	0,014	202,0	0,015	213,3	0,012	203,6	0,014	212,7	0,013	217,2	0,019	220,4	0,010	214,2	0,022	231,0
K <sub>1</sub>	0,041	214,4	0,046	220,7	0,035	209,9	0,041	219,3	0,040	223,7	0,057	226,8	0,029	220,6	0,067	235,5
N <sub>2</sub>	0,145	108,9	0,167	107,3	0,101	97,1	0,106	98,0	0,114	99,8	0,206	145,9	0,193	125,8	0,117	227,3
M <sub>2</sub>	0,780	110,3	0,896	110,2	0,812	100,8	0,933	104,4	1,060	109,0	1,013	127,3	1,045	128,3	1,000	173,6
S <sub>2</sub>	0,305	124,3	0,378	123,3	0,291	118,3	0,335	122,6	0,379	129,3	0,384	147,9	0,425	149,7	0,323	198,9
K <sub>2</sub>	0,084	116,3	0,103	124,4	0,079	119,7	0,091	124,1	0,103	131,0	0,105	149,6	0,116	151,4	0,088	201,0
2N <sub>2</sub>	0,021	100,8	0,022	105,8	0,013	93,3	0,014	91,6	0,015	90,5	0,028	164,5	0,026	123,4	0,016	281,0
NU <sub>2</sub>	0,026	112,6	0,032	108,3	0,019	97,4	0,020	98,7	0,022	100,7	0,039	144,0	0,037	126,1	0,022	221,7
T <sub>2</sub>	0,011	228,4	0,039	124,2	0,017	119,0	0,020	123,4	0,022	130,2	0,023	148,7	0,025	150,6	0,019	200,0
L <sub>2</sub>	0,023	111,0	0,022	122,8									0,076	106,7	0,102	17,2
2SM <sub>2</sub>					0,016	290,2	0,019	289,7	0,025	294,2						
M <sub>3</sub>	0,012	126,1	0,019	124,9	0,013	112,8	0,014	121,0	0,021	143,4			0,026	153,3		
MO <sub>3</sub>					0,005	130,5			0,010	154,1	0,021	175,3	0,013	246,9	0,035	264,6
MN <sub>4</sub>					0,009	143,6	0,012	158,0	0,023	165,5	0,028	228,7	0,032	255,2	0,039	327,6
M <sub>4</sub>	0,010	291,1	0,037	287,7	0,020	233,7	0,037	279,1	0,096	284,6	0,058	271,9	0,059	294,2	0,107	313,8
SN <sub>4</sub>															0,040	102,0
MS <sub>4</sub>	0,012	15,1	0,023	0,7	0,006	323,7	0,023	4,8	0,049	359,2					0,071	292,6
M <sub>6</sub>					0,005	315,4			0,024	104,6	0,019	145,1	0,021	162,9	0,025	334,2
MSN <sub>6</sub>											0,011	132,9			0,020	174,1
2MS <sub>6</sub>									0,013	108,1	0,026	154,0	0,027	168,0	0,037	318,5
2SM <sub>6</sub>															0,018	27,8

Obs. a – amplitude; <sup>1</sup> - Bahia (2000); <sup>2</sup> - novas; <sup>3</sup> - DHN

**Tabela 5.9. Altura da maré [m] na BTS e estuário do Rio Paraguaçu.**

Maré	S19	S20	S18	Coqueiros	Cachoeira
<i>Média</i>	1,63	1,86	2,10	2,15	2,04
<i>Sizígia</i>					
Média [m]	2,41	2,74	3,08	3,22	2,96
Desvio padrão [m]	0,15	0,17	0,19	0,24	0,20
<i>Quadratura</i>					
Média	0,84	0,98	1,12	1,07	1,13
Desvio padrão [m]	0,15	0,17	0,18	0,09	0,13

A defasagem de tempo média entre S19, na entrada da BTS, e o extremo do estuário do Rio Paraguaçu, em Cachoeira, foi de 59 minutos na preamar e de 1:48 horas na baixa-mar (Tabela 5.10). A maior parte desta defasagem temporal ocorre ao longo do Rio Paraguaçu. Conforme mostra a Tabela 5.10, o atraso na baixa-mar da estação S18 chegou no máximo à meia hora, enquanto que o atraso de Cachoeira em relação a S18 pode ser de até 02:01 + 00:55 horas. Como será visto adiante, essa defasagem está associada à presença do delta na Baía de Iguape e à rugosidade no baixo curso do Rio Paraguaçu.



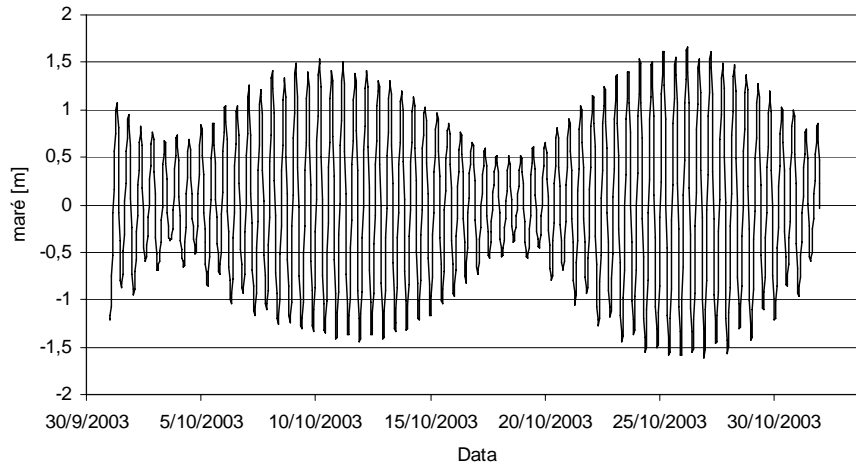
**Figura 5.17. Altura média da maré na BTS e estuário do Rio Paraguaçu – sizígia e quadratura – 2003.**

**Tabela 5.10. Defasagem de tempo de ocorrência da preamar (PM) e baixa-mar (BM).**

Defasagem de tempo [hora:minuto]	S19 para Cachoeira		S19 para S20		S19 para S18		S18 para Coqueiros		Coqueiros para Cachoeira	
	PM	BM	PM	BM	PM	BM	PM	BM	PM	BM
Média	00:59	01:48	00:35	ND	00:35	00:03	ND	00:29	00:29	01:14
Máxima	01:32	02:27	00:45	00:31	00:45	00:31	00:19	00:55	01:08	02:01

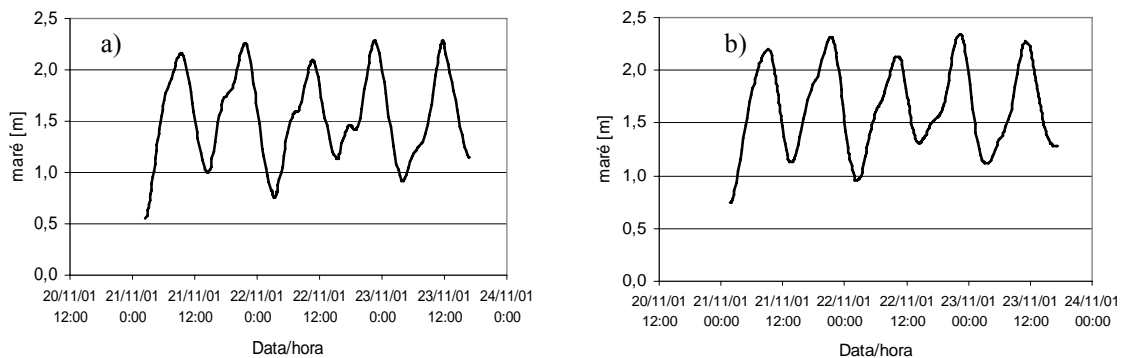
Obs. ND – Não definida;

As desigualdades diurnas podem alcançar dezenas de centímetros (e.g. em S18 o valor máximo foi de 0,51 m) (Figura 5.18). As maiores variações ocorreram nos dias de transição entre sizígia e quadratura e vice-versa. Nos dias de sizígia os valores de desigualdade diária foram menores (0,12 a 0,16 m) do que em quadratura (0,18 a 0,28 m).



**Figura 5.18. Desigualdade da altura de maré – estação S18.**

Na menor maré de quadratura de alguns meses do ano observa-se uma deformação diferenciada na maré enchente em Cachoeira e Coqueiros, sendo mais destacado em Cachoeira (Figura 5.19).



**Figura 5.19. Deformação da onda de maré observada em Cachoeira (a) e Coqueiros (b) – quadratura.**

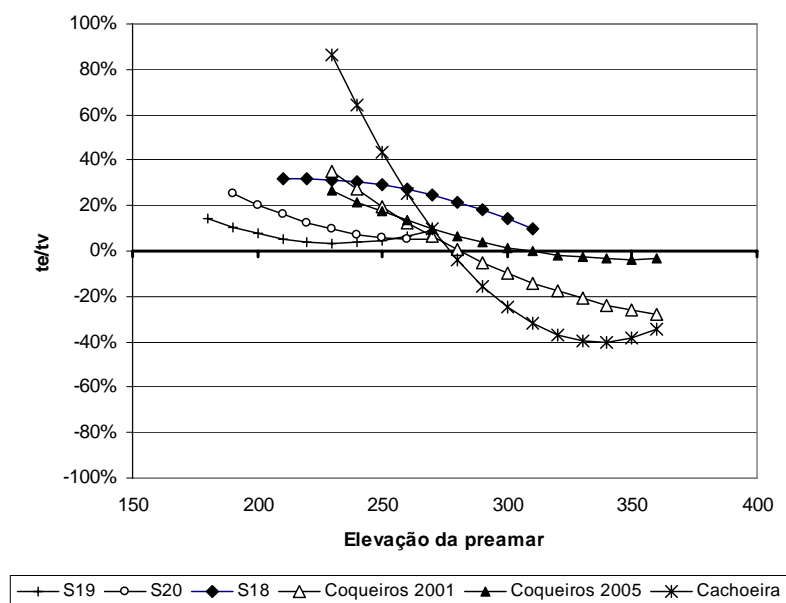
### 5.3.2.1 Assimetria

A onda de maré apresenta uma assimetria positiva na maior parte da BTS, que segundo definição de Lincoln e Fitzgerald (1988), caracteriza-se por um tempo de maré enchente ( $t_e$ ) maior que o tempo de maré vazante ( $t_v$ ). Por exemplo, para o mês de novembro de 2001, em sizígia a razão  $t_e/t_v$  foi de 4% na estação S20 e de 8% na estação S18. No entanto, a assimetria se inverteu no baixo curso do Rio Paraguaçu quando em Cachoeira  $t_e/t_v = -26\%$  (negativa). Em quadratura a assimetria positiva tende a se acentuar, alcançando 58% em S18 (Tabela 5.11).

**Tabela 5.11. Tempo de enchente e vazante em 14 e 21/11/2001 [hora:minuto].**

Estação	Sizígia-14/11			Quad -21/11		
	te	tv	te/tv [%]	te	tv	te/tv [%]
S20	06:15	06:00	4	07:07	05:15	36
S18	06:30	06:00	8	07:30	04:45	58
Cachoeira	05:15	07:07	-26	06:22	05:45	11

A Figura 5.20 mostra a variação de te/tv para toda a faixa de variação da elevação da preamar nos meses de novembro e dezembro de 2001, bem como em 2005 para Coqueiros. Enquanto as estações da BTS (S19 e S20) e do Canal do Paraguaçu (S18) apresentaram somente  $te/tv > 0$  (assimetria positiva), no baixo curso do rio a assimetria se tornou negativa ( $te/tv < 0$ ) em marés de sizígia, e positiva para marés de quadratura. Em Cachoeira, as mudanças na assimetria são marcantes (valores extremos de te/tv iguais a -40% e 87%). A relação te/tv em Coqueiros no período de 2005, mostrou uma assimetria negativa mínima em sizígia, diferente daquela obtida para 2001, e deve ser consequência da não ocorrência de cheias.



**Figura 5.20. Variação média da proporção de te/tv [%] em função da elevação da maré (nível médio arbitrário).**

No estuário do Rio Paraguaçu a relação de  $M_4/M_2$  cresce progressivamente entre S19, S20 e S18 (0,025, 0,04 e 0,09) e depois de Coqueiros (0,057) para Cachoeira (0,107) (Tabela 5.12). No trecho da BTS entre S19 e S20, com o aumento de áreas rasas ( $< 10$  m) e intermareais (Lima e Lessa, 2002; Bonfim *et al.*, 2003), o efeito do atrito deve ser o principal

fator para o crescimento de  $M_4/M_2$ . No Canal do Paraguaçu (S18), o confinamento do escoamento no canal pode estar contribuindo para a distorção da onda de maré. Por fim, no trecho do baixo curso do rio, o efeito do truncamento do nível da água em função do delta do rio na Baía de Iguape foi definitivo para a distorção da maré, bem como o atrito no canal fluvial devido às pequenas profundidades.

O comportamento da fase das componentes harmônicas  $M_4$  e  $M_2$ , descrito por  $2M_2-M_4$ , que indica a direção da assimetria, variou entre  $33^\circ$  a  $343^\circ$  (Tabela 5.12). Os valores entre  $180^\circ$  e  $360^\circ$  (estações S19, S20, S18 e Coqueiros) correspondem a assimetria positiva, enquanto que valores entre  $0^\circ$  e  $180^\circ$  referem-se à assimetria negativa (Cachoeira) (Aubrey e Friedrichs, 1988). A relação de fase  $2M_2-M_4$  corresponde à assimetria encontrada por  $t_e/t_v$  nas estações da área de estudo, à exceção de Coqueiros em 2001 (provavelmente por estar na região de transição da assimetria positiva à negativa).

**Tabela 5.12. Relação entre as componentes harmônicas  $M_2$  e  $M_4$ .**

	S19	S20	S18	Coqueiros	Cachoeira
$M_4/M_2$	0,025	0,040	0,090	0,057 <sup>1</sup> /0,056 <sup>2</sup>	0,107
$2M_2-M_4$	328	290	293	343 <sup>1</sup> /322 <sup>2</sup>	33

<sup>1</sup> 2001/ <sup>2</sup> 2005

Como a assimetria da maré resulta em intensidades de correntes diferenciadas entre a enchente e a vazante, nos dias próximos e durante a quadratura, quando  $t_e > t_v$  (Figura 5.20), espera-se correntes mais intensas na vazante ao longo de todo o estuário. Por outro lado, na sizígia, as correntes no baixo curso do rio devem ser mais intensas durante a enchente.

### 5.3.2.2 *Variações do nível da água na frequência submaré*

Durante a cheia simulada em novembro de 2001 foi possível registrar alterações do nível da maré devido às vazões liberadas pela barragem. No dia da máxima vazão (14/11), o nível médio da maré subiu cerca de 0,8 m em Cachoeira, sendo que o nível da preamar foi 0,5 m superior a maré astronômica prevista e a altura da maré apresentou uma redução em 1,2 m. Em Coqueiros, a estação localizada mais a jusante, o aumento no nível médio da maré foi de somente 0,4 m e a altura da maré reduziu 0,5 m (Figura 5.21 e Figura 5.23). O efeito da descarga fluvial sobre a maré em Cachoeira persistiu até o dia 19/11, quando a vazão era de 58 m<sup>3</sup>/s (Figura 5.22 a). Em Coqueiros (Figura 5.22 b), as alterações sobre o nível da maré foram observadas somente até dia 18/11, quando a vazão era de 108 m<sup>3</sup>/s. Na estação mais a jusante, São Roque, os efeitos da onda de cheia fluvial não foram perceptíveis.

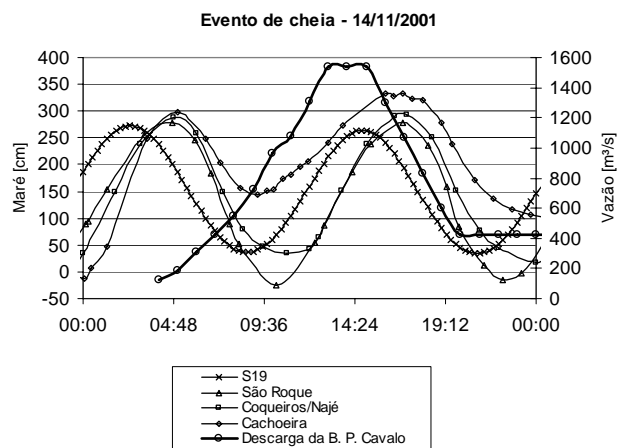


Figura 5.21 .Maré e vazão liberada pela Barragem Pedra do Cavalo – 11/2001 .

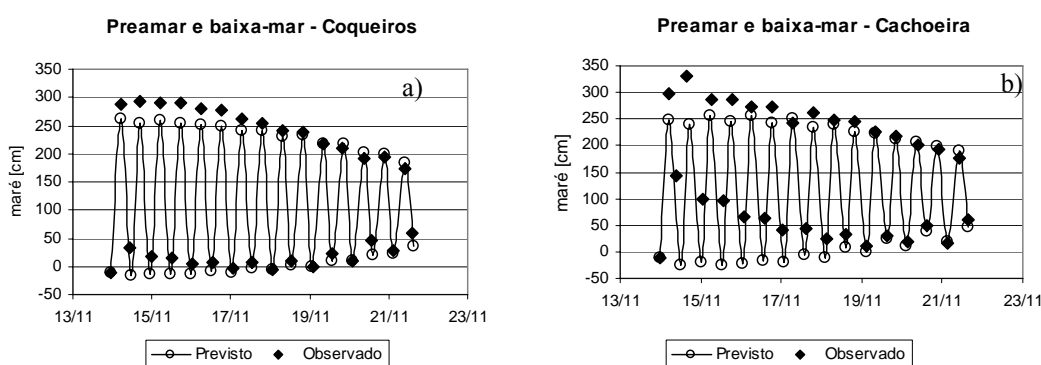


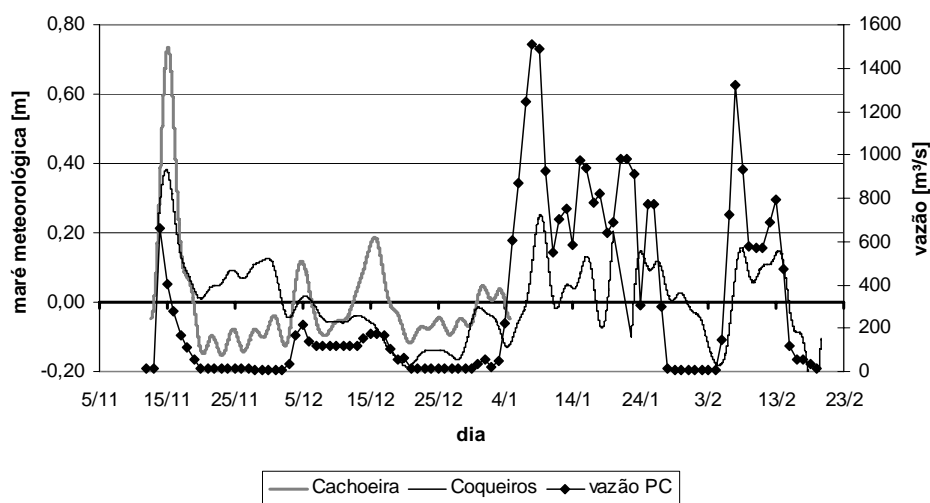
Figura 5.22. Maré prevista e observada durante o evento de cheia – 11/2001: a) Cachoeira e b) Coqueiros.

No período de monitoramento de 2001/2002 houve outros eventos de cheia. A Figura 5.23 apresenta as vazões diárias e a oscilação da maré calculada com um filtro de baixa frequência de 72 horas. Observou-se que em Cachoeira o aumento do nível médio da maré é muito sensível à descarga da Barragem Pedra do Cavalo, até mesmo pela proximidade, a exemplo do dia 1/1/2002 quando a vazão foi  $58,4 \text{ m}^3/\text{s}$  e provocou o aumento de  $0,03 \text{ m}$ . Em Coqueiros, devido ao amortecimento no baixo curso e, possivelmente, à expansão da região de escoamento na Baía de Iguape (cerca de  $3,5 \text{ km}$  a jusante), vazões da ordem de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  ou mais são necessários para provocar o aumento do nível médio. No entanto, na fase de recessão de um hidrograma ou após a ocorrência de uma cheia, vazões menores são suficientes para provocar alterações.

Em 2005, somente a estação de Coqueiros esteve em operação, com objetivo de avaliar o efeito da vazão liberada pelas turbinas da geração de energia elétrica na UHE de Pedra do Cavalo sobre o nível médio da água na Baía de Iguape (de 23/5 a 22/12/2005). A



cota mínima e máxima do nível médio foi de -0,14 m (dia 22/9/2005) e 0,22 m (dia 15/11/2005), respectivamente, tendo a maior oscilação ocorrido de 22 a 28/8/2005 (0,28 m) (Figura 5.24).

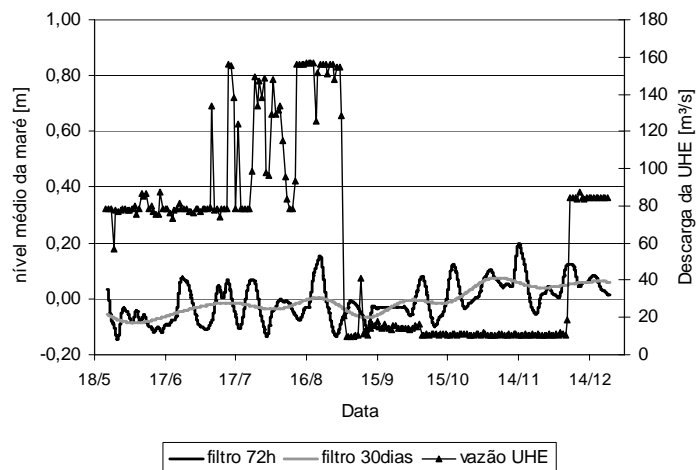


**Figura 5.23. Variações no nível médio da maré 2001/2002 – filtro de 72 horas. Vazão média diária liberada na barragem Pedra do Cavalo (PC).**

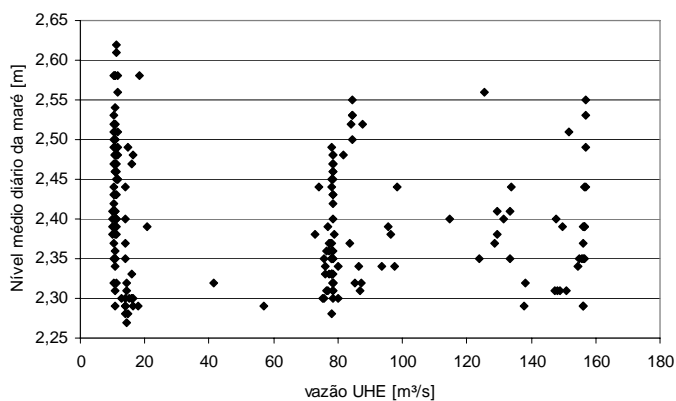
Em Coqueiros, além das alterações na maré devido à descarga fluvial, as oscilações são causadas pelo controle morfológico do leito do rio na região do delta. Os extensos bancos intermareais na região deltáica truncam parcialmente a onda de maré na baixa-mar de sizígia, ocasionando o efeito da assimetria descrito acima. Além disso, como o nível da maré baixa é sustentado acima daquele que seria atingido caso o delta não existisse, o nível médio é elevado nas marés de sizígia. Desta forma, observa-se que as oscilações do nível médio têm um período de aproximadamente 14 dias (Figura 5.24). Durante o período de 23/5 a 18/8 e de 6 a 22/12, quando as vazões liberadas pela UHE variaram entre 75 m<sup>3</sup>/s (uma turbina) e 160 m<sup>3</sup>/s (duas turbinas), não se observou uma correlação direta entre as vazões e a variação no nível médio da maré (Figura 5.25).

Por outro lado, a maré meteorológica pode ser observada em sua variação sazonal com o filtro de 30 dias (Figura 5.24), com valores abaixo da média de maio a setembro e acima da média de outubro a fevereiro. A variação máxima foi de 0,15 m, com níveis médios menores ocorrendo em maio de 2005 (-0,085 m) e maiores em novembro 2005 (0,076 m).

Desta maneira, considerando-se as análises com dos dados de 2001/2002, resulta que as vazões turbinadas não devem provocar alterações significativas sobre o nível médio. No entanto, há que considerar as questões das correntes e salinidade, apresentadas a seguir.



**Figura 5.24. Variações no nível médio da maré em Coqueiros em 2005 (filtro de 72 horas e 30 dias) e vazão liberada pela UHE PC.**



**Figura 5.25. Variação do nível médio em Coqueiros em 2005 sem correlação com a descarga da UHE PC.**

### 5.3.3 Campo de correntes, perfil vertical de correntes e hidrografia

Os resultados da distribuição das velocidades nas seções transversais são apresentadas a seguir, além das informações sobre as características do ciclo de maré vazante e enchente (duração, velocidades e vazões), o prisma, a vazão residual, os índices de assimetria da maré horizontal e vertical (IAdv - Mantovanelli *et al.*, 2004) e os erros nos campos de corrente, bem como os perfis hidrográficos. De forma geral, os erros nos campos de correntes variaram entre o máximo de 0,025 m/s e o mínimo de 0,008 m/s nos monitoramentos em maré de sizígia e na quadratura de 02/11/2003 (Seção I - Figura 5.4; célula 1 m de altura), enquanto que o erro no prisma ficou entre 7,4% e 2,7%, conforme será descrito nos resultados a seguir. No entanto, no monitoramento de quadratura de 31/01/2004, nas seções III (Canal do Paraguaçu) e IV (BIS) os erros máximo e mínimo aumentaram, respectivamente, para 0,046 m/s e 0,014 m/s, devido à menor altura da célula (0,5 m) e às baixas velocidades. O erro no prisma foi maior, com 20,8% na seção III e 33,8% na seção IV.

### 5.3.3.1 Canal do Paraguaçu – seções I e II

A seção transversal no trecho final do Canal do Paraguaçu (seção I - Figura 5.4) foi definida com o propósito de ser a seção de controle e referência para: 1) a caracterização hidrográfica e hidráulica do estuário; e 2) calibração da modelagem numérica. Assim, foram monitoradas marés de sizígia e quadratura com vazão fluvial baixa (15,6 m<sup>3</sup>/s), respectivamente em 26/10 e 02/11/2003, e maré de sizígia com vazão de 191 m<sup>3</sup>/s, relacionada ao máximo turbinamento para geração de energia da UHE Pedra do Cavalo, em 29/08/2003. A outra seção de monitoramento de correntes foi estabelecida no trecho compreendido entre a Ilha do Francês e São Roque (seção II - Figura 5.4), na qual foi estabelecida uma estação fixa que utilizou o correntômetro SD-30 e a sonda HORIBA. As medições ocorreram nos dias 14 e 20 de novembro de 2001, por ocasião da liberação do hidrograma de cheia da Barragem Pedra do Cavalo. Os resultados serão apresentados dos dias de menores para maiores vazões, não havendo seqüência cronológica.

#### 5.3.3.1.1 Campo de correntes – Seção I - Sizígia – 26/10/2003

O monitoramento foi executado com uma vazão fluvial de 15,6 m<sup>3</sup>/s e altura de maré prevista de 3,09 m na enchente e 3,15 m na vazante (Figura 5.26). A duração da maré enchente (te), definida com base na velocidade média da seção, foi de 6,47 horas, superando a maré vazante (tv) que chegou a 5,67 horas, tendo o ciclo completo a duração de 12,13 horas. Em contrapartida, as velocidades de vazante ( $\bar{U} = 0,53$  m/s,  $U_{max} = 0,89$  m/s,  $\bar{u}_{max} = 1,18$  m/s) superaram respectivamente em 29%, 48% e 56% aquelas de enchente ( $\bar{U} = -0,41$  m/s,  $U_{max} = -0,60$  m/s,  $\bar{u}_{max} = -0,76$  m/s). As diferentes durações e velocidades na maré enchente e vazante são reflexos da assimetria da onda de maré (te/tv= 14%) e da desigualdade diurna, pois a altura foi maior na vazante. As velocidades de corrente foram máximas na meia maré, indicando uma onda estacionária.

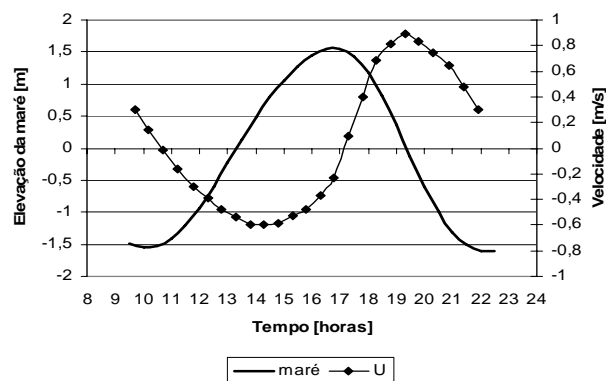


Figura 5.26. Velocidade média na seção I e maré prevista em S18 – 26/10/2003 – sizígia – Q= 15,6 m<sup>3</sup>/s.

A vazão máxima na vazante (22.748 m<sup>3</sup>/s) foi 45% maior do que a enchente (-15.725 m<sup>3</sup>/s), tendo a área da seção transversal variado entre 23.281 a 27.266 m<sup>2</sup>. O prisma da maré enchente foi calculado em 2,48x10<sup>8</sup> m<sup>3</sup> e o índice de assimetria AIdv = 0,063. A vazão residual foi igual a 618,7 m<sup>3</sup>/s. O resumo com os valores característicos de velocidade e vazão são apresentados na Tabela 5.13.

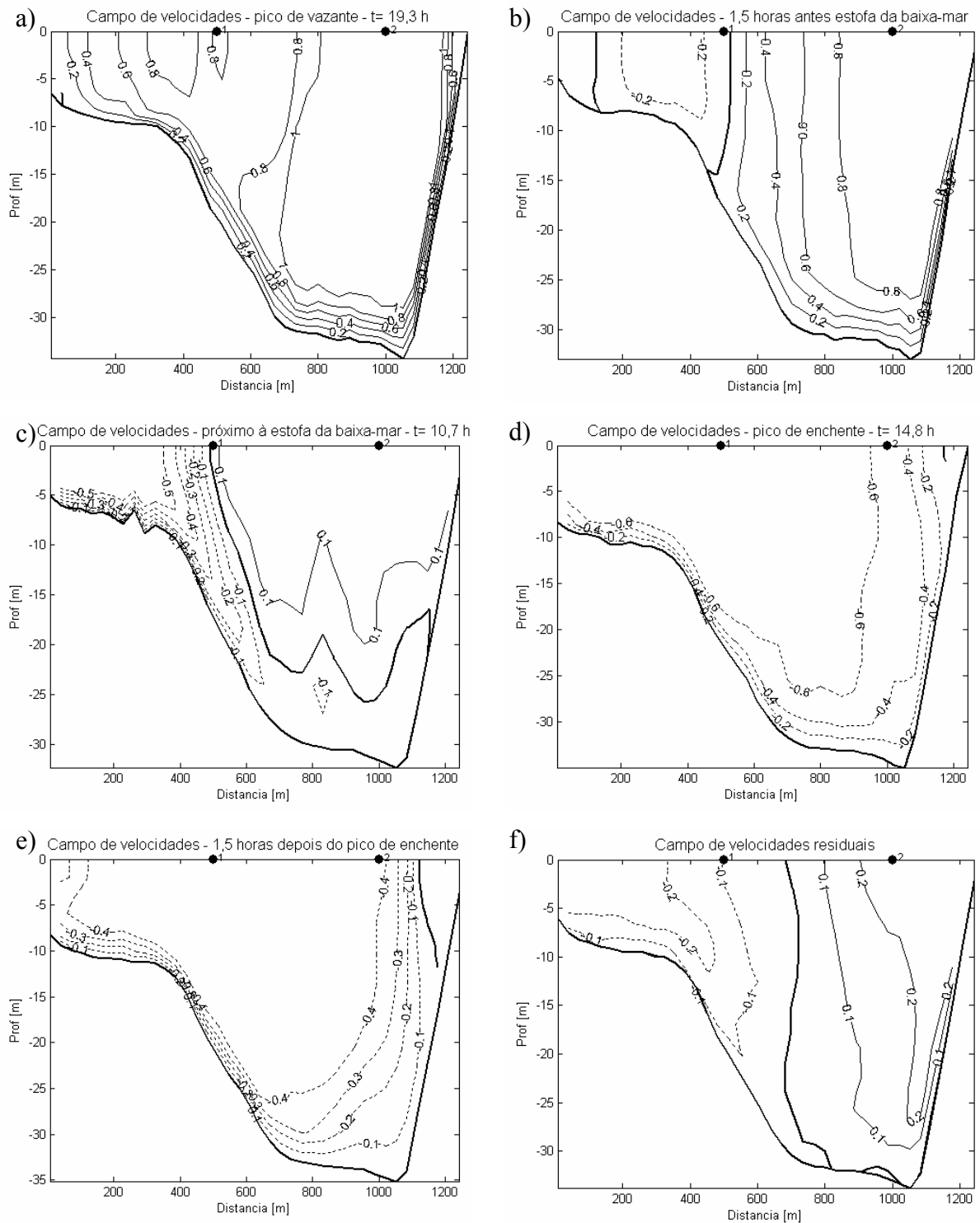
**Tabela 5.13. Resumo com os valores característicos dos ciclos monitorados no Canal do Paraguaçu.**

	Sizígia- 26/10/2003 Q=15,6 m <sup>3</sup> /s	Quadratura-02/11/2003 Q=15,6 m <sup>3</sup> /s	Sizígia-29/08/2003 Q=191 m <sup>3</sup> /s
Duração do ciclo [h]	12,13	13,03	12,33
Tempo de vazante [h]	5,67	6,4	5,72
$\bar{U}$ na vazante [m/s]	0,53	0,14	0,51
$U_{max}$ de vazante [m/s]	0,89	0,27	0,85
$\bar{u}_{max}$ de vazante [m/s]	1,18	0,29	1,13
Q <sub>max</sub> de vazante [ m <sup>3</sup> /s]	22748	6996	21106
Tempo de enchente [m/s]	6,47	6,62	6,61
$\bar{U}$ de enchente [m/s]	-0,41	-0,16	-0,37
$U_{max}$ de enchente [m/s]	-0,6	-0,27	-0,57
$\bar{u}_{max}$ de enchente [m/s]	-0,76	-0,3	-0,66
Q <sub>max</sub> de enchente [ m <sup>3</sup> /s]	-15725	-7012	-14979
te/tv	14%	3,4%	15,6%
Prisma – P [m <sup>3</sup> ]	2,48 x10 <sup>8</sup>	0,96 x10 <sup>8</sup>	2,38x10 <sup>8</sup>
Índice assimetria AIdv	0,063	-0,092	0,086
Vazão residual [m <sup>3</sup> /s]	618,7	-158,6	372,8
Altura da maré [m]	3,15	1,32	3,13
Erro máximo de U [m/s]	0,024	0,016	0,018
Erro mínimo de U [m/s]	0,009	0,009	0,009
Erro no Prisma [%]	2,7	7,5	3,3

Obs.: te e tv foram determinados em função da variação de U.

Em relação à distribuição espacial das velocidades na seção transversal, cabe destacar o cisalhamento lateral no campo de velocidades. No pico de vazante as maiores velocidades se localizaram na metade direita do Canal (isolinha de 1 m/s - Figura 5.27a), com forte cisalhamento de velocidade nas proximidades do fundo devido ao atrito. Na estufa da baixa-mar (Figura 5.27c), o campo de velocidades referente mostra o escoamento de vazante na parte mais profunda da seção e o escoamento de enchente entrando pela margem esquerda, o que ocorreu pelo menos nas horas anteriores, como exemplifica a Figura 5.27b. O campo de velocidades no pico da enchente (Figura 5.27d) concentrou as maiores velocidades em torno do centro da seção até a margem esquerda (isolinha de 0,6 m/s), permitindo a formação de uma região com escoamento de vazante na margem esquerda e próxima da superfície, que foi se ampliando com a aproximação da estufa (Figura 5.27e ilustra a situação 1,5 horas depois

do pico). Os dois aspectos, maré enchente entrando pela margem esquerda e escoamento de vazante se concentrado na margem direita, colaboraram para resultar em um campo com estrutura de circulação residual bidirecional (Figura 5.27f).

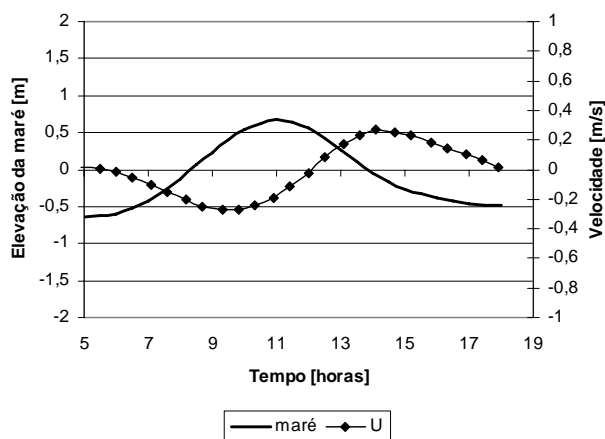


**Figura 5.27. Campos de velocidades [m/s] característicos– 26/10/2003 – sizigia –  $Q= 15,6 \text{ m}^3/\text{s}$ . Seção I – Canal do Paraguaçu (Figura 5.4).**

As características dos perfis verticais de corrente associadas às medições hidrográficas serão apresentadas mais adiante (Perfil Vertical).

### 5.3.3.1.2 Campo de correntes –Seção I - Quadratura - 02/11/2003

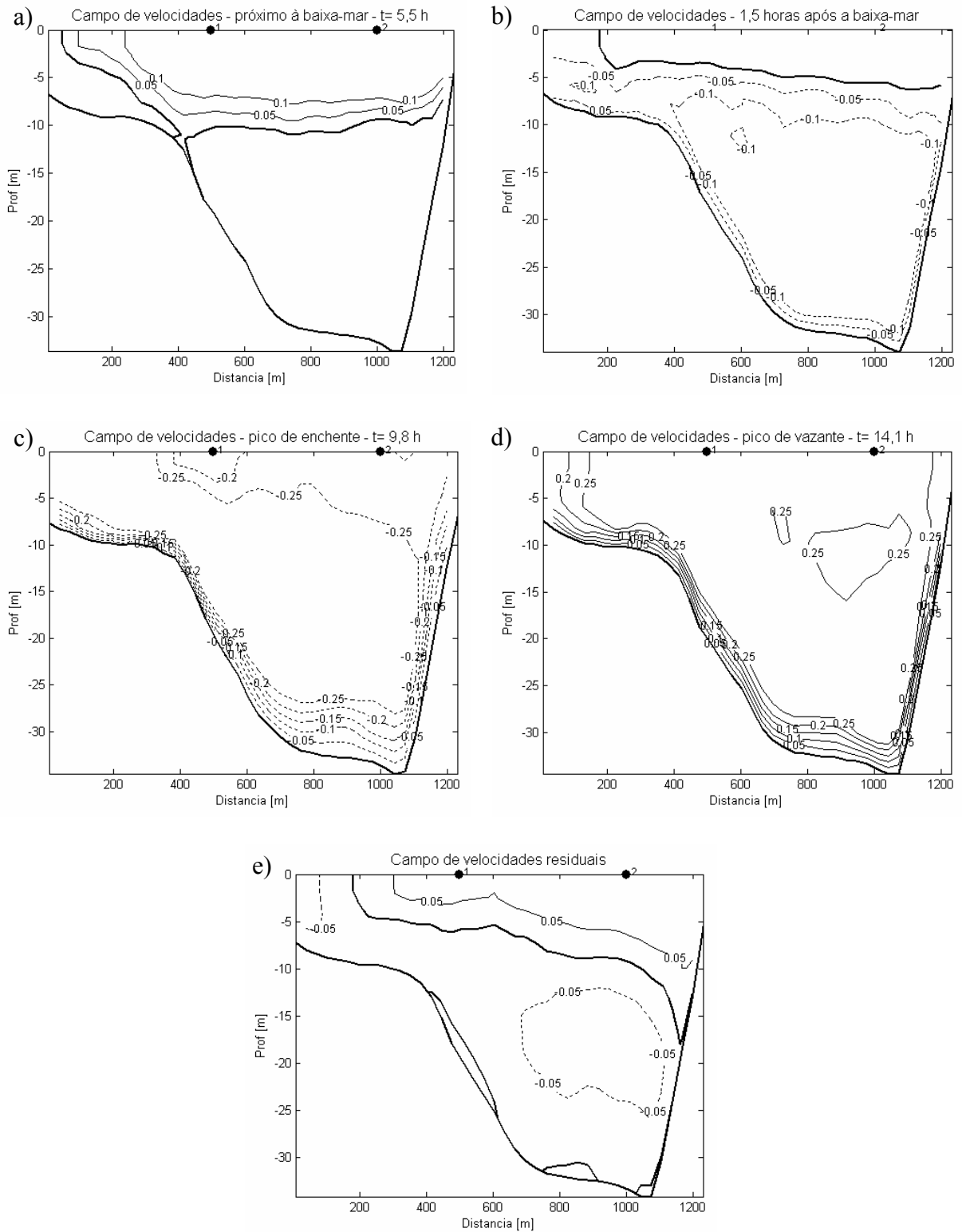
Este monitoramento também ocorreu durante a descarga fluvial de 15,6 m<sup>3</sup>/s, em maré de quadratura com altura de 1,32m na enchente e 1,17m na vazante (Figura 5.28). A duração da maré enchente (6,6 horas), ficou com um valor bem próximo da maré vazante (6,4 horas), totalizando um ciclo de maré com 13 horas, com  $t_e/t_v = 3\%$ . As velocidades de vazante e enchente se equivaleram, sendo respectivamente  $\bar{U} = 0,14$  e  $-0,16$  m/s e  $\bar{u}_{max} = 0,27$  e  $-0,3$  m/s. A  $U_{max}$  em ambas as fases foi igual a 0,27 m/s. O índice de assimetria  $AI_{dv}$  resultou em  $-0,092$ . Com a área da seção transversal variando entre 25.050 m<sup>2</sup> a 26.677 m<sup>2</sup>, as vazões máximas foram praticamente iguais: 6.996 m<sup>3</sup>/s e  $-7.012$  m<sup>3</sup>/s, respectivamente para vazante e enchente. O prisma de enchente foi de  $0,96 \times 10^8$  m<sup>3</sup>. A vazão residual obtida foi igual a  $-158,6$  m<sup>3</sup>/s. O resumo com os valores característicos de velocidade e vazão são apresentados na Tabela 5.13.



**Figura 5.28. Velocidade média na seção I e maré prevista – 02/11/2003 – quadratura – Q= 15,6 m<sup>3</sup>/s.**

No campo de corrente, verificou-se um padrão bem diferenciado da sizígia (Figura 5.27). A maré de enchente, embora tenha desenvolvido as maiores velocidades na parte mais profunda da seção, apresentou na camada superficial um fluxo de vazante, até duas horas após a estofa da baixa-mar, como mostram as Figura 5.29 a,b. Esse padrão ficou, de certa maneira, ainda registrado no pico de enchente pelas menores velocidades na camada superficial em relação à camada mais profunda da seção (Figura 5.29 c). No pico de vazante as velocidades se distribuíram em toda a seção (Figura 5.29 d). Como resultado, o campo de velocidade

residual apresentou movimento bidirecional na vertical, ou seja, circulação gravitacional (Figura 5.29 e).



**Figura 5.29. Campos de velocidades [m/s] característicos – 02/11/2003 – quadratura –  $Q= 15,6 \text{ m}^3/\text{s}$ . .  
Seção I – Canal do Paraguaçu (Figura 5.4).**

Conforme descrevem muito bem Jay e Smith (1990), o movimento bidirecional no perfil residual é resultado da combinação das forças de atrito e baroclínica em direções opostas na maré enchente e vazante. Na maré vazante o atrito e o gradiente de pressão baroclínico se opõe ao gradiente de pressão barotrópico, gerando um perfil de velocidades maiores na superfície, decrescentes com a profundidade. Por outro lado, na enchente os gradientes de pressão barotrópica e baroclínica atuam na mesma direção e o perfil tem velocidades mais homogêneas em todas as profundidades. Desta maneira, o campo residual resulta em movimentos contrários na camada superior (positivo) e inferior (negativo), conforme apresentado na Figura 5.29e. No pico de enchente (Figura 5.29 c) e de vazante (Figura 5.29 d) verificou-se forte cisalhamento de velocidade nas proximidades do fundo devido ao atrito, assim como ocorrido na sizígia (Figura 5.27)

### 5.3.3.1.3 Campo de correntes – Seção I - Sizígia - 29/08/2003

O terceiro monitoramento no Canal do Paraguaçu ocorreu em maré de sizígia e vazão fluvial de 191 m<sup>3</sup>/s, com altura de maré de 3,13m na vazante e 3,03m na enchente (Figura 5.30). A duração da maré enchente (6,61 horas), superou a de maré vazante (5,72 horas), totalizando um ciclo de maré com 12,33 horas, com  $t_e/t_v = 15,6\%$ . As velocidades de vazante ( $\bar{U} = 0,51$  m/s,  $U_{max} = 0,85$  m/s e  $\bar{u}_{max} = 1,13$  m/s) superaram respectivamente em 37%, 49% e 71% aquelas de enchente ( $\bar{U} = -0,37$  m/s,  $U_{max} = -0,57$  m/s,  $\bar{u}_{max} = -0,66$  m/s). O índice de assimetria  $A_{Idv}$  resultou em 0,086. Com a área da seção transversal variando entre 23.428 m<sup>2</sup> a 27.127 m<sup>2</sup>, as vazões máximas foram 21.106 m<sup>3</sup>/s e -14.979 m<sup>3</sup>/s, respectivamente para vazante e enchente. O prisma chegou a 2,38x10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>. A vazão residual obtida com base no campo de velocidade residual foi igual a 372,8 m<sup>3</sup>/s. O resumo com os valores característicos de velocidade e vazão são apresentados na Tabela 5.13.

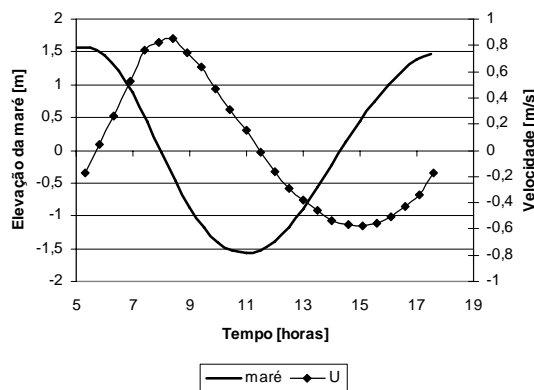
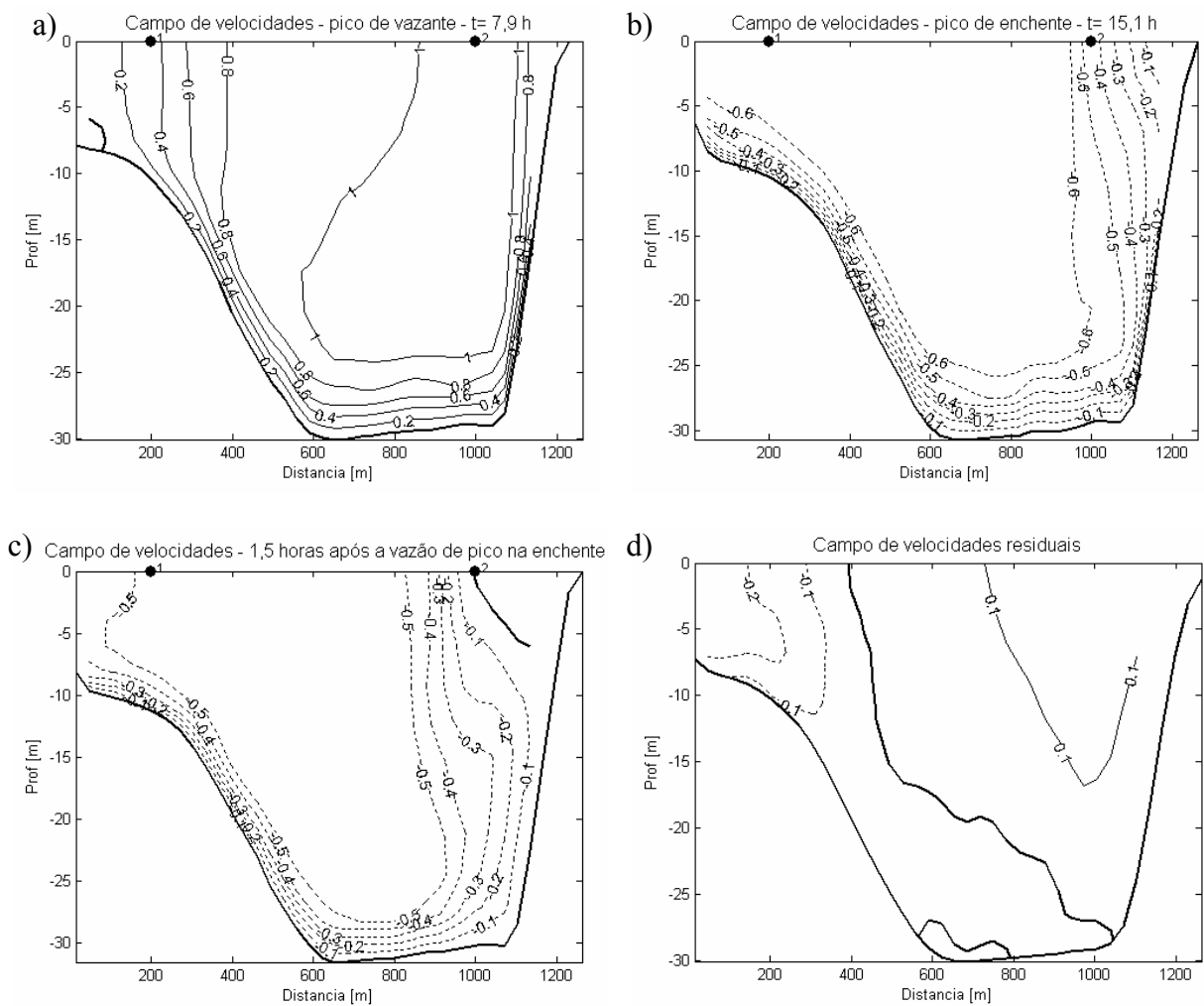


Figura 5.30. Velocidade média na seção I e maré prevista – 29/08/2003 – sizígia – Q= 191 m<sup>3</sup>/s.



Em termos de padrão de distribuição das correntes (Figura 5.31), destaca-se que a área de escoamento de vazante próxima à margem direita, durante a fase de redução da maré enchente (já registrado no campo de 26/10), expandiu em direção ao centro da seção (Figura 5.31 c). O campo de velocidade residual apresentou, em relação aquele de 26/10, um avanço das correntes de vazante em direção à margem esquerda, embora não tenha atingido valores iguais ou superiores a 0,2 m/s (Figura 5.31 d). Por outro lado, as correntes de enchente influenciaram a parte mais profunda do canal (Figura 5.31 b), elevando a posição da isolinha de velocidade nula (Figura 5.31 d). A estratificação lateral no campo de velocidade residual, encontrado novamente, é de origem barotrópica, induzida pela geometria do canal.



**Figura 5.31. Campos característicos de correntes – 29/08/2003 – sizígia e  $Q = 191 \text{ m}^3/\text{s}$ . Seção I – Canal do Paraguai (Figura 5.4).**

As principais diferenças dos valores característicos do ciclo em relação ao monitoramento de 26/10/2003 (Tabela 5.13), foram: 1) o aumento do índice de assimetria

AIdv de 0,063 (26/10) para 0,086; 2) a redução da vazão residual em 40% (de 618 m<sup>3</sup>/s para 373 m<sup>3</sup>/s); 3) redução da velocidade barotrópica máxima de enchente em 13% (de -0,76 para -0,66 m/s). As diferenças são fruto das desigualdades na altura da maré. Interessante salientar que apesar da vazão fluvial ter aumentado em mais de 10 vezes, a vazão residual foi quase a metade (ainda que positiva) da situação anterior.

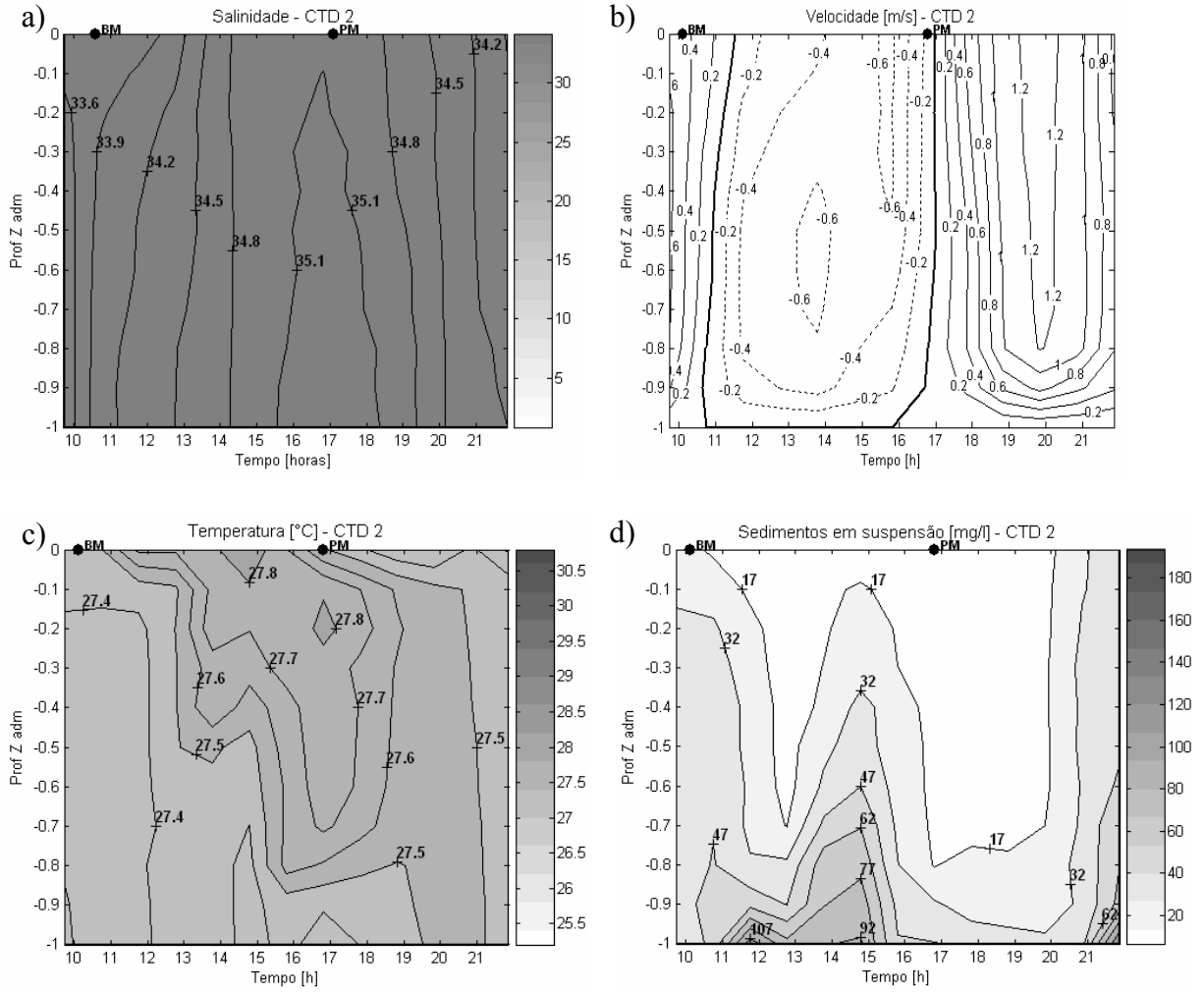
O padrão de movimento bidirecional na vertical observado nos campos residuais em maré de sizígia (Figura 5.31d e Figura 5.27f) mostram a atenuação do efeito baroclínico verificado na quadratura (Figura 5.29e) devido à maior intensidade do efeito barotrópico da maré.

#### 5.3.3.1.4 Perfis Verticais de hidrografia e correntes – Seção I - Sizígia – 26/10/2003

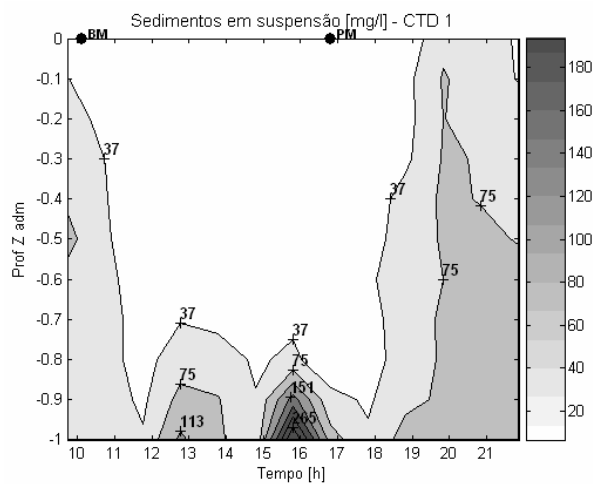
Em sizígia, com baixa descarga fluvial (15,6 m<sup>3</sup>/s), os perfis verticais CTD 1 (profundidade máxima ~10 m) e CTD 2 (profundidade máxima ~ 31 m) apresentaram algumas variações devido a circulação lateralmente diferenciada (ver campo de correntes na Figura 5.27).

Os dados do CTD 2 serão utilizados para descrever os aspectos gerais da hidrografia na Seção I.. Os gráficos com a variação temporal dos parâmetros para a posição do CTD 2 mostram a coluna d'água bem misturada durante todo o ciclo (Figura 5.32 a), com valor médio de 34,5, variando entre o máximo na preamar (~35,1) e mínimo na baixa-mar (~33,5). A temperatura apresentou pequena variabilidade (média de 27,5°C), com padrão vertical mais homogêneo próximo da baixa-mar (Figura 5.32 b). As velocidades máximas ocorreram à meia maré enchente e vazante (Figura 5.32 c), com  $\bar{u}_{max}$  de -0,53 e 1,16 m/s, respectivamente. A velocidade máxima instantânea na enchente (-0,66 m/s) ocorreu a 0,5Z, enquanto que na vazante (1,28 m/s) foi registrado na superfície. A velocidade residual foi de 0,156 m/s. A maior concentração de sedimentos esteve associada à maré enchente, logo após a baixa-mar e junto ao fundo (máximo de 107 mg/l), e no pico de enchente para a coluna toda (máximo de 92 mg/l). Na maré vazante, somente cerca de 3 horas após a preamar foi verificado o aumento da concentração dos sedimentos em suspensão e ao longo de toda a coluna de água (Figura 5.32 d).

Em relação aos resultados do perfil do CTD 1 (próximo a margem esquerda) é importante destacar a maior quantidade de sedimentos em suspensão medida (máximo de 307 mg/l) (Figura 5.33).



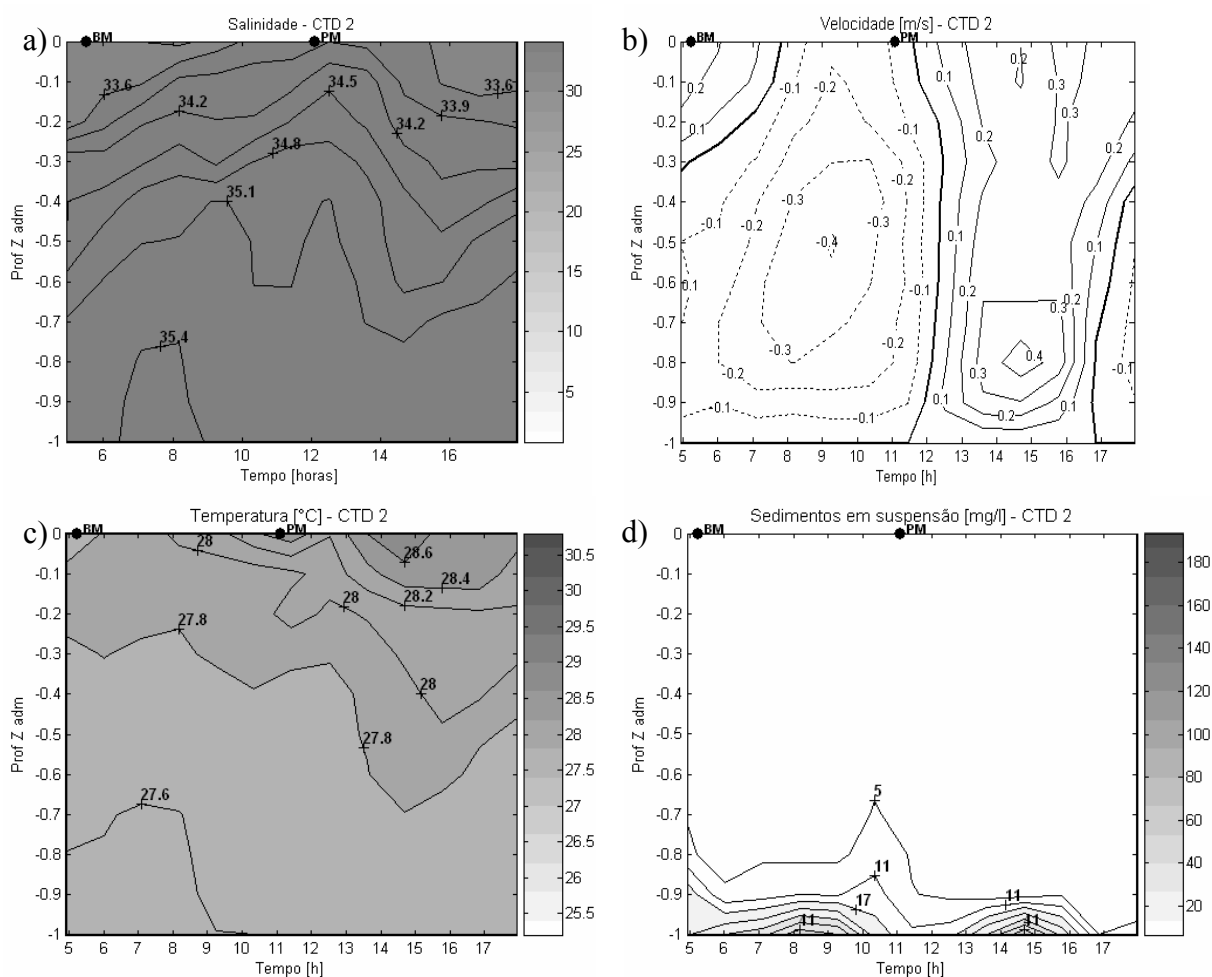
**Figura 5.32. Variação temporal da salinidade (a), temperatura (b), velocidade (c), e sedimentos em suspensão (d) – 26/10/2003 – CTD 2 - Canal do Paraguaçu – sizígia e  $Q = 15,6 \text{ m}^3/\text{s}$ .**



**Figura 5.33. Variação temporal da salinidade (a), temperatura (b), velocidade (c), e sedimentos em suspensão (d) – 26/10/2003 – CTD 1 - Canal do Paraguaçu – sizígia e  $Q = 15,6 \text{ m}^3/\text{s}$ .**

### 5.3.3.1.5 Perfis verticais de hidrografia e correntes – Seção I – Quadratura - 02/11/2003

Na maré de quadratura não houve circulação em sentidos diferenciados na horizontal (ver campos de corrente na Figura 5.29) e devido aos resultados semelhantes nas duas posições de medição, somente os dados do CTD 2 são descritos. A variação temporal das variáveis ao longo do ciclo de maré (Figura 5.34 a), apresentou um pequeno e gradual gradiente de salinidade na coluna de água (valor médio de 34,7). Os valores acima de 35 sempre estiveram preenchendo a região de profundidade maior que 0,7Z e os valores abaixo de 33,6 acontecendo próximo da superfície e da baixa-mar. Associada à salinidade, a temperatura mostrou um padrão semelhante, com temperaturas menores no fundo ( $< 27,8^{\circ}\text{C}$ ) e temperaturas maiores na superfície, principalmente durante a maré vazante (Figura 5.34 b). A temperatura média foi de  $27,8^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 5.34. Variação temporal da salinidade (a), temperatura (b), velocidade (c), e sedimentos em suspensão (d) – 02/11/2003 – CTD 2 - Canal do Paraguaçu – quadratura e  $Q = 15,6 \text{ m}^3/\text{s}$  – seção I.**

As velocidades (Figura 5.34 c), em comparação com àquelas de sizígia, foram bem menores. Os valores máximos da  $\bar{u}_{max}$  foram 0,28 e -0,27 m/s, embora os valores instantâneos máximos tenham alcançado 0,46 m/s (meia maré vazante e na altura de 0,5Z) e -0,41 m/s (meia maré enchente e na altura de 0,8Z). A velocidade residual foi de -0,005 m/s. A concentração de sedimentos em suspensão foi reduzida (entre 0 e 46 mg/l) e somente junto ao fundo foram registrados valores acima de 15 mg/l, associados à ocorrência da velocidade máxima de enchente e de vazante (Figura 5.34 d).

#### 5.3.3.1.6 Perfis verticais de hidrografia e correntes – Seção I - Sizígia - 29/08/2003

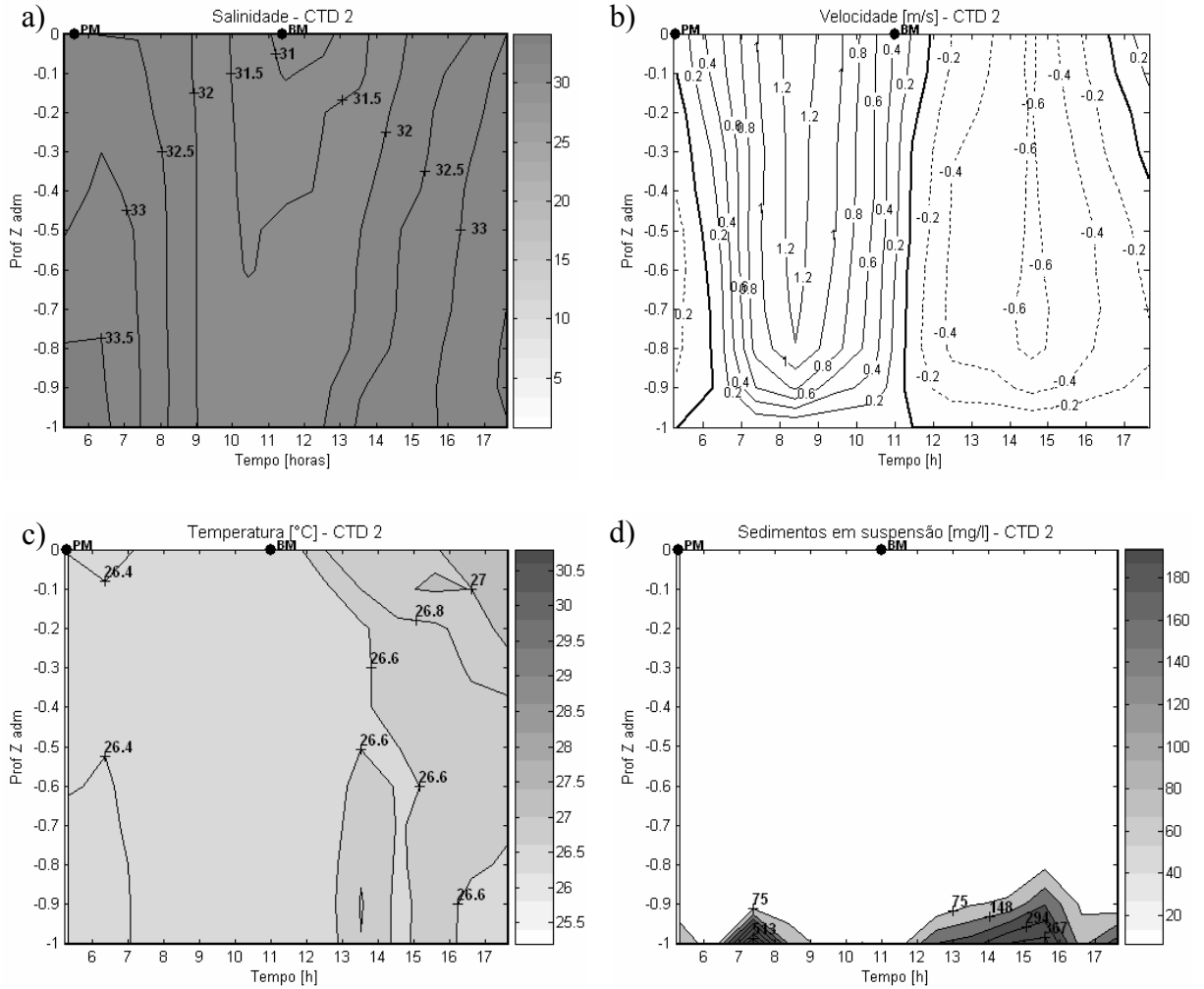
O perfil vertical na posição do CTD 2 será utilizado para comparar os dados de 26/10/2003 (Figura 5.32), procurando identificar as diferenças decorrentes da maior descarga fluvial em 29/08/2003 (191 m<sup>3</sup>/s).

O perfil de salinidade mostrou a coluna d'água relativamente bem misturada (Figura 5.35), porém com uma variação de 1 psu entre a superfície e o fundo na baixa-mar que deve ser decorrente da maior descarga fluvial, já que não ocorreu em 26/10. A temperatura se apresentou mais homogênea durante a maré vazante (26,6°C) do que em 26/10. Em relação aos sedimentos, as concentrações foram bem superiores àquelas de 26/10, chegando a superar valores de 500 mg/l, em torno da meia maré de vazante.

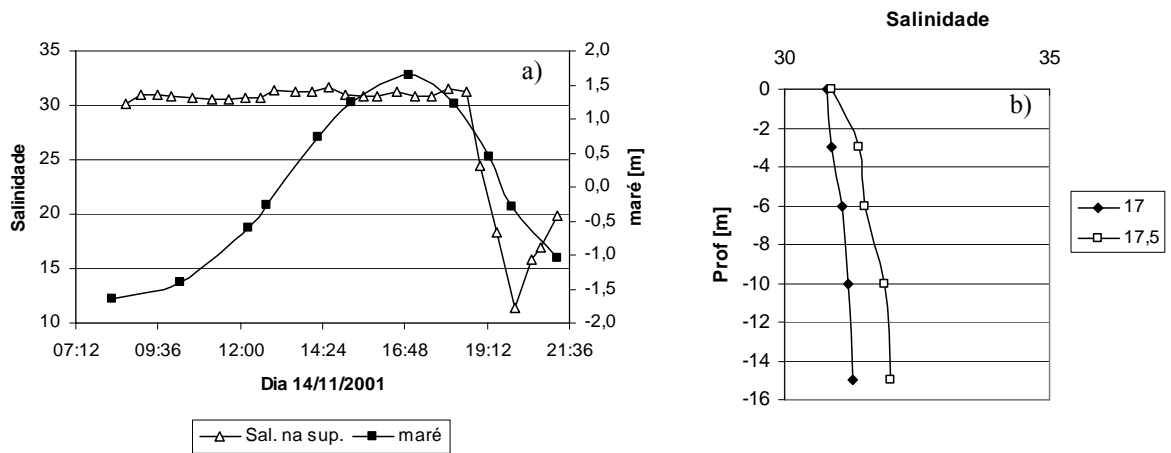
As diferenças entre as duas sizíguas (26/10/2003 – 15,6 m<sup>3</sup>/s e 29/08/2003 - 191 m<sup>3</sup>/s), além da forma da estratificação, está relacionada à variação temporal da salinidade, oscilando entre 31 a 33,5, comparada com 33,6 e 35,1.

#### 5.3.3.1.7 Perfis verticais de hidrografia e correntes – Seção II - Sizígia - 14/11/2001

O monitoramento da estação fixa na Seção II (Figura 5.4) do dia 14/11 ocorreu em maré de sizígia, quando o hidrograma de cheia liberado pela Barragem Pedra do Cavalo chegou à vazão de pico (1534 m<sup>3</sup>/s às 13 horas). A salinidade permaneceu com valores superiores a 30 durante a maré enchente e início da maré vazante (Figura 5.36 a) e apresentou uma boa mistura na vertical conforme sugerem os perfis de 17 e 17,5 horas (Figura 5.36 b). O efeito da descarga fluvial pode ser verificado a partir da metade da maré vazante, quando a salinidade reduziu ao valor mínimo na superfície de 11,4 às 20 horas, para finalizar em 19,9 às 21:15 horas (figura 39 a). Não foi possível medir a estrutura vertical da salinidade desses momentos devido às altas velocidades do fluxo.

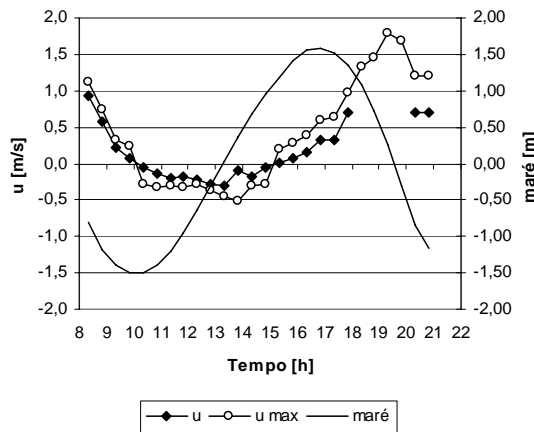


**Figura 5.35.** Variação temporal da salinidade (a), temperatura (b), velocidade (c), e sedimentos em suspensão (d) – 29/08/2003 – CTD 2 - Canal do Paraguaçu – sizígia e  $Q = 191 \text{ m}^3/\text{s}$  – seção I.



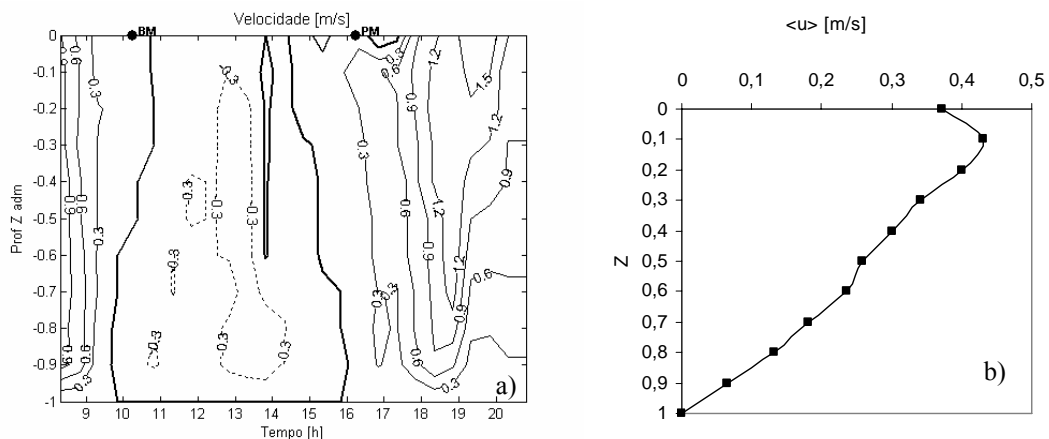
**Figura 5.36.** Salinidade na superfície e variação da maré observada em São Roque (a). Perfil da salinidade às 17 e 17,5 horas (b). Seção II – sizígia.

As velocidades na enchente, em média, não ultrapassaram 0,40 m/s, enquanto que na vazante elas atingiram valores superiores a 1 m/s, com um máximo de 1,8 m/s na superfície às 19:30 horas (Figura 5.37). Entre as 19 e 20:30 horas não foi possível medir a velocidade em toda a coluna d'água devido às altas velocidades.



**Figura 5.37. Velocidade média e máxima e maré – estação fixa - sizígia – seção II – Canal do Paraguaçu.**

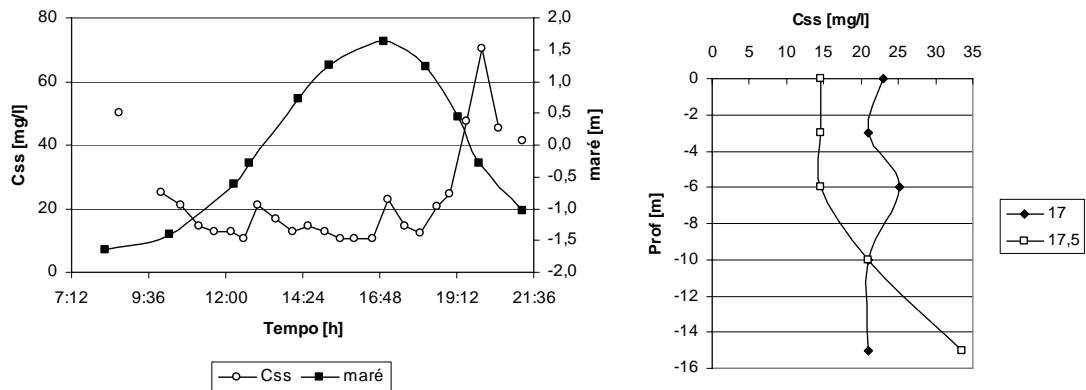
Considerando a velocidade média, as correntes de enchente persistiram por somente 4,5 horas, indicando uma assimetria acentuada ( $t_e/t_v = -30\%$ ), para um ciclo completo de 11 horas (Figura 5.38 a). A ocorrência das velocidades nulas foi bastante discordante do horário da preamar, provavelmente devido ao efeito baroclínico provocado pela descarga água doce (Figura 5.38 a). O perfil residual resultante foi totalmente de vazante, típico de estuário bem misturado, chegando a 0,43 m/s logo abaixo da superfície (Figura 5.38 b).



**Figura 5.38. Distribuição temporal das velocidades (a) e perfil residual (b) – estação fixa – sizígia - seção II – Canal do Paraguaçu.**

(Nota: As velocidades estimadas para o período de 19 a 20 horas devem ser tomadas com cautela: são resultados de interpolação de um perfil vertical teórico e das informações dos horários adjacentes).

Em relação aos sedimentos, observou-se que durante a baixa-mar, a maré enchente e a preamar, os valores foram inferiores a 25 mg/l e na maior parte do tempo permaneceram entre 10 a 15 mg/l. Somente na maré vazante ultrapassaram 40 mg/l (máximo = 71 mg/l) (Figura 5.39 a). A ocorrência do valor máximo de C<sub>ss</sub> coincidiu com o mínimo valor de salinidade, correspondendo à influência da descarga fluvial. Os dois perfis verticais medidos (Figura 5.39 b) sugerem que antes da maré vazante os sedimentos apresentaram concentrações regulares em toda a coluna d'água, tendendo para um aumento próximo ao fundo.



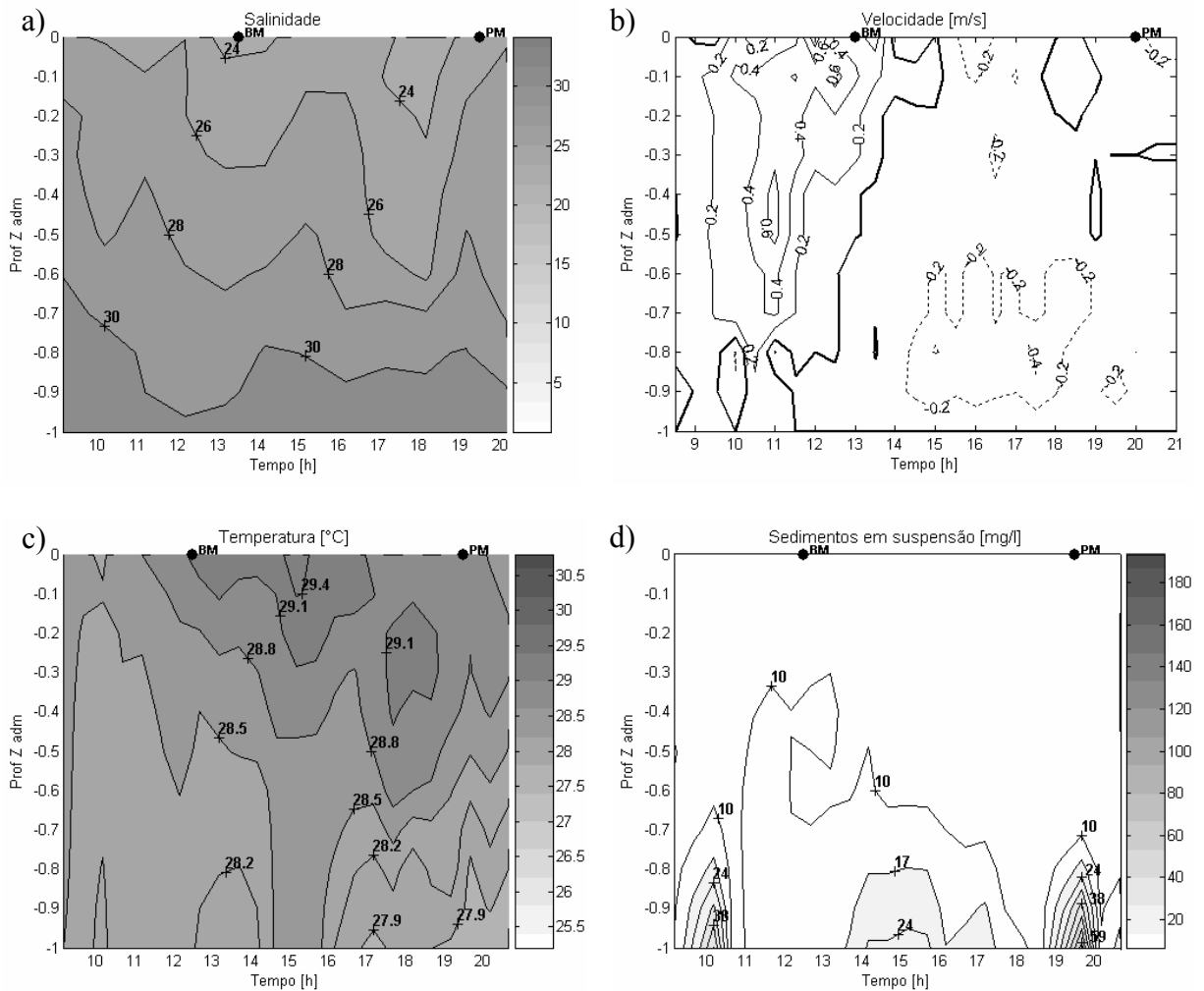
**Figura 5.39. C<sub>ss</sub> na superfície (a) e perfil de C<sub>ss</sub> às 17 e 17,5 horas (b) - sizígia – seção II – Canal do Paraguauçu.**

#### 5.3.3.1.8 Perfis verticais de hidrografia e correntes – Seção II - Quadratura - 20/11/2001

O monitoramento da estação fixa do dia 20/11 ocorreu na véspera da maré de quadratura, com uma descarga fluvial de 58 m<sup>3</sup>/s. Nestas condições, a salinidade na superfície variou de 28,4 a 21,2. Uma tendência geral de aumento na salinidade ocorreu durante a maré enchente, enquanto que na vazante a tendência foi de redução, ainda devido aos efeitos do hidrograma de cheia gerado pela barragem de Pedra do Cavalo. Observa-se que abaixo de 0,6Z (10 m) praticamente não ocorreu alteração na salinidade, permanecendo com valores acima 29. A variabilidade foi maior na camada 0,6Z até superfície, onde os menores valores de salinidade foram registrados na baixa-mar (21,2) e quando a maré se aproximou da preamar (21,6) (Figura 5.40 a). A temperatura variou entre 27,6 e 29,6°C, com águas na superfície mais quentes do que as do fundo. Na meia maré de vazante a temperatura apresentou o menor valor médio (28,3°C) e estava praticamente homogênea na coluna d'água, enquanto que duas horas após a baixa-mar a temperatura média na coluna chegou ao valor máximo de 29°C e na preamar ocorreu a maior variabilidade vertical (Figura 5.40 b). A velocidade mostrou intensidades três vezes maiores na maré vazante (máximo de 0,92 m/s) do que na maré enchente. Enquanto na maré vazante as maiores velocidades ocorreram na



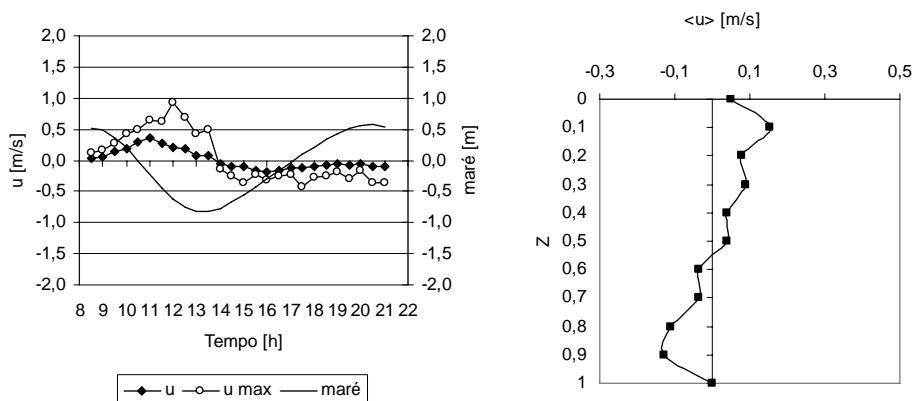
camada superficial, na maré enchente elas se concentram na camada próximo ao fundo. Após a baixa-mar e na segunda metade da maré enchente as velocidades eram de vazante ou quase nulas. Somente na meia maré enchente é que velocidades acima de 0,2 m/s foram encontradas próximas da superfície (Figura 5.40 c). Esse comportamento explica a variação da salinidade na camada superficial durante a maré enchente, devendo ser resultado quantidade de água doce existente no estuário. Os sedimentos em suspensão apresentaram baixos valores de concentração (< 20 mg/l). Somente junto ao fundo, valores elevados ocorreram, com máximo de 87 mg/l no momento da preamar (Figura 5.40 d).



**Figura 5.40. Variação temporal da salinidade (a), temperatura (b), velocidade (c), e sedimentos em suspensão (d) – 20/11/2001 – quadratura – seção II – Canal do Paraguçu.**

A duração total do ciclo foi de 11,5 horas, sendo 5,5 horas de maré enchente e 6 horas de maré vazante, com base na análise nas velocidades média e máxima (Figura 5.41 a). A assimetria da duração da maré resultou em  $t_e/t_v = 9\%$ , sendo inversa àquela verificada na

maré de sizígia (-30%). O perfil residual de velocidade apresentou uma forma típica de circulação gravitacional e expressa a ocorrência das maiores velocidades de vazante na camada superior e de enchente na camada inferior (Figura 5.41 b). O efeito da forçante baroclínica fica evidente abaixo da profundidade de movimento nulo.



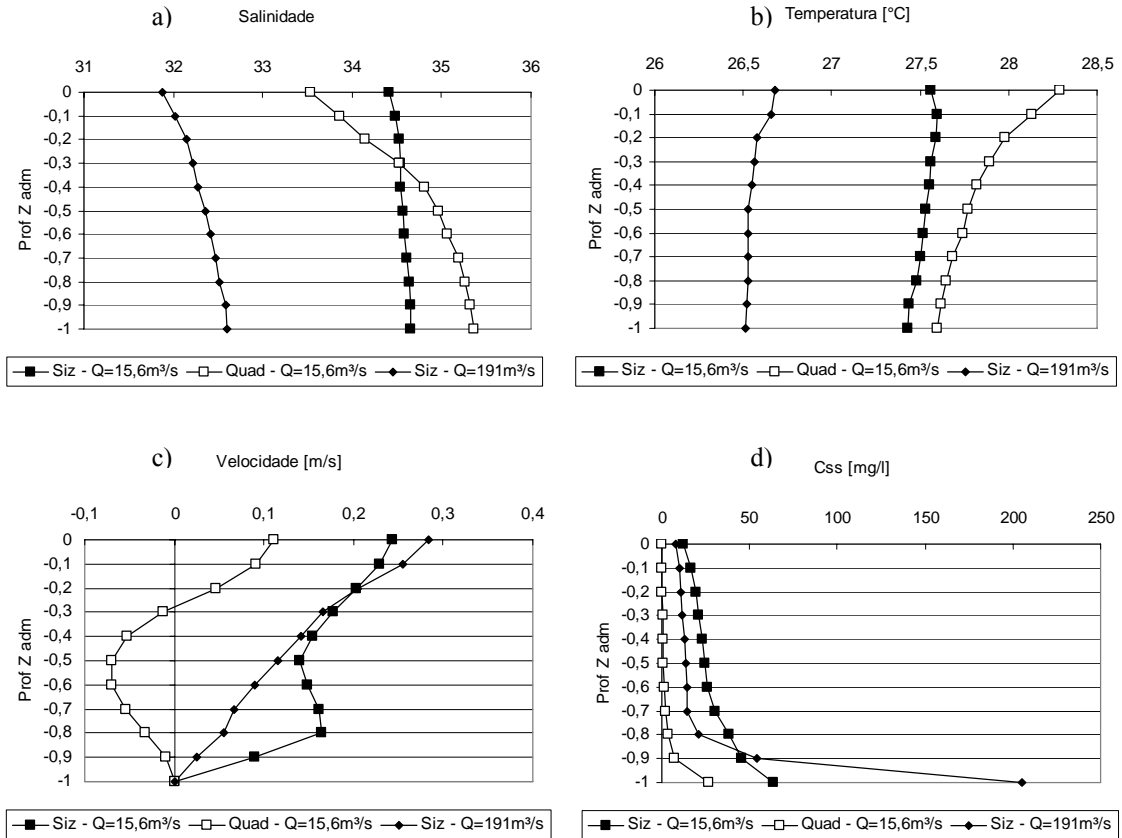
**Figura 5.41. Velocidade e maré (a) e perfil residual (b) -quadratura –seção II – Canal do Paraguaçu. Maré medida em São Roque.**

#### 5.3.3.1.9 Perfis médios – Canal do Paraguaçu

A análise dos perfis médios de salinidade, temperatura, velocidade (residual) e concentração de sedimentos em suspensão (Figura 5.42) mostra que embora os valores médios da salinidade em sizígia e quadratura sejam praticamente iguais ( $\sim 34,5$ ), a variação vertical em sizígia aumentou de 0,2 para 1,72 na quadratura. Padrão semelhante foi observado em relação à temperatura. A velocidade residual em sizígia foi positivo em toda a coluna d'água, enquanto que em quadratura apresentou-se em duas camadas, típico de circulação gravitacional. Os sedimentos em suspensão na sizígia, devido às maiores velocidades, apresentaram concentrações mais elevadas, aumentando ao longo da coluna d'água e se acentuando próximo ao fundo. De modo geral, ficou evidente a maior capacidade de mistura e de transporte de sedimentos em suspensão na maré de sizígia.

Comparando-se as situações de sizígia com vazões fluviais diferentes, observou-se que o perfil médio da salinidade mostrou uma variação da superfície ao fundo um pouco mais acentuada (0,8) com a vazão fluvial de  $191 \text{ m}^3/\text{s}$ . O perfil de velocidade residual mudou a forma, apresentando um crescimento linear a partir do fundo, chegando na superfície com  $0,28 \text{ m/s}$  (16% superior àquela de 26/10). A concentração de sedimentos, embora ao longo de quase toda a coluna d'água tenha sido inferior aos valores de 26/10, junto ao fundo ocorreu um aumento extraordinário (valor médio de  $205 \text{ mg/l}$ ). É importante ressaltar que ocorreram

chuvas nos dias anteriores ao monitoramento (item 5.2.5) e os pequenos mananciais que circundam o estuário podem ter contribuído para a maior quantidade de sedimentos.



**Figura 5.42.** Perfis médios de salinidade (a), temperatura (b), velocidade (c) e sedimentos em suspensão (d) – Canal do Paraguaçu – seção I.

### 5.3.3.1.10 Classificação da dinâmica estuarina – Canal do Paraguaçu

Segundo a classificação do diagrama de circulação e estratificação (Hansen e Rattray, 1966), o Canal do Paraguaçu com vazão de 15,6 m<sup>3</sup>/s varia do *tipo 1* (bem misturado) em sizígia, para um ponto na transição de *2a* para *2b* (parcialmente misturado) na quadratura (Figura 5.43). Assim, enquanto na sizígia predomina o mecanismo de difusão turbulenta, na quadratura a circulação gravitacional e a mistura longitudinal se desenvolvem, tanto por mecanismos de dispersão quanto por advecção. Na maré de sizígia de 29/08, com vazão fluvial de 191 m<sup>3</sup>/s, o estuário continuou classificado dentro do *tipo 1*, porém tendendo para *2a*.

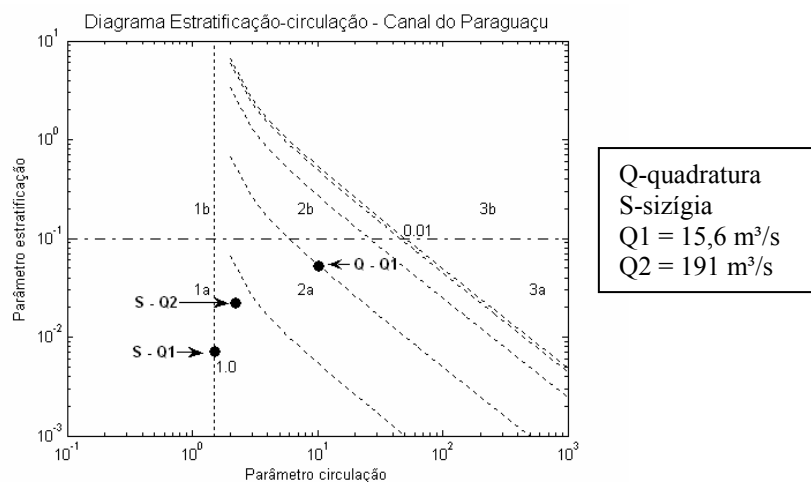


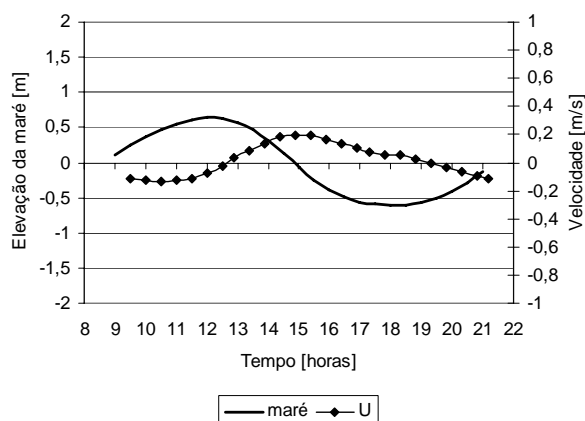
Figura 5.43. Diagrama de estratificação e circulação – Canal do Paraguauçu – seção I.

### 5.3.3.2 Canal do Paraguauçu a montante da Ilha do Francês – seção III

A seção transversal estabelecida no Canal do Paraguauçu na Ilha do Francês (seção III - Figura 5.4) possui cerca de 2.100 m, apresentando dois canais principais de escoamento, um mais profundo (18,5m) e estreito (400m) ao Norte da ilha (margem esquerda), que doravante denominamos de CN, e outro mais raso (15m) ao Sul da ilha, porém de maior largura (800m), que denominamos de CS. A parte central, que divide os dois canais, corresponde ao final do delta do rio, estando inclinado na direção do canal esquerdo, com profundidade entre 8 e 10m.

#### 5.3.3.2.1 Campo de Correntes - Canal do Paraguauçu na Ilha do Francês – Seção III - Quadratura - 31/01/2004

O monitoramento da maré em quadratura ocorreu simultaneamente a BI Sul com uma descarga fluvial de 331 m<sup>3</sup>/s e uma altura de 1,15 m na maré enchente e 1,25 m na maré vazante (Figura 5.44). O ciclo completo da maré na quadratura durou 11,7 horas, sendo que o tempo de maré vazante (6,6 horas) foi superior em 29% ao da maré enchente (5,1 horas). Apesar dessa assimetria ( $t_e/t_v = -22\%$ ), as velocidades na vazante ( $\bar{U} = 0,11$  m/s,  $U_{max} = 0,2$  m/s e  $\bar{u}_{max} = 0,3$  m/s) foram um pouco maiores do que na enchente ( $\bar{U} = -0,09$  m/s,  $U_{max} = -0,14$  m/s e  $\bar{u}_{max} = -0,28$  m/s). Nessas condições o índice de assimetria  $A_{Idv}$  resultou igual a 0,26, semelhante ao ocorrido na quadratura em BI Sul. Com a área da seção transversal variando entre 22.368 m<sup>2</sup> e 27.782 m<sup>2</sup>, as vazões máximas na vazante e enchente foram 4.886 m<sup>3</sup>/s e -3.327 m<sup>3</sup>/s, respectivamente. O prisma de maré enchente totalizou 0,385x10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>, com uma vazão residual de 551,7 m<sup>3</sup>/s, cerca de 67% superior à vazão fluvial. (Tabela 5.14)



**Figura 5.44. Variação da velocidade e da maré prevista – 31/01/2004 – quadratura – Seção III – Canal do Paraguauçu.**

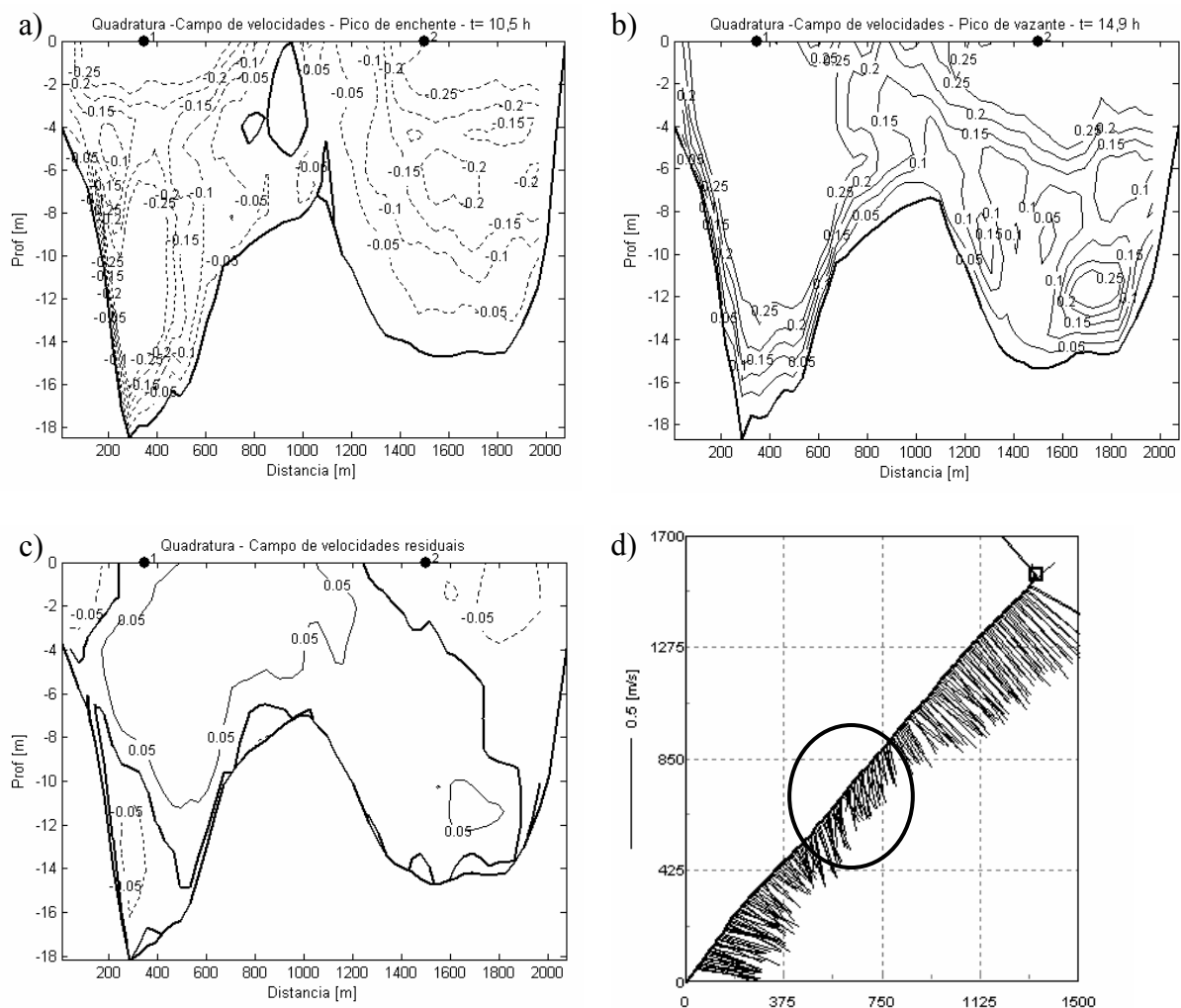
**Tabela 5.14. Resumo com os valores característicos dos ciclos monitorados no Canal do Paraguauçu a montante da Ilha do Francês – seção III**

	Quadratura-31/01/2004 Q=331 m <sup>3</sup> /s	Sizígia-08/02/2004 Q=236 m <sup>3</sup> /s
Duração do ciclo [h]	11,7	12,1
Tempo de vazante [h]	6,6	5,3
$\bar{U}$ na vazante [m/s]	0,11	0,31
$U_{max}$ de vazante [m/s]	0,2	0,58
$V_{max}$ barotrópica de vazante [m/s]	0,3	0,9
$Q_{max}$ de vazante [ m <sup>3</sup> /s]	4886	14.975
Tempo de enchente [m/s]	5,1	6,8
$\bar{U}$ na enchente [m/s]	-0,09	-0,28
$U_{max}$ enchente [m/s]	-0,14	-0,41
$V_{max}$ barotrópica de enchente [m/s]	-0,28	-0,68
$Q_{max}$ de enchente [ m <sup>3</sup> /s]	-3327	-9706
$t_e/t_v$	-22%	28%
Prisma – P [m <sup>3</sup> ]	$0,385 \times 10^8$	$1,55 \times 10^8$
Índice assimetria AIdv	0,258	-0,069
Vazão residual [ m <sup>3</sup> /s]	551,7	81,4
Altura da maré [m]	1,25	2,80
Erro máximo de U [m/s]	0,027	0,025
Erro mínimo de U [m/s]	0,014	0,012
Erro no Prisma [%]	20,8	5,2

Obs.:  $t_e$  e  $t_v$  foram determinados em função da variação de U.

Em relação aos campos de correntes, observou-se uma região de “sombra” atrás da Ilha do Francês durante a maré enchente na quadratura, com baixas velocidades. No momento de fluxo máximo da enchente, o CN apresentou duas áreas de maior velocidade (isolinha de  $u=-0,25$  m/s), a primeira junto ao talude da margem esquerda e próximo ao fundo, e a segunda nos dois metros da camada superficial. No CS o fluxo mais intenso se localizou na camada superficial próxima da margem direita. As baixas velocidades da região central ficaram bem

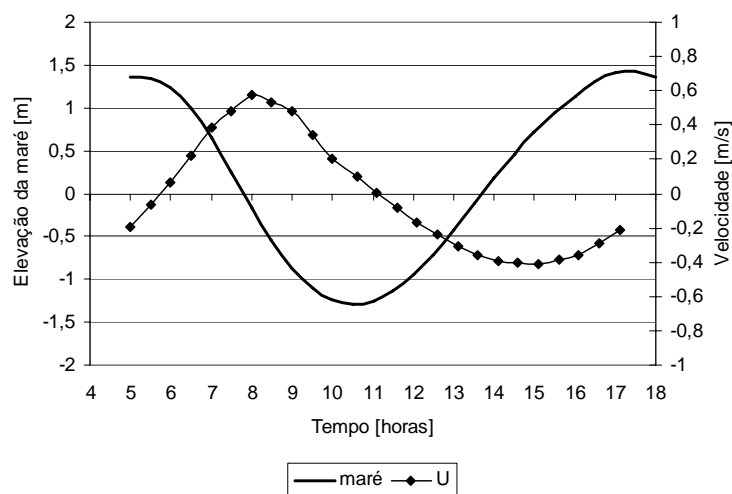
caracterizadas, ainda que se tratasse do momento de fluxo máximo de enchente (Figura 5.45 a). Na maré vazante a velocidade no CN se desenvolveu rapidamente na vertical desde o fundo, enquanto que no CS ocorreu uma certa estratificação, apresentando uma grande área de fluxo mais intenso ( $u=0,25$  m/s) junto a superfície e outro, bem menor, próximo ao fundo e ao talude da margem direita (Figura 5.45 b). O campo de velocidade residual mostrou o domínio de correntes de vazante, à exceção da camada superficial do CS e fundo do CN (Figura 5.45 c). Além disso, observou-se que na maré vazante pode ocorrer um fluxo proveniente da metade Norte da BI sendo direcionado para o CS (Figura 5.45 d).



**Figura 5.45. Campo de correntes [m/s] (a, b, c). Vetores de  $\bar{u}$  na seção transversal mostrando o fluxo de águas na maré vazante vindo da BI Norte para o CS, destacados pela elipse (d) . Canal do Paraguaçu a montante da Ilha do Francês – quadratura –  $Q=331$  m<sup>3</sup>/s – seção III.**

5.3.3.2.2 *Campo de Correntes - Canal do Paraguaçu na Ilha do Francês – Seção III - Sizígia - 08/02/2004*

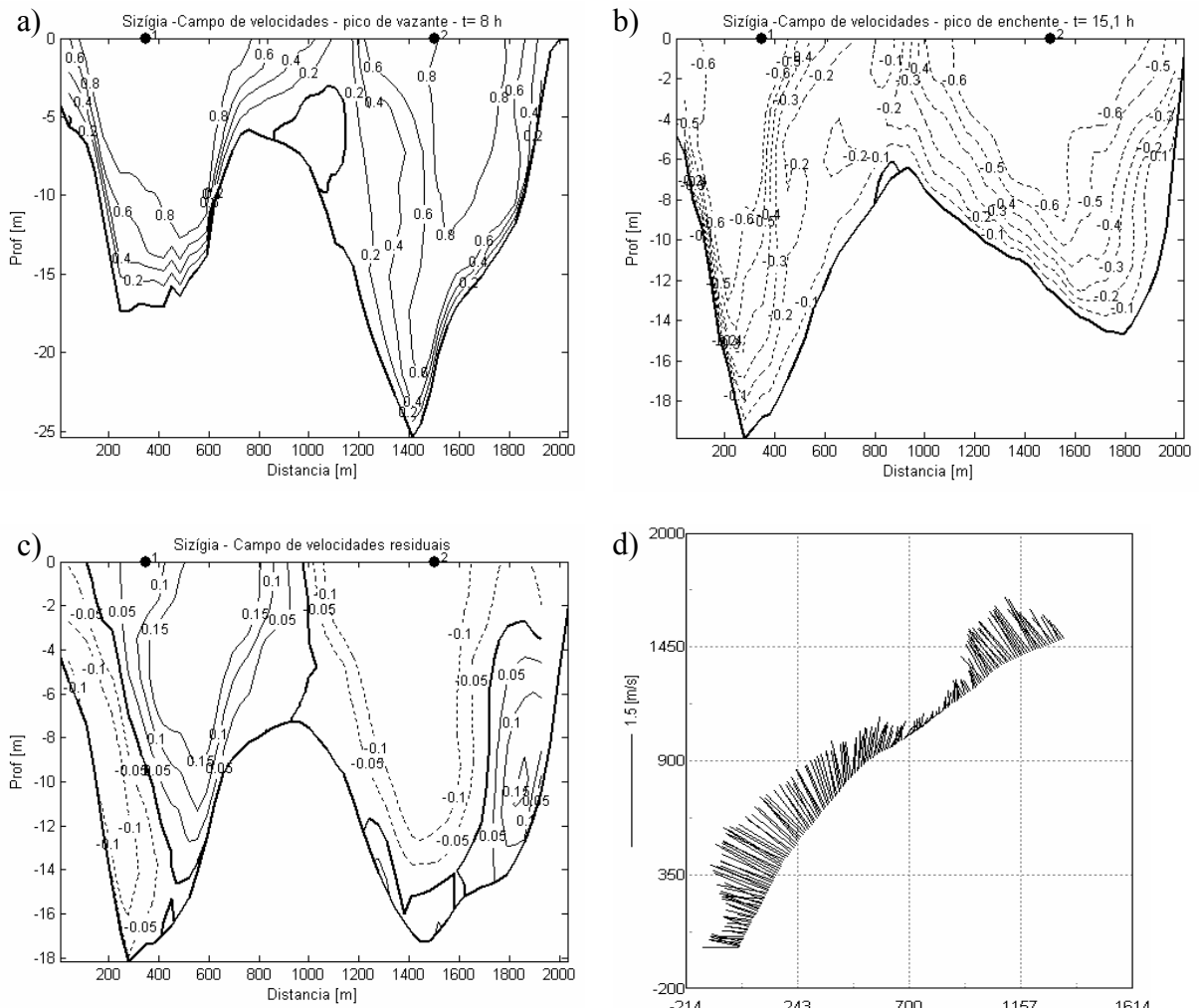
O monitoramento do ciclo de maré em sizígia ocorreu com uma descarga fluvial de 236 m<sup>3</sup>/s e altura de maré de 2,73m na enchente e 2,8m na vazante (Figura 5.46). O ciclo de maré completo teve duração de 12,1 horas (3,4% maior do que na quadratura). O tempo de maré vazante foi de 5,3 horas, enquanto o tempo da maré enchente chegou a 6,8 horas, resultando em uma assimetria inversa ( $t_e/t_v = 28\%$ ) àquela da quadratura ( $t_e/t_v = -22\%$ ), conforme indicado no item sobre marés. As velocidades foram mais intensas na vazante ( $\bar{U} = 0,31$  m/s,  $U_{max} = 0,58$  m/s e  $\bar{u}_{max} = 0,9$  m/s) do que na enchente ( $\bar{U} = -0,28$  m/s,  $U_{max} = -0,41$  m/s e  $\bar{u}_{max} = -0,68$  m/s). Em comparação com as velocidades medidas na quadratura, as de sizígia foram 3 vezes maior tanto na maré vazante bem como na maré enchente, à exceção da  $\bar{u}_{max}$  de enchente (cerca de 2,5 vezes). O índice de assimetria  $A_{Idv}$  resultou em -0,069. A vazão máxima na vazante foi de 14.975 m<sup>3</sup>/s e na enchente -9.706 m<sup>3</sup>/s. A área da seção transversal variou de 21.512 m<sup>2</sup> a 28469 m<sup>2</sup>. O prisma de maré enchente chegou a 1,55x10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>, superando largamente o prisma da maré de quadratura (0,385x10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>). A vazão residual foi de somente 81,4 m<sup>3</sup>/s, três vezes inferior à a descarga fluvial (Tabela 5.14).



**Figura 5.46. Variação da velocidade e da maré prevista – 08/02/2004 – sizígia – Seção III – Canal do Paraguaçu.**

Em relação aos campos de correntes na seção transversal, observou-se a quebra da estratificação característica do ciclo de quadratura. Nos momentos de fluxo máximo o campo de velocidade apresentou aumento progressivo das correntes do fundo para a superfície em

ambos os canais. Na maré vazante as correntes máximas ficaram bem centradas (Figura 5.47 a), enquanto que na maré enchente se localizaram próximo ao talude esquerdo (Figura 5.47 b). A isolinha de  $u=0,8$  m/s se desenvolveu além dos 10m de profundidade tanto na maré enchente como na maré vazante. As águas vindas do Norte da baía durante a maré vazante cruzaram com mais intensidade a região central da seção (Figura 5.47 a). Na enchente, a região de "sombra" da Ilha do Francês apresentou correntes na direção Norte e em alguns momentos gerou um vórtice no sentido horário(Figura 5.47 d). Em função da concentração de fluxo em áreas diferentes da seção durante as marés enchente e vazante, o campo residual mostrou grande cisalhamento lateral.( Figura 5.47 c).



**Figura 5.47. Campo de correntes [m/s] (a,b,c). Vetores de  $\bar{u}$  na seção transversal mostrando o efeito da Ilha do Francês na maré enchente (d) – Canal do Paraguaçu a montante da Ilha do Francês – sizígia –  $Q=236$  m<sup>3</sup>/s – Seção III.**

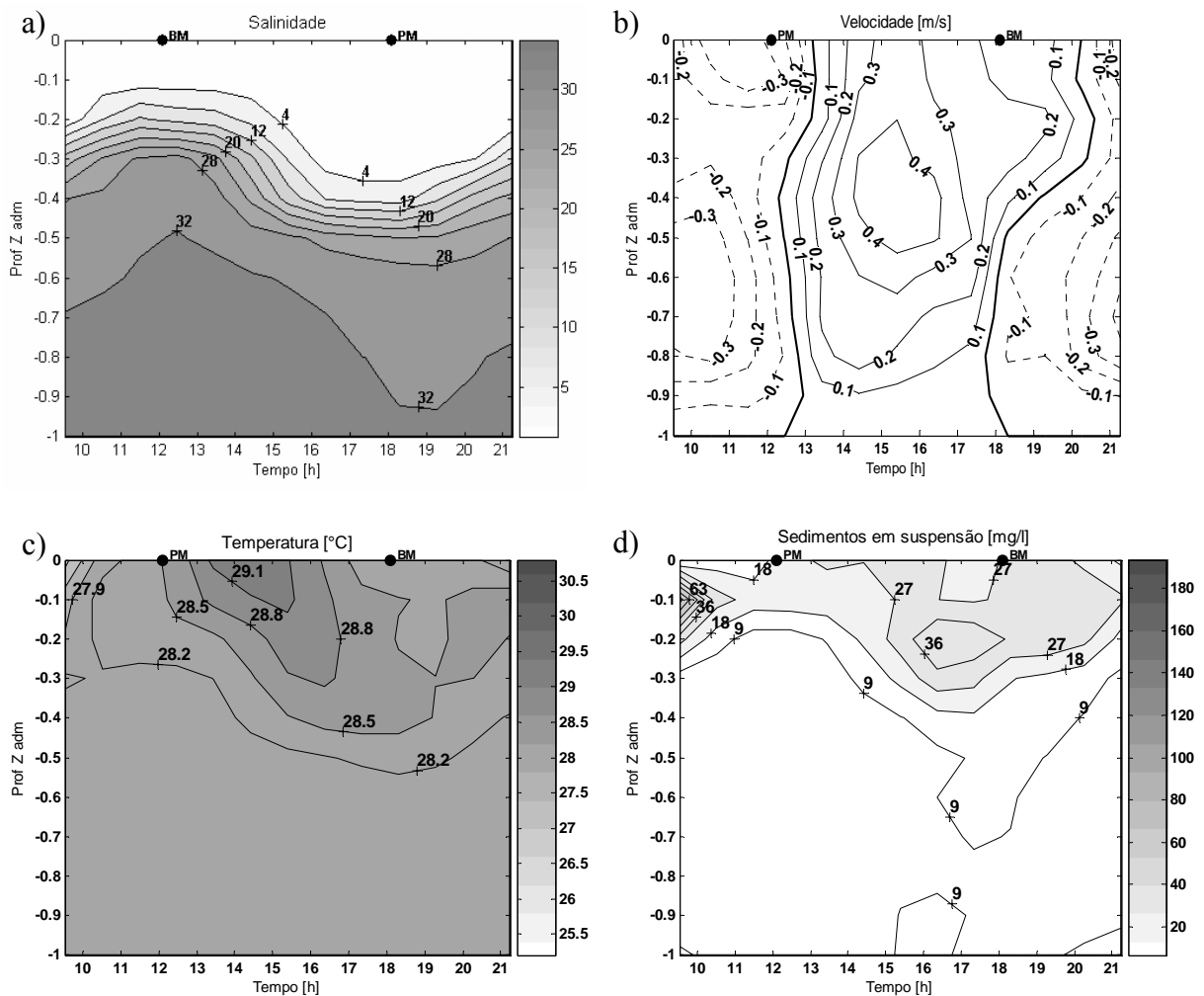


#### *5.3.3.2.3 Perfis verticais de hidrografia e correntes – Canal do Paraguaçu – Seção III - Quadratura - 31/01/2004 - Canal ao Norte da Ilha do Francês*

As características de variação temporal da temperatura, velocidade e sedimentos em suspensão no canal ao Norte da Ilha do Francês (CN) estiveram associadas com a estratificação de sal encontrada na quadratura. A água doce ocupou a camada superior (mínimo de 0,5 psu) e com a isohalina de 4 variando sua posição vertical de -0,1Z na preamar à -0,3Z na baixa-mar, caracterizando ondas internas, típicas em estuários tipo cunha salina. As demais isohalinas acompanharam esse padrão, à exceção da isohalina de 32, que enquanto na preamar estava à -0,5Z (máximo no fundo de 33,2), desceu para -0,9Z na baixa-mar (Figura 5.48 a). A temperatura variou na metade superior da coluna d'água (mínimo de 27,2°C e máximo de 29,3°C) (Figura 5.48 c), bem como a concentração de sedimentos em suspensão (Figura 5.48 d), assim como na BI Sul. No caso dos sedimentos a camada superior conteve as maiores concentrações (máximo na meia maré enchente = 75 mg/l), e a camada inferior com valores menores a 7 mg/l relacionados a águas marinhas. As velocidades durante a maré enchente apresentaram uma camada superficial de menor velocidade em relação à camada adjacente e, coincidindo com a posição do intenso gradiente de salinidade, deve-se ao efeito de entranhamento e mistura das águas doce e marinha. Na maré vazante a zona de corrente mais intensa (isolinha de  $u= 0,4$  m/s) se posicionou entre -0,3Z e -0,5Z, cerca de duas horas após a preamar. A velocidade máxima na maré enchente foi -0,43 m/s enquanto que na maré vazante 0,47m/s (Figura 5.48 b).

#### *5.3.3.2.4 Perfis verticais de hidrografia e correntes – Canal do Paraguaçu – Seção III - Quadratura - 31/01/2004 - Canal ao Sul da Ilha do Francês*

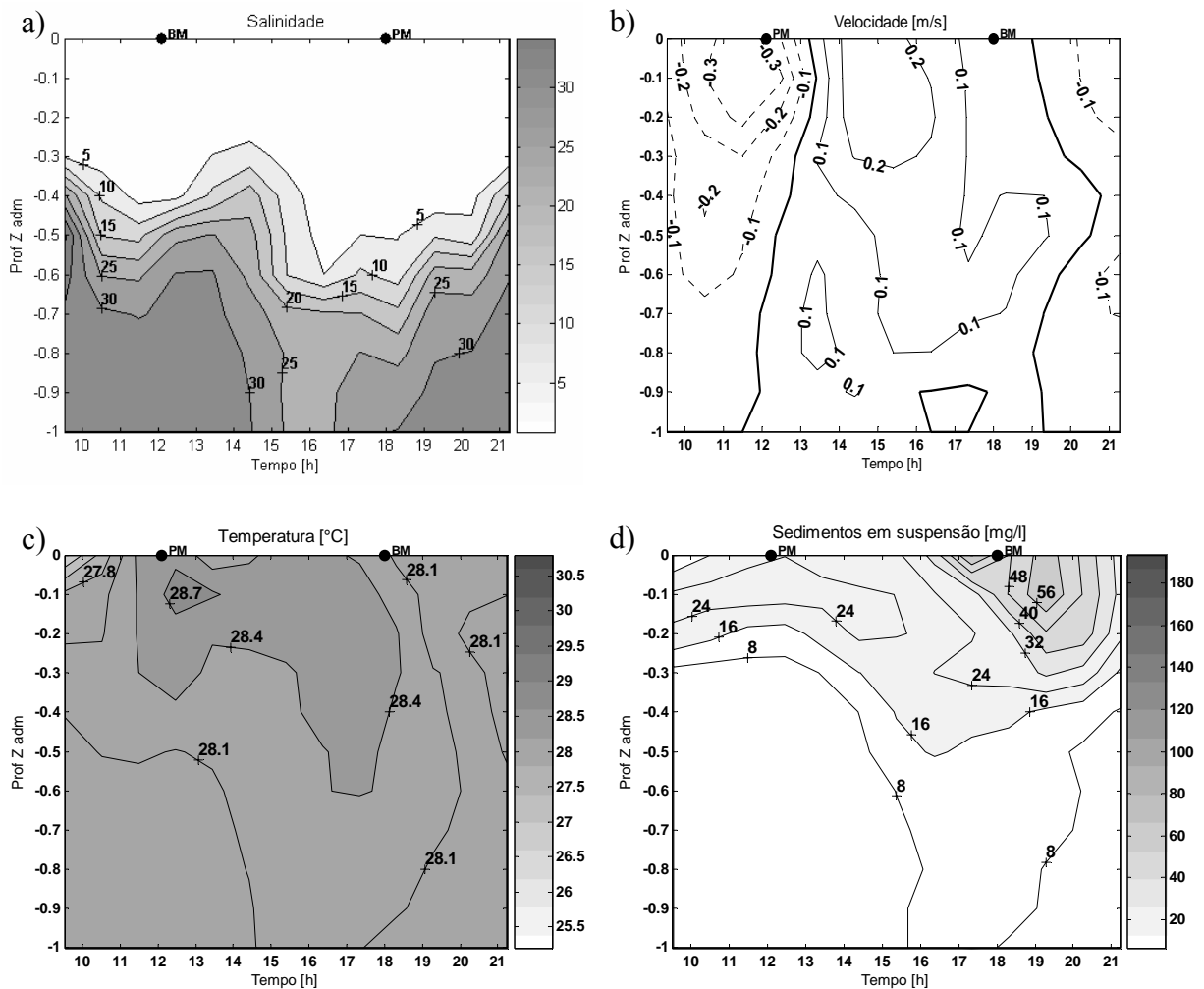
No canal ao Sul da Ilha do Francês (CS) a presença de água doce foi maior do que no CN, com a isohalina de 5 ficando abaixo de -0,3Z e ocorrendo uma redução da salinidade junto ao fundo na meia maré vazante (mínimo de 23,2) (Figura 5.49 a). No ciclo, os valores máximo e mínimo foram, respectivamente, 33 e 0,6. A temperatura oscilou entre 26,9°C e 28,8°C (Figura 5.49 c). No CS as velocidades máximas foram menores que no CN, com valores de 0,3 m/s na vazante e -0,39 m/s na enchente. Destaca-se que as correntes mais intensas, tanto enchente como na vazante, ocorreram próximas da superfície (Figura 5.49 b). Nos sedimentos em suspensão, a camada superior apresentou maior concentração, porém os valores máximos ocorreram após a baixa-mar (máximo = 65 mg/l) (Figura 5.49 d).



**Figura 5.48. Variação temporal da salinidade (a), velocidade (b), temperatura (c) e sedimentos em suspensão (d) – 31/01/2004 – Canal Norte – quadratura e  $Q = 331 \text{ m}^3/\text{s}$  – Seção III.**

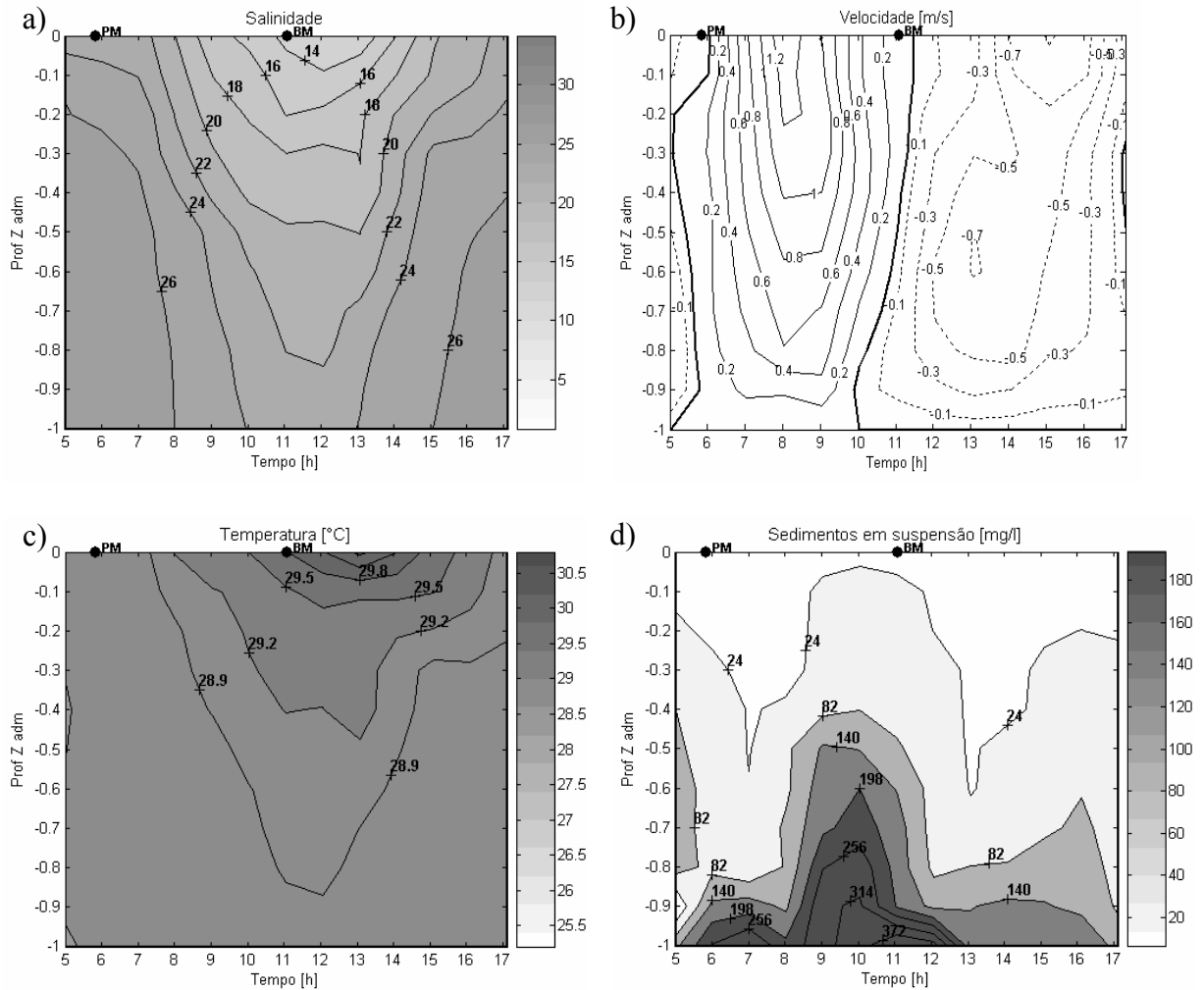
### 5.3.3.2.5 Perfis verticais de hidrografia e correntes – Canal do Paraguaçu – Seção III - Sizígia - 08/02/2004 - Canal ao Norte da Ilha do Francês

No Canal do Paraguaçu a montante da Ilha do Francês, com a maré de sizígia, a coluna d'água no CN ficou bem misturada na preamar, passando para parcial mistura à medida que migrou para baixa-mar, quando se formou um gradiente acentuado de salinidade, com variação de 11,7 (mínimo = 11,3 e máximo = 23) (Figura 5.50a). A temperatura, seguindo o padrão de distribuição temporal da salinidade, apresentou a maior variação durante e logo após a baixa-mar, variando de 30,5°C na superfície para 28,7°C junto ao fundo. Na preamar os valores de temperatura em toda a coluna foram inferiores a 28,9°C (Figura 5.50 c).



**Figura 5.49. Variação temporal da salinidade (a), velocidade (b), temperatura (c) e sedimentos em suspensão (d) – 31/01/2004 – Canal Sul – quadratura e  $Q = 331 \text{ m}^3/\text{s}$  – Seção III.**

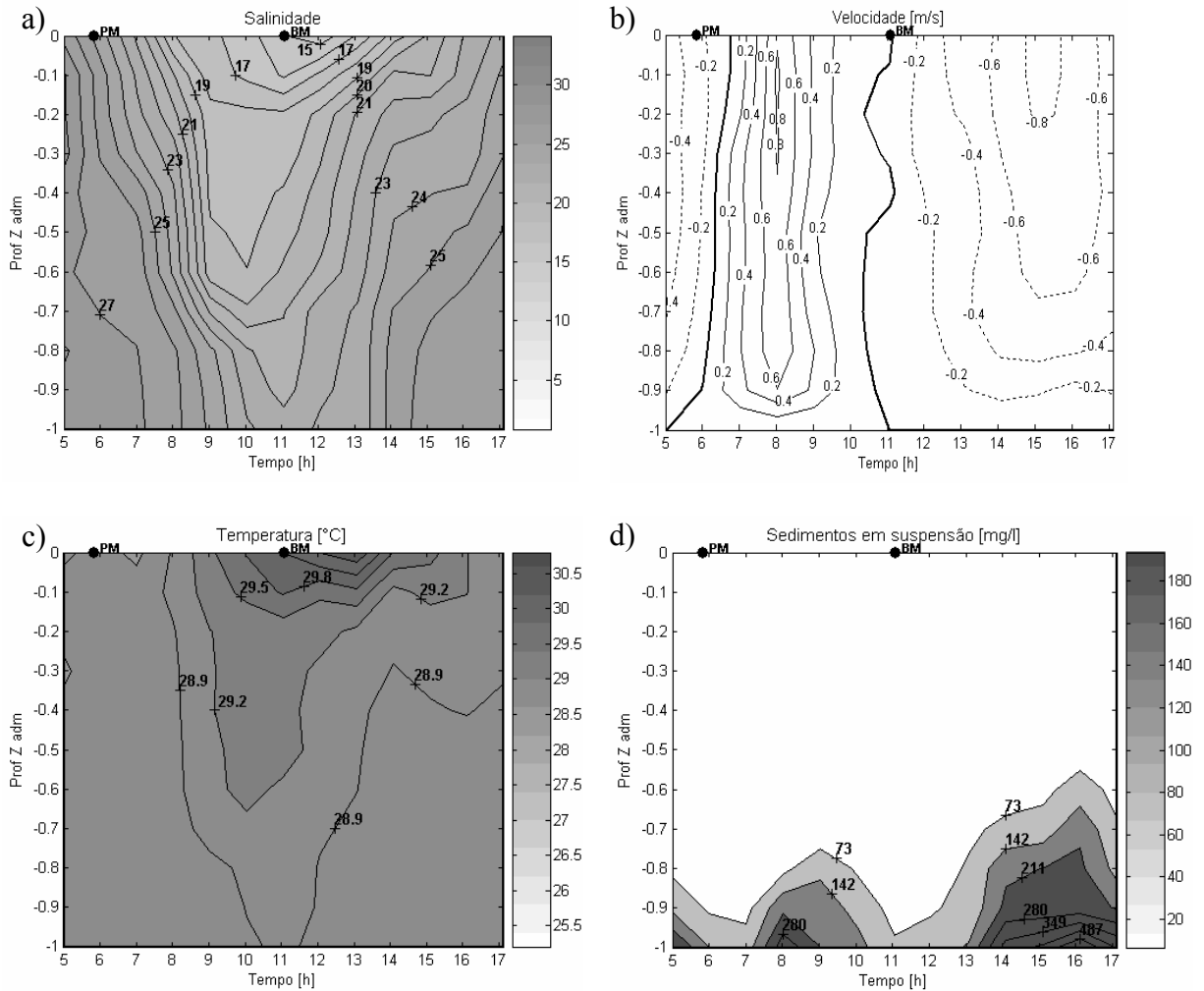
No CN, em sizígia, a velocidade da corrente de vazante (máximo = 1,36 m/s) superou em quase 50% a de enchente (máximo = 0,92 m/s), e, se comparada com a de quadratura, chegou a ser duas vezes maior (Figura 5.50 b). A concentração de sedimentos em suspensão foi alta, com os maiores valores associados ao fluxo de vazante e próximo do fundo. O valor máximo ocorreu na baixa-mar (436 mg/l). Na enchente as concentrações foram menores, em torno de 140 mg/l no fundo (Figura 5.50 d).



**Figura 5.50. Variação temporal da salinidade (a), velocidade (b), temperatura (c) e sedimentos em suspensão (d) – 08/02/2004 – Canal Norte – sizígia e  $Q = 236 \text{ m}^3/\text{s}$  – Seção III.**

### 5.3.3.2.6 Perfis verticais de hidrografia e correntes – Canal do Paraguaçu – Seção III - Sizígia - 08/02/2004 - Canal ao Sul da Ilha do Francês

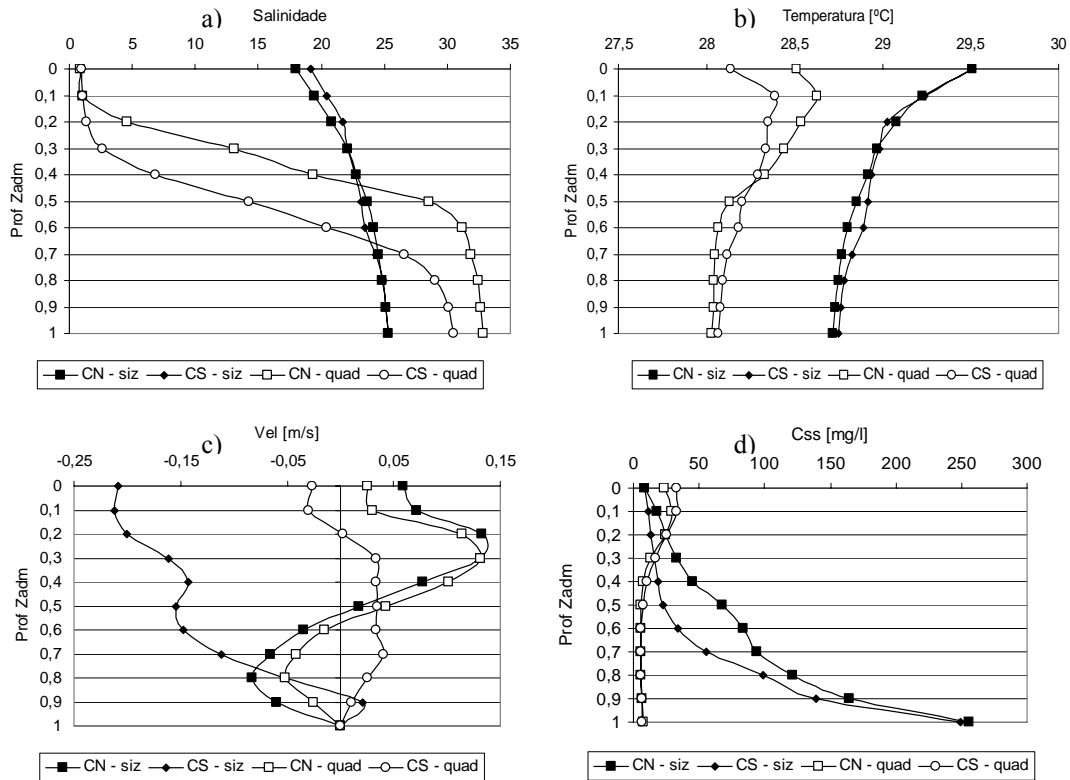
Em geral, as características hidrográficas no CS (Figura 5.51) seguiram o padrão do CN. Porém, algumas diferenças podem ser destacadas: a) a faixa de variação da salinidade foi menor (mínimo de 14,4); b) as maiores concentrações de sedimentos em suspensão ocorreram na maré enchente (máximo = 561 mg/l); c) Na maré vazante ocorreu um gradiente maior de velocidades próximo ao fundo e, no entanto, a velocidade máxima na enchente (-0,9 m/s) superou a de vazante (0,83 m/s).



**Figura 5.51. Variação temporal da salinidade (a), velocidade (b), temperatura (c) e sedimentos em suspensão (d) – 08/02/2004 – Canal Sul – sizígia e  $Q = 236 \text{ m}^3/\text{s}$  – Seção III.**

### 5.3.3.2.7 Perfis médios - Canal do Paraguauçu na Ilha do Francês – Seção III.

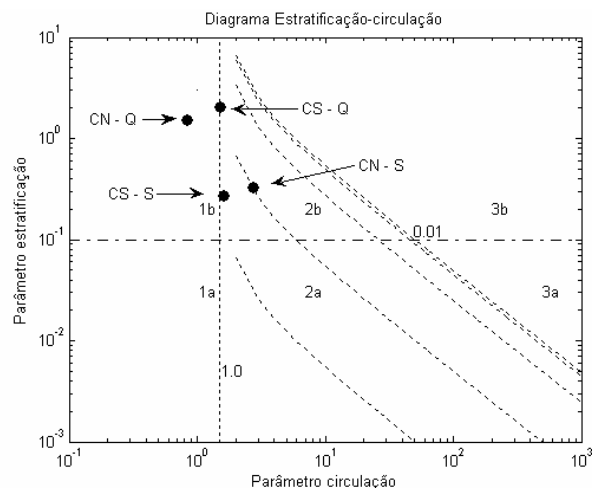
Os perfis médios de salinidade, temperatura e sedimentos em suspensão (Figura 5.52 a,b e d) apresentaram um comportamento semelhante no Norte e Sul do Canal, para a mesma condição de maré. No entanto, comparando-se a situação em quadratura em relação à sizígia, verificou-se: 1) a estratificação de sal na quadratura e melhor mistura em sizígia (Figura 5.52 a); 2) a temperatura maior das águas na sizígia (Figura 5.52 b); e 3) os sedimentos, que em quadratura estavam na camada superior, com a quebra da estratificação na sizígia ocorreram com grande concentrações junto ao fundo (Figura 5.52 d). No caso das velocidades (Figura 5.52 c), o CN apresentou um perfil semelhante tanto em quadratura bem como na sizígia, com um padrão misto de circulação gravitacional e baroclínica. Contudo, no CS os perfis foram bem diferentes em função do fluxo distinto que ocorreu no maré de quadratura e de sizígia.



**Figura 5.52.** Perfis médios de salinidade (a), temperatura (b), velocidade (c) e sedimentos em suspensão (d) – Canal do Paraguaçu a montante da Ilha do Francês – Seção III.

#### 5.3.3.2.8 Classificação da dinâmica estuarina - Canal do Paraguaçu – Seção III.

Na classificação pelo diagrama estratificação e circulação (Hansen e Rattray, 1966), na quadratura e com vazão de 331 m<sup>3</sup>/s o Canal do Paraguaçu na Seção III ficou classificado com do *tipo 4* (cunha salina), enquanto que na sizígia e vazão de 236 m<sup>3</sup>/s passou para *tipo 2b* a *tipo 1b* (parcialmente misturado a bem misturado, mais estratificado) (Figura 5.53).



**Figura 5.53.** Diagrama de circulação e estratificação - Canal do Paraguaçu a montante da Ilha do Francês – Seção III.

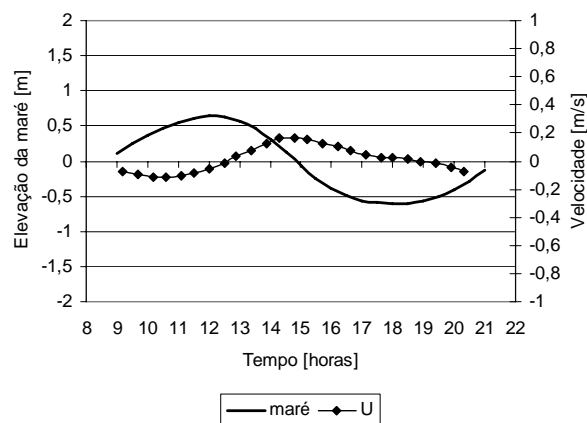
### 5.3.3.3 Baía de Iguape – Setores Norte e Sul – seções IV e V

Os monitoramentos na Baía de Iguape foram feitos em maré de quadratura (31/01/04) e de sizígia (7 e 8/02/04), em duas seções transversais: 1) no canal principal do Setor Sul (IV); e 3) no canal principal do Setor Norte (V) (Figura 5.4). Devido a problemas técnicos com o ADCP, o monitoramento no Setor Norte não foi realizado na maré de quadratura.

As vazões fluviais foram de 331 m<sup>3</sup>/s (31/1), 258 m<sup>3</sup>/s (7/2) e 236 m<sup>3</sup>/s (8/2), embora nos dias que antecederam o monitoramento tenham ocorrido vazões altas (Figura 5.11). As previsões fornecidas pelos dados da estação S18 foram utilizadas para representar o comportamento da maré nos dias de monitoramento.

#### 5.3.3.3.1 Campo de correntes [m/s] – Baía de Iguape – Seção IV - Setor Sul – Quadratura – 31/01/2004

O monitoramento da maré em quadratura ocorreu com uma descarga fluvial de 331 m<sup>3</sup>/s e uma altura de 1,15 m na maré enchente e 1,25 m na maré vazante (Figura 5.54). A seção transversal do Setor Sul da BI, limitada ao canal principal, tem uma extensão de 950 m e profundidade máxima de 10,8 m (Figura 5.55 b).



**Figura 5.54. Velocidade média na Seção IV e maré prevista em S18 – 31/01/2004 – quadratura.**

O ciclo teve a duração de 11,1 horas, das quais 6,3 horas foram de maré vazante e 4,8 horas de maré enchente. A assimetria na duração da maré  $t_v/t_e$  resultou em  $-24\%$ . As velocidades na vazante ( $\bar{U} = 0,09$  m/s;  $U_{max} = 0,17$  m/s e  $\bar{u}_{max} = 0,31$  m/s) superaram àquelas de enchente ( $\bar{U} = -0,07$  m/s;  $U_{max} = -0,12$  m/s e  $\bar{u}_{max} = -0,17$  m/s),

respectivamente, em 29%, 42% e 82%. O índice de assimetria AIdv ficou igual a 0,272. As vazões máximas apresentaram valores de 1.203 m<sup>3</sup>/s e -810 m<sup>3</sup>/s, respectivamente para vazante e enchente, com a área da seção transversal variando entre 7.409 m<sup>2</sup> e 6.258 m<sup>2</sup>. O prisma de maré enchente foi de 0,082x10<sup>8</sup> m<sup>3</sup> (Tabela 5.15). A vazão residual do ciclo de maré na seção da BI Sul foi de 121,4 m<sup>3</sup>/s.

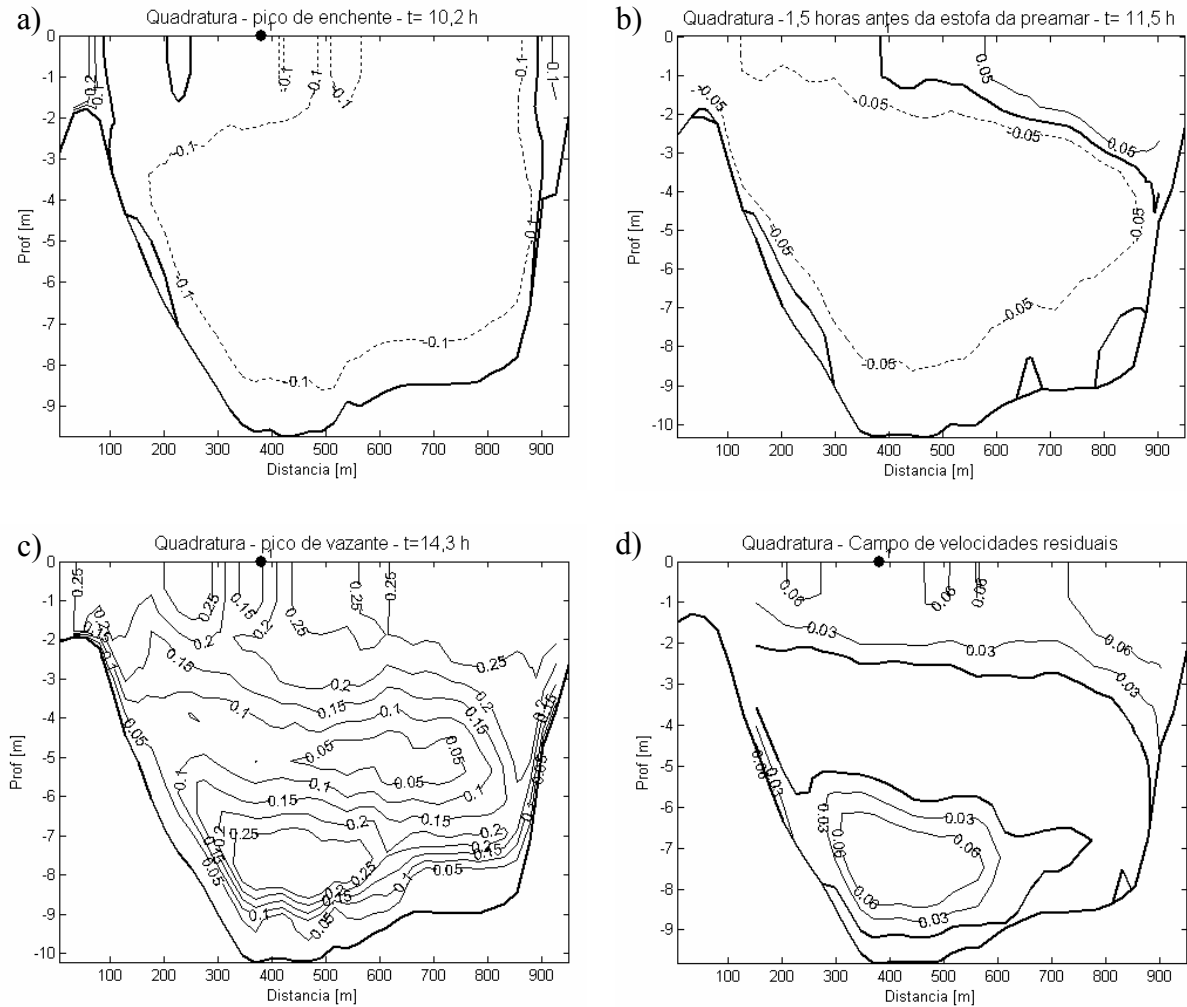
**Tabela 5.15. Resumo com os valores característicos dos ciclos monitorados na Baía de Iguape - 2004.**

	BIS: Quad – 31/01 Q=331 m <sup>3</sup> /s	BIS: Siz - 08/02 Q=236 m <sup>3</sup> /s	BIN: Siz - 07/02 Q=258 m <sup>3</sup> /s
Duração do ciclo [h]	11,1	12,0	12,6
Tempo de vazante [h]	6,3	5,2	5,3
$\bar{U}$ na vazante [m/s]	0,09	0,33	0,42
$U_{max}$ de vazante [m/s]	0,17	0,64	0,81
$V_{max}$ barotrópica de vazante [m/s]	0,31	0,86	0,94
$Q_{max}$ de vazante [ m <sup>3</sup> /s]	1.203	4.413	3.958
Tempo de enchente [m/s]	4,81	6,77	7,23
$\bar{U}$ na enchente [m/s]	-0,07	-0,26	-0,36
$U_{max}$ de enchente [m/s]	-0,12	-0,37	-0,52
$V_{max}$ barotrópica de enchente [m/s]	-0,17	-0,52	-0,68
$Q_{max}$ de enchente [ m <sup>3</sup> /s]	-810,3	-2.394	-2.651
te/tv	-24%	30%	36%
Prisma – P [m <sup>3</sup> ]	0,082x10 <sup>8</sup>	0,384x10 <sup>8</sup>	0,447x10 <sup>8</sup>
Índice assimetria AIdv	0,272	-0,004	-0,075
Vazão residual [ m <sup>3</sup> /s]	121,4	85,3	1,68
Altura da maré [m]	1,25	2,80	2,92
Erro máximo de U [m/s]	0,046	0,025	0,016
Erro mínimo de U [m/s]	0,015	0,013	0,008
Erro no Prisma [%]	33,8	6,9	2,9

Obs.: te e tv foram determinados em função da variação de U.

Em relação aos campos de correntes, a maré enchente entra na seção pela margem direita e se expande a medida que a vazão aumenta até atingir o máximo (Figura 5.55 a). Devido a grande quantidade de água doce no estuário, como veremos nos perfis verticais, 1,5 horas antes da estufa da preamar já ocorre a saída de água pela camada superior da margem direita, indicando a forte circulação baroclínica (Figura 5.55 b), que mesmo no momento da vazão de pico de vazante produz uma estrutura de correntes em três zonas distintas (Figura 5.55 c). Como resultado, houve a formação de um campo de velocidade residual em três camadas (Figura 5.55 d).



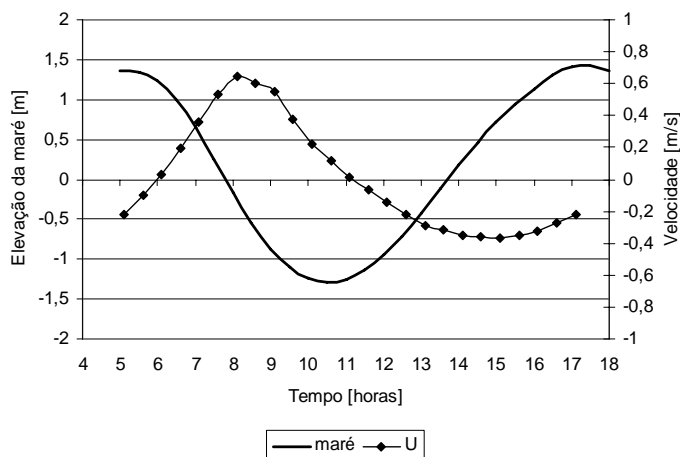


**Figura 5.55. Campo de correntes [m/s] – Baía de Iguape – Setor Sul – quadratura– Q= 331 m<sup>3</sup>/s–Seção IV.**

**5.3.3.3.2 Campo de correntes [m/s] – Baía de Iguape – Seção IV - Setor Sul – Sizígia – 08/02/2004**

O monitoramento do ciclo de maré em maré de sizígia da BI Sul ocorreu com uma descarga fluvial de 236 m<sup>3</sup>/s e altura de maré de 2,73 m na enchente e 2,8 m na vazante (Figura 5.56). O ciclo teve a duração de 12 horas, das quais 6,8 horas foram de maré enchente e 5,2 horas de maré vazante. Como consequência dessa assimetria na maré ( $t_e/t_v = 30\%$ ) as velocidades na vazante ( $\bar{U} = 0,33$  m/s;  $U_{max} = 0,64$  m/s e  $\bar{u}_{max} = 0,81$  m/s) superaram aquelas de enchente ( $\bar{U} = -0,26$  m/s;  $U_{max} = -0,37$  m/s e  $\bar{u}_{max} = -0,52$  m/s), respectivamente, em 27%, 73% e 65%. O índice de assimetria  $A_{ldv}$  ficou igual a -0,004. As vazões máximas apresentaram valores de 4.413 m<sup>3</sup>/s e -2.394 m<sup>3</sup>/s, respectivamente para

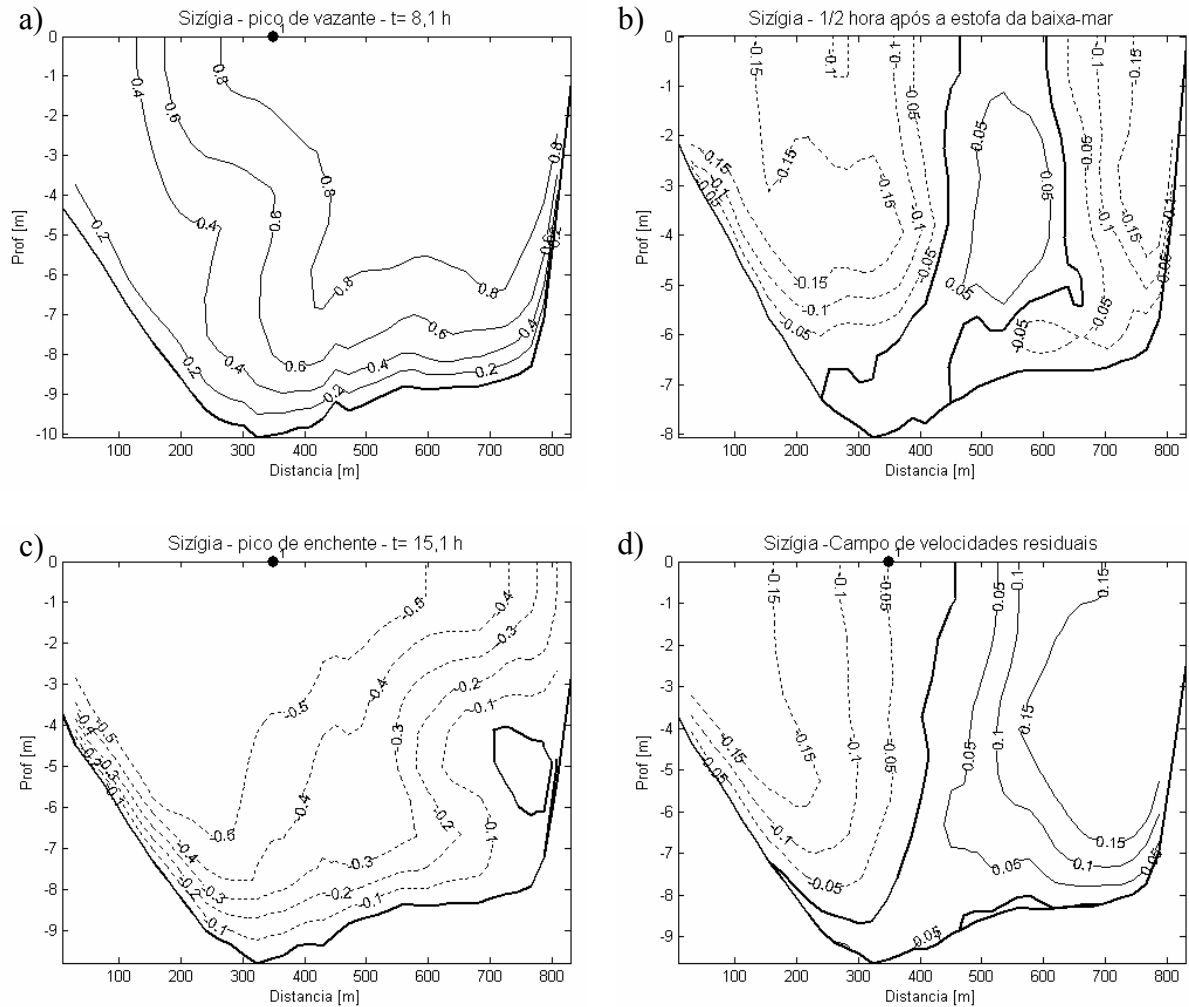
vazante e enchente, com a área da seção transversal variando entre 7.475 m<sup>2</sup> e 5.061 m<sup>2</sup>. O prisma de maré enchente chegou a 0,384x10<sup>8</sup> m<sup>3</sup> (Tabela 5.15). A vazão residual do ciclo de maré na seção da BI Sul foi de 85,3 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 5.56. Velocidade média na Seção IV e maré prevista em S18 – 08/02/2004 – sizígia**

A distribuição das velocidades na seção transversal no ciclo de maré na sizígia, mostrou o fluxo de vazante se posicionando do lado direito do canal (Figura 5.57 a) e o fluxo máximo de enchente ocorrendo próximo à margem esquerda, com cisalhamento vertical mais intenso próximo do fundo devido ao atrito (Figura 5.57 c). Mesmo meia hora após a estofa da baixa-mar foram observados fluxos de vazante (Figura 5.57 b) que colaboraram para estabelecer um movimento bidirecional, com cisalhamento lateral da velocidade residual (Figura 5.57 d).

Em comparação às características da quadratura, as velocidades ( $\bar{U}$  e  $U_{max}$ ) e a vazão máxima na sizígia foram cerca de 3,7 vezes superiores na vazante e 3 vezes na enchente. O prisma de maré foi maior ainda, cerca de 4,7 vezes superior ao de quadratura. O índice  $t_e/t_v$  (30%) confirmou a inversão da assimetria indicada no item de análise das marés. Em função da semelhança entre as velocidades médias e discrepância na duração das marés vazante e enchente na quadratura, o índice  $A_{Idv}$  passou de 0,272 para -0,004 na sizígia, quando a razão entre as velocidades e durações da maré vazante e enchente foi pequena (Tabela 5.15). No que se refere aos campos de corrente, o padrão de estratificação na quadratura (Figura 5.55 b,c,d) foi quebrado pela energia da maré de sizígia, quando fluxos preferenciais em margens opostas ficaram melhor definidos (Figura 5.57 a,c,d), assim como ocorreu na saída do Canal do Paraguaçu.



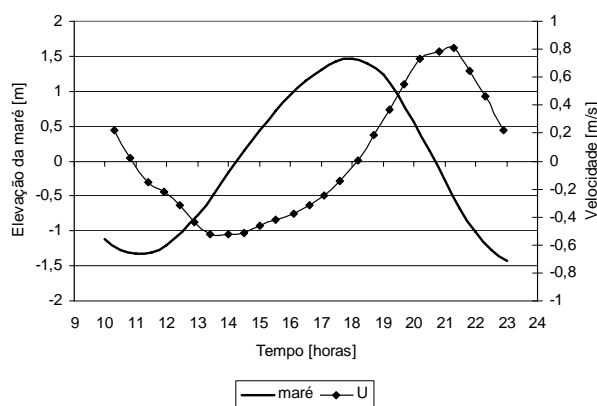
**Figura 5.57. Campo de correntes [m/s] – Baía de Iguape – Setor Sul – sizígia –  $Q= 236 \text{ m}^3/\text{s}$  – seção IV.**

### 5.3.3.3.3 Campo de correntes [m/s] – Baía de Iguape – Seção V - Setor Norte – Sizígia – 07/02/2004

O ciclo de monitoramento de maré de sizígia na BI Norte ocorreu com uma altura de maré de 2,72 m na enchente e 2,92 m na vazante (Figura 5.58). A descarga fluvial no Rio Paraguaçu era de  $258 \text{ m}^3/\text{s}$ . A seção transversal do Setor Norte da BI, limitada ao canal principal, tem uma extensão de 700 m e profundidade máxima de 10,8 m (Figura 5.59 c).

O ciclo teve a duração de 12,5 horas, das quais 7,2 horas foram de maré enchente e 5,3 horas de maré vazante. Como consequência da assimetria na maré ( $t_e/t_v = 36\%$ ) e da maior altura da maré, as velocidades na vazante ( $\bar{U} = 0,42 \text{ m/s}$ ;  $U_{max} = 0,81 \text{ m/s}$  e  $\bar{u}_{max} = 0,94 \text{ m/s}$ ) superaram aquelas de enchente ( $\bar{U} = -0,36 \text{ m/s}$ ;  $U_{max} = -0,52 \text{ m/s}$  e  $\bar{u}_{max} = -0,68$

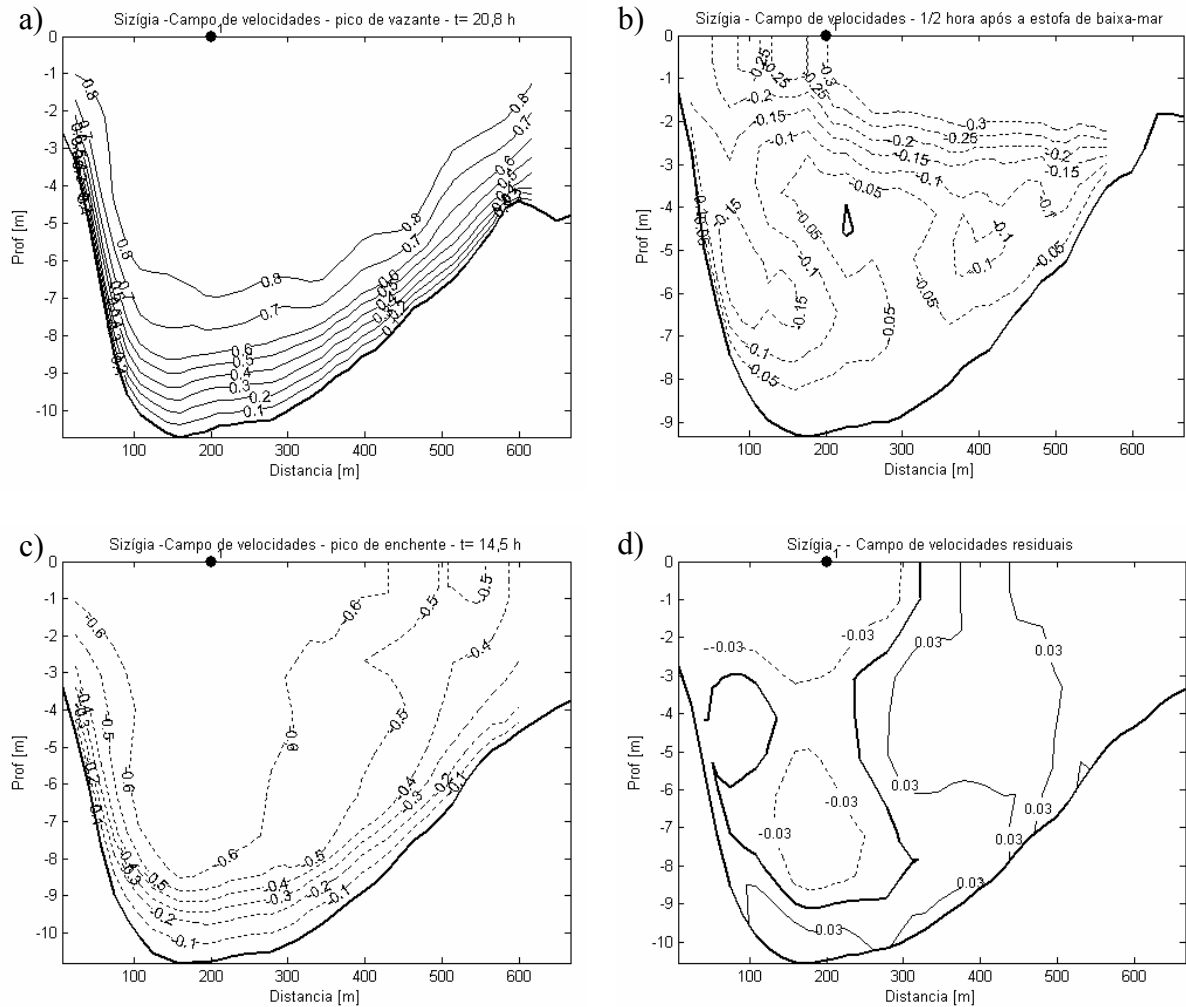
m/s), respectivamente, em 67%, 56% e 38%. O índice de assimetria  $A_{Idv}$  ficou igual a  $-0,075$ . As vazões máximas apresentaram valores de  $3.958 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $-2.651 \text{ m}^3/\text{s}$ , com a área da seção transversal variando entre  $4.182 \text{ m}^2$  e  $5.867 \text{ m}^2$ . O prisma de maré enchente chegou à  $0,447 \times 10^8 \text{ m}^3$  (Tabela 5.15). A vazão residual do ciclo de maré na seção da BI Norte foi praticamente nula ( $1,68 \text{ m}^3/\text{s}$ ), com uma vazão fluvial do Rio Paraguaçu de  $258 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Figura 5.58. Velocidade média na Seção V e maré prevista – 07/02/2004 – Sizígia**

O campo de velocidades na seção transversal, no momento de medição do fluxo máximo (pico) de vazante (Figura 5.59 a), apresentou isolinhas bem distribuídas ao longo de toda a seção, enquanto que no máximo de enchente (Figura 5.59 c) as maiores velocidades se concentraram na parte profunda da seção, próximas da margem esquerda. Em ambos os momentos de fluxo máximo destacou-se o forte cisalhamento vertical de velocidades nas proximidades do fundo, como resultado do atrito. Curiosamente, logo após a estofa de vazante (Figura 5.59 b), identificou-se um fluxo de enchente significativo na camada superficial ( $u > 0,3 \text{ m/s}$ ) próximo à margem direita, como consequência da descarga fluvial. O campo residual apresentou cisalhamento lateral, porém de velocidades pequenas ( $u \sim 0,03 \text{ m/s}$ ) (Figura 5.59 d) quando comparadas com aquele da BI Sul ( $u \sim 0,15 \text{ m/s}$ ).

Em relação ao comportamento da seção da BI Sul no ciclo de maré de sizígia (8/2/04), as velocidades e o prisma foram maiores em BI Norte (Tabela 5.15), ainda que a área de seção transversal do canal fosse menor. A vazão máxima de vazante em BI Norte ficou cerca de 10% aquém daquela de BI Sul, porém superou a vazão máxima de enchente na mesma proporção, ainda que a altura da maré enchente tenha sido a mesma (2,72 m). A pequena vazão residual em BI Norte, em relação a BI Sul (Tabela 5.15), deve ter sofrido influência do aporte da água doce do Rio Paraguaçu, como será destacado na descrição dos perfis hidrográficos a seguir.

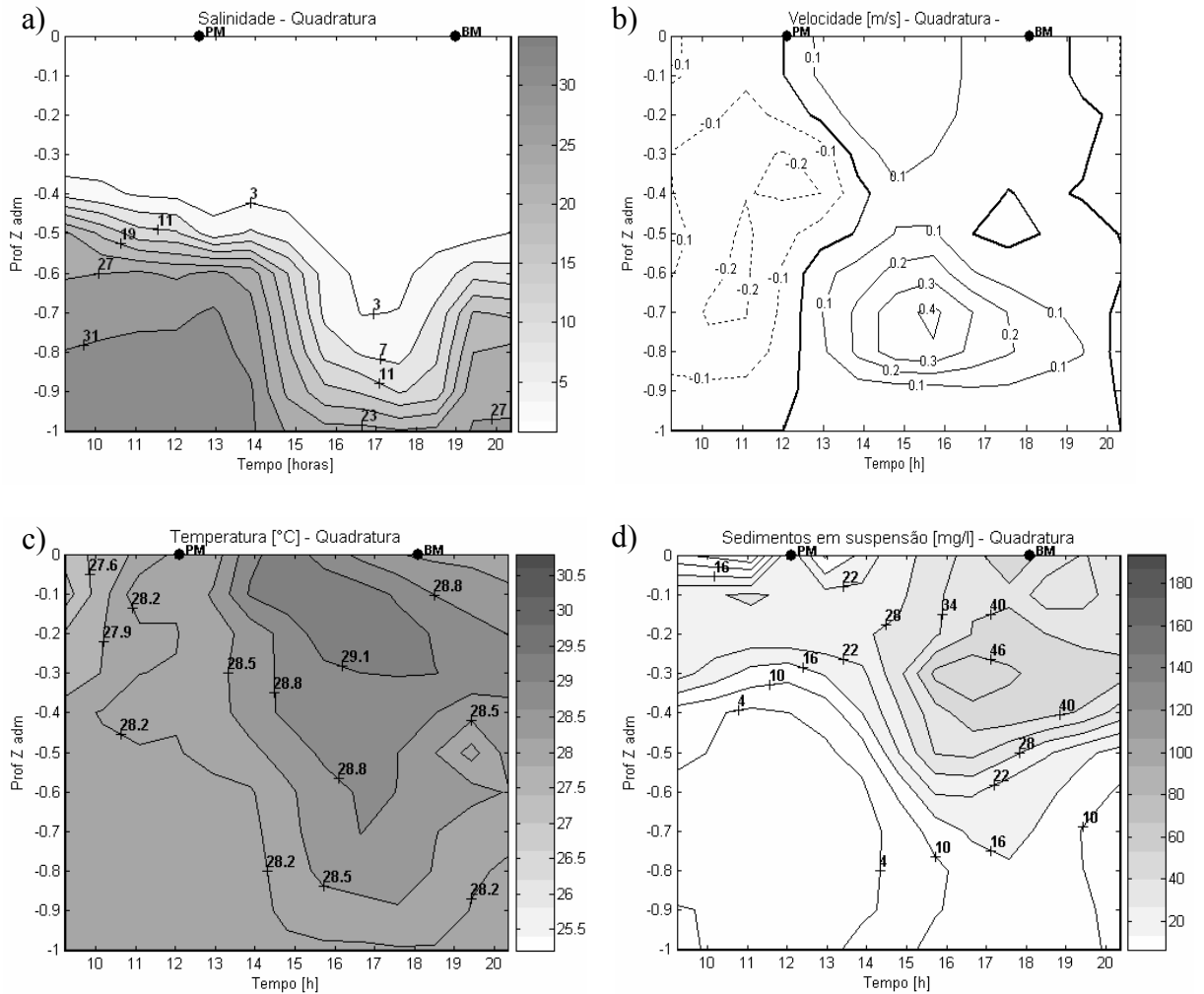


**Figura 5.59. Campo de correntes [m/s] – Baía de Iguape – Setor Norte – sizígia –  $Q = 258 \text{ m}^3/\text{s}$  – seção V.**

*5.3.3.3.4 Perfis verticais de hidrografia e correntes – Baía de Iguape - Seção IV – Setor Sul – Quadratura – 31/01/2004*

A distribuição vertical e temporal da salinidade (Figura 5.60 a) demonstra a forte estratificação provocada pela alta descarga fluvial, que na preamar divide a seção com água doce na metade superior e água salgada na metade inferior, com valor de 31 a partir de  $0,75Z$ . Na baixa-mar a água doce se expande até  $0,7Z$  e salinidade no fundo foi de 23. A temperatura (Figura 5.60 b) apresentou variação na vertical durante a maré vazante, diminuindo da superfície em direção ao fundo, indicando água doce mais quente que a marinha (cerca de  $1^\circ\text{C}$ ). Em relação às velocidades (Figura 5.60 c), observou-se um tempo menor de permanência do fluxo de maré enchente. Durante a vazante, as maiores velocidades se concentraram da meia profundidade para baixo ( $>0,4 \text{ m/s}$ ), enquanto que na camada superior a variação foi pequena (entre 0 e  $0,1 \text{ m/s}$ ), caracterizando diferentes condições de fluxo

associadas à estratificação existente devido ao efeito de entranhamento. Os sedimentos em suspensão mostraram maior concentração junto da água doce na camada superior, e com valores mais altos próximo à baixa-mar, enquanto que próximo ao fundo a água marinha esteve com pouco sedimentos em suspensão (Figura 5.60 d).

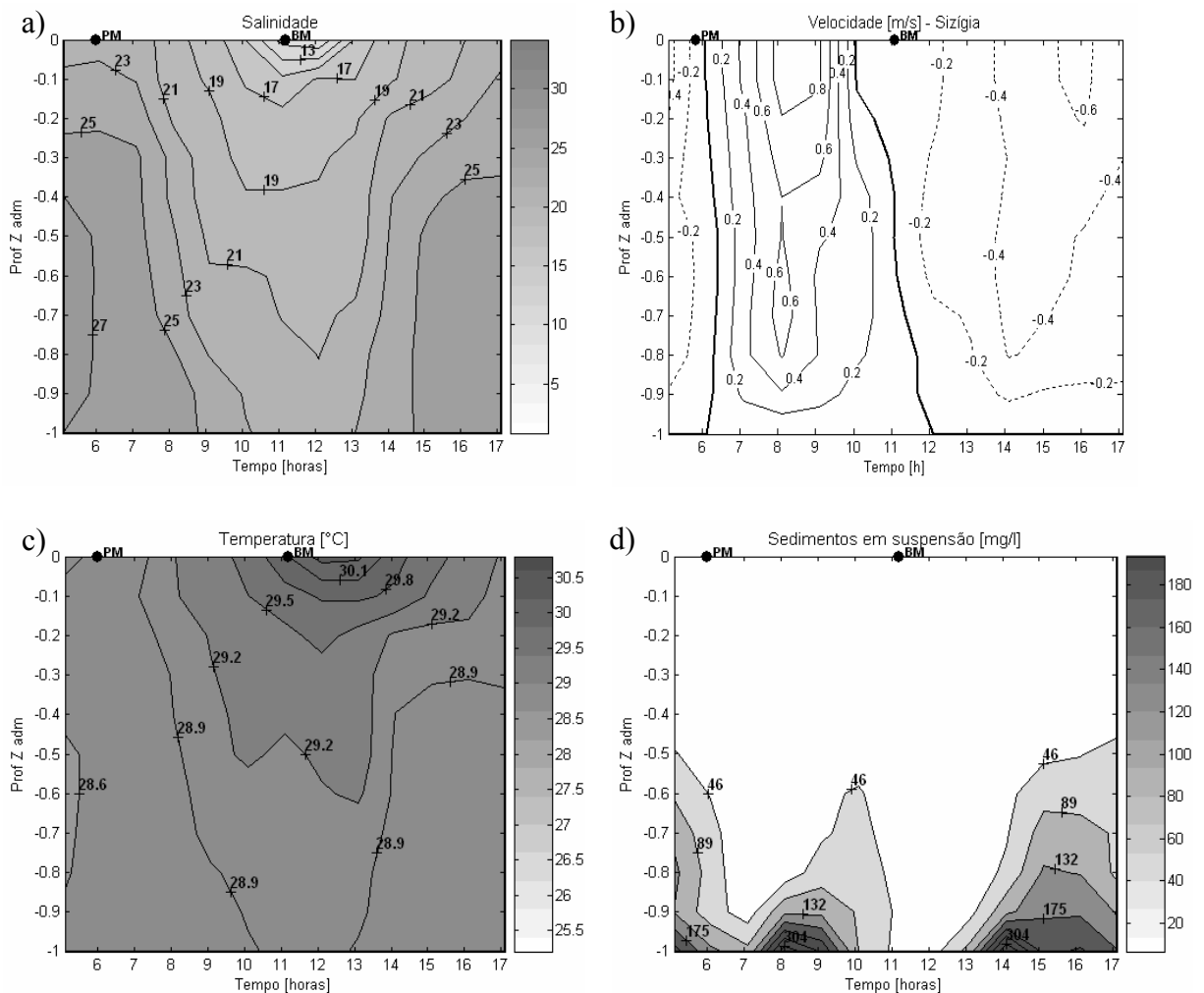


**Figura 5.60. Variação temporal da salinidade (a), velocidade (b), temperatura (c) e sedimentos em suspensão (d) – 31/01/2004 – BI Sul – quadratura -  $Q = 331 \text{ m}^3/\text{s}$  – Seção IV.**

#### 5.3.3.3.5 Perfis verticais de hidrografia e correntes – Baía de Iguape – Seção IV – Setor Sul – Sizígia – 08/02/2004

No ciclo da maré de sizígia a estratificação vertical foi quebrada e a coluna d'água apresentou uma mistura parcial. Próximo à baixa-mar a variação de salinidade foi significativa, com valor mínimo de 9,2 na superfície, enquanto no fundo chegou a 22. No entorno da preamar a coluna d'água ficou mais homogênea, ainda que com variações de cerca de 4 psu entre a superfície e o fundo (Figura 5.61 a). A temperatura seguiu o comportamento

da salinidade, mostrando água mais quente na superfície (máximo = 30,6°C) associada à salinidade menor, e temperatura mais baixa junto ao fundo (< 29°C), relacionada a água mais salina. Próximo da preamar a temperatura ficou homogênea em toda a coluna, cerca de 28,9°C (Figura 5.61 b). Os perfis de velocidade não apresentaram a segmentação ocorrida na maré de quadratura. No momento da baixa-mar a isolinha de velocidade nula mostrou uma inclinação indicativa de correntes de enchente na metade superior da coluna d'água e de vazante na inferior (Figura 5.61 c). Considerando a existência de água menos salina na superfície, o movimento baroclínico usual seria justamente oposto àquele verificado. Provavelmente é um resultado decorrente da posição do CTD na seção e da geometria do canal, que induz correntes de enchente preferencialmente pela margem esquerda.



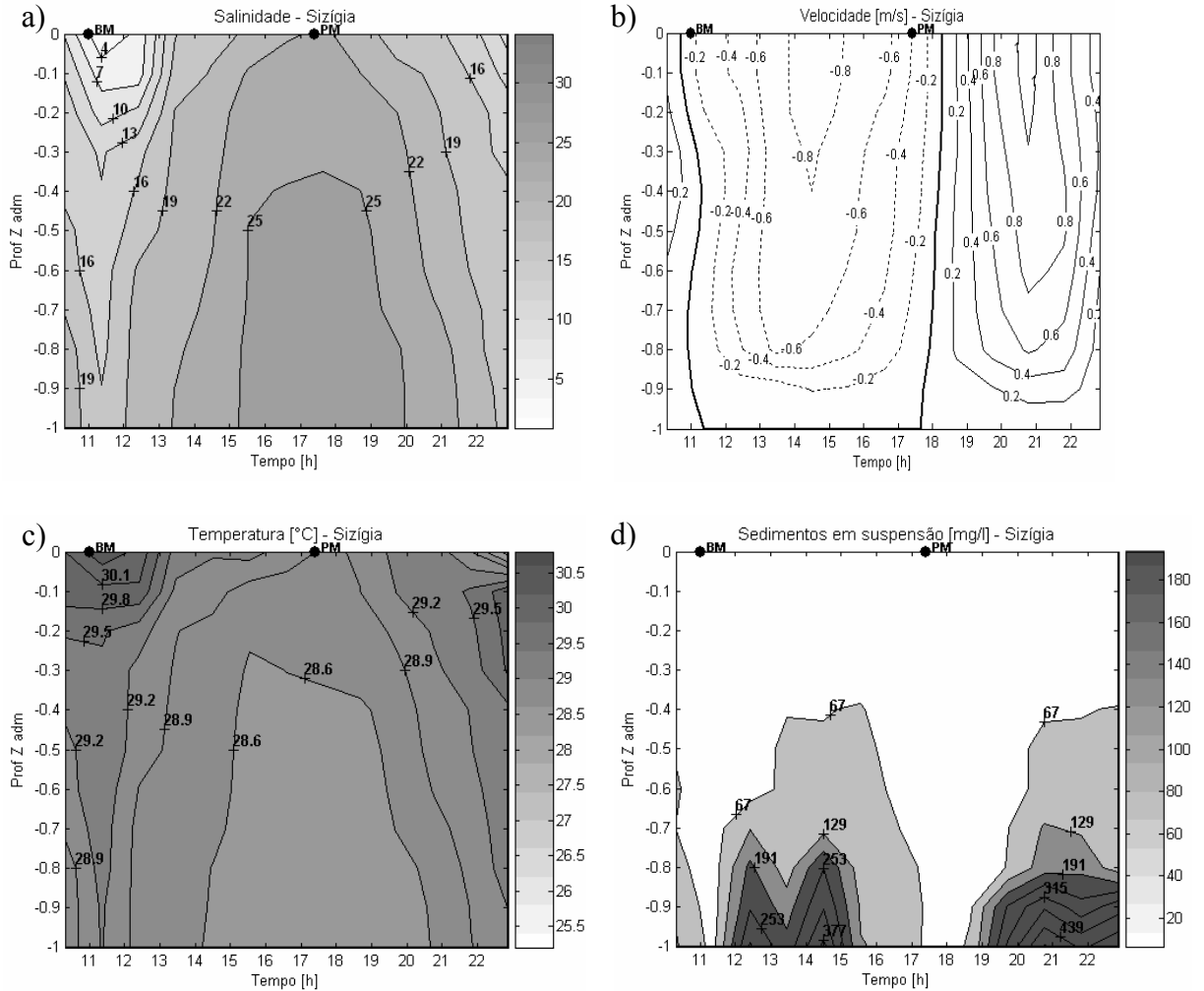
**Figura 5.61. Variação temporal da salinidade (a), velocidade (b), temperatura (c) e sedimentos em suspensão (d) – 08/02/2004 – BI Sul – sizígia e  $Q = 236 \text{ m}^3/\text{s}$  – seção IV.**

A situação dos sedimentos em suspensão na sizígia foi bastante diferente daquela encontrada na quadratura, quando eles se concentraram na camada superior. Os valores de concentração foram bastante elevados junto ao fundo, chegando a 351 mg/l, enquanto que na superfície, em geral, foram inferiores a 10 mg/l. Os momentos de ocorrência das altas concentrações foram dois: a) logo após a velocidade máxima de vazante; e b) desde a meia maré de enchente até a preamar (Figura 5.61 d), indicando remobilização dos sedimentos de fundo.

*5.3.3.3.6 Perfis verticais de hidrografia e correntes – Baía de Iguape – Seção V – Setor Norte – Sizígia – 08/02/2004*

O monitoramento mostrou valores muito baixos de salinidade na superfície (1,7psu) e uma grande variação até o fundo (16psu) logo após a baixa-mar. A salinidade, da meia maré enchente em diante, teve uma variação menor na coluna d'água, sendo que na preamar ficou entre 23 e 26 (Figura 5.62 a). Considerando a existência de correntes de enchente consideráveis (0,2 m/s a 0,4 m/s) próximo da superfície e logo após a baixa-mar, reforça-se o aporte de água fluviais em direção de BI Norte. A temperatura seguiu o padrão de distribuição vertical e temporal da salinidade, associando temperatura maior à água doce (máximo de 30,6°C) e temperatura menor à água mais salina (mínimo de 28,2°C) (Figura 5.62 b). As velocidades na vazante foram mais intensas que na enchente. Na vazante, velocidade chegou a superar 1m/s na superfície (máximo = 1,1 m/s) e com a isolinha de 0,8 m/s se expandindo até -0,65Z, enquanto que na enchente a velocidade máxima na superfície foi de -0,9 m/s e a isolinha de -0,8 m/s só chegou até -0,4Z (Figura 5.62 c). Os sedimentos em suspensão mostraram altas concentrações junto ao fundo em quase todo o ciclo, exceto durante a baixa-mar e a preamar. Na maré enchente o valor máximo foi de 390 mg/l (14,5 horas), enquanto que na maré vazante chegou a 507 mg/l (20,8 horas), em ambos os casos junto ao fundo (Figura 5.62 d).





**Figura 5.62. Variação temporal da salinidade (a), velocidade (b), temperatura (c) e sedimentos em suspensão (d) – 07/02/2004 – BI Norte – sizígia e  $Q = 258 \text{ m}^3/\text{s}$  – seção V.**

#### 5.3.3.3.7 Perfis médios – Baía de Iguape – Seção IV e V

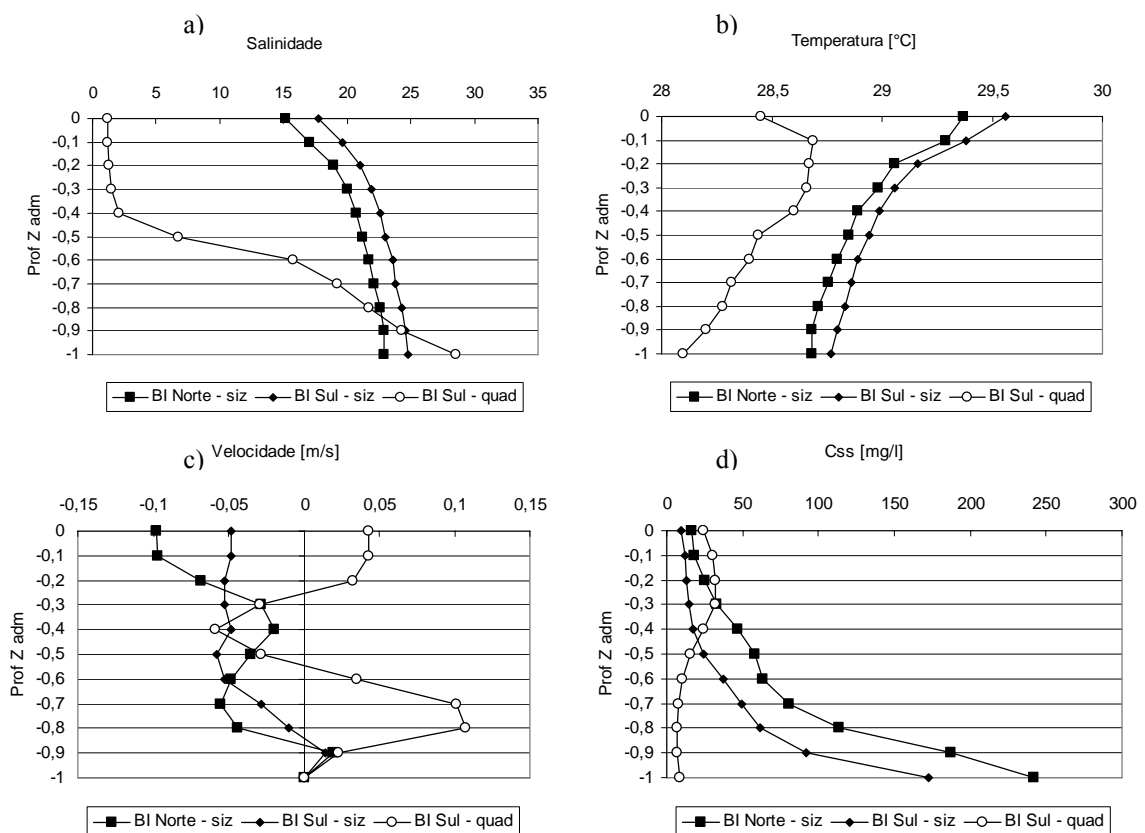
Nos perfis médios de salinidade (Figura 5.63 a) destacaram-se as diferenças entre a quadratura, onde a estratificação foi marcante, e a sizígia, que apresentou um perfil com melhor mistura, ainda que a variação entre a superfície e o fundo fosse superior a 5. Na temperatura (Figura 5.63 b) a tendência geral foi de decréscimo com o aumento da profundidade, sendo que no ciclo de maré de quadratura ficou mais destacada a associação da temperatura à água doce (mais quente) e a água marinha (menos quente) devido à estratificação de sal.

A estrutura do perfil de velocidade (Figura 5.63 c) na quadratura resultou em três camadas: a) do fundo até  $-0,55Z$  foi positiva e mais intensa; b) de  $-0,55Z$  a  $-0,25Z$  ficou negativa; e c) de  $-0,25Z$  à superfície novamente voltou a ser positiva. A velocidade residual

foi de vazante (0,027 m/s). Na sizígia o perfil residual foi praticamente todo de enchente (-0,047 e -0,039 m/s para Norte e Sul), à exceção da camada junto ao fundo (Figura 5.63 c).

Os sedimentos (Figura 5.63 d) que, na quadratura, concentraram-se em maior quantidade na camada superior (água doce), na sizígia, com a mistura das águas, distribuíram-se na coluna d'água, apresentando um aumento logarítmico com a profundidade e altos valores junto ao fundo.

Em sizígia, a salinidade e temperatura foram menores no setor Norte, porém com maior concentração de sedimentos. A influência da descarga fluvial foi mais explícita no setor Norte, onde um fluxo residual mais intenso e negativo foi observado próximo da superfície.

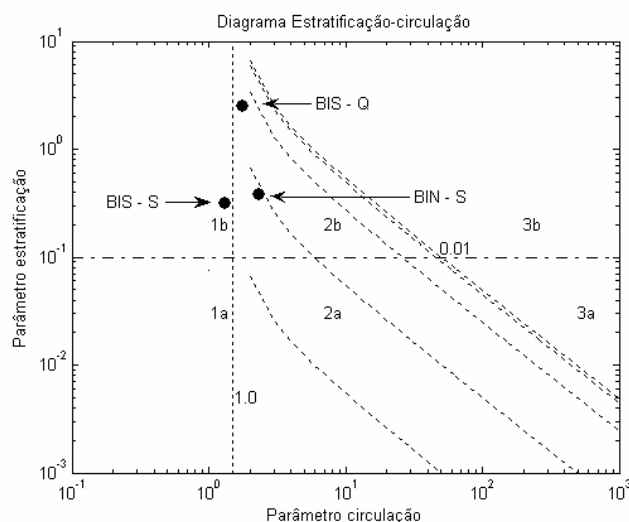


**Figura 5.63. Perfis médios de salinidade (a), temperatura (b), velocidade (c) e sedimentos em suspensão (d) – Setores Sul e Norte da BI – Seção IV e V.**

#### 5.3.3.3.8 Classificação da dinâmica estuarina – Baía de Iguape

Na classificação pelo diagrama estratificação e circulação (Hansen e Rattray, 1966), o setor Sul na quadratura e com vazão de 331 m<sup>3</sup>/s ficou classificado com do *tipo 4* (cunha salina), enquanto que na sizígia e vazão de 236 m<sup>3</sup>/s o setor Sul passou para *tipo 1b* (bem misturado, mais estratificado). O setor Norte ficou classificado como *tipo 2b* (parcialmente

misturado, mais estratificado) (Figura 5.64). Comparando-se com o diagrama da seção do Canal do Paraguai na Ilha do Francês (Figura 5.53), verifica-se grande correspondência entre a classificação das seções na BI Sul e Norte com a dos canais (CS e CN).



**Figura 5.64. Diagrama de circulação e estratificação – setores Sul e Norte da BI – Seção IV e V.**

#### 5.3.3.4 Baixo curso do Rio Paraguai – seção VI

O monitoramento no baixo curso ocorreu próximo à desembocadura na Baía de Iguape, sendo realizado na maré de sizígia em duas seções diferentes (Figura 5.4). A primeira, no dia 27/08/2003, foi estabelecida logo abaixo de Coqueiros, porém não permitiu as medições durante a maré baixa devido ao calado da embarcação. O segundo, no dia 22/05/2005, localizou-se praticamente na desembocadura e, sendo realizado com um barco de alumínio pequeno, permitiu o monitoramento do ciclo completo.

##### 5.3.3.4.1 Correntes – baixo curso do rio – Seção VI - Sizígia - 27/08/2003 – $Q = 0 \text{ m}^3/\text{s}$

O monitoramento ocorreu em maré de sizígia e descarga fluvial nula. A altura da maré na vazante foi de 2,85 m e de 2,88 m na enchente (Figura 5.65). A descrição das características do ciclo de maré foi realizada com base no perfil vertical realizado no canal da seção transversal, localizado junto à margem direita, uma vez que não foi possível medir com o ADCP em toda a seção, durante todo o ciclo.

O ciclo de maré completo apresentou duração de 12,3 horas, sendo que o tempo de maré vazante foi de 6,7 horas, enquanto que na enchente resultou em 5,6 horas. A assimetria obtida por  $t_e/t_v$  ficou em  $-18\%$ . As velocidades médias ( $\bar{U}$ ) de vazante e enchente foram

semelhantes, 0,49 m/s e -0,48 m/s, porém a  $\bar{u}_{max}$  de vazante (0,8 m/s) superou a de enchente (0,7 m/s). Com esses valores de duração e velocidade média, o índice de assimetria Aldv resultou em 10,85.

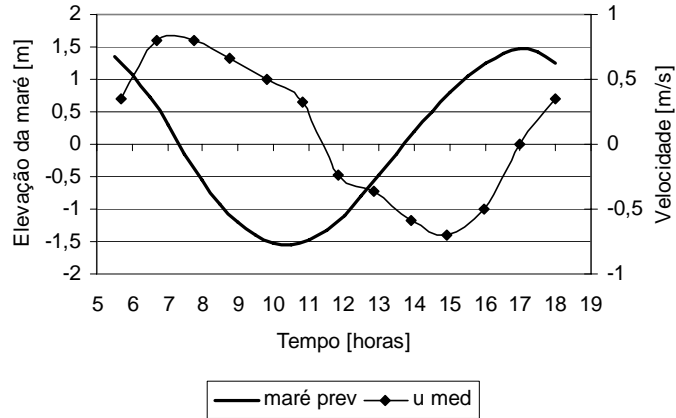


Figura 5.65. Velocidade média na Seção VI e a maré prevista – 27/08/2003 – Sizígia.

#### 5.3.3.4.2 Correntes – baixo curso do rio – Seção VI - Sizígia - 22/05/2005 – $Q = 78 \text{ m}^3/\text{s}$

A seção transversal do monitoramento teve uma extensão de aproximadamente 450 m, apresentando uma parte rasa, iniciando próxima da margem esquerda com profundidade de 3 m e chegando com 4,5 m à 275 m da seção. A partir daí se localiza o canal principal, com profundidade de 8 m e largura de 150 m, próximo a margem direita.

O monitoramento foi realizado em maré de sizígia com descarga fluvial de  $78 \text{ m}^3/\text{s}$ , que corresponde à descarga máxima de uma turbina da UHE. A altura de maré foi de 2,65 m na enchente e 2,66 m na vazante (Figura 5.66).

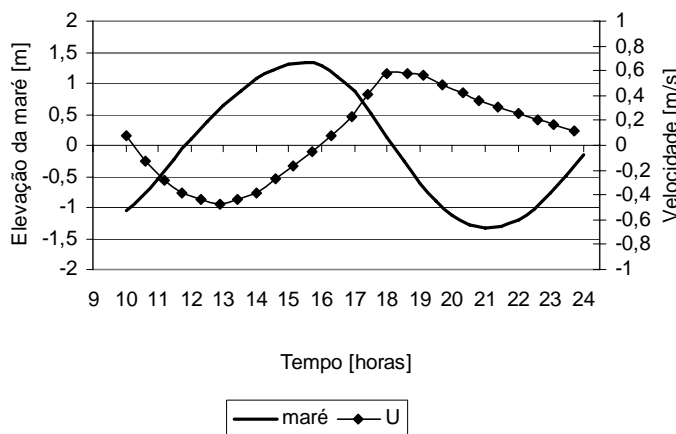


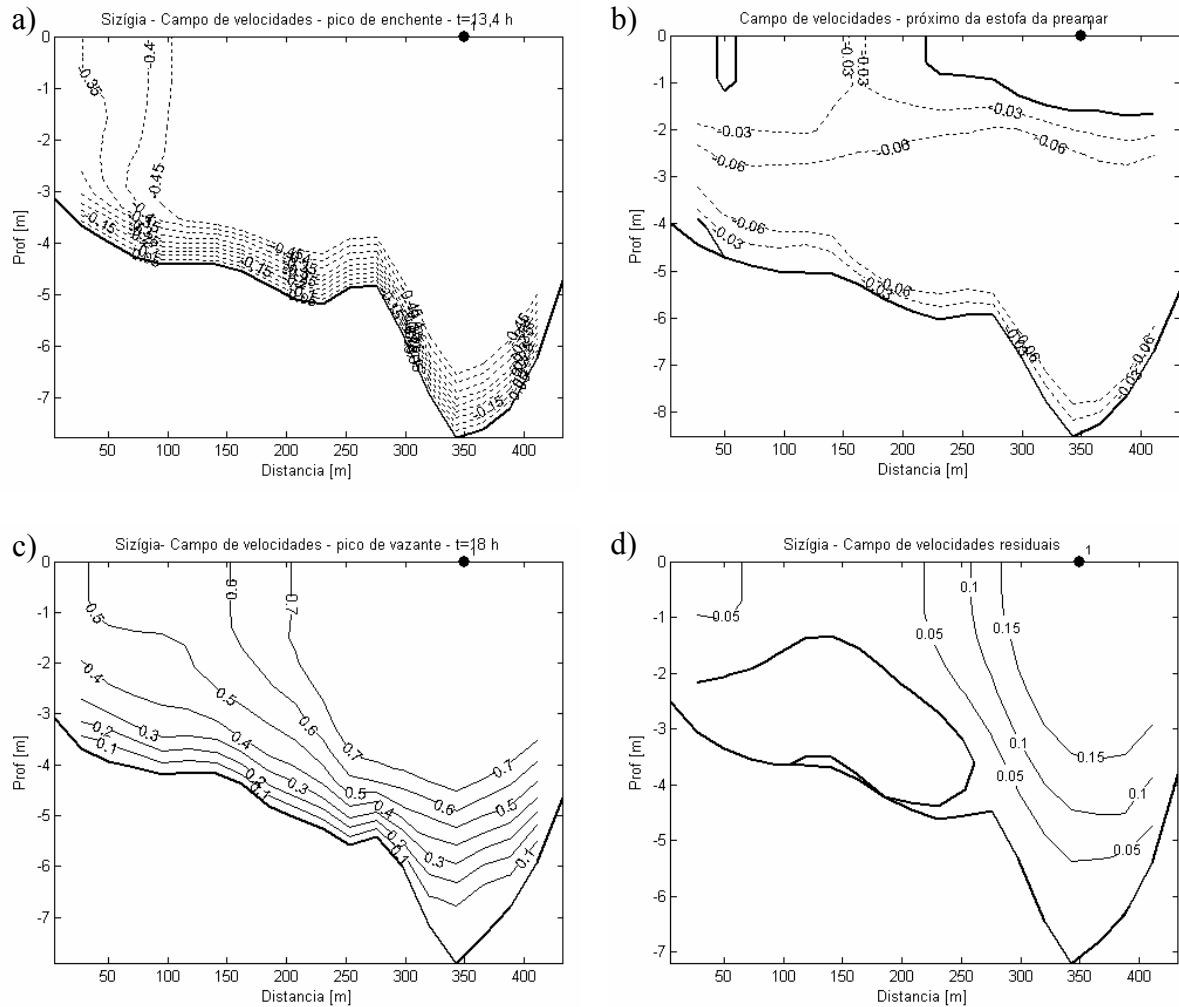
Figura 5.66. Velocidade média na Seção VI e maré prevista – 22/05/2005 – Sizígia.

O ciclo de maré completo teve duração de 13,7 horas, sendo 8 horas de maré vazante e 5,7 horas de maré enchente. A assimetria  $t_e/t_v$  correspondente foi de -28%. Embora  $\bar{U}$  tenha sido praticamente a mesma (cerca de 0,3 m/s) na vazante e na enchente, as velocidades máximas foram maiores na vazante em 23% na  $U_{max}$  e 56% na  $\bar{u}_{max}$ . O índice de assimetria  $A_{Idv}$  resultou em 0,194. A vazão máxima na vazante foi de 1.295 m<sup>3</sup>/s, enquanto que na enchente chegou a -985 m<sup>3</sup>/s. A área de seção transversal variou entre 1.248 m<sup>2</sup> a 2.550 m<sup>2</sup>. O prisma de maré enchente foi calculado em 0,128x10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>. A vazão residual foi de 97,3 m<sup>3</sup>/s, cerca de 24% superior à vazão fluvial. Os erros estimados para U foram 0,072 m/s (máximo) e 0,011 m/s (mínimo), enquanto que o erro no prisma foi de 4,3%.

Em relação aos campos de correntes, durante a maré enchente o fluxo apresentou um forte cisalhamento de velocidades junto ao fundo (-0,8Z a -1Z) e no momento de pico do escoamento a isolinha de 0,45 m/s ocupou quase toda a seção, a exceção dos 100m perto da margem esquerda (Figura 5.67 a). Logo após a preamar o efeito baroclínico da vazão fluvial se fez perceber, gerando uma camada de corrente vazante superficial até 2 m, enquanto na camada junto ao fundo as correntes ainda estavam na direção de enchente (Figura 5.67 b). Na maré vazante, no momento de pico de escoamento, as velocidades mais altas (cerca de 0,7 m/s) se concentraram na região do canal, junto à margem direita, e a variação vertical da velocidade junto ao fundo foi gradual. (Figura 5.67 c). O campo residual apresentou velocidades positivas concentradas na região do canal, com a isolinha de 0,15 m/s chegando à metade da coluna d'água a partir da superfície (Figura 5.67 d).

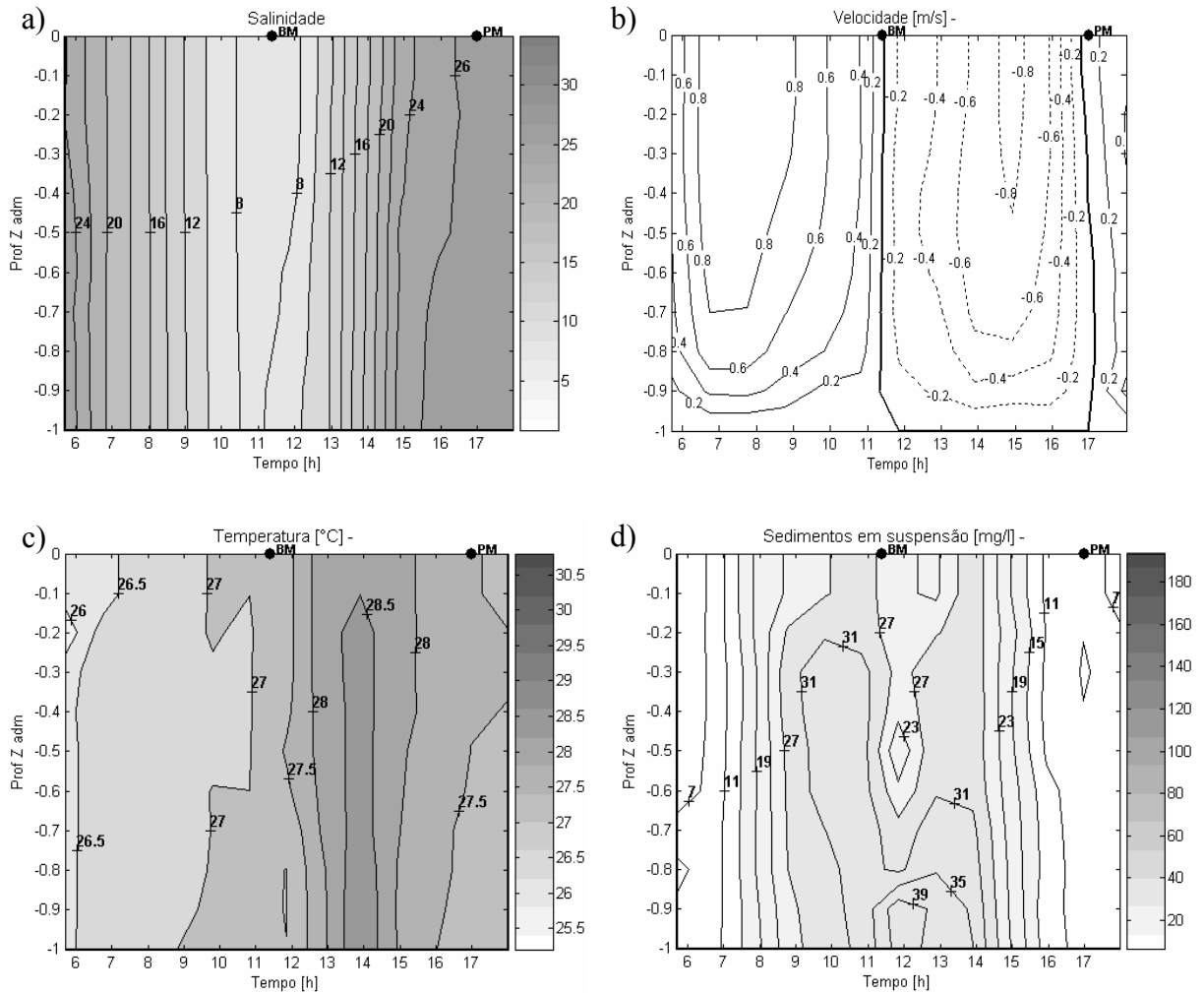
#### *5.3.3.4.3 Perfis verticais de hidrografia e correntes – baixo curso do rio – Seção VI - Sizígia - 27/08/2003 – $Q = 0 \text{ m}^3/\text{s}$*

A salinidade ao longo do ciclo de maré mostrou boa mistura na coluna d'água, embora tenha ocorrido uma variação temporal entre o mínimo de 6,7 na baixa-mar e o máximo de 27,1 na preamar (Figura 5.68 a). A temperatura permaneceu entre 26,5 e 27°C na maior parte do tempo da maré vazante. Houve um aumento de temperatura com a maré enchente, tendo o valor máximo de 29°C ocorrido a meio estágio da maré, em torno das 14 horas. Na preamar a temperatura média foi de 27,5°C. Em geral, a água da camada superficial esteve mais quente do que a do fundo em cerca de 0,5°C (Figura 5.68 c).



**Figura 5.67. Campo de correntes [m/s] – Baixo Curso do Rio Paraguaçu – sizígia –  $Q=78 \text{ m}^3/\text{s}$  – Seção VI.**

A velocidade mostrou um perfil mais pronunciado na maré vazante, isto é, com maiores velocidades na camada de 0,5Z a 0,9Z, do que o perfil na maré enchente. A permanência de velocidades acima de 0,8 m/s também foi acentuada na maré vazante, chegando ao máximo de 1 m/s na superfície. Na enchente o máximo na superfície foi de -0,89 m/s (Figura 5.68 b). Os sedimentos em suspensão na metade do ciclo, entre a meia maré vazante, baixa-mar e meia maré enchente apresentaram concentrações superiores a 23 mg/l, com valor máximo de 41,9 mg/l junto ao fundo e logo após a baixa-mar. No restante do ciclo a concentração de sedimentos em suspensão foi inferior aos 23 mg/l, atingindo valor mínimo no entorno da preamar (3,5 mg/l) (Figura 5.68 d). Observou-se também que as concentrações mais altas não estiveram associadas às maiores velocidades, indicando que os sedimentos foram mobilizados a montante da seção, durante a ocorrência das velocidades máximas de vazante, e havendo, posteriormente, uma certa deposição na baixa-mar.



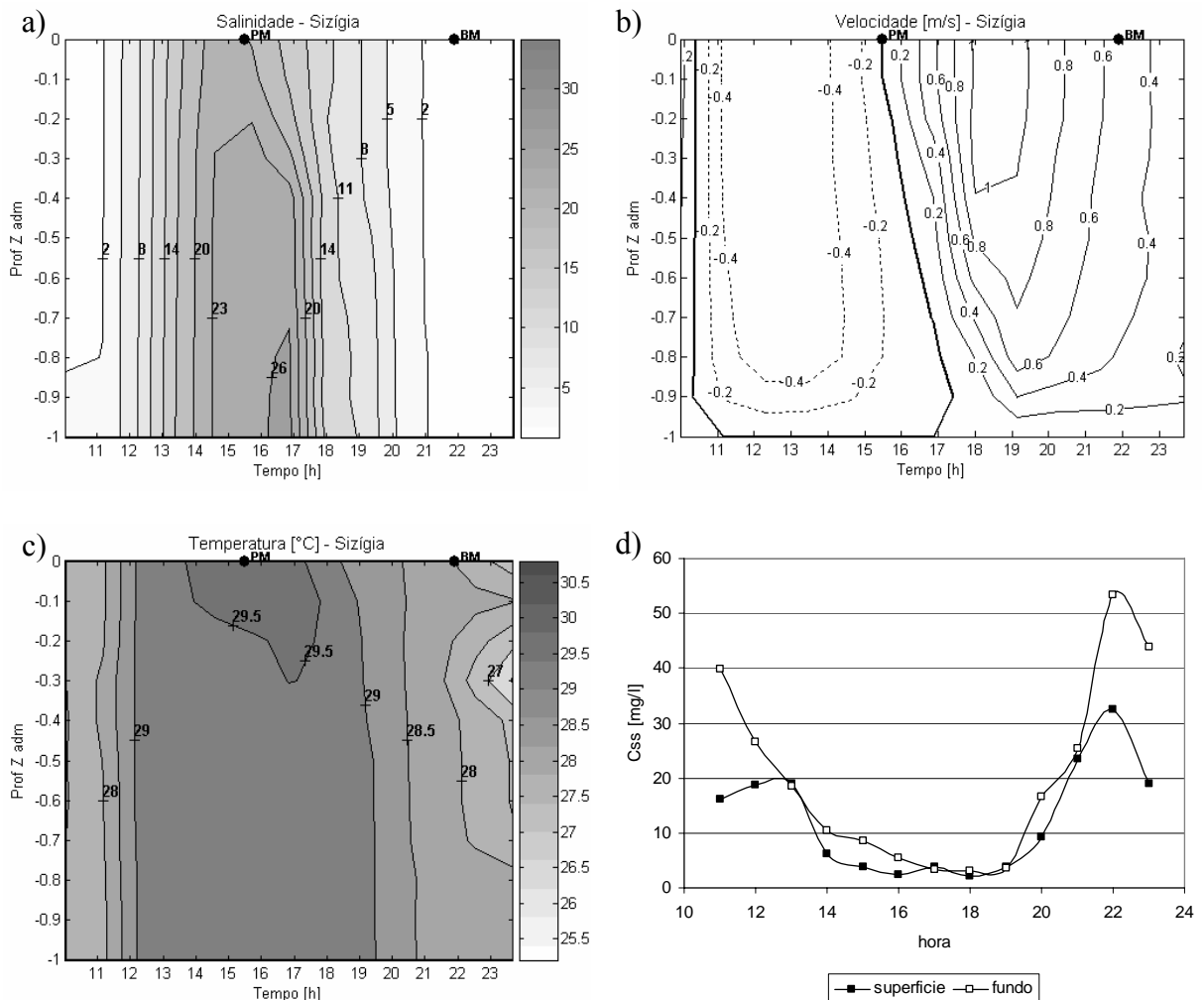
**Figura 5.68. Variação temporal da salinidade (a), velocidade (b), temperatura (c) e sedimentos em suspensão (d) – 27/08/2003 – Baixo curso do rio – sizígia e  $Q = 0 \text{ m}^3/\text{s}$  – Seção VI.**

#### 5.3.3.4.4 Perfis verticais de hidrografia e correntes – baixo curso do rio – Seção VI - Sizígia - 22/05/2003 – $Q = 78 \text{ m}^3/\text{s}$

Na maior parte do tempo do ciclo de maré, a coluna d'água esteve bem misturada, porém com grande variação temporal na salinidade (mínimo = 0 e máximo = 26,7) (Figura 5.69 a). No entorno da preamar foi observado uma camada de menor salinidade até  $-0,3Z$ . Destaca-se também que houve a permanência de salinidade menor a 2 durante cerca de 4 horas, o que não foi verificado no ciclo de sizígia de 27/08/03 quando a vazão era nula. A variação da temperatura seguiu o padrão de distribuição da salinidade, no entanto associando águas mais quente no entorno da preamar (máximo =  $30^\circ\text{C}$ ) e águas de menor temperatura no entorno da baixa-mar (mínimo =  $26,4^\circ\text{C}$ ) (Figura 5.69 c). Apesar de um tempo de duração menor da maré enchente, as velocidades foram bem menores que na maré vazante. Na

enchente o valor máximo na superfície foi de  $-0,54$  m/s, enquanto que na maré vazante chegou a  $1,06$  m/s. Na preamar, enquanto na superfície o fluxo logo começou a vazar, junto ao fundo o movimento era de enchente (Figura 5.69 b).

Em relação aos sedimentos em suspensão, durante o monitoramento, devido a falha técnica no CTD, eles foram somente coletados próximos da superfície e do fundo. Em ambas as camadas, durante metade do ciclo a concentração foi menor que  $10$  mg/l (1,5 horas antes da preamar até cerca de 2 horas antes da baixa-mar), enquanto na outra metade a concentração aumentou, apresentando um pico na baixa-mar (máximo de  $53,4$  mg/l no fundo e  $32,5$  mg/l na superfície) (Figura 5.69 d). Esta situação indica que a mobilização dos sedimentos ocorreu a montante, de forma semelhante àquela do ciclo com vazão nula.

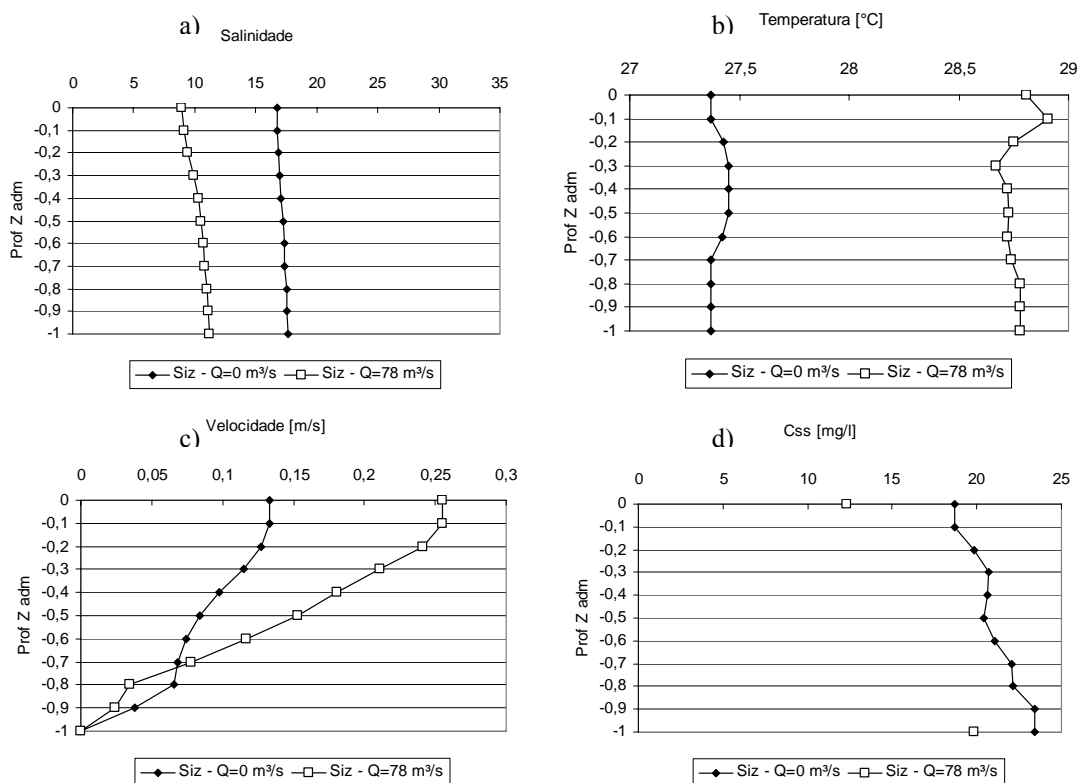


**Figura 5.69. Variação temporal da salinidade (a), velocidade (b), temperatura (c) e sedimentos em suspensão (d) – 22/05/2005 – Baixo curso do rio – sizígia e  $Q = 78$  m<sup>3</sup>/s – Seção VI.**



### 5.3.3.4.5 Perfis médios – baixo curso do Rio Paraguaçu – Seção VI

Os perfis médios de salinidade e temperatura apresentaram pequena variação na vertical (Figura 5.70 a,b). No caso da salinidade, com a vazão de 78 m<sup>3</sup>/s houve uma redução na salinidade média de 6,9. A temperatura foi maior cerca de 1,4°C no ciclo com vazão de 78 m<sup>3</sup>/s, que pode ser devido à época do ano dos monitoramentos, pois no ciclo de vazão zero era inverno e as temperaturas são um pouco mais baixas. A velocidade residual no ciclo com vazão de 78 m<sup>3</sup>/s foi superior àquelas do ciclo de vazão zero desde a superfície (quase o dobro ~92%) até -0,7Z (Figura 5.70 c). Os sedimentos em suspensão durante o ciclo de vazão fluvial nula apresentaram um perfil com um crescimento gradual da concentração a partir da superfície (18,7 mg/l) em direção ao fundo (24,4 mg/l). No ciclo com vazão de 78 m<sup>3</sup>/s, indicaram uma redução dos valores médios (superfície = 12,3mg/l e fundo = 20mg/l) em comparação com o monitoramento de vazão nula (Figura 5.70 d).



**Figura 5.70. Perfis médios de salinidade (a), temperatura (b), velocidade (c) e sedimentos em suspensão (d) – Baixo Curso do Rio Paraguaçu**

### 5.3.3.4.6 Classificação da dinâmica estuarina – baixo curso do Rio Paraguaçu – Seção VI

Na classificação pelo diagrama de estratificação e circulação (Hansen e Rattray, 1966), com vazão nula o baixo curso do rio ficou classificado com do *tipo 1a* (bem misturado),

enquanto que com vazão de  $78 \text{ m}^3/\text{s}$  passou para *tipo 1b* (bem misturado, forte estratificação) (Figura 5.71).

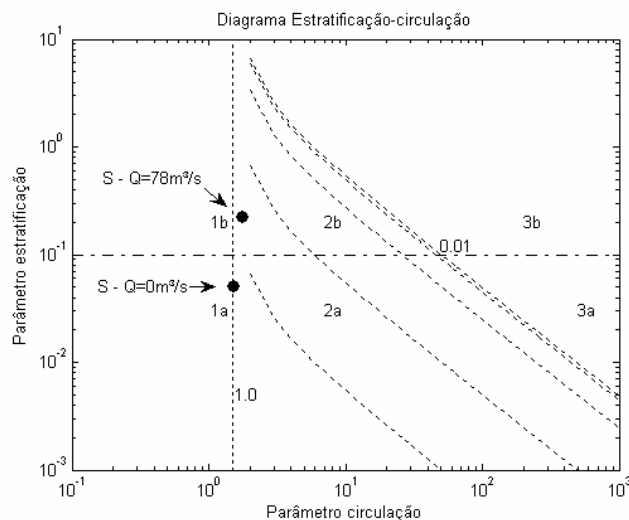


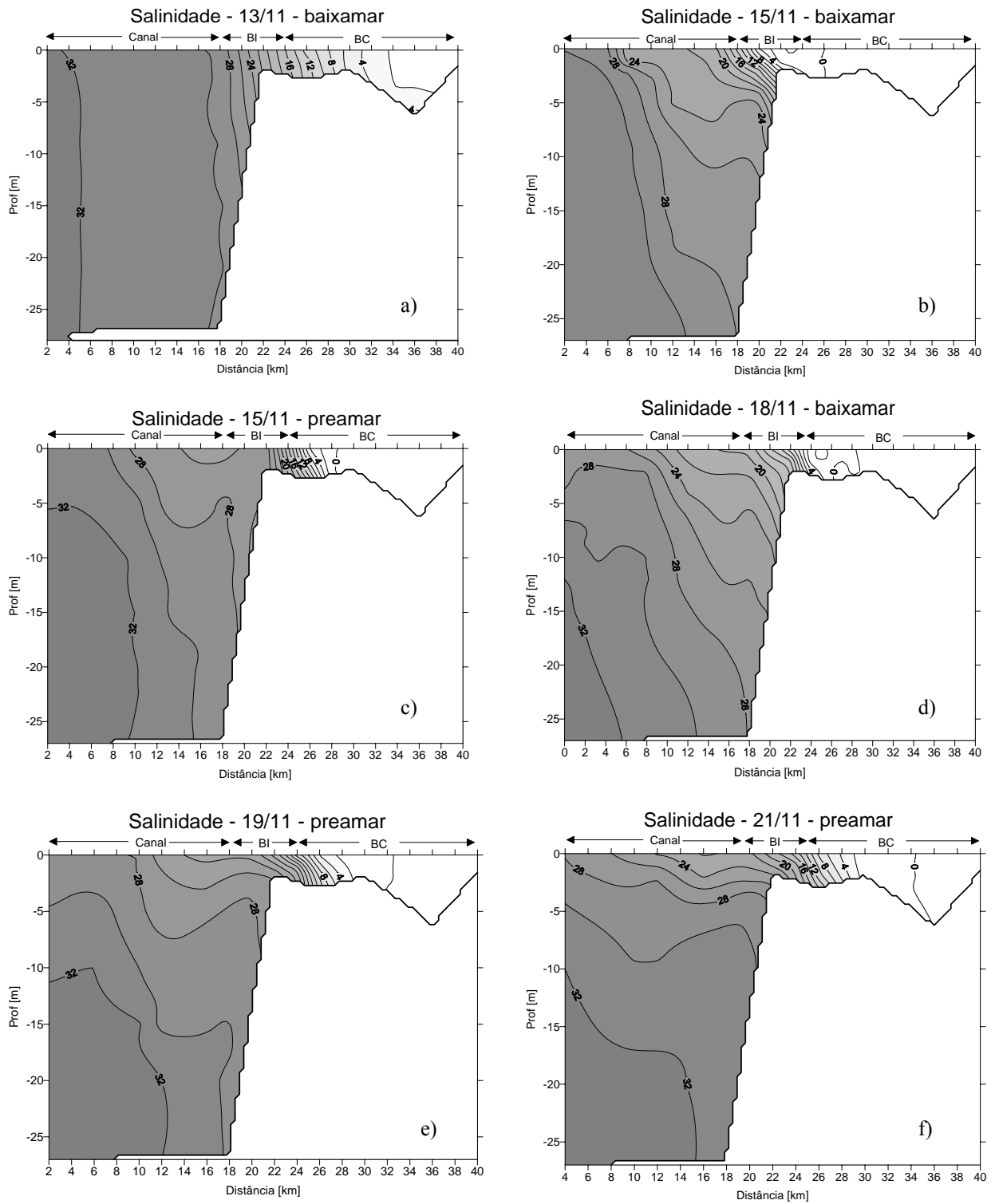
Figura 5.71. Diagrama de circulação e estratificação – Baixo curso do Rio Paraguaçu – Seção VI.

### 5.3.4 Hidrografia - perfis longitudinais

Os perfis longitudinais descrevem as condições de salinidade, sedimentos em suspensão e temperatura. Eles são apresentados separadamente para o Rio Paraguaçu e Canal do Paraguaçu (sentido longitudinal do estuário) e para a Baía de Iguape (transversal ao estuário) (Figura 5.4).

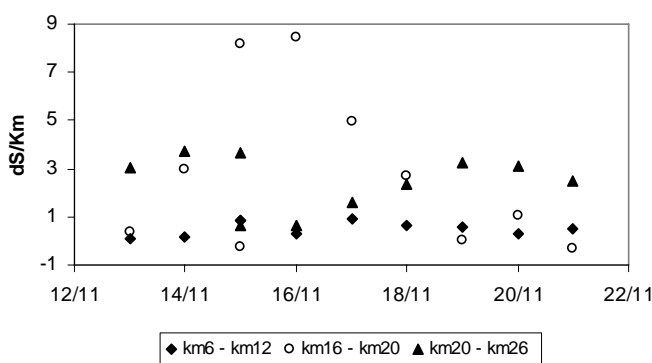
#### 5.3.4.1 Salinidade – Rio e Canal do Paraguaçu

O monitoramento realizado de 13 a 21 de novembro de 2001 investigou o efeito de uma cheia fluvial sobre a região estuarina. O perfil longitudinal de salinidade da baixa-mar do dia 13/11 (Figura 5.72 a), anterior a liberação da cheia, mostra o estuário em condição de bem misturado, com salinidades acima de 30 penetrando cerca de 16 km no Canal do Paraguaçu. Uma intensa variação de salinidade foi observada a partir do km 18 (um pouco antes da Baía de Iguape), reduzindo os valores de salinidade para 4 na região do baixo curso do rio (km 32). A presença de sal foi detectada até o km 36, cerca de 7 km a jusante da cidade de Cachoeira (4 psu no fundo). Como a medição foi na baixa-mar, a intrusão do sal na preamar deve avançar além deste ponto.



**Figura 5.72. Perfis longitudinais – comportamento da salinidade devido à ocorrência do hidrograma de cheia – nov/2001.**

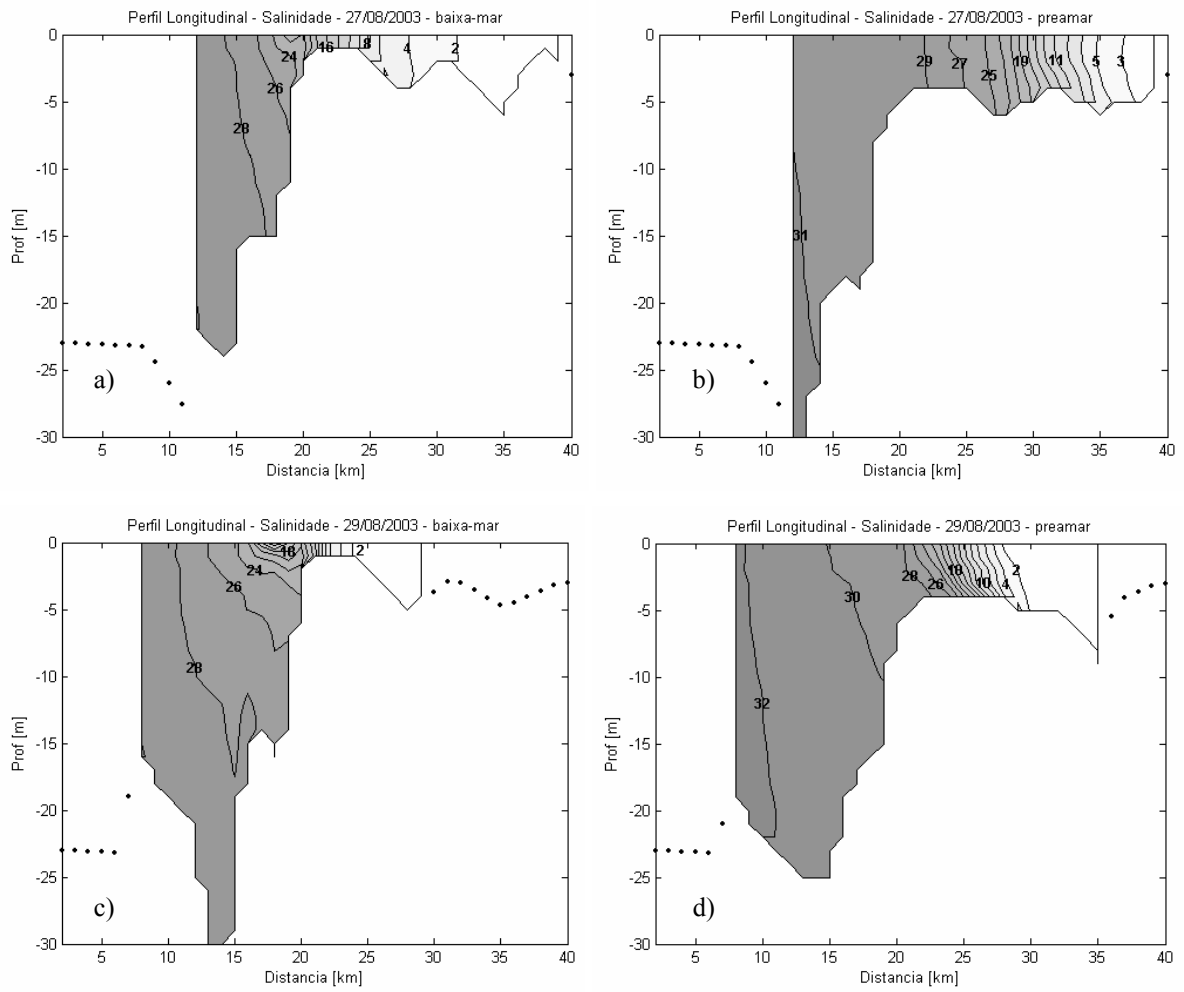
Com a liberação do hidrograma de cheia, o estuário gradualmente passou da condição de bem misturado para parcialmente misturado e a água doce ocupou todo o baixo curso do rio na baixa-mar (Figura 5.72 b; Anexo 2). A condição de parcial mistura se manteve até o dia 18/11 (Figura 5.72 d). No dia 19/11, com a vazão reduzida para 58 m<sup>3</sup>/s e a maré em transição para quadratura, observou-se o retorno da intrusão salina no baixo curso do rio (Figura 5.72 e,f). O gradiente máximo de salinidade durante a cheia se localizou, de modo geral, no entorno da Baía de Iguape. A Figura 5.73 mostra os gradientes de salinidade na superfície (média de 2,6 psu/km) para diferentes trechos do estuário, sendo que os valores máximos ocorreram durante a baixa-mar dos dias 15 e 16 (~ 8 psu/km), no trecho abrangendo a Baía de Iguape, a Ilha do Francês e um trecho do Canal do Paraguaçu (km 16 a 20).



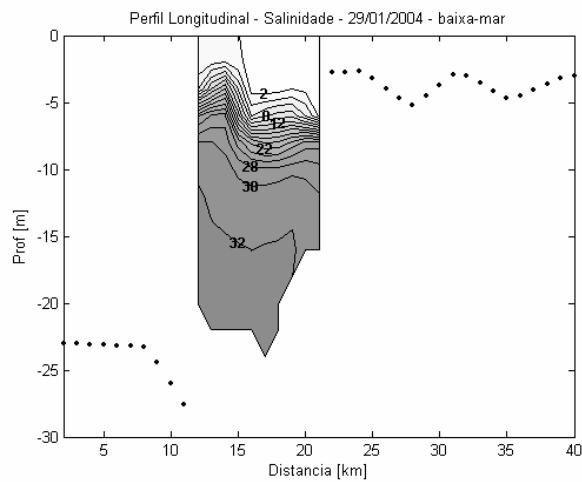
**Figura 5.73. Gradiente longitudinal de salinidade – superfície – novembro/2001.**

Nas medidas realizadas em 2003 e início de 2004, a caracterização da resposta do estuário às vazões foi complementada. Em agosto, na maré de sizígia, a barragem liberou uma descarga com valor próximo do máximo de turbinamento para a geração de energia elétrica (183 e 191 m<sup>3</sup>/s). No dia 27/8, com a vazão mantida nula para fins de comparação, na preamar a isohalina de 5 psu chegou ao km 36, enquanto que na baixa-mar deslocou-se para o km 27,5 (Figura 5.74 a,b). No dia 29/8, com a vazão de 183 m<sup>3</sup>/s, a isohalina de 5 psu foi deslocada para a Baía de Iguape (km 23) na baixa-mar, com a formação de um forte gradiente de salinidade na área (Figura 5.74 c). Na preamar a isohalina de 5 psu foi deslocada para o km 29 (Figura 5.74 d - os gráficos apresentam somente a zona amostrada).

Em 2004, devido à grande cheia ocorrida no mês de janeiro (item 5.2.5), no dia 29/1 (890 m<sup>3</sup>/s) a água doce preenchia todo baixo curso do rio, Baía de Iguape e os primeiros 5m da coluna d'água do Canal do Paraguaçu até próximo de São Roque (Figura 5.75).



**Figura 5.74. Perfis longitudinais – comportamento da salinidade à ocorrência da vazão máxima das turbinas de geração de energia – ago/2003 (os gráficos apresentam somente a zona amostrada - linha pontilhada representa o fundo do estuário).**



**Figura 5.75. Perfil longitudinal – salinidade após ocorrência de uma grande cheia do rio – jan/2004.**

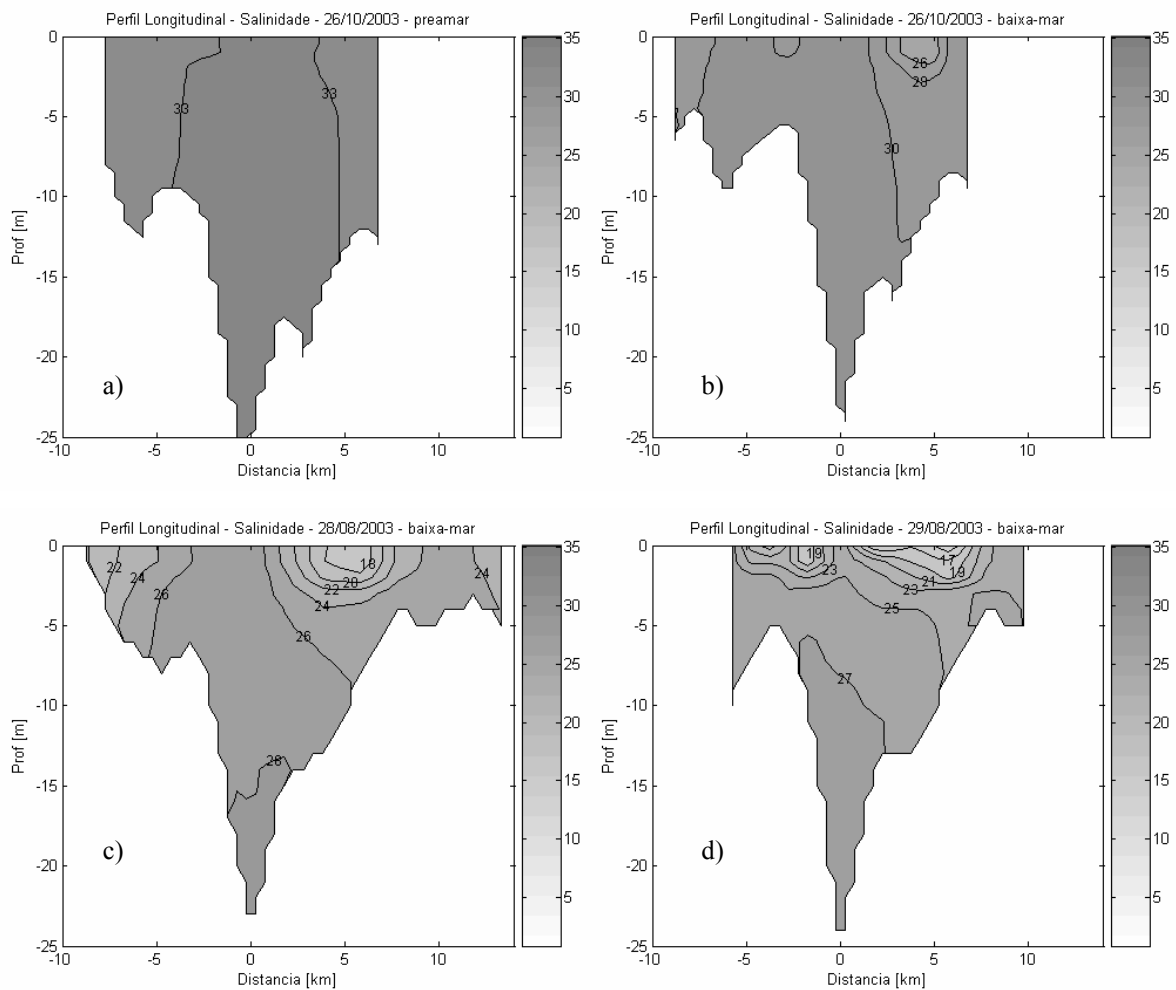
#### 5.3.4.2 Salinidade - Baía de Iguape

Na Baía de Iguape o monitoramento acompanhou os canais principais dos setores Norte e Sul. Na representação gráfica dos perfis, o setor Sul corresponde às informações relacionadas às distâncias negativas, enquanto que no Setor Norte às positivas, tendo como referência (zero) a estação 9 do perfil longitudinal, localizada a sudeste da Ilha do Francês (Figura 5.4).

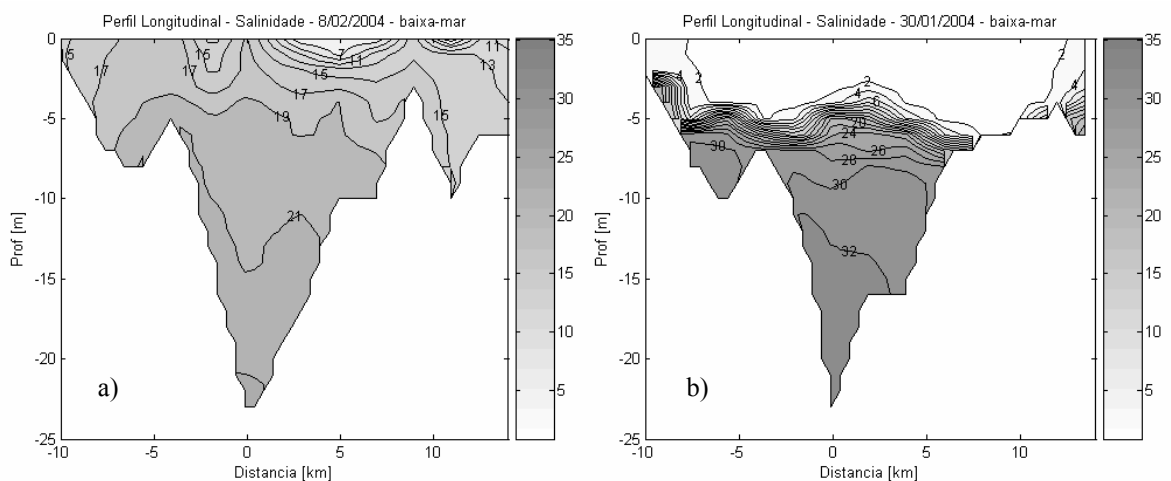
O padrão de salinidade variou, para os períodos de monitoramento, de bem misturado, com valores de 33 psu (26/10/2003 – preamar - Figura 5.76 a,b), passando por parcialmente misturado (28 e 29/8/2003 - Figura 5.76 c,d e 8/2/2004 - Figura 5.77 a), e estratificado (30/01/2004) (Figura 5.77 b e Anexo 2).

Os perfis da baixa-mar (Figura 5.76 b,c,d e Figura 5.77 a), mostraram uma zona preferencial do escoamento da água fluvial pelo setor Norte da BI, mesmo para uma baixa vazão ( $15,6 \text{ m}^3/\text{s}$  – 26/10/2003), conforme sugerido pela batimetria (Figura 5.12). Por outro lado, na preamar de sizígia com baixa vazão fluvial ( $15,6 \text{ m}^3/\text{s}$ ) (Figura 5.77 a) e na maré de quadratura (02/11/2003 – Anexo 2), a Baía de Iguape se apresentou bem misturada.

Em resposta a alta descarga fluvial de janeiro/2004, a baía ficou quase completamente preenchida com água doce e fortemente estratificada no entorno da Ilha do Francês e Canal do Paraguçu (30/01 - Figura 5.77 b). Na preamar da maré de quadratura de 30/01, houve maior mistura e a elevação da salinidade das águas próximas ao fundo (Anexo 2). Na maré de sizígia (08/02/2004), devido a maior energia da maré e a redução da vazão para valores entre 236 e  $258 \text{ m}^3/\text{s}$ , o estuário passou para condição de parcial mistura. Na baixa-mar, a isohalina máxima no entorno da Ilha do Francês foi de 23 e de 19 nos setores Sul e Norte da baía, sendo observadas menores salinidades e maiores gradientes verticais no setor Norte (Figura 5.77 a). Na preamar, manteve-se a parcial mistura, com a salinidade máxima passando para 26, e os menores valores se situando no setor Norte (Anexo 2).



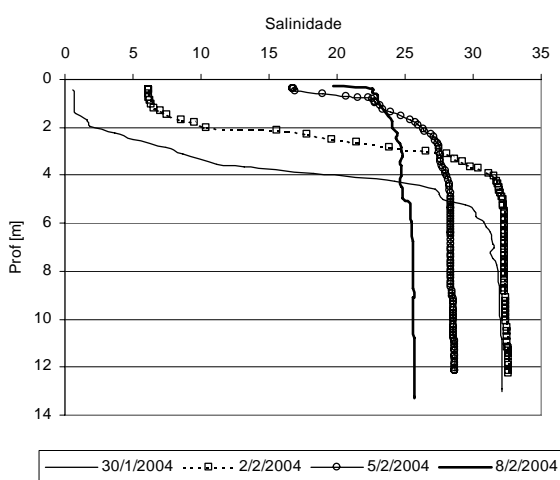
**Figura 5.76. Perfis de salinidade – Sizígia – Baía de Iguape – 2003.**



**Figura 5.77. Perfis de salinidade – sizígia (a) e quadratura (b) – Baía de Iguape – 2004.**

Durante a transição de quadratura para sizígia foi realizado o monitoramento na estação 301, localizada no início do setor Norte, em frente a São Francisco do Paraguaçu, permitindo acompanhar a evolução do perfil de salinidade (Figura 5.78). Na quadratura

(30/01), com estuário em situação de cunha salina, uma forte estratificação foi observada, com água doce até 1,4 m, a partir de onde se iniciou um forte gradiente até 4,5 m (salinidade de 27). O gradiente continuou com menor intensidade até os 6 m e então estabilizou em torno de 31 a 32 psu. No dia 02/02, a salinidade na camada mais superficial passou para cerca de 6 e o forte gradiente finalizou próximo dos 4 m de profundidade, ficando a salinidade partir deste ponto com valores de 32. Em 05/02, o gradiente se encontrou na camada superficial (0 – 3 m), porém a salinidade abaixo se firmou em cerca de 28, destacando claramente a mistura da água doce com a marinha. Na sizígia (08/02), a situação já era de parcial mistura com a salinidade entre 24 e 26 na maior parte da coluna d'água.



**Figura 5.78. Evolução do perfil vertical de salinidade – estação 301 – 2004. As vazões liberadas pela barragem nos dias de medição foram, respectivamente: 341 m<sup>3</sup>/s, 384 m<sup>3</sup>/s, 410 m<sup>3</sup>/s e 236 m<sup>3</sup>/s.**

#### 5.3.4.3 Sedimentos em Suspensão – Rio e Canal do Paraguaçu

No monitoramento do hidrograma de cheia simulada em 2001, o aumento das velocidades do fluxo provocado pelo hidrograma de cheia resultou na re-mobilização de sedimentos no baixo curso do rio, aumentando a concentração de sedimentos em suspensão em toda a região estuarina (

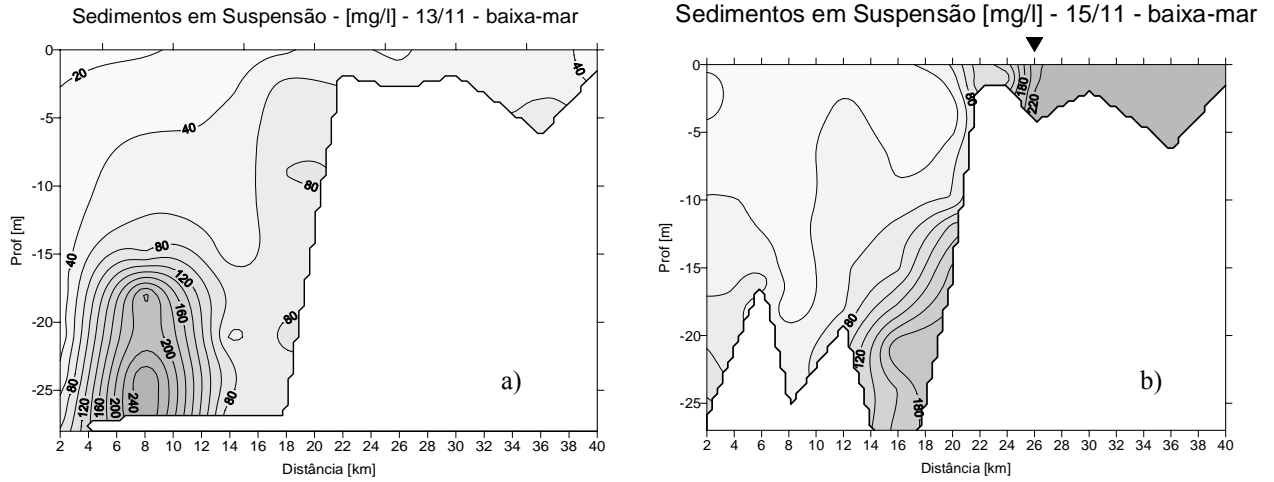
Figura 5.79).

Zonas de turbidez máxima foram encontradas na saída da Baía de Iguape, no início e também no final do Canal do Paraguaçu (

Figura 5.79 e Anexo 2). O valor máximo foi medido na preamar do dia 15/11, no fundo, em frente a São Roque (km 6), com valor de 586 mg/l. A partir do dia 19/11, quando a

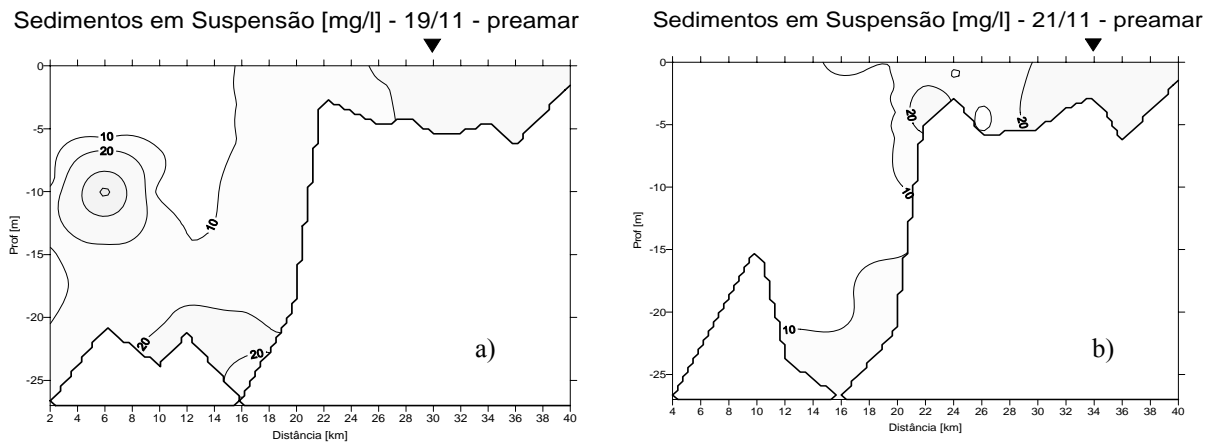


vazão da barragem passou para 58 m<sup>3</sup>/s e a maré para quadratura, as concentrações observadas na preamar reduziram drasticamente (Figura 5.80).



**Figura 5.79. Perfil longitudinal de sedimentos em suspensão - baixa-mar: 13/11/2001 – antes da cheia (a) e 15/11/2001 – após a vazão máxima (b).**

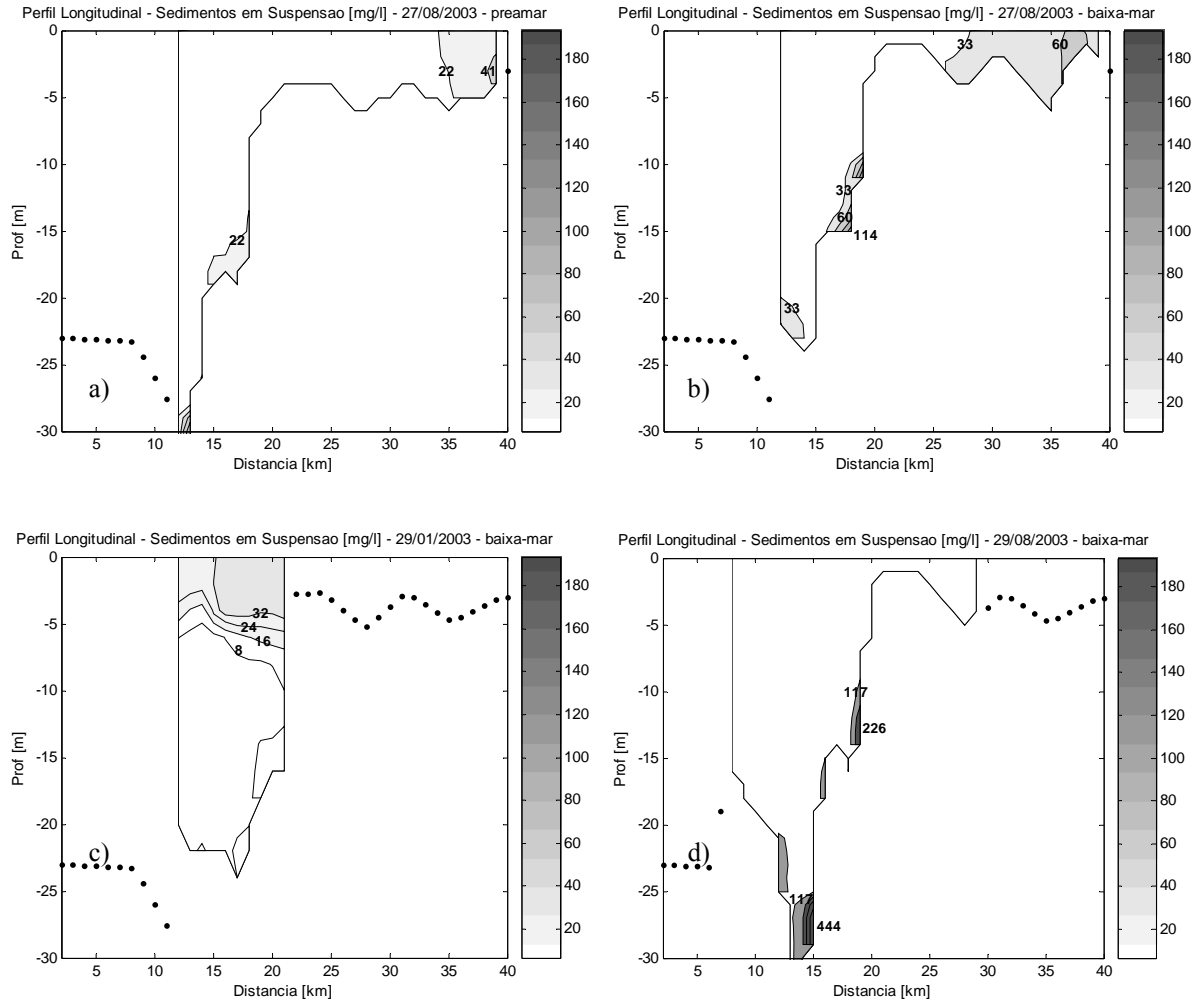
( ▼ - limite das medidas)



**Figura 5.80. Perfil longitudinal de sedimentos em suspensão - preamar – 19/11/2001 (a) e 20/11/2001 (b).**

No monitoramento de agosto de 2003, novamente verificou-se a ocorrência de maior concentração de sedimentos na baixa-mar e junto ao fundo (27 e 29/08) (Figura 5.81a,b,c). A descarga fluvial dos dias 28 e 29 resultaram em aumento da concentração de sedimentos na

baixa-mar. Na cheia de janeiro de 2004, o perfil longitudinal mostrou os sedimentos somente associados a camada de água doce superficial (Figura 5.81 d).



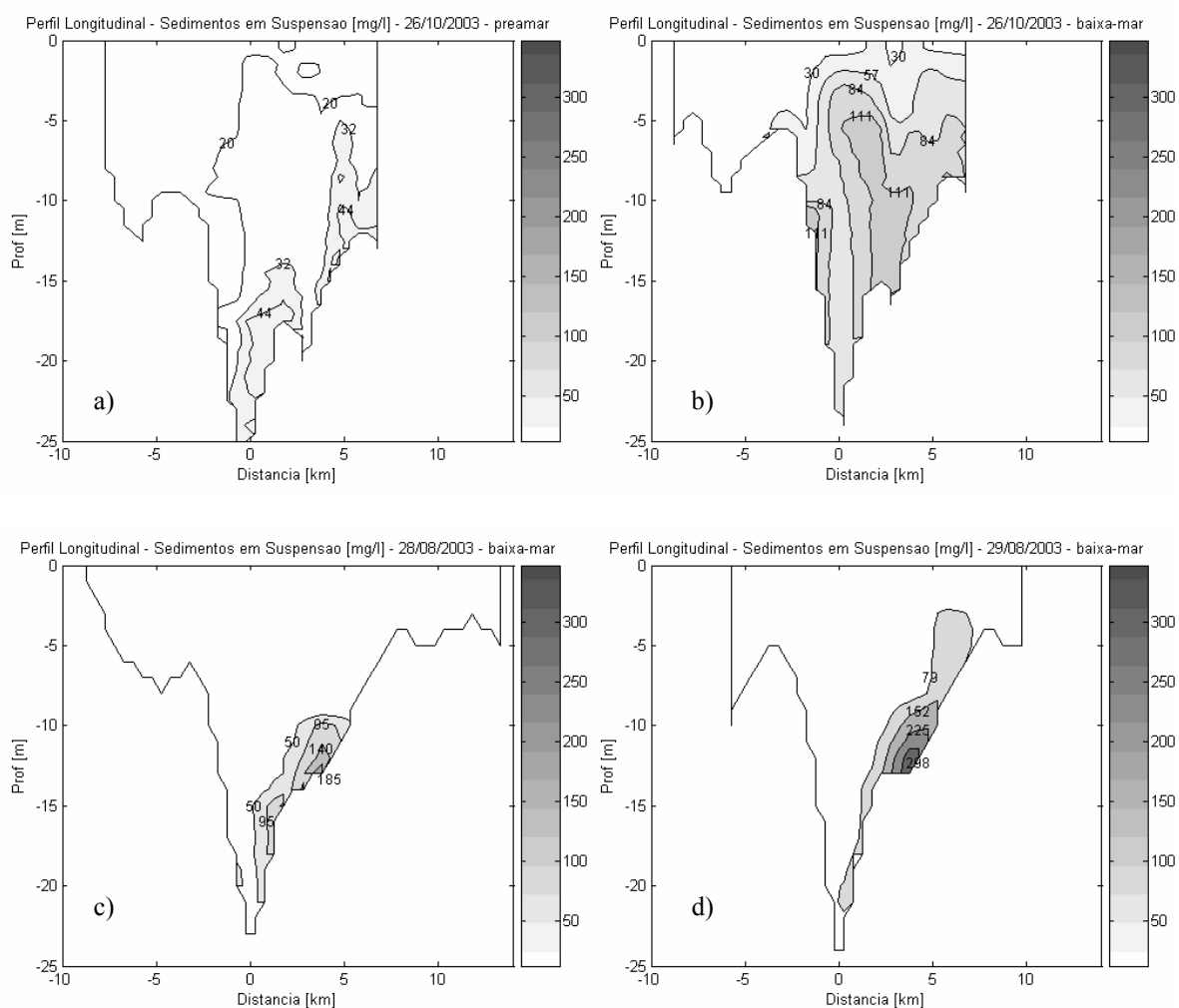
**Figura 5.81. Perfil longitudinal de sedimentos em suspensão – agosto/2003 e janeiro/2004.**

(os gráficos apresentam somente a zona amostrada e ilustram o fundo do estuário)

#### 5.3.4.4 Sedimentos em Suspensão – Baía de Iguape

Os sedimentos em suspensão na Baía de Iguape tenderam a apresentar maior concentração na baixa-mar de sizígia (Figura 5.82 a,b) e no setor Norte, associado à descarga do rio (Figura 5.82 c,d). Em agosto/2003, o aumento da vazão resultou em aumento da concentração dos sedimentos no setor Norte (Figura 5.82).

Na cheia de 2004, conforme já indicado no perfil longitudinal do rio de 29/01 (Figura 5.81), os sedimentos ficaram na camada superior da coluna de água, associados à descarga fluvial, e praticamente ao longo de toda a região amostrada da baía (Figura 5.83 a - 30/01/2004 – maré de quadratura). Com a redução da descarga de água doce e a passagem para a maré de sizígia, houve a quebra da estratificação e a deposição e a acumulação dos sedimentos junto ao fundo, que junto à ressuspensão associada às correntes mais fortes da maré de sizígia formaram zonas de intensa turbidez (Figura 5.83 b,c – 08/02/2004, Figura 5.84 e Figura 5.85).



**Figura 5.82. Perfil longitudinal de sedimentos em suspensão na Baía de Iguape – 2003.**

Observou-se que a evolução da maré do estágio de baixa-mar para preamar contribuiu no deslocamento das zonas de turbidez da parte central e mais profunda da baía e início do Canal, para o interior dos setores Sul e Norte (Figura 5.83 b,c).

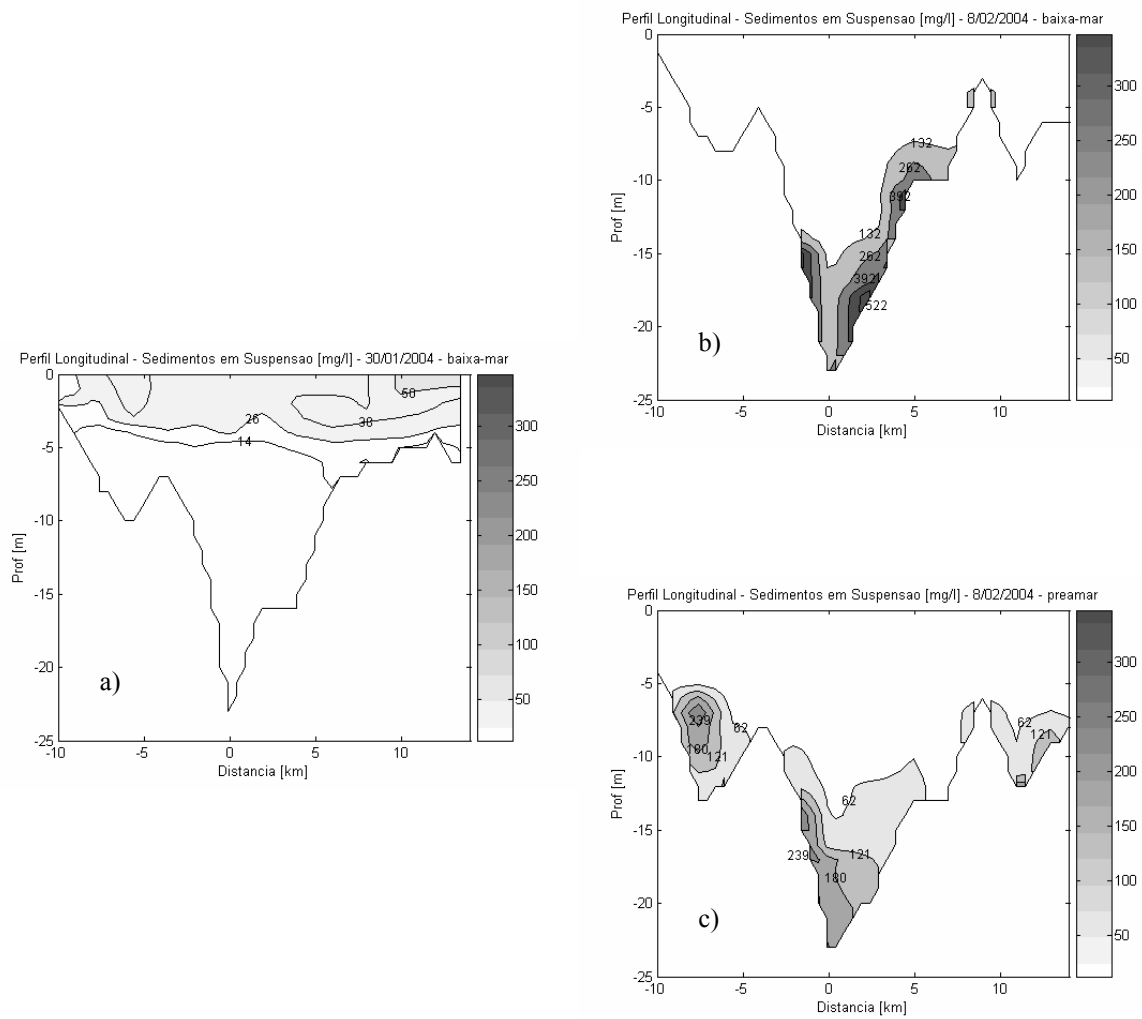


Figura 5.83. Perfil longitudinal de sedimentos em suspensão na Baía de Iguape – 2004.

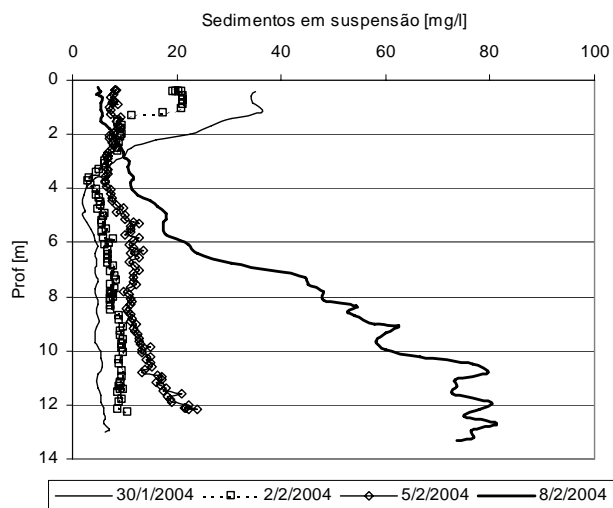


Figura 5.84. Perfil de distribuição vertical de sedimentos em suspensão – estação 301 – 2004. As vazões liberadas pela barragem nos dias de medição foram, respectivamente: 341 m<sup>3</sup>/s, 384 m<sup>3</sup>/s, 410 m<sup>3</sup>/s e 236 m<sup>3</sup>/s.

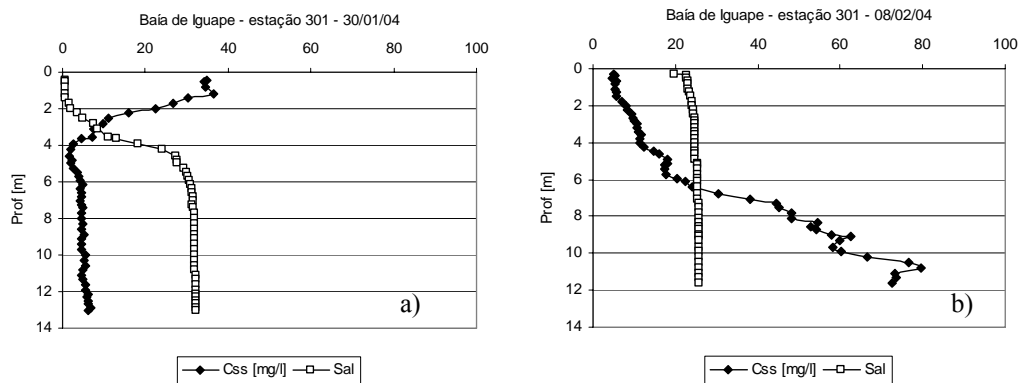


Figura 5.85. Perfil de sal e sedimentos em suspensão – estação 301: quadratura (a) e sizígia (b).

### 5.3.4.5 Temperatura – Rio e Canal do Paraguaçu

O estuário apresentou distintas faixas de temperatura para os monitoramentos no verão (nov/2001, out/nov/2003 e jan/2004) e inverno (ago/2003), chegando a atingir diferença de 2°C. Enquanto no verão a temperatura oscilou entre 28°C e 29,5°C, no inverno variou de entre 26°C e 28°C.

A massa d'água com maiores salinidades observada no Canal do Paraguaçu no verão (nov/2001) (Figura 5.72) apresentou temperaturas de 28,5°C a 29°C. No baixo curso do rio e na parte central da Baía de Iguape a temperatura variou de 29°C a 29,5°C, com descarga da barragem de 13 m<sup>3</sup>/s, possivelmente um aumento devido às menores profundidades (Figura 5.86 a). A partir do aumento da vazão durante o hidrograma de cheia em nov/2001, temperaturas menores que 27,5°C foram medidas no baixo curso (dia 15/11/2001 – mínimo de 27,1°C - Figura 5.86 b). Vale ressaltar que a descarga da barragem através da comporta liberou águas na profundidade de 10 m abaixo da superfície do lago.

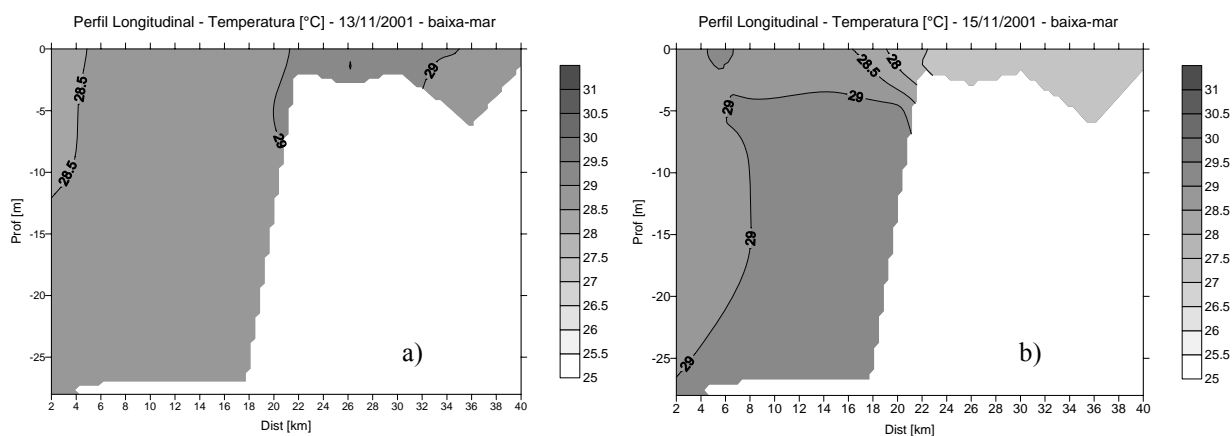
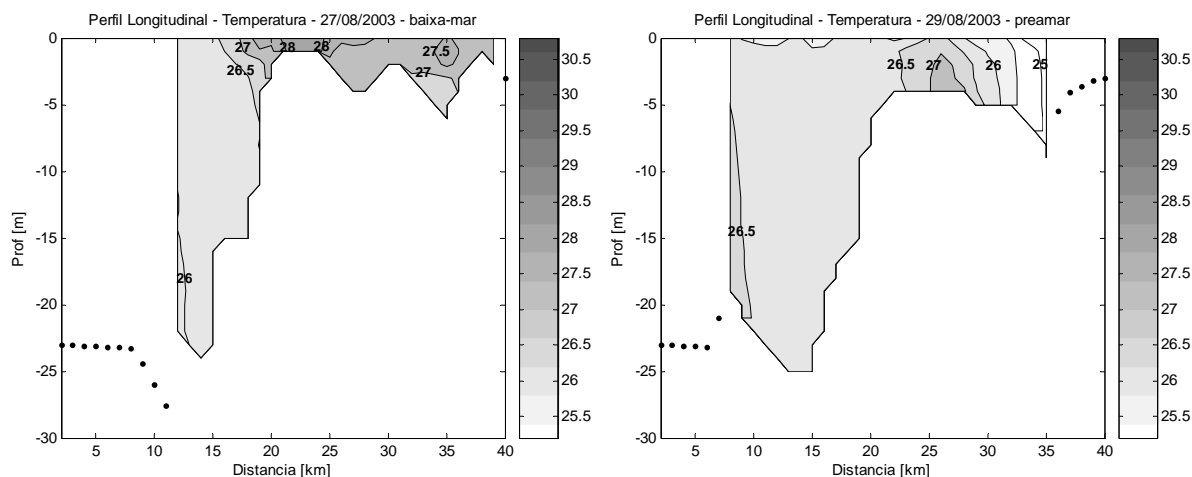


Figura 5.86. Perfil longitudinal de temperatura – representativo da situação de verão - baixa-mar: 13/11/2001 – antes da cheia (a) e 15/11/2001 – após a vazão máxima (b).

No inverno, as águas marinhas encontradas no Canal do Paraguaçu variaram de 26°C a 26,5°C (ago/2003), enquanto que a temperatura no baixo curso do rio e na parte central da Baía de Iguape esteve entre 27°C a 28°C (Figura 5.87 - 27/08). Com a descarga de vazões de 183 e 191 m<sup>3</sup>/s (dias 28 e 29/08), as temperaturas ficaram menores no baixo curso do rio, chegando ao valor mínimo de 24,5°C (Figura 5.87 - 29/08).

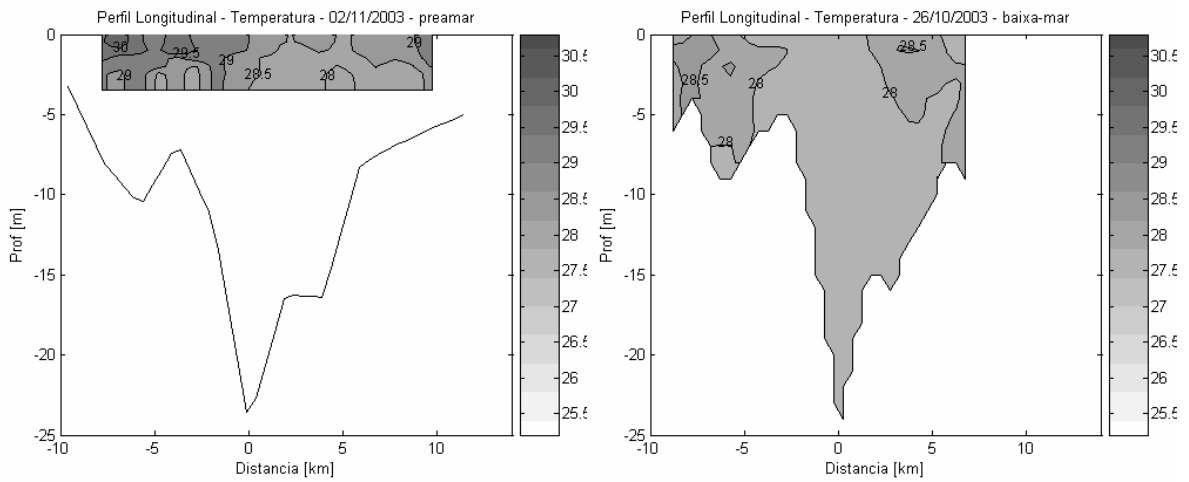


**Figura 5.87. Perfil longitudinal de temperatura – representativo da situação de inverno.**

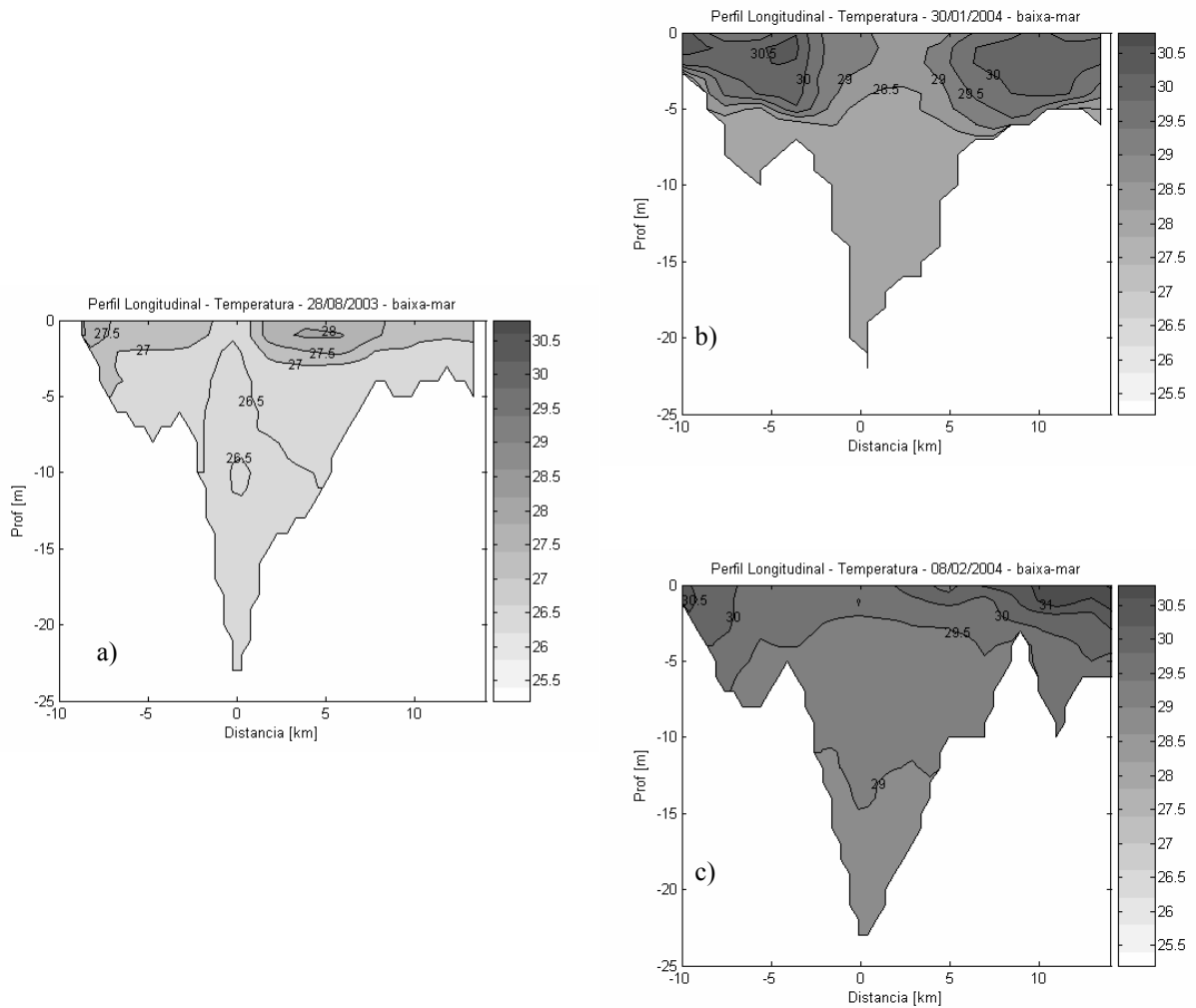
#### **5.3.4.6 Temperatura – Baía de Iguape**

Nos momentos de baixa descarga fluvial, verificou-se que em maré de sizígia (26/10/2003) as temperaturas foram menores e mais homogêneas, entre 27,5°C (associada à salinidade de 33) e 28,5°C, enquanto que na quadratura (02/11/2003) apresentou maior variabilidade espacial, sendo que valores de 30°C foram encontrados no setor Sul (salinidade de 31) durante a preamar. Ou seja, a menor capacidade de mistura da maré de quadratura, aliada às menores profundidades em toda a baía, levam ao aquecimento da água (Figura 5.88).

Nos períodos de maior descarga fluvial monitorados em agosto/2003 e janeiro/2004 (Figura 5.89), observou-se a camada superficial mais quente, e a formação de gradientes de temperatura crescente do centro para os extremos dos setores Sul e Norte (principalmente após a cheia de 2004). No entanto, em agosto/2003, a presença da descarga fluvial está bem marcada no início do Setor Norte (entre km 2 e 7) (Figura 5.89 a) e o efeito da mistura ocasionado pela maré de sizígia aparece no perfil de 08/02/2004 (Figura 5.89 b,c).



**Figura 5.88. Temperatura na Baía de Iguape – baixa vazão – sizígia e quadratura.**



**Figura 5.89. Temperatura na Baía de Iguape – sob influência de descarga fluvial – agosto/2003 (sizígia) e janeiro/2004 (30/01 – quadratura e 08/02 – sizígia).**

## 5.4 Discussão

### 5.4.1 Propagação da maré

A existência do delta do Rio Paraguaçu na Baía de Iguape resultou em mudanças nas características de propagação da onda de maré ao longo da área de estudo, causando: a) o retardo da ocorrência da baixa-mar no baixo curso do rio; b) a inversão da assimetria de positiva (tempo de maré enchente maior que o tempo de maré vazante), para negativa durante a maré de sizígia; e c) o aumento do nível médio nas marés de sizígia. O retardo da baixa-mar foi associado à presença de um delta, fenômeno comum também a outros estuários (Lessa *et al.*, 2001). A existência de uma assimetria positiva na onda de maré na maior parte da BTS, bem como a inversão da assimetria no baixo curso do rio, de positiva em maré de quadratura para negativa na maré de sizígia, foram descritas por Lessa *et al.* (2001). A mudança na assimetria em sizígia não deve estar associada à ocorrência de manguezais, como sugerem Lessa *et al.* (2001), pois a área de mangues no baixo curso é pequena, devendo ser decorrente da presença do delta. O efeito de truncamento do nível da maré foi responsável pela mudança de assimetria da maré nos estuários de Louisa e Eimeo (Austrália) (Lessa, 2000). De outro lado, o efeito do atrito do canal fluvial foi identificado por Hughes (1992) como responsável pelo aumento de  $M_4$  em relação à  $M_2$  na propagação da onda de maré no Rio Hawkesbury (Austrália).

### 5.4.2 Mistura e correntes

Em maré de sizígia o estuário, no Canal do Paraguaçu, apresentou um perfil médio de salinidade homogêneo, enquanto que em quadratura houve um gradiente de salinidade pequeno (diferença de 1,72 entre a superfície e o fundo). Diferenças no perfil de salinidade da maré de sizígia e da maré de quadratura foram observadas em outros estuários brasileiros, devido à maior capacidade de mistura da maré de sizígia, apesar das diferentes características físicas, como veremos em dois exemplos a seguir.

O estuário do Canal de Bertioga, estudado por Miranda e Kjerfve (1998) nos seus 14 km iniciais, tem o canal com largura variando de 200 a 700 m e profundidade média de 3 a 6 m, em ambiente de micromaré semi-diurna (altura média de 0,73 m). A caracterização foi realizada no inverno (época de menor precipitação). Em maré de quadratura o canal é parcialmente misturado, com forte estratificação próximo da foz do Rio Itapanhaú (a cerca de 2 km da entrada e vazão média de 10 m<sup>3</sup>/s) e uma tendência para bem misturado na região



mais interior do canal. Na maré de sizígia a estratificação foi bem menor, tendo o início do canal moderadamente estratificado com boa mistura na parte mais interna. O perfil residual de salinidade, medido a montante da foz do Rio Itapanhaú, na quadratura apresentou valor 16 na superfície e 30 no fundo, enquanto que na sizígia foi cerca de 27,8 na superfície, demonstrando a melhor mistura provocada pela maré de sizígia.

A Baía de Paranaguá está localizada nos 50 km do eixo Leste-Oeste do Complexo Estuarino de Paranaguá, com largura maior que 3 km e profundidades até 17 m (próximo a desembocadura) (Mantovanelli *et al.*, 2004). A maré é semi-diurna com altura média em quadratura e sizígia na desembocadura de 1,3 m e 2 m, respectivamente, sofrendo uma amplificação em direção à cabeceira (Antonina). O aporte de água doce foi estimado em 41 m<sup>3</sup>/s (inverno de 1997) e 182 m<sup>3</sup>/s (verão de 1998). Através do monitoramento de oito ciclos de maré, Mantovanelli *et al.* (2004) verificaram que em quadratura a estratificação vertical pode ser moderada ( $\Delta S$  de 2,7 a 4,1) ou alta ( $\Delta S = 8,6$ ) devido às fracas correntes, resultando em um perfil de circulação gravitacional. Uma exceção ocorreu em um ciclo de maré em quadratura no verão onde foi encontrado parcial mistura, padrão este verificado nos ciclos de maré de sizígia, onde predominou a difusão turbulenta gerada pelas correntes intensas.

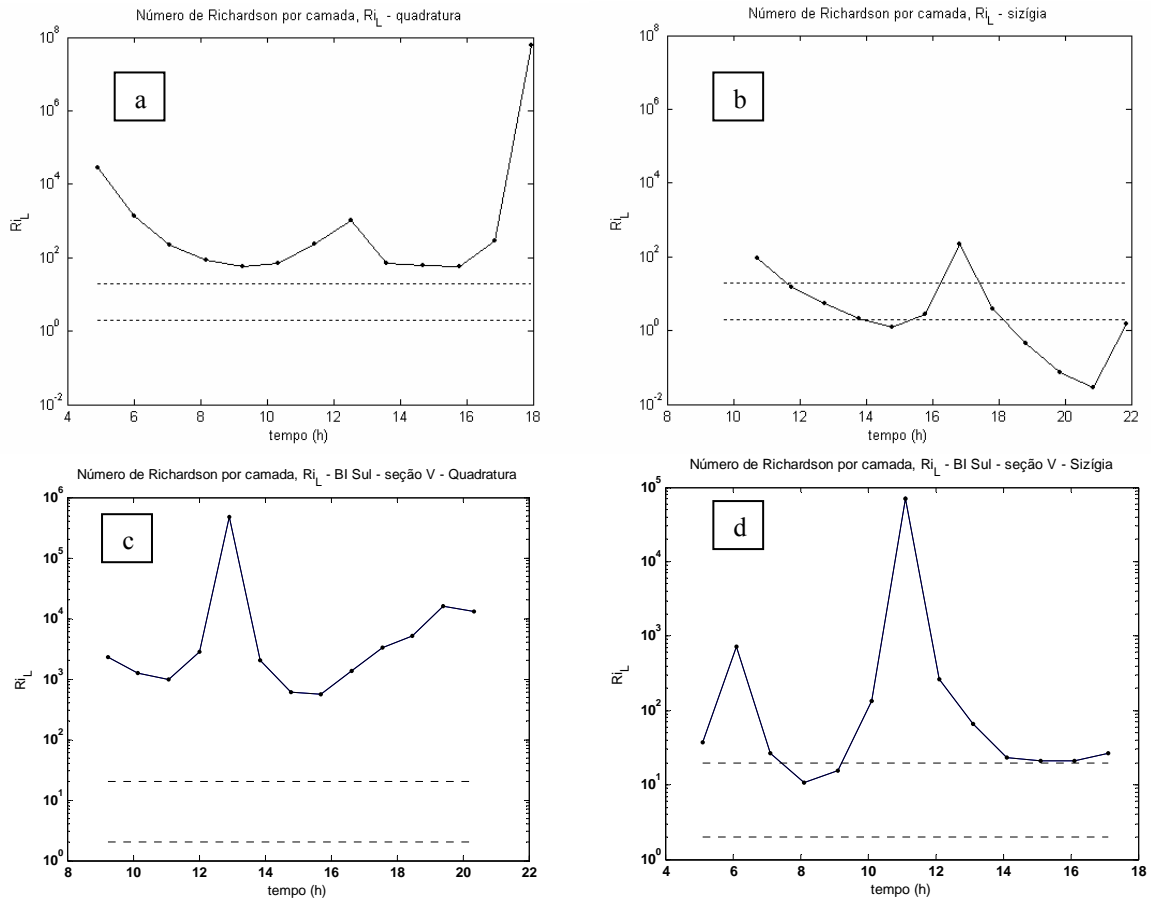
Essa dinâmica de correntes diferenciada nas marés de quadratura e sizígia também foi verificada no Canal do Paraguaçu. Em maré de quadratura, o gradiente de salinidade, apesar de reduzido, induziu a formação de uma circulação gravitacional e um campo de velocidade residual em duas camadas de sentido oposto na vertical. Também verificou-se uma simetria da maré enchente e vazante tanto na duração ( $t_e/t_v = 3\%$ ) quanto nas velocidades (média  $\sim 0,15$  m/s, barotrópica máxima  $\sim 0,30$  m/s), semelhante ao ocorrido na Baía de Paranaguá (Mantovanelli *et al.*, 2004). Em maré de sizígia, os perfis de correntes mostraram-se desenvolvidos em toda a coluna d'água (unidirecionais). A assimetria foi positiva ( $t_e/t_v = 14\%$ ) e a corrente média de vazante (0,53 m/s) superou à de enchente (-0,41 m/s) em 29%, podendo chegar a 56% na máxima velocidade barotrópica (1,18 m/s e -0,76 m/s). Esse domínio de vazante em sizígia foi destacado por Lessa *et al.* (2001). Comparativamente, a assimetria positiva e o domínio da corrente de vazante foram encontradas na Baía de Paranaguá, e apesar de uma altura de maré de sizígia menor (média de 1,7 m), as correntes máximas são da mesma ordem de magnitude (0,9 a 1,3 m/s e -0,7 a -1,1 m/s) daquelas do Canal do Paraguaçu. No entanto, na quadratura (altura média de 1,3m), as velocidades máximas na Baía de Paranaguá foram maiores (0,5 a 0,9 m/s e -0,3 a -0,9 m/s). A

dominância de correntes de vazante também ocorreu no estuário do Canal de Bertioga (Miranda e Kjerfve, 1998) e no Rio Curimataú (Miranda *et al.*, 2005). No Canal de Bertioga o perfil residual tanto na quadratura quanto na sizígia (perfil médio de salinidade na sizígia com diferença de 2 psu entre a superfície e fundo) foi característico de circulação gravitacional. O estuário do Rio Curimataú/RN é raso (< 10 m) e tem seus principais rios afluentes chegando a cerca de 5-6 km da desembocadura. A maré é semi-diurna, com altura média em sizígia de 2,38 m ( $M_2 = 0,806$  m e  $S_2 = 0,276$  m). O monitoramento em estação fixa localizada cerca de 3 km da desembocadura mostrou no ciclo de maré de quadratura valores máximos de corrente de -0,4 m/s e 0,9 m/s, enquanto que na sizígia as correntes máximas atingiram -0,8 m/s e 1,1 m/s. A descarga fluvial (medida bem a montante do estuário) reduziu de 0,65 m<sup>3</sup>/s na maré quadratura para 0,1 m<sup>3</sup>/s na maré de sizígia.

As diferentes condições de mistura nas marés de quadratura e sizígia no estuário do Rio Paraguaçu foram retratadas pelo número de Richardson ( $Ri_L$ ) em dois locais: 1) no Canal do Paraguaçu (out/nov de 2003), durante todo o ciclo da maré de quadratura, o  $Ri_L > 20$  indicou a condição de alta estabilidade, enquanto que na sizígia ficou na faixa de fraca estabilidade ( $2 < Ri_L < 20$ ) durante a maré enchente e passou para valores indicativos de instabilidade ( $Ri_L < 2$ ) na maré vazante (Figura 5.90 a,b); 2) a seção da BI Sul, com a grande quantidade de água doce presente (jan/fev de 2004), apresentou altos valores de  $Ri_L (>1000)$  na quadratura, enquanto que na sizígia foram bastante reduzidos, com valores de  $Ri_L$  inferiores a 20 no pico da maré vazante (Figura 5.90 c,d). A variação do número de Richardson nos outros ciclos monitorados pode ser vista no Anexo 2.

Além disso, a precipitação pode influenciar a salinidade na superfície. O monitoramento realizado por Peixinho (apud Wolgemuth *et al.*, 1981) entre julho/1973 a junho/1974 na desembocadura do Canal do Paraguaçu mostrou a salinidade na superfície variando de 23,6 e 32,5. Analisando os valores apresentados, juntamente com dados de vazão do Rio Paraguaçu e precipitação em São Francisco do Conde, verificou-se que a baixa salinidade de março de 1974 (23,7) parece estar relacionada à descarga do Rio Paraguaçu com vazão média mensal de 243 m<sup>3</sup>/s (máxima diária 546 m<sup>3</sup>/s). No entanto, o menor valor da série 23,6 (maio de 1974) deve ter influência da precipitação (362 mm) sobre a superfície líquida, como também das pequenas drenagens adjacentes, uma vez que a vazão mensal do Rio Paraguaçu foi de 183 m<sup>3</sup>/s (máxima diária 281 m<sup>3</sup>/s). A influência da precipitação também pode ser verificada sobre a salinidade em outubro e novembro/1973 (28,1 e 28,5)

quando as vazões médias foram da ordem de 80 m<sup>3</sup>/s (máximas diárias menores que 280 m<sup>3</sup>/s), enquanto que a precipitação (São Francisco do Conde) chegou a 389 e 295 mm, respectivamente. Cirano *et al.* (2006) associaram a diferença de salinidade entre a superfície e fundo no inverno com a ocorrência de chuva na BTS.



**Figura 5.90. Variação do número de Richardson ( $Ri_L$ ) ao longo do ciclo de maré. Canal do Paraguaçu: quadratura (a) e sizigia (b). Baía de Iguape setor Sul: quadratura (c) e sizigia (d).**

(As linhas tracejadas indicam  $Ri_L$  iguais a 2 e 20.  $Ri_L < 2$  - instabilidade;  $2 < Ri_L < 20$  - fraca estabilidade;  $Ri_L > 20$  - alta estabilidade vertical - Bérghamo *et al.*, 2002)

O estuário, a partir dos dados do Canal do Paraguaçu, com baixa descarga fluvial (15,6 m<sup>3</sup>/s) foi classificado, segundo Hansen e Rattray (1966), no tipo 1 (bem misturado) na sizigia e como tipo 2a em transição para 2b (parcialmente misturado) na quadratura. Desta maneira, o estuário está sujeito a ciclos de estabilização e desestabilização na estrutura de salinidade na coluna d'água condicionados a ocorrência da maré de quadratura e sizigia (Uncles *et al.*, 1990; Jay e Smith, 1990). No Canal de Bertioga (SP), Miranda e Kjerfve (1998) observaram a mudança de classificação com a passagem de maré de quadratura (bem estratificado - 2b) para sizigia (menor estratificação - 2a) (regime de micromaré).

A corrente residual na BTS, segundo Cirano e Lessa (2002) e Cirano *et al.* (2006), é similar no verão e inverno, com velocidades não excedendo 0,05 m/s, sendo que na parte central da BTS ocorre a circulação gravitacional. No Canal do Rio Paraguaçu o perfil residual na quadratura é típico da circulação gravitacional com valor na superfície maior que 0,1 m/s, enquanto que na sizígia o perfil é todo de vazante e a velocidade supera 0,2 m/s na superfície.

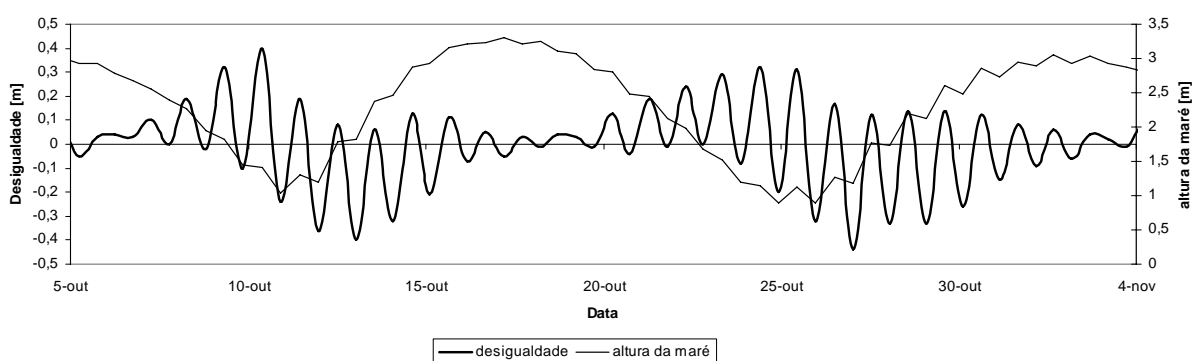
É importante destacar que a entrada de água doce pela descarga fluvial pode acentuar a condição de estratificação, como foi observado em janeiro de 2004 no estuário do Rio Paraguaçu. A cheia (TR~15 anos) preencheu com água doce o baixo curso do rio, a Baía de Iguape e uma camada de até 5 m de profundidade do Canal do Paraguaçu até próximo de São Roque. Nessa situação, em maré de quadratura, o estuário ficou com forte estratificação. No período que transcorreu durante a semana seguinte, com as vazões mantidas acima de 350 m<sup>3</sup>/s, a estratificação foi gradualmente sendo quebrada pela maior capacidade de mistura da maré de sizígia (Figura 5.78). Essa destruição da estratificação com a passagem da maré de quadratura para sizígia foi descrita no Canal Hinchinbrook, Austrália (Wolanski *et al.*, 1990), no estuário do Rio Columbia (Jay e Smith, 1990), no estuário de Sungai Merbok, Malásia (Uncles *et al.*, 1990) e no estuário do Rio Curimataú (Miranda *et al.*, 2005).

Sob condição de alta descarga, o setor Norte apresentou maior dinamismo em relação ao setor Sul. As velocidades e o prisma foram maiores no setor Norte (>25% e 16% respectivamente), ainda que a área de seção transversal do canal fosse menor. A vazão residual no setor Norte foi bem menor que no setor Sul, indicando estar o primeiro sob influência da descarga fluvial (entrou na seção de monitoramento com velocidades de até -0,30m/s logo após a baixa-mar). Além disso, a salinidade e a temperatura em sizígia foram ligeiramente menores no setor Norte, em consequência da maior mistura das massas de água doce e marinha. Destaca-se que o comportamento das seções da Baía de Iguape setor Norte e setor Sul é similar àquele dos canais CN e CS da seção do Canal do Paraguaçu a montante da Ilha do Francês, respectivamente, no que se refere aos perfis médios de sal, temperatura e sedimentos em suspensão, inclusive quanto à classificação no diagrama de estratificação-circulação. No entanto, a vazão residual na maré de sizígia na seção de BI Sul foi superior àquela do Canal, indicando que deve ter ocorrido uma vazão residual de enchente na BI Norte. Desta maneira, os setores Norte e Sul parecem ter dinâmicas distintas e independentes.

Na desembocadura do baixo curso do rio, a classificação quanto a circulação e estratificação em um ciclo de maré de sizígia mudou de tipo *Ia* (bem misturado), com vazão

nula, para tipo *Ib* (bem misturado, forte estratificação), com vazão de 78 m<sup>3</sup>/s (uma turbina da UHE em funcionamento). A maior descarga da barragem gerou uma variação de salinidade entre 0 e 26, enquanto que com vazão nula foi de 6,7 a 27,1. Além disso, com essa vazão houve a permanência da salinidade inferior a 2 durante cerca de 4 horas.

A vazão residual obtida para as seções monitoradas, além da influência da assimetria da maré que induz a dominância de enchente/vazante, também esteve sob efeito da desigualdade diurna da maré. Nos ciclos de vazão residual de vazante (26/10/2003 e 29/08/2003 – seção I; 31/01/2004 – seções III e IV; 7 e 8/2/2004 – seções III, IV e V; 27/08/2003 – seção VI) a desigualdade favoreceu uma maior altura na maré vazante, enquanto que o oposto ocorreu no ciclo com vazão residual de enchente (02/11/2003 – seção I). Portanto, junto com a mudança de assimetria da maré de quadratura para sizígia e vice-versa, deve estar ocorrendo também uma mudança na vazão residual, com períodos de dias sequenciais de domínio de enchente/vazante associado à desigualdade favorável à enchente/vazante (Figura 5.91).



**Figura 5.91. Desigualdade dos ciclos de maré junto com a maré altura medida em Coqueiros em 2005. Valores positivos da desigualdade indicam que a altura na maré enchente foi maior que da maré vazante, enquanto que valores negativos indicam o oposto.**

### 5.4.3 Sedimentos em suspensão

A variação da concentração de sedimentos em suspensão ao longo do ciclo de maré seguiu o padrão descrito por Mantovanelli *et al.* (2004) na Baía de Paranaguá, com a intensidade da turbulência controlando a mistura dos sedimentos à coluna d'água. Assim, grande ressuspensão de sedimentos foi verificada na maré de sizígia no Canal do Paraguaçu ( $Ri_L < 2$ ). Na maré de quadratura ( $Ri_L > 20$ ) a concentração dos sedimentos em suspensão foi baixa e somente próximo ao fundo houve alguma concentração de material.

Os perfis verticais de sedimentos apresentaram um crescimento da concentração com a profundidade, devido ao processo de ressuspensão pelas correntes de maré em sizígia, formando zonas de intensa turbidez (até 586 mg/l). Wolgemuth *et al.* (1981) já relataram esse tipo de comportamento embora com concentrações no fundo bem menores. Em situação anterior a construção da Barragem Pedra do Cavalo, os dados coletados em 1977 por Wolgemuth *et al.* (1981), mostraram a concentração de material em suspensão inferior a 4 mg/l na BTS, enquanto que no baixo curso do Rio Paraguaçu os valores variaram entre 10 e 70 mg/l. Na medição de março/1977 o valor máximo de concentração de sedimentos foi 25 mg/l (média 16 mg/l) enquanto que nas campanhas de maio e setembro/1977 o máximo variou de 65 a 70 mg/l (média de 41 mg/l). Os autores mostraram surpresa com essa diferença, já que em março a vazão era 4 vezes maior (132 m<sup>3</sup>/s). No entanto, tal fato decorre do monitoramento em março ter sido na maré de quadratura, enquanto nas demais foi na sizígia. Além disso, Moura (1979) mostra um perfil coletado no setor Norte da Baía de Iguape onde os sedimentos variaram de 34 mg/l na superfície para 164 mg/l no fundo.

Durante a cheia de janeiro de 2004, na maré de quadratura (30/1), os sedimentos estavam na camada superior da coluna de água, associados à massa d'água fluvial, e praticamente ao longo de toda a região da Baía de Iguape. Com a passagem para a maré de sizígia (8/2), houve a quebra da estratificação e a precipitação e a acumulação dos sedimentos junto ao fundo (Figura 5.84). Essa situação não é comum, pois em estuários estratificados, o material em suspensão é transportado na parte superior da coluna d'água até o oceano, e somente a parte do material mais grosso é depositado no encontro da cunha salina e o rio (Brown *et al.*, 1989). No caso do estuário do Rio Paraguaçu, o processo está ligado à morfologia incomum, que tem a Baía de Iguape quase transversal ao canal do baixo curso e a mudança acentuada da batimetria nos canais da baía e no Canal do Paraguaçu.

#### **5.4.4 Temperatura**

O aquecimento da água (~1,5°C) verificado na Baía de Iguape durante a maré de quadratura parece estar associado à menor capacidade de mistura, aliada às menores profundidades em toda a baía. No entanto, Wolanski *et al.* (1990) demonstraram que o aquecimento da água pode ser decorrente da inundação dos manguezais durante o dia, ou resfriamento se a maré enchente ocorrer à noite. No caso estuário do Rio Paraguaçu não há indícios dessa relação na Baía de Iguape (ver os perfis de temperatura no Anexo 2). Moura (1979) traz informações de temperatura do período anterior à barragem compatíveis com as

medidas neste estudo. Em maré de quadratura e vazão de 130 m<sup>3</sup>/s (dia 3/3/1977) a temperatura cerca de 4 km acima da BI foi maior que 30°C (salinidade de 3,2). Já em sizígia, com vazão de 32,6 m<sup>3</sup>/s, no dia 17/5/1977, a salinidade em torno de 1 foi medida cerca de 1,5km acima da BI, com temperatura no entorno de 28,9°C.

#### 5.4.5 Tempo de descarga

O tempo de descarga ( $t_q$ ) é o tempo que a água doce que se acumulou na Zona de Mistura (ZM) leva para sair do estuário, sendo definido pela razão entre o volume de água doce ( $V_f$ ) retido na ZM e a descarga fluvial ( $Q_f$ ). Considerando que a salinidade e a fração de água doce são funções das coordenadas espaciais, o tempo de descarga pode ser calculado por (Miranda, *et al.*, 2002):

$$t_q = \frac{(S_0 - \bar{S})}{S_0} \frac{V}{Q_f} \quad \text{(Equação 5.5)}$$

onde:  $t_q$  = tempo de descarga [s];  $S_0$  = Salinidade não diluída na zona costeira;  $\bar{S}$  = Salinidade média;  $V$  = volume do estuário [m<sup>3</sup>];  $Q_f$  = vazão fluvial [ m<sup>3</sup>/s].

O método do prisma de maré, baseado em um estuário ideal (tipo 1), considera que o prisma da maré (P), com salinidade constante, mistura-se completamente com o volume da descarga fluvial durante a maré enchente. A formulação do tempo de descarga pelo método do prisma é (Miranda, *et al.*, 2002):

$$t_q = \frac{T}{2P + R} V \quad \text{(Equação 5.6)}$$

onde:  $T$  = período da maré [s];  $R = Q_f \cdot T$  [m<sup>3</sup>]. Segundo Dyer (1997) o método do prisma subestima o tempo de descarga em relação a outros métodos, pois parte da água doce pode não ser eliminada em um ciclo de vazante, ou segundo Miranda *et al.* (2002) se a ela não se mistura completamente com a do mar durante a maré enchente ou o ciclo completo de maré.

Uncles *et al.* (2002) analisando vários estuários no mundo (maioria no hemisfério norte), propôs o seguinte modelo para obter o tempo de descarga:

$$t_q = 0,23 \cdot HS^{-0,4} \cdot EXT^{1,2} \quad (R^2 = 0,91) \quad \text{(Equação 5.7)}$$

onde:  $t_q$  = tempo de descarga [dias]; HS = altura média da maré de sizígia [m]; EXT = extensão da maré [km].

Os tempos de descarga no estuário do Rio Paraguaçu foram estimados, pelos métodos descritos acima, utilizando os dados indicados na Tabela 5.16:

**Tabela 5.16. Informações básicas para o cálculo do tempo de descarga.**

Perfil	1	2	3	4	5	6
Maré	Sizígia	Sizígia	Sizígia	Sizígia	Quadratura	Quadratura
Data	13/11/2001	29/8/2003	15/11/2001	15/11/2001	21/11/2001	20/11/2001
Estágio da maré	bm	pm	bm	pm	pm	pm
$Q_f$	13	191	402	402	13	48
$\bar{S}$	19,0	18,7	22,7	27,0	20,9	21,3

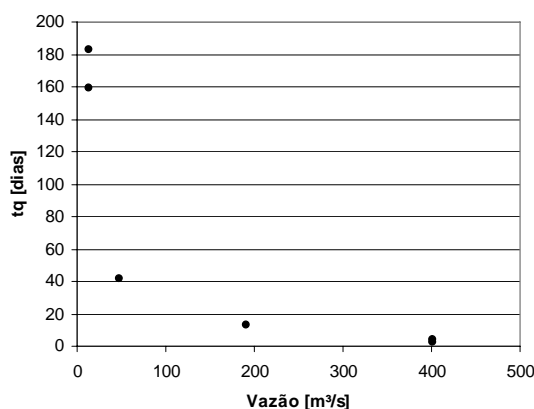
Obs: bm – baixa-mar; pm - preamar

A salinidade média  $\bar{S}$  foi calculada após a interpolação dos dados dos perfis longitudinais em pontos na profundidade adimensional  $Z$  e equidistantes (2 km). Além disso,  $HS = 3\text{m}$ ,  $EXT = 40\text{ km}$ ,  $S_0 = 33$  (entrada do Canal do Paraguaçu);  $V = 485 \times 10^6\text{ m}^3$ ;  $P(\text{sizígia}) = 485 \times 10^6\text{ m}^3$  (monitoramento de 26/10/2003);  $P(\text{quadratura}) = 96 \times 10^6\text{ m}^3$  (monitoramento de 02/11/2003).

O tempo de descarga, considerando a variação da vazão (equação 5.5), resultou em valores entre o mínimo de 2,5 dias (vazão de  $402\text{ m}^3/\text{s}$  - sizígia) e máximo de 183 dias (vazão de  $13\text{ m}^3/\text{s}$  – sizígia) (Tabela 5.17 e Figura 5.92).

**Tabela 5.17. Tempo de descarga em função da vazão.**

Perfil	1	2	3	4	5	6
$t_q$ [dias]	183	12,7	4,4	2,5	159	41,5



**Figura 5.92. Variação do tempo de descarga em função da vazão fluvial.**

O método do prisma, para maré de sizígia e quadratura, com base no perfil 1 e perfil 5, respectivamente, resultou em tempos de descarga de 11,8 dias e 32,5 dias, respectivamente. Através da equação 5.7 (Uncles *et al.*, 2002), o tempo de descarga obtido é de 12,4 dias.



O tempo de descarga ( $t_q$ ) do estuário do Rio Paraguaçu, obtido a partir dos dados do Canal do Paraguaçu, é de 12 dias na maré de sizígia (método do prisma e equação proposta por Uncles *et al.*, 2002), podendo variar de 2,5 dias a 183 dias (vazões de 13 m<sup>3</sup>/s a 402 m<sup>3</sup>/s), é compatível com o tempo de descarga do Rio Hudson ( $t_q = 6$  e 10,6 dias para vazões de 488 m<sup>3</sup>/s e 197 m<sup>3</sup>/s), com a baía de Narragansett, Rhode Island, EUA ( $t_q$  variando entre 12 e 40 dias na época de alta e baixa vazão, respectivamente) (Miranda *et al.*, 2002) e com o tempo de renovação de 50% da água da Baía de Guanabara (11,4 dias) (Kjerfve *et al.*, 1997).

#### 5.4.6 Intrusão salina e vazão fluvial

A isohalina de 5 psu foi escolhida para representar a variação da intrusão do sal no estuário do Rio Paraguaçu. A isohalina de 5 psu corresponde, segundo o Venice System (1985), ao limite entre ambientes oligohalino (0,5–5 psu) e mesohalino (5–18 psu), separando os organismos oligohalinos dos demais organismos estuarinos.

A posição da isohalina 5 no estuário foi determinada com base nos perfis longitudinais, considerando o ponto médio na coluna d'água. Dois valores de vazão foram considerados para avaliar o comportamento da intrusão salina:

- 13 m<sup>3</sup>/s: corresponde a operação de descarga média diária da barragem Pedra do Cavalo, exceto durante o período de cheias, realizada antes da instalação da UHE;
- 160 m<sup>3</sup>/s: vazão máxima das turbinas de geração de energia elétrica da UHE.

Em geral, a penetração do sal no estuário tem sido analisada diretamente com a vazão (e.g. Sklar e Browder, 1998; Meyer *et al.*, 2003; Schettini, 2001; Flannery *et al.*, 2002). Para o estuário do Rio Paraguaçu a relação de melhor ajuste entre a isohalina de 5 psu foi exponencial, com a equação:

$$S_i = 28,58 e^{(-0,0007 Q)} \quad (R^2 = 0,695) \quad \text{(Equação 5.8)}$$

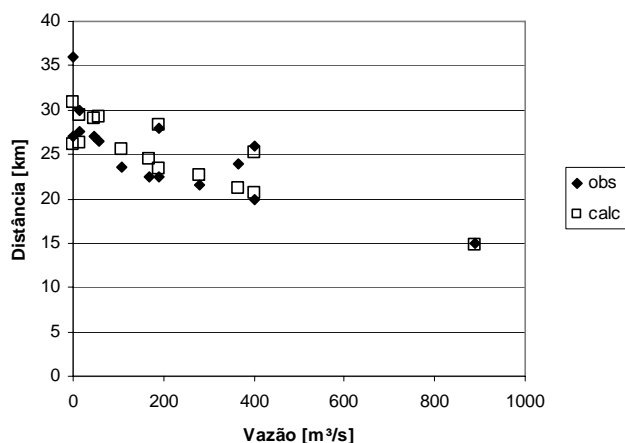
onde:  $S_i$  = extensão da intrusão salina [km];  $Q$  = vazão [ m<sup>3</sup>/s]

Devido à altura de maré em sizígia ser três vezes maior que à de quadratura, a elevação da maré foi incluída na parametrização da intrusão do sal no estuário. A curva de ajuste resultou equação:

$$S_i = 26 - 0,0144 Q + 1,522 h \quad (R^2 = 0,76) \quad \text{(Equação 5.9)}$$

onde:  $S_i$  = extensão da intrusão salina [km];  $Q$  = vazão [ m<sup>3</sup>/s];  $h$  = elevação da maré ( $0 < h < 3,2$  m).

A Figura 5.93 apresenta a tendência da relação entre a penetração do sal (isohalina de 5) e a vazão fluvial, com base nos dados observados e calculados pela Equação 5.9. Discrepâncias ocorrem pela superestimação da penetração do sal para a faixa de vazão entre 48 m<sup>3</sup>/s e 280 m<sup>3</sup>/s e a maré na baixa-mar, enquanto que a subestimação foi verificada para vazões menores que 15 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 5.93. Relação entre a vazão e a penetração do sal (isohalina 5) segundo a equação 5. 9.**

Os principais deslocamentos da isohalina de 5 ocorrem na maré de sizígia, quando para uma mesma vazão a posição da isohalina na preamar avança cerca de 5 km estuário adentro em relação à baixa-mar (Figura 5.94). Na quadratura, a variação estimada entre a baixa-mar e a preamar é menor, cerca de 1,6 km (Figura 5.95).

O efeito da descarga de 160 m<sup>3</sup>/s sobre a intrusão foi marcante em maré de sizígia. Na baixa-mar, a isohalina de 5 recua do km 25,8 para o km 23,7, invadindo a Baía de Iguape (Figura 5.94). Na preamar, o deslocamento é semelhante (cerca de 2,1 km) e a isohalina de 5 mantém-se dentro do baixo curso do rio (Figura 5.94). Na maré de quadratura, o deslocamento foi de 1,9 km, mantendo a isohalina de 5 no baixo curso, sendo que na baixa-mar se localizou na entrada da Baía de Iguape (Figura 5.95).

Destaca-se que houve um deslocamento da posição da isohalina de 5 na superfície e no fundo em relação à posição obtida para o meio da coluna d'água. A isohalina de 5 na superfície é em média 0,73 km para jusante (desvio padrão de 0,5 km), enquanto que no fundo a posição é de 0,81 km para montante (desvio padrão de 0,6 km). A inclinação da isohalina foi mais acentuada nos dias posteriores à descarga máxima do hidrograma de cheia e com a maré em transição para quadratura.

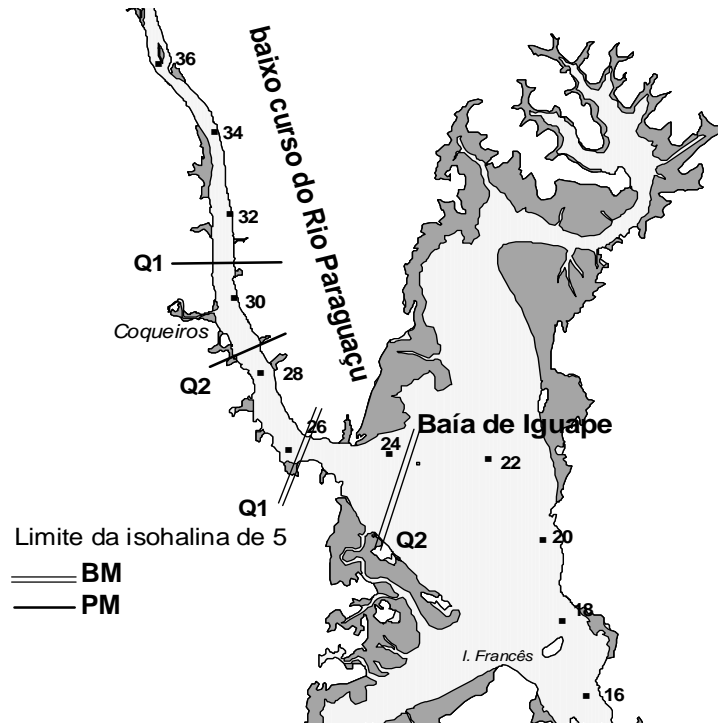


Figura 5.94. Intrusão salina (isohalina 5) – maré de sizígia –  $Q1 = 13 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $Q2 = 160 \text{ m}^3/\text{s}$  (PM – preamar; BM – baixa-mar). Ponto e número indicam a distância em km.

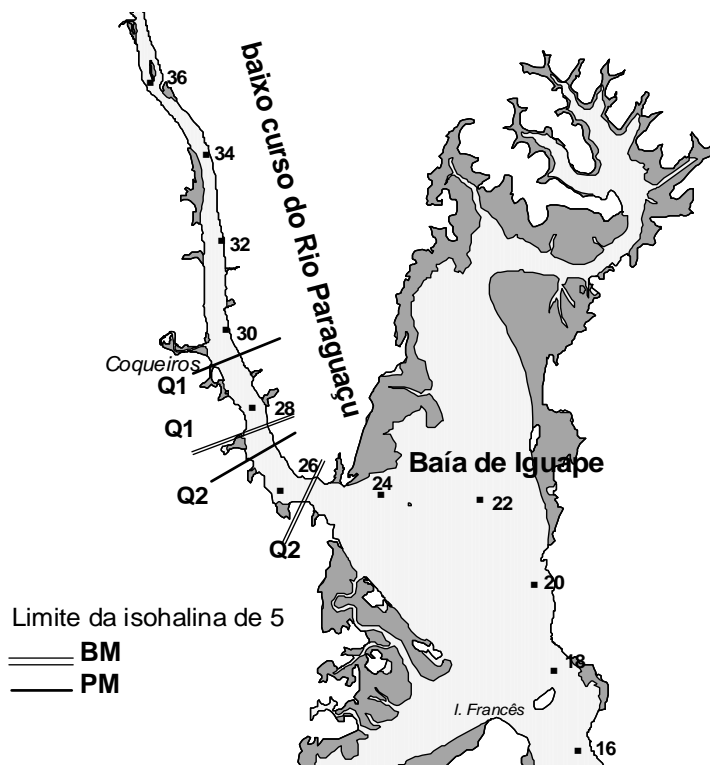


Figura 5.95. Intrusão salina (isohalina 5) – maré de quadratura –  $Q1 = 13 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $Q2 = 160 \text{ m}^3/\text{s}$  (PM – preamar; BM – baixa-mar). Ponto e número indicam a distância em km.

Em estuários com uma relação entre a penetração do sal e a vazão com forma curva acentuada no trecho das vazões menores tendem a dramáticos movimentos das isohalinas para montante devido à pequenas reduções na vazão durante a estação seca (Flannery *et al.* (2002). Não é o caso do Rio Paraguaçu, onde o deslocamento da isohalina de 5 entre a preamar e a baixa-mar é maior que aquele causado pela diminuição da vazão no período seco. Enquanto que a redução na vazão de 48 m<sup>3</sup>/s para 13 m<sup>3</sup>/s resulta em 2,5 km de deslocamento da isohalina de 5, a variação entre a preamar e baixa-mar na sizígia pode levar a deslocamentos de 4,7 km, sendo que com vazão nula chegou a 9 km. Por outro lado, a ocorrência de enchentes extremas pode danificar as comunidades estuarinas, caso sejam repentinas ou não possam ser amenizadas por grandes prismas de maré (Sklar e Browder, 1998). Assim, considerando que o baixo curso e a região central da Baía de Iguape são fortemente afetadas pela descarga fluvial, vazões de 160 m<sup>3</sup>/s e 600 m<sup>3</sup>/s podem, respectivamente, levar a isohalina de 5 para jusante do baixo curso e da Baía de Iguape.

Desta maneira, as vazões liberadas pela UHE modificam as condições estuarinas no baixo curso e na Baía de Iguape, quando comparadas a vazões baixas (<13 m<sup>3</sup>/s) do período de seco, tanto com relação ao que seria natural acontecer no rio antes da barragem quanto sob o esquema de operação da EMBASA. Os eventos de cheias que se igualem ou superem a vazão máxima média anual (TR=2 anos ~ 900 m<sup>3</sup>/s), bem como a vazão de operação da barragem (1.500 m<sup>3</sup>/s), devem preencher de água doce o baixo curso do rio e a Baía de Iguape, gerando forte estratificação se coincidir com a maré de quadratura.

Com base nas análises acima, a relação estabelecida entre as vazões liberadas pela barragem, a elevação da maré e a penetração do sal no estuário (equação 5.9) tem condições de se tornar o instrumento de orientação operacional para gestão das vazões mínimas afluentes ao estuário do Rio Paraguaçu, estabelecendo uma abordagem do tipo *condicionado* (Alber, 2002), onde os padrões de vazão são estabelecidos para manter a condição específica de salinidade.

As condições estuarinas que não puderam ser caracterizadas com os dados coletados em campo e que são de interesse para a avaliação dos efeitos da Barragem Pedra do Cavalo sobre o estuário foram: 1) situação com as vazões do período úmido do estuário (inverno); 2) distribuição do sal na Baía de Iguape, para as vazões de inverno e de turbinamento da UHE. Estas serão objeto da modelagem numérica.

## 6 MODELAGEM NUMÉRICA

### 6.1 DESCRIÇÃO DO MODELO

A modelagem numérica do escoamento no estuário do Rio Paraguaçu foi realizada com o modelo Princeton Ocean Model – POM (Blumberg e Mellor, 1987; Mellor, 2003). O POM é um modelo de domínio público, desenvolvido na década de 70 e que vem sendo amplamente utilizado na modelagem da circulação de regiões costeiras e oceânicas, tanto em escalas regionais como globais. Por usar coordenadas sigma, que acompanham a topografia de fundo, o POM é particularmente aconselhado para o estudo de regiões com uma pronunciada variação batimétrica. Alguns dos exemplos clássicos da aplicação do POM em ambientes costeiros são os trabalhos nos estuários dos rios Hudson e Delaware (Oey et al., 1985a-b; Galperin e Mellor, 1990a-b). Na região costeira do Brasil, o POM também foi aplicado na Baía de Paranaguá (Camargo, 1998), sistema estuarino Cananéia-Iguape (Picarelli, 2001) e estuário do Rio Itajaí (Conceição, 2004).

O POM é um modelo tridimensional, de equações primitivas, variante no tempo, com superfície livre e coordenadas Sigma na vertical, cujas variáveis prognósticas são as três componentes da velocidade, além da temperatura e da salinidade.

#### 6.1.1 Equações fundamentais

As equações fundamentais que o modelo soluciona são:

- Continuidade, sendo as velocidades  $U_i = (U, V, W)$  correspondente aos eixos ortogonais x,y,z:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{Equação 6.1}$$

- Momento:

$$\frac{\partial}{\partial t}(U, V) + \frac{\partial}{\partial x_i}[U_i(U, V)] + f(-V, U) = -\frac{1}{\rho_0} \left[ \frac{\partial \mathcal{P}}{\partial x}, \frac{\partial \mathcal{P}}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_M \frac{\partial}{\partial z}(U, V) \right] + (F_u, F_v)$$

Equação 6.2

$$\rho g = -\frac{\partial P}{\partial z} \quad \text{Equação 6.3}$$

- Conservação para temperatura (T) e salinidade (S):

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(U_i, T) = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_H \frac{\partial T}{\partial z} \right] + F_T \quad \text{Equação 6.4}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(U_i, S) = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_H \frac{\partial S}{\partial z} \right] + F_S \quad \text{Equação 6.5}$$

- Estado:

$$\rho = \rho(T, S, P) \quad \text{Equação 6.6}$$

onde:

$f$  = parâmetro de Coriolis ( $s^{-1}$ );

$\rho, \rho_0$  = densidade no local e densidade de referência ( $kg\ m^{-3}$ );

$P$  = pressão ( $Nm^{-2}$ );

$K_M, K_H$  = coeficientes de difusão vertical ( $m^2s^{-1}$ );

$F$  = termos de difusão horizontal;

Os coeficientes de difusão vertical  $K_M, K_H$  (eqs. 6.2, 6.4 e 6.5) são calculados usando o esquema de fechamento turbulento de Mellor e Yamada (1982).

Os termos de difusão horizontal  $F_u, F_v, F_T$  e  $F_S$  (eqs. 6.2, 6.4 e 6.5) são obtidos pela formulação de Smagorinsky, cujo parâmetro é dado por:

$$A_M = C\Delta x\Delta y \frac{1}{2} \left| \nabla \mathbf{V} + (\nabla \mathbf{V})^T \right| \quad \text{Equação 6.7}$$

onde:  $|\nabla \mathbf{V} + (\nabla \mathbf{V})^T|/2 = [(\partial u / \partial x)^2 + (\partial v / \partial x + \partial u / \partial y)^2 / 2 + (\partial v / \partial y)^2]^{1/2}$ . O coeficiente  $C$  (horcon) usualmente tem valores entre 0,10 a 0,20.

As equações fundamentais foram desenvolvidas em um sistema de coordenadas sigma (Figura 6.1), que adota:

$$x^* = x, y^* = y, \sigma = \frac{z - \eta}{H + \eta}, t^* = t \quad \text{Equação 6.8 a, b, c, d}$$

onde:  $x, y, z$  são as coordenadas cartesianas;  $D \equiv H + \eta$ , onde  $H(x, y)$  é a batimetria de fundo e  $\eta(x, y, t)$  é a elevação da superfície da água. Assim,  $\sigma$  varia de  $\sigma = 0$  em  $z = \eta$  a  $\sigma = -1$  em  $z = -H$ . A formulação em coordenadas Sigma pode ser consultada em Mellor (2003).

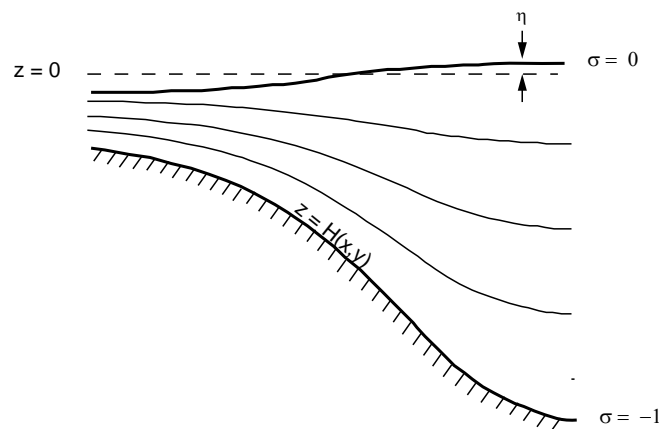


Figura 6.1. Esquema ilustrando a discretização da coluna d'água em coordenadas Sigma.

A rugosidade no fundo, utilizada no cálculo da velocidade, é definida por:

$$C_D = \left( \frac{\kappa}{\ln\left(\frac{h_0}{z_{ob}}\right)} \right)^2 \quad \text{Equação 6.9}$$

onde:  $C_D$  = coeficiente de atrito;  $\kappa$  = constante de von Karman = 0,4;  $h_0$  = altura do fundo até o meio da 1ª camada;  $z_{ob}$  = parâmetro de rugosidade.

### 6.1.2 Solução numérica

O POM adota a solução numérica por diferenças finitas, progressivo no tempo com um esquema do tipo “leapfrog”. Os termos do transporte advectivo adotam um esquema explícito, enquanto que a difusão do fluxo vertical usa um esquema implícito. A precisão da solução é de segunda ordem no espaço e de primeira ordem no tempo.

### 6.1.3 Implantação do modelo

#### 6.1.3.1 Grade

Uma rotina em ambiente MATLAB foi desenvolvida para gerar uma grade retangular (ortogonalidade zero), com as células crescendo em progressão aritmética a partir da posição de entrada da vazão fluvial (borda Oeste) em direção ao Sul e Leste (variação de área <1%). Desta maneira, uma grade de 200 x 300 células foi definida (60.000 células), com tamanho médio de 100m x 100m, iniciando com 50m x 50m no canto superior esquerdo da grade (rio) para chegar com cerca de 150m x 150m no canto inferior direito (BTS) (Figura 6.2).

A grade retangular com pequena variação de área das células vizinhas atende com folga a necessidade de limitar a variação da área no máximo a 20% para não comprometer a estabilidade numérica. Além disso, não há restrições quanto às restrições necessárias para satisfazer a ortogonalidade. Os outros parâmetros importantes de avaliação da grade são:

- 1) Fator de gradiente batimétrico ( $r$ ):

$$r = (H_1 - H_2) / (H_1 + H_2) \quad \text{Equação 6.10}$$

onde:  $H_1$  e  $H_2$  as profundidades de dois elementos adjacentes. O  $r$  deve ser inferior a 0,5.

- 2) Condição de Courant-Friederichs-Levy ( $CFL$ ): limita o intervalo de tempo de integração numérica ao valor mínimo determinado por:

$$CFL = \frac{1}{\sqrt{gH}} \left| \left( \frac{1}{dx} \right)^2 + \left( \frac{1}{dy} \right)^2 \right|^{\frac{1}{2}} \quad \text{Equação 6.11}$$

Uma outra rotina de análise foi preparada em MATLAB para avaliação da grade e suavização da batimetria caso o parâmetro  $r$  acima não fosse satisfeito. Essa resolução da grade permitiu estabelecer no mínimo cinco células para cada seção do baixo curso do rio.

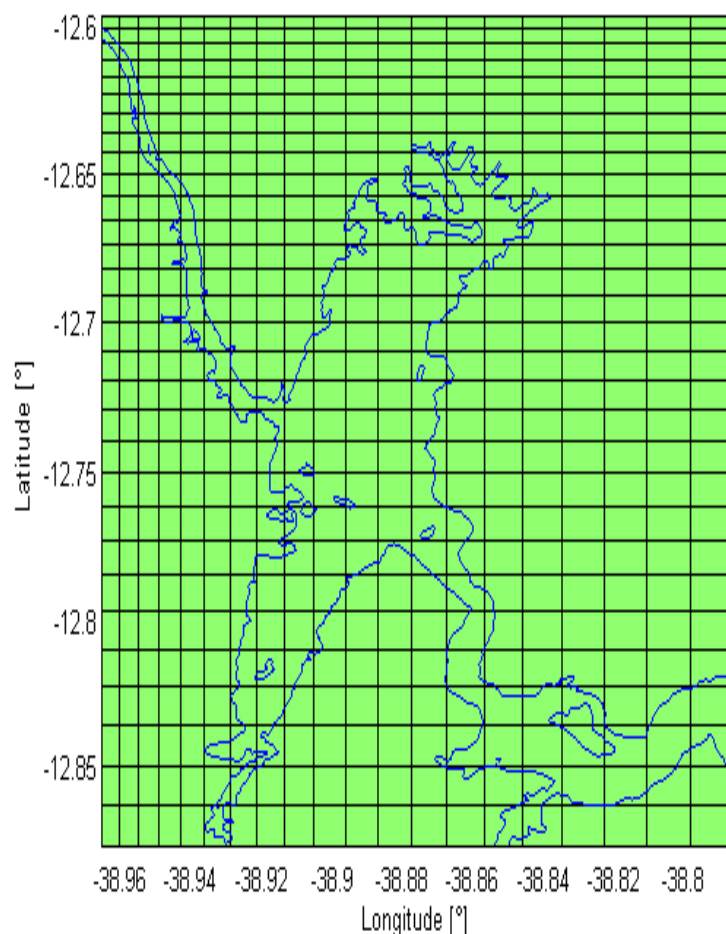
#### 6.1.3.2 Batimetria

A versão atual do POM não tem capacidade para simular áreas que inundam e secam, sendo ainda preciso também respeitar uma profundidade mínima de lâmina d'água (1m) (pom2k.f - <http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom/>). Considerando que em sizígia a amplitude da maré pode chegar a 1,6m, adotou-se a profundidade mínima de 3 m,



resultando no aumento de 31,1% ( $1,507 \times 10^8 \text{m}^3$ ) sobre o volume real do estuário ( $4,84 \times 10^8 \text{m}^3$ ).

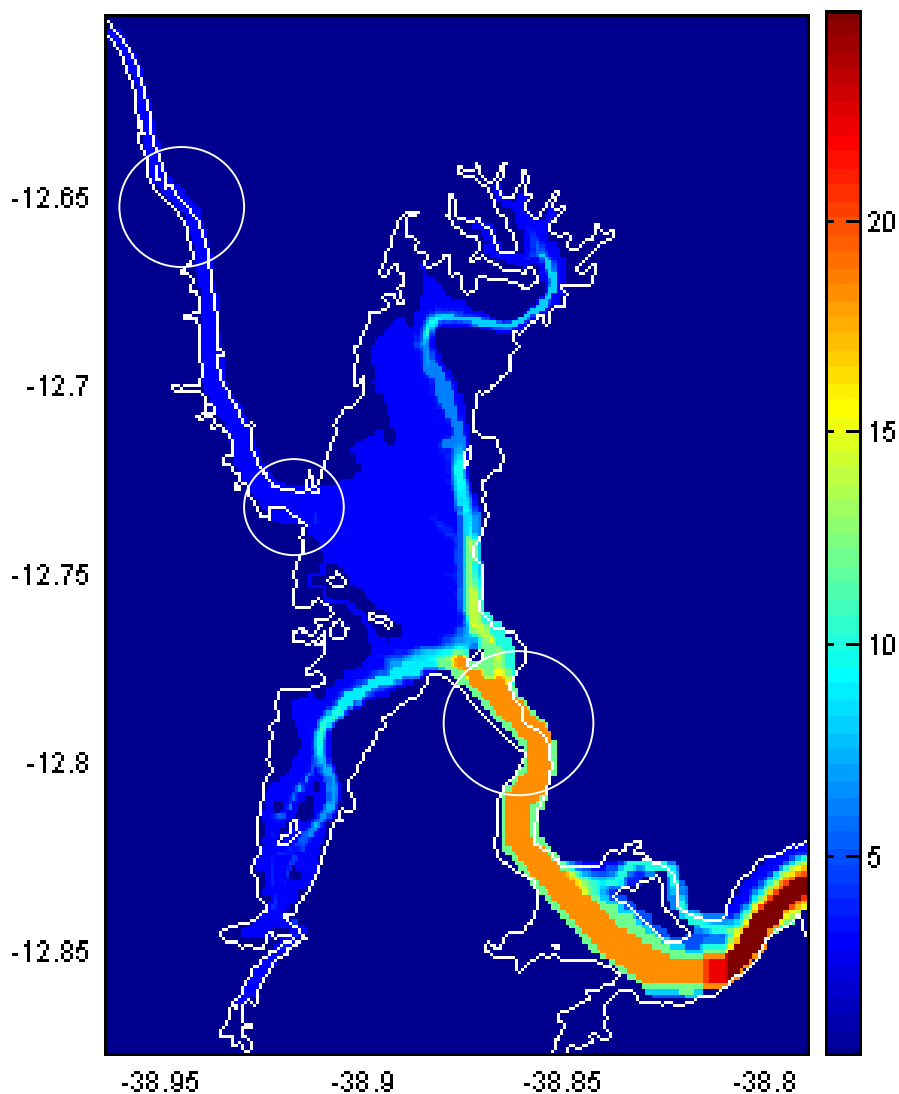
Nas simulações iniciais com a grade, verificou-se a necessidade de alargar a conexão entre a Baía de Iguape e o Canal do Paraguaçu, de maneira a evitar o acúmulo de água a montante e gerar capacidade de fluxo do volume excessivo no estuário. A batimetria em regiões mais profundas foi alterada para que as células permitissem a continuidade do fluxo no fundo. De forma localizada, também ocorreram ajustes nas profundidades para minimizar o *r*. Em função desses ajustes, o volume na grade ficou 37% acima do volume real.



**Figura 6.2. Grade retangular ilustrativa com tamanho das células crescendo em progressão aritmética a partir do canto superior esquerdo. Na realidade cada célula está dividida em dez partes em cada direção, totalizando 6.980 células de água.**

Para minimizar o problema de aumento do volume, procedeu-se a retirada das áreas de mangue, mesmo porque o modelo não poderia simular o fluxo real dessas regiões. A grade final (Figura 6.3) adotada para as simulações teve então a seção do baixo curso do rio ampliada, principalmente na desembocadura e na curva localizada próxima da latitude –

12,65°, novamente para que não ocorresse acúmulo de água a montante. Foi necessário adotar a profundidade mínima de 3 m em todo o baixo curso do rio, o que levou a um acréscimo de volume de 36% ( $1,48 \times 10^7 \text{ m}^3$ ) naquela região. A estilização do Canal do Paraguaçu, além da suavização de contornos, adotou as profundidades de 12 m e 18 m entre a Ilha do Francês e a Ilha do Cristo, sendo que para a parte final do Canal, antes da BTS, foi utilizado 25 m na área mais profunda da seção. O acréscimo de volume no Canal do Paraguaçu foi de 14% ( $3,9 \times 10^7 \text{ m}^3$ ). O canal atrás da Ilha do Cristo e os canais da Baía de Iguape nos setores Sul e Norte foram suavizados. No geral, o aumento do volume foi de 23,2% ( $1,122 \times 10^8 \text{ m}^3$  - 58% do valor do prisma de maré).



**Figura 6.3. Configuração final do estuário do Rio Paraguaçu adotada para os experimentos numéricos com o POM. Círculos indicam áreas de “estrangulamento” do fluxo.**

A grade final ficou com 7.245 células de água, com  $r$  inferior a 0,45, sendo que nas áreas de maior dinâmica, em especial no Canal do Paraguaçu, procurou-se manter  $r < 0,2$ . O valor mínimo de CFL foi estimado em 3s.

### 6.1.3.3 Forçantes

As duas forçantes principais do estuário do Rio Paraguaçu são:

- 1) Elevação da maré na borda leste (BTS), com 12 componentes harmônicas da estação S20, a saber:  $Q_1, O_1, P_1, K_1, N_2, M_2, S_2, K_2, M_3, MN_4, M_4, MS_4$ .
- 2) Descarga fluvial na borda oeste, na posição do Rio Paraguaçu em Cachoeira/São Félix.

### 6.1.3.4 Condições de contorno

Adotou-se a condição de contorno proposta por Blumberg e Kantha (1985) (BKI) para a elevação, temperatura e sal. A formulação da BKI é dada por:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + c \frac{\partial \phi}{\partial x} = -\frac{\phi}{T_f}$$

onde  $\phi$  = representa qualquer uma das variáveis prognósticas ( $\eta, U, V, T, S$ );  $c = (gH)^{1/2}$  = velocidade de fase da onda;  $T_f$  = período de tempo dentro do qual a solução numérica é levada ao seu valor de referência. Se  $T_f = 0$  não é permitido que nenhum distúrbio atravesse a fronteira; se  $T_f \rightarrow \infty$  a borda se torna transparente para distúrbios propagando-se na direção do eixo  $x$  com velocidade  $C$ .

No contorno da descarga fluvial a velocidade é especificada e a salinidade é nula.

### 6.1.3.5 Condições iniciais

A velocidade e a elevação foram consideradas nulas no tempo igual a 1. A salinidade e a temperatura adotaram uma distribuição espacial estabelecida em função da distância da desembocadura do Canal do Paraguaçu com base em dados medidos em campo, conforme apresenta a Figura 6.4. A distribuição espacial do sal e temperatura ao longo do estuário foi realizada como auxílio de sistema de informações geográficas (Figura 6.5 e Figura 6.6).

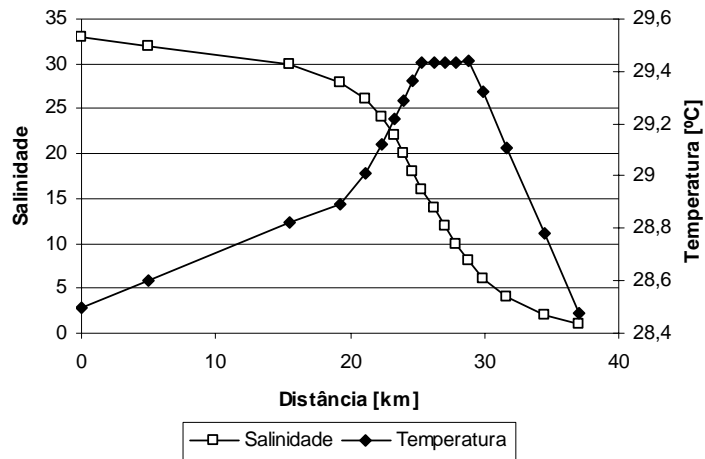


Figura 6.4. Sal e temperatura em função da distância da desembocadura. A variação foi obtida pela média do perfis hidrográficos realizados em 13/11/2001 e 27/08/2003, quando as vazões eram 13 m<sup>3</sup>/s e nula, respectivamente.

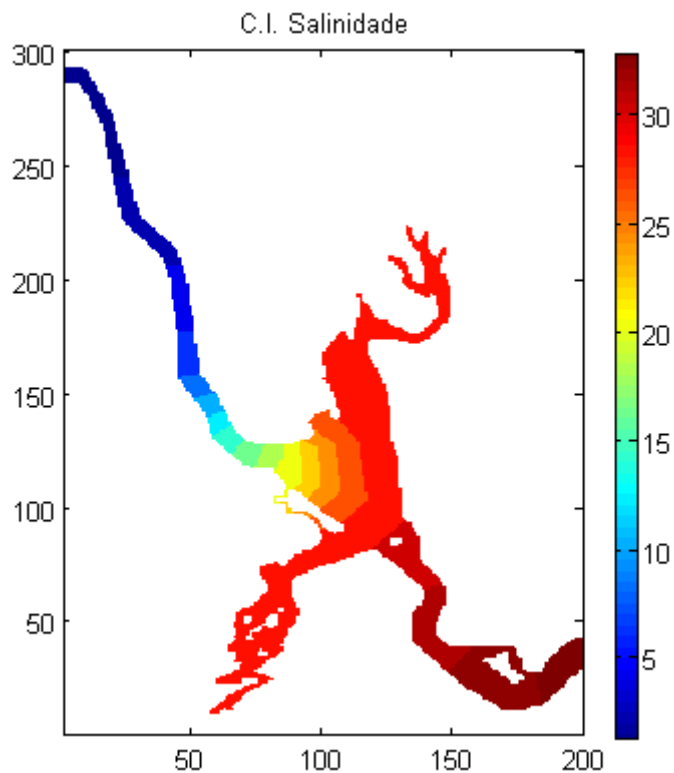
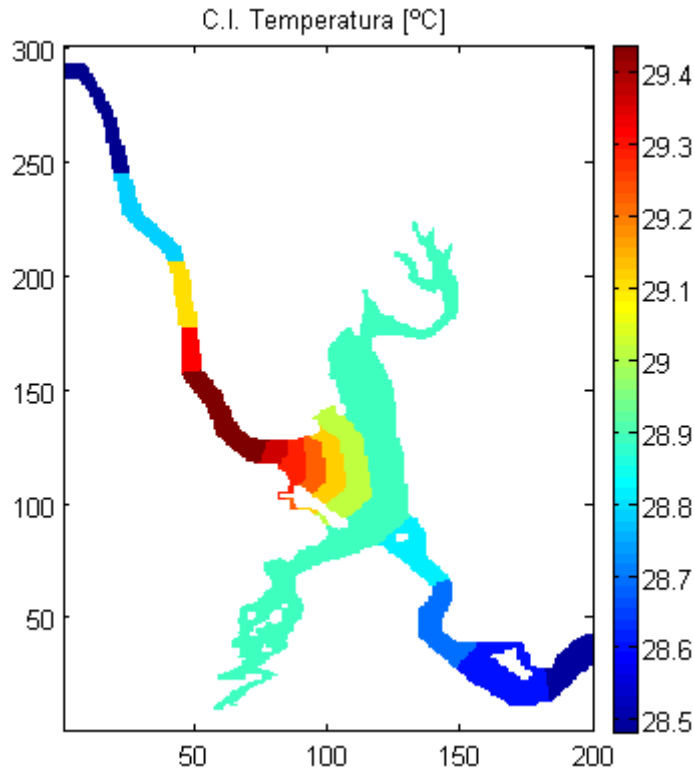


Figura 6.5. Condição inicial de distribuição espacial da salinidade no estuário. Valores homogêneos na coluna d'água. Grade de elementos em  $i(x) - 0$  a  $200$  e  $j(y) - 0$  a  $300$ .



**Figura 6.6. Condição inicial de distribuição espacial da temperatura no estuário (superfície). Grade de elementos em  $i(x) - 0$  a  $200$  e  $j(y) - 0$  a  $300$ .**

A variação da temperatura na vertical adotou um perfil logarítmico dado por:

$$T(k) = T_s \cdot e^{(Z(k) \cdot H / 500)}$$

onde:  $T(k)$  = temperatura na camada  $k$  [°C];  $T_s$  = Temperatura na camada superficial [°C];  $Z(k)$  = profundidade adimensional da camada  $k$ ;  $H$  = profundidade local [m]. Para as profundidades limites extremas do estuário, 3 m e 25 m, a variação entre a temperatura da superfície e fundo ficou em 0,1°C e 1,3°C, respectivamente.

Utilizou-se a versão de trabalho do POM (pom2k.f) do Prof. Dr. Ivan Soares/FURG, bem como as rotinas de condições de contorno por ele adaptadas.

## 6.2 CENÁRIOS

Os cenários de interesse para o entendimento da dinâmica do estuário são aqueles que não puderam ser caracterizados com os levantamentos hidrográficos em campo e envolvem as situações anteriores e posteriores à Barragem Pedra do Cavalo.

### **6.2.1 Pré-barragem**

A situação de vazão mínima na condição pré-barragem utilizará a vazão com 90% de permanência ( $Q_{90}$ ), a qual tem sido adotada como valor de referência para as outorgas na Bahia. Como o objetivo é identificar o efeito da barragem sobre o estuário, será adotada a  $Q_{90}$  afluente a barragem no período de 1986 a 2003, com valor de  $6 \text{ m}^3/\text{s}$  (definido no Capítulo 4).

Devido às alterações hidrológicas impostas pela barragem com redução das vazões médias mensais no período úmido no recôncavo (ver item 4.3.6.3), aliado à perspectiva de geração de energia elétrica pela UHE neste mesmo período, o segundo cenário pré-barragem adotará uma vazão de  $31,6 \text{ m}^3/\text{s}$ , que corresponde à vazão média mensal afluente ao reservatório nos meses de maio a julho (1986 a 2003).

Desta forma, os dois cenários pré-barragem são:

- 1) Vazão mínima ( $Q_{90}$ ) =  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
- 2) Vazão média do período úmido no recôncavo =  $31,6 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### **6.2.2 Pós-barragem**

O período pós-barragem envolve duas situações: 1) o padrão de operação da EMBASA, que ocorreu até 2004; 2) a operação da UHE Pedra do Cavalo, iniciada em 2005.

#### **6.2.2.1 Operação da EMBASA**

Além das alterações hidrológicas nos meses do período úmido no recôncavo, a operação da Barragem Pedra do Cavalo foi determinante para as mudanças nas vazões mínimas afluentes ao estuário. Neste caso, os cenários a serem considerados são:

- 3) Vazão nula, correspondendo a comportas fechadas;
- 4) Pulso de vazão, com descarga constante de  $56 \text{ m}^3/\text{s}$  durante 5 horas (de 9 às 14 horas), para representar uma vazão média de  $11,2 \text{ m}^3/\text{s}$  diária, imposta a partir de 1997.

#### **6.2.2.2 Operação da UHE**

Os cenários dos padrões operacionais da UHE são os seguintes:

- 5) Pulso de vazão, com descarga de  $78 \text{ m}^3/\text{s}$  durante 3 horas (de 18 às 21 horas), para representar uma vazão média de  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  diária, estabelecida como vazão sanitária.

- 6) Vazão de uma turbina = 78 m<sup>3</sup>/s;
- 7) Vazão de duas turbinas = 156 m<sup>3</sup>/s.

### 6.3 EXPERIMENTOS NUMÉRICOS

A estratégia adotada para os experimentos numéricos seguiu a abordagem de Brooks et al. (1999), na qual utilizam-se os campo de salinidade e temperatura observados como condição inicial e considera-se que em poucos ciclos as correntes apresentam padrões repetitivos (similares), indicando ter atingido a estabilização. Os experimentos numéricos iniciaram 3 dias (zero hora) antes do dia com resultados de interesse, sendo que o tempo de aquecimento do modelo foi de 54 horas.

Os parâmetros adotados para as simulações foram:

$A_M$  : devido a alta resolução da grade, valores muito pequenos ( $10^{-3}$ ) ocorreram e foi necessário adotar um valor mínimo, fixado em 0,5 [m/s<sup>2</sup>].

*Número de camadas*: 21, espaçadas de 0,125Z.

$C_D$  : adotou-se  $z_{ob} = 0,005$ . Os valores de  $C_D$  foram calculados até a profundidade real de 2m, ainda que a profundidade mínima da grade fosse 3m, com objetivo de melhorar a representação da direção do fluxo (valor máximo 0,03).

$umol$  : coeficiente secundário da difusão vertical . Mostrou bastante sensibilidade para a mistura vertical. Inicialmente, utilizamos  $umol = 2 \times 10^{-5}$  e a mistura ficou restrita às primeiras camadas no baixo curso do rio. O valor final adotado foi de  $2 \times 10^{-4}$ . acentuando a mistura.

$smoth$  : coeficiente de suavização = 0,5.

$C = 0,2$  (formulação de Smagorinski).

$T_f$  : demonstrou ser o parâmetro mais importante para a definição da elevação. O valor adotado foi de 9.000 para elevação e 90.000 para temperatura e salinidade. O uso de valores inferiores a 9.000 levou o modelo a “estourar” na fase de aquecimento, com acúmulo de água crescente com o tempo.

$d_{ti}$  : intervalo de tempo interno = 45s.

$d_{te}$  : intervalo de tempo externo = 1,5s.

## 6.4 RESULTADOS

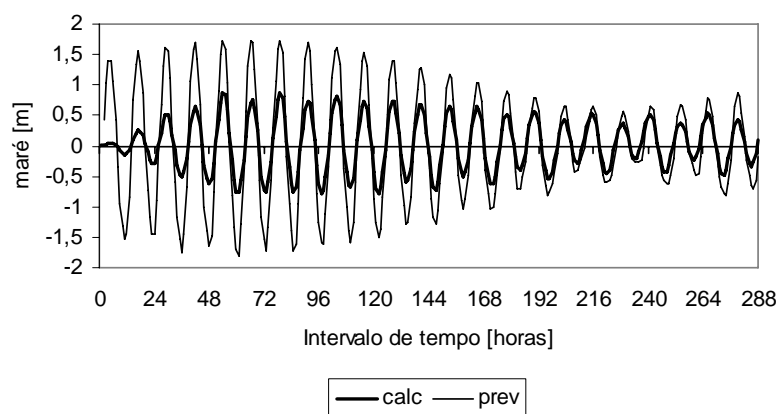
A primeira parte da apresentação dos resultados se dedica à verificação das simulações obtidas com o modelo em relação às medidas de campo. Na segunda parte serão apresentados os campos de distribuição espacial da salinidade e das correntes para os cenários de vazão.

### 6.4.1 Verificação das simulações

Os dados coletados em campo permitem verificar o desempenho das simulações numéricas através da comparação: 1) da propagação da maré; 2) da variação dos campos de corrente e salinidade ao longo de um ciclo de maré; 3) dos perfis longitudinais de salinidade na situação de preamar/baixa-mar; 4) da relação entre a extensão de penetração do sal e a vazão.

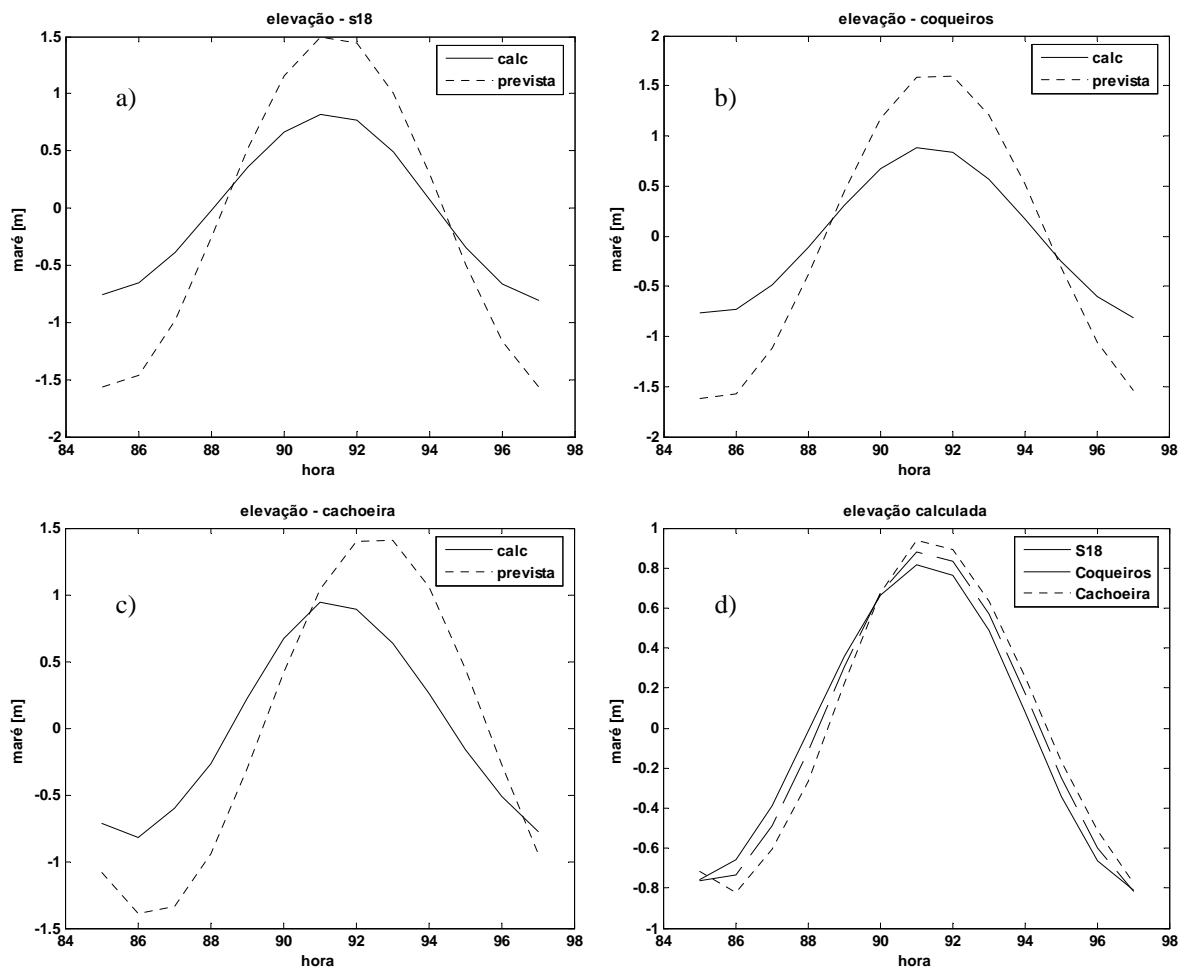
#### 6.4.1.1 Propagação da maré

De uma forma geral, a maré obtida com o modelo matemático subestimou os valores reais, sendo a diferença mais acentuada na maré de sizígia do que em quadratura (Figura 6.7). O comportamento da maré calculada pelo modelo em três estações ao longo do estuário (S18, Coqueiros e Cachoeira) em sizígia e quadratura são apresentados na Figura 6.8 e na Figura 6.9. Enquanto na sizígia a altura da maré calculada variou entre 52% e 58% da maré prevista, na quadratura a representação foi melhor, chegando a valores entre 66% e 75% (Tabela 6.1).



**Figura 6.7.** Maré prevista e calculada com o POM em S18 – 22/10 a 3/11/2003. Nas primeiras 54 horas o modelo está em fase de aquecimento.





**Figura 6.8.** Comparação da maré prevista e calculada pelo POM ao longo do estuário em maré de sizígia.

As ampliações da maré entre S18 e Coqueiros (0,16m na sizígia e 0,09m na quadratura) foram confirmadas na maré simulada pelo modelo (0,07m e 0,05m, respectivamente), porém o amortecimento de Coqueiros para Cachoeira não foi representado (-0,19m e -0,12m). Ao contrário, houve uma ampliação de 0,05m e 0,02m, respectivamente. A elevação do nível d'água calculada na preamar é maior que àquela da baixa-mar na sizígia, sendo que a situação inversa ocorre na quadratura (Tabela 6.1). Observa-se uma defasagem de uma hora na preamar da sizígia calculada em S18, enquanto que na quadratura ocorreu um atraso de uma hora na preamar calculada em S18 e em Coqueiros. A assimetria de duração ( $t_e/t_v$ ) da maré real diferenciada na sizígia e na quadratura foi representada, ainda que o intervalo horário das saídas do modelo limite a precisão dos valores obtidos (Tabela 6.1).

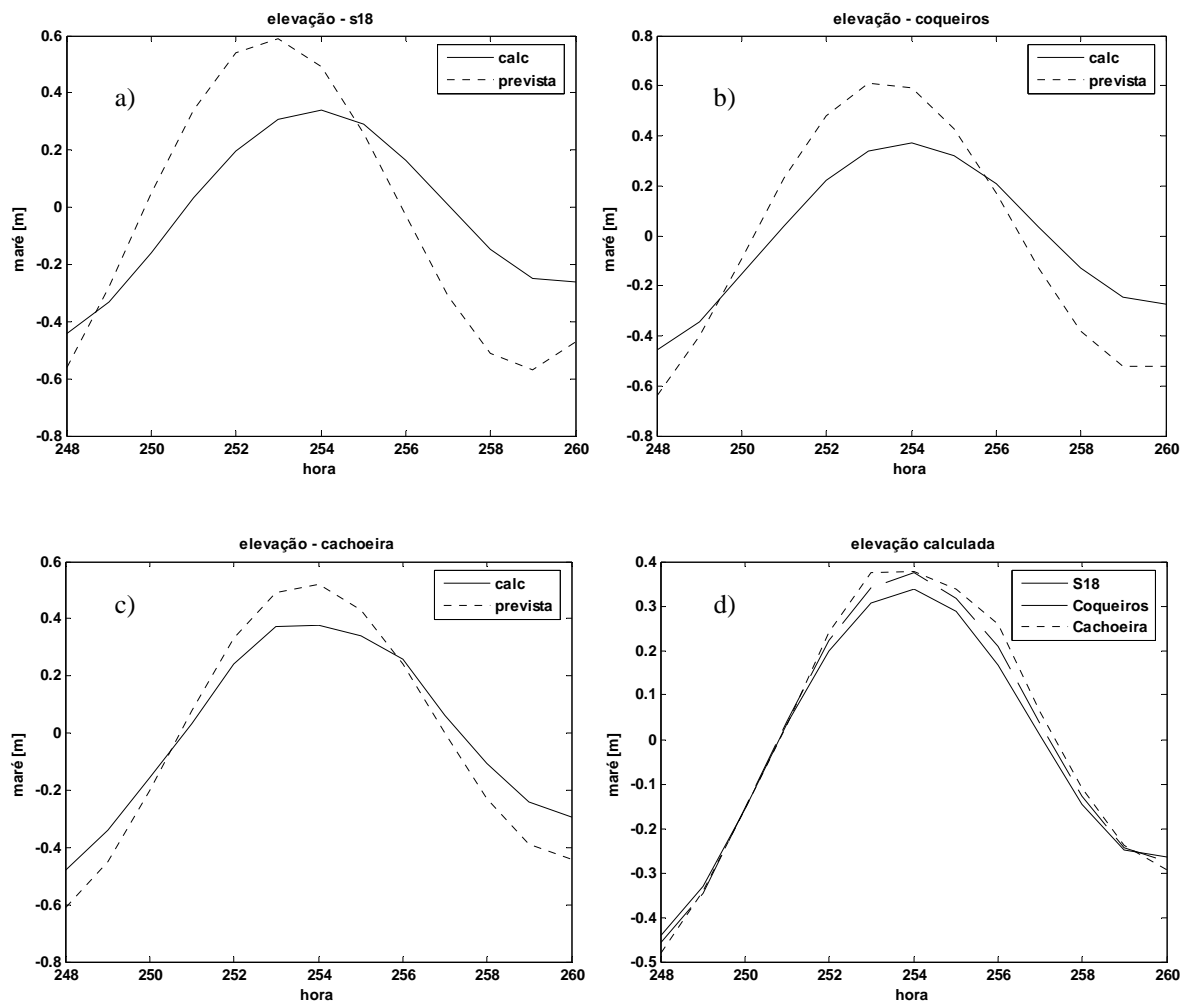


Figura 6.9. Comparação da maré prevista e calculada pelo POM em maré de quadratura.

Tabela 6.1. Comparação da maré prevista e calculada pelo POM ao longo do estuário.

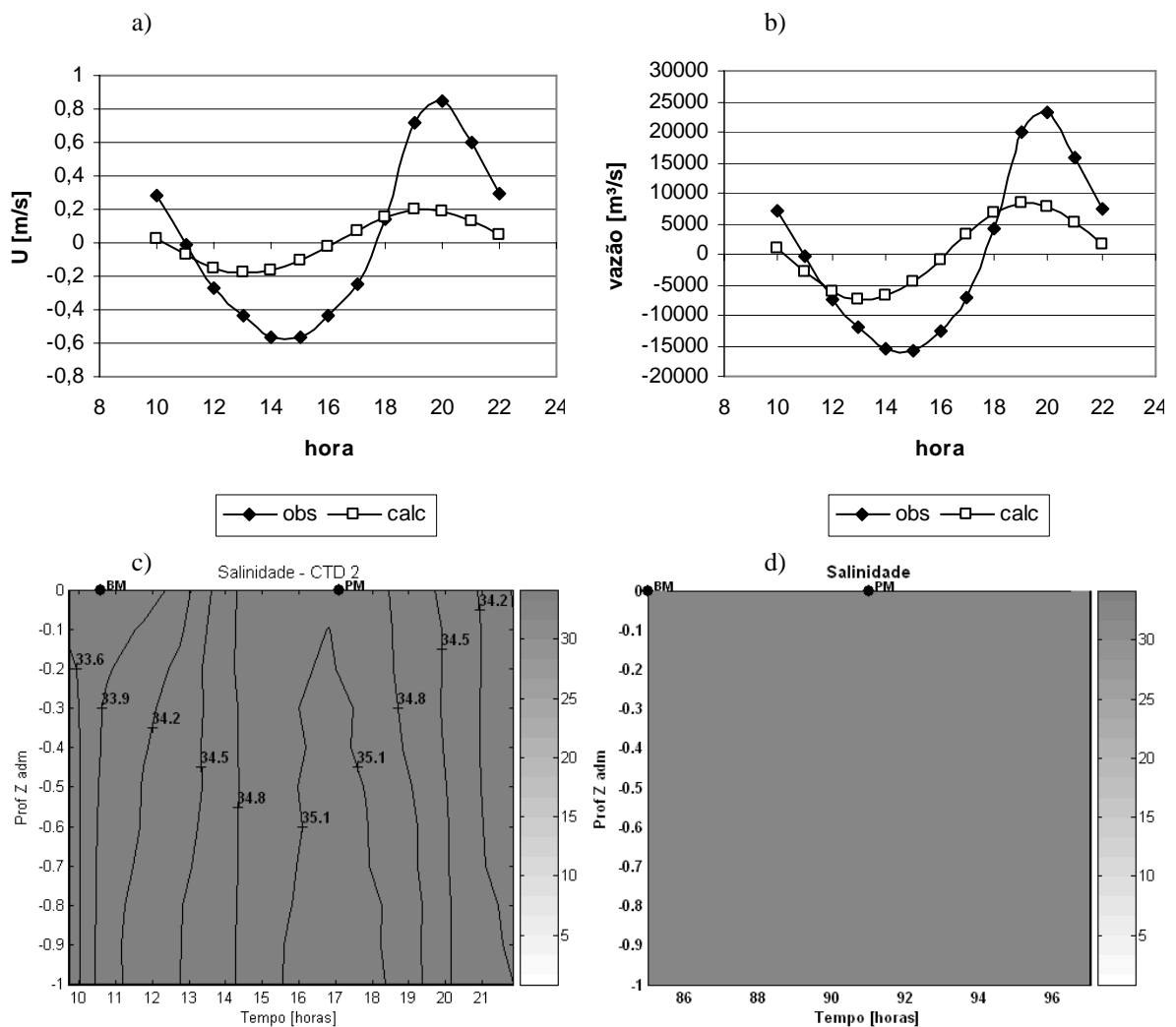
	Maré prevista		Maré calculada		Calculada/prevista			te/tv
	altura [m]	amplificação [m]	altura [m]	amplificação [m]	Altura	Baixa-mar	Preamar	
<i>Sizígia - 26/10/2003</i>								
S18	3,06		1,62		53%	48%	54%	1,00
Coqueiros	3,22	0,16	1,69	0,07	52%	47%	51%	1,00
Cachoeira	3,03	-0,19	1,76	0,07	58%	66%	63%	0,83
<i>Quadratura - 02/11/2003</i>								
S18	1,16		0,78		67%	79%	69%	1,16
Coqueiros	1,25	0,09	0,83	0,05	66%	71%	63%	1,16
Cachoeira	1,13	-0,12	0,85	0,02	75%	78%	71%	1,00

#### 6.4.1.2 Seções transversais – velocidade, vazão e salinidade.

##### 6.4.1.2.1 Canal do Paraguaçu

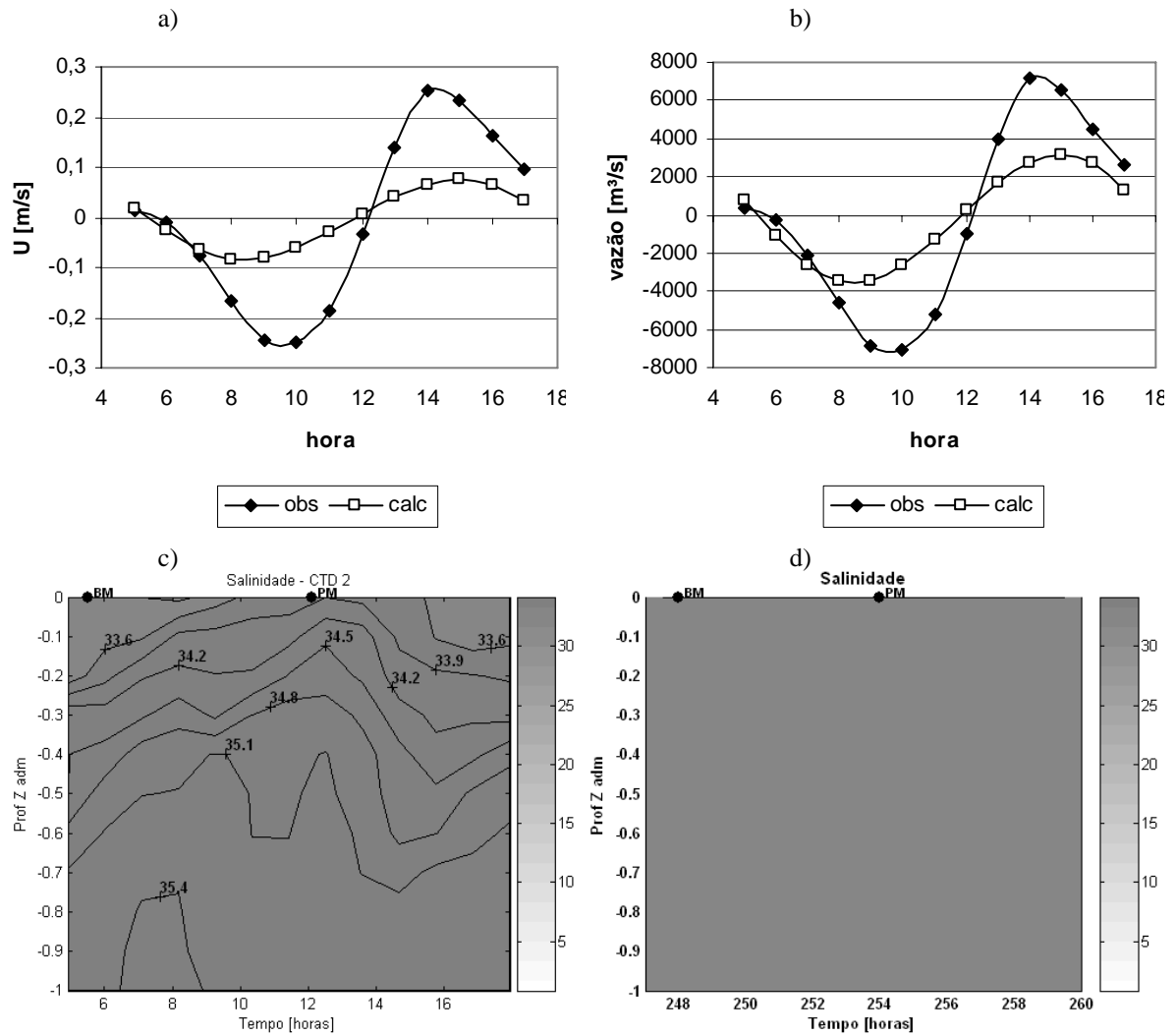
No Canal do Paraguaçu (seção de monitoramento I) foram utilizados os dados da maré de sizígia (26/10/2003) e quadratura (02/11/2003) com vazão fluvial de 15 m<sup>3</sup>/s. O cenário de

simulação equivalente é de operação da EMBASA (pulso de vazão de 56 m<sup>3</sup>/s durante 5 horas) (cenário 4). Em maré de sizígia a velocidade máxima na enchente e vazante (-0,175m/s e 0,20m/s) correspondeu a somente 23,5% e 31,2% das velocidades observadas, respectivamente (Figura 6.10a). Quando avaliados em termos da vazão, os valores máximos calculados aumentaram proporcionalmente, passando para 35,7% dos valores observados na vazante e 45,8% na enchente (7.278 m<sup>3</sup>/s e -8.280 m<sup>3</sup>/s) (Figura 6.10b). Tal fato se deve a uma compensação resultante do aumento da área da seção transversal da grade de simulação. O modelo não reproduziu a variação de salinidade observada de 1,5 ao longo do ciclo de maré. O campo de salinidade calculado manteve-se em 33, com uma coluna d'água bem misturada (Figura 6.10c,d).



**Figura 6.10. Comparação dos resultados obtidos com o POM e os valores medidos no ciclo de maré de sizígia de 26/10/2003 no Canal do Paraguaçu – seção I. Velocidade (a), vazão (b) , salinidade observada (c) e salinidade calculada (d).**

Em maré de quadratura, a velocidade máxima na enchente e vazante (-0,084m/s e 0,076m/s) correspondeu a 30,4% e 33,9% das velocidades observadas, respectivamente (Figura 6.11a). Quando avaliados em termos da vazão, os valores calculados aumentaram proporcionalmente, passando para 44,3% na vazante e 49,3% na enchente (3.171 m<sup>3</sup>/s e -3.478 m<sup>3</sup>/s) (Figura 6.11b). O modelo não reproduziu a estrutura vertical da salinidade observada durante o ciclo (de 33,6 a 34,5), mantendo-a em 33 em uma coluna bem misturada (Figura 6.11c,d).

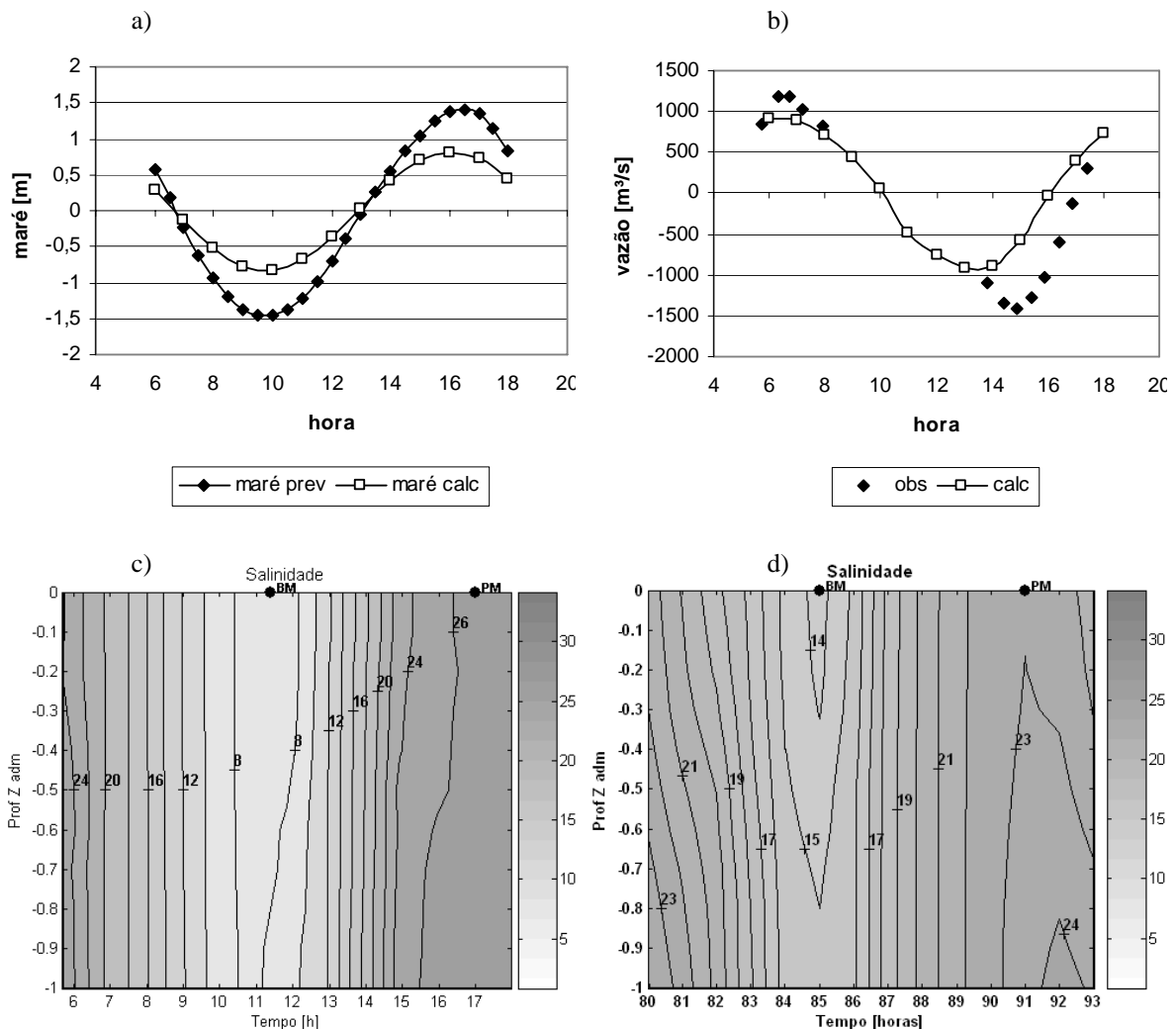


**Figura 6.11. Comparação dos resultados obtidos com o POM e os valores medidos no ciclo de maré de quadratura de 02/11/2003 no Canal do Paraguçu – seção I. Velocidade (a), vazão (b), salinidade observada (c) e salinidade calculada (d).**

#### 6.4.1.2.2 Baixo curso do rio

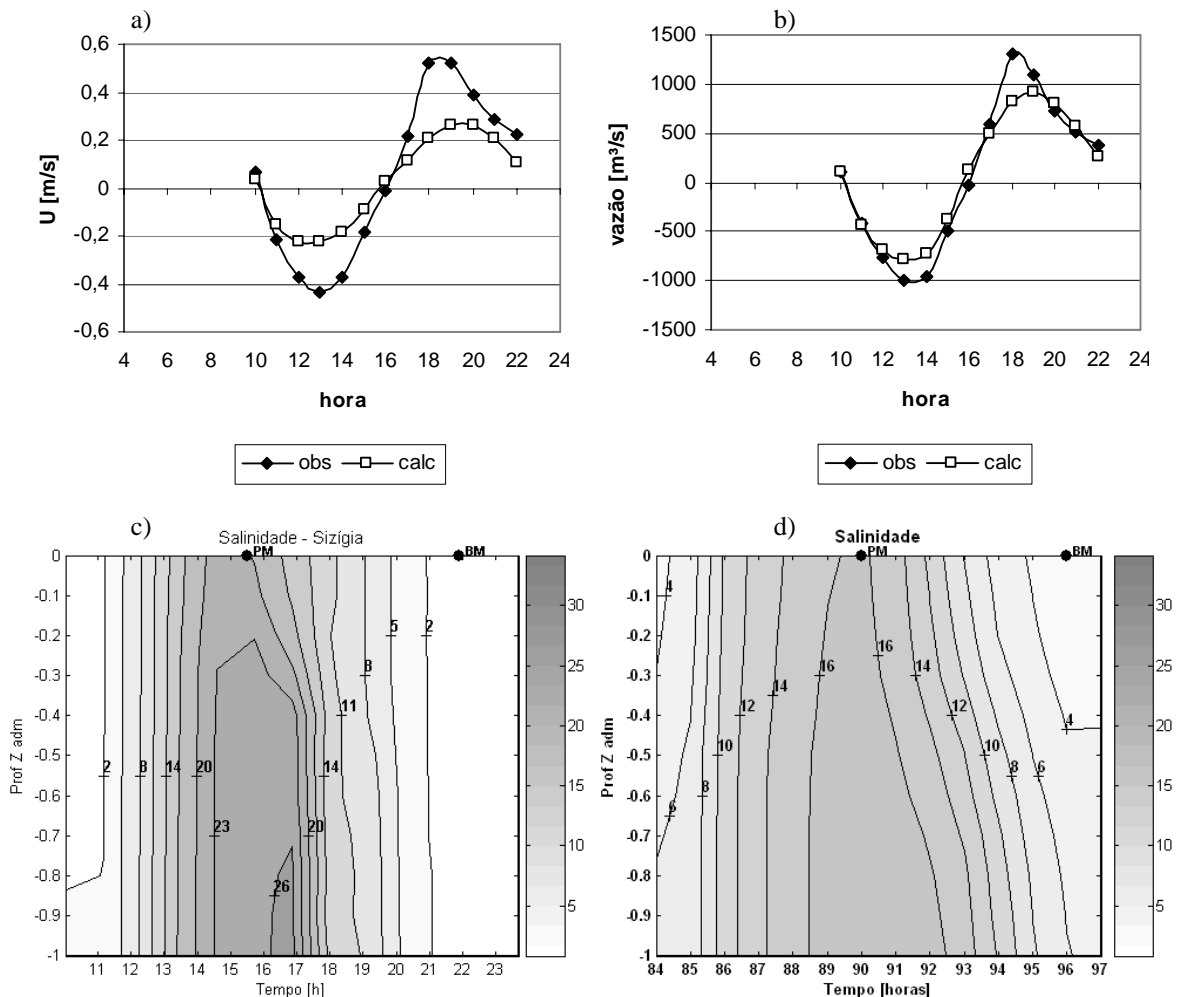
No baixo curso do Rio Paraguçu (seção de monitoramento VI) foram utilizados os dados de maré de sizígia com vazões fluviais nula (27/08/2003) e de 78 m<sup>3</sup>/s (22/05/2005).

O cenário de simulação equivalente ao monitoramento do dia 27/08/2003 é o número 3 - operação da EMBASA (vazão nula - comportas fechadas). Em maré de sizígia a velocidade máxima calculada na enchente e vazante (-0,27m/s e 0,28m/s) correspondeu a 47,6% e 52,8% das velocidades observadas, respectivamente (Figura 6.12a). Quando avaliados em termos da vazão, os valores calculados aumentaram proporcionalmente, passando para 76,5% na vazante e 65,7% na enchente (912 m<sup>3</sup>/s e -921 m<sup>3</sup>/s) (Figura 6.12b). Tal fato se deve a uma compensação resultante do aumento da área da seção transversal e do volume da grade de simulação no trecho do baixo curso. O modelo reproduziu a variação de salinidade observada durante o ciclo, com um perfil bastante homogêneo na vertical, porém os extremos dos valores das isohalinas (14 e 24) ficaram aquém daqueles observados em campo (8 e 26) (Figura 6.12c,d).



**Figura 6.12.** Comparação dos resultados obtidos com o POM e os valores medidos no ciclo de maré de sizígia de 27/08/2003 no baixo curso do rio – seção VI. Descarga fluvial nula. Velocidade (a), vazão (b), salinidade observada (c) e salinidade calculada (d).

O cenário de simulação equivalente ao monitoramento do dia 22/05/2005 é o número 5 - operação da UHE (vazão de  $78 \text{ m}^3/\text{s}$  – 1 turbina). Em maré de sizígia a velocidade máxima calculada na enchente e vazante ( $-0,22\text{m/s}$  e  $0,27\text{m/s}$ ) correspondeu a 51,1% e 50,9% das velocidades observadas, respectivamente (Figura 6.13a). Quando avaliados em termos da vazão, os valores calculados aumentaram proporcionalmente, passando para 71,1% na vazante e 78,1% na enchente ( $926 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $-783 \text{ m}^3/\text{s}$ ) (Figura 6.13b). Devido à elevação da maré na baixa-mar ter sido mais subestimada do que a preamar (Tabela 6.1), a vazão máxima de vazante calculada foi menor em termos percentuais. O modelo reproduziu a variação de salinidade observada durante o ciclo, com um perfil bastante homogêneo na vertical, porém os extremos dos valores das isohalinas (4 e 18) ficaram aquém daqueles observados em campo (0 e 26) (Figura 6.13c,d). Além disso, o gradiente de salinidade de  $6\text{psu}$  medido próximo da preamar não foi representado na estrutura obtida com o modelo.



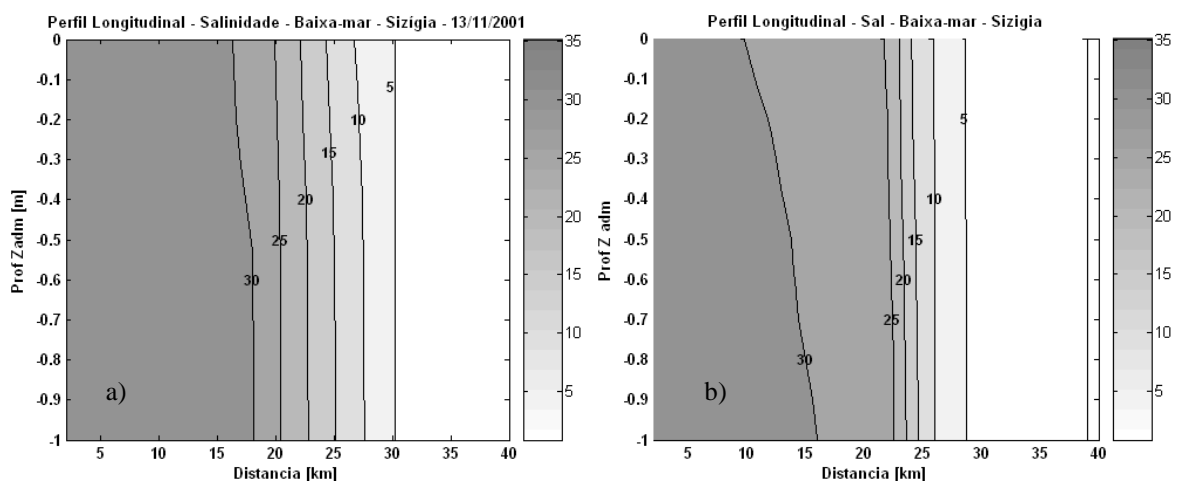
**Figura 6.13.** Comparação dos resultados obtidos com o POM e os valores medidos no ciclo de maré de sizígia de 22/05/2005 no baixo curso do rio – seção VI. Descarga fluvial de  $78 \text{ m}^3/\text{s}$ . Velocidade (a), vazão (b), salinidade observada (c) e salinidade calculada (d).

### 6.4.1.3 Perfis longitudinais – salinidade

#### 6.4.1.3.1 Rio e Canal do Paraguaçu

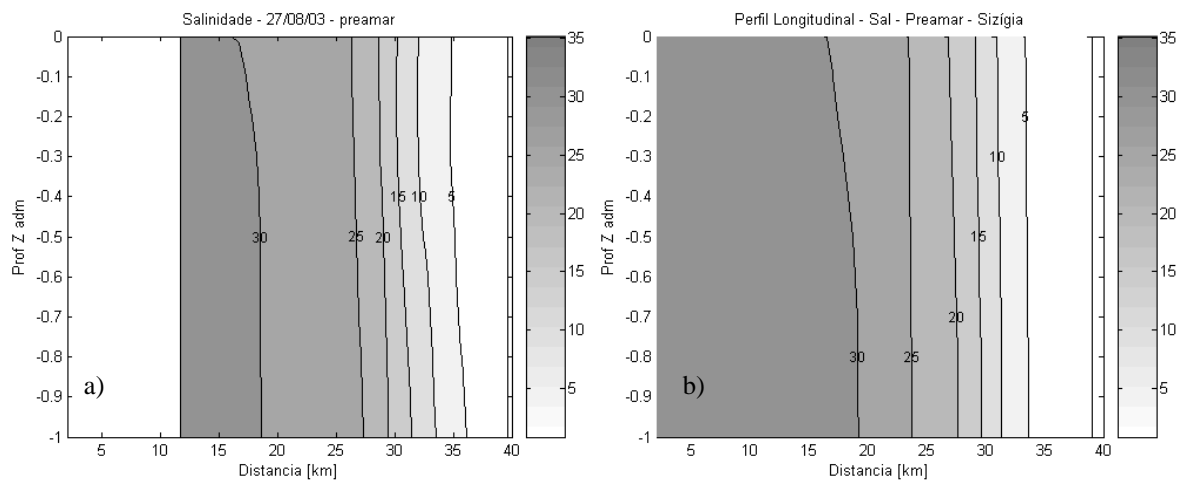
Dos perfis medidos ao longo do eixo longitudinal do estuário, três podem ser comparados com a modelagem: a) 13/11/2001 – vazão 13 m<sup>3</sup>/s – maré de sizígia, compatível com o cenário 4); b) 27/08/2003 – vazão nula – maré de sizígia, compatível com o cenário 3); c) 19/11/2001 – vazão de 58 m<sup>3</sup>/s – transição para maré de quadratura, compatível com cenário 6).

Em todos os perfis simulados houve uma subestimação na penetração do sal. Em comparação com os perfil de 13/11/2001 (Figura 6.14a), o perfil simulado para a baixa-mar de sizígia e vazão de 11,2 m<sup>3</sup>/s mostrou a isohalina de 5 no km 28,7 (Figura 6.14b), 1,7 km à jusante da sua posição observada. O gradiente na Baía de Iguape (km 20 a 25) foi mais intenso no perfil simulado, com a salinidade variando de 4 psu a mais que o observado.



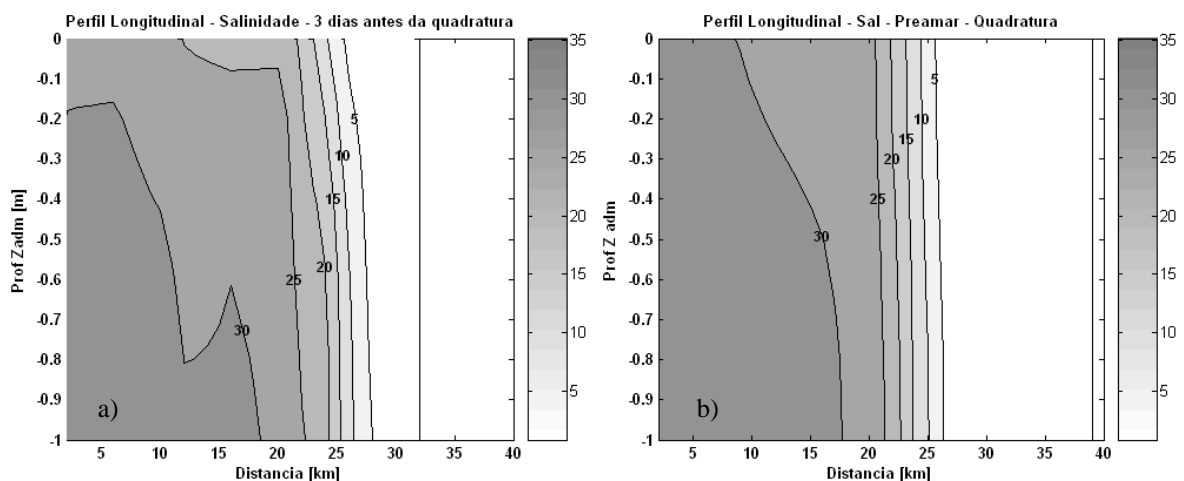
**Figura 6.14.** Perfis longitudinais de sal no estuário do Rio Paraguaçu. Observado em 13/11/2001 – sizígia – vazão de 13 m<sup>3</sup>/s (a) e simulado (b).

Defasagem espacial semelhante ocorreu na preamar de sizígia com vazão nula, quando a isohalina de 5 no perfil medido se posicionou 1,6 km a montante (Figura 6.15a) em relação a posição simulado para esta mesma isohalina (Figura 6.15b).



**Figura 6.15. Perfis longitudinais de sal no estuário do Rio Paraguáçu. Observado em 27/08/2003 – sizígia – vazão nula (a) e simulado (b).**

O perfil de 19/11/2001, quando a vazão fluvial era de  $58 \text{ m}^3/\text{s}$  e a maré três dias antes da quadratura, tem a condição mais próxima da simulação com vazão  $78 \text{ m}^3/\text{s}$ . No perfil medido a posição da isohalina de 5 estava no km 27,2 (Figura 6.16a), tendo o modelo previsto a posição desta isohalina no km 26 (Figura 6.16b). A extensão da área de gradiente de salinidade entre 5 e 25 (cerca de 5 km) medida e simulada foram equivalentes. No entanto, a salinidade simulada pelo modelo não conseguiu reproduzir a inclinação das isohalinas, ou seja, a mistura vertical simulada foi maior que a observada.



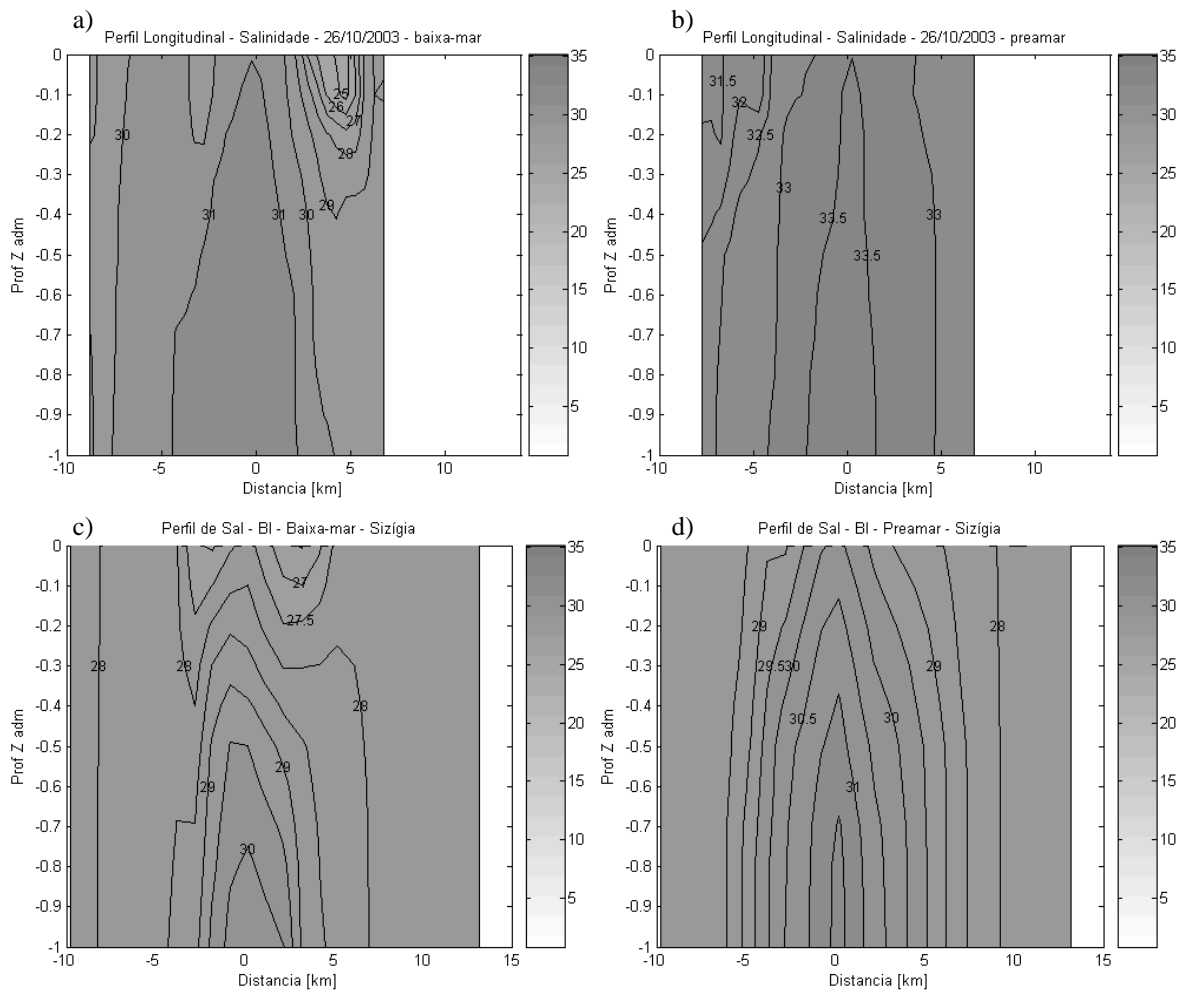
**Figura 6.16. Perfis longitudinais de sal no estuário do Rio Paraguáçu. Observado em 19/11/2001 – transição para quadratura – preamar -vazão de  $58 \text{ m}^3/\text{s}$  (a) e simulado – vazão de  $78 \text{ m}^3/\text{s}$  - quadratura (b).**



#### 6.4.1.3.2 Baía de Iguape

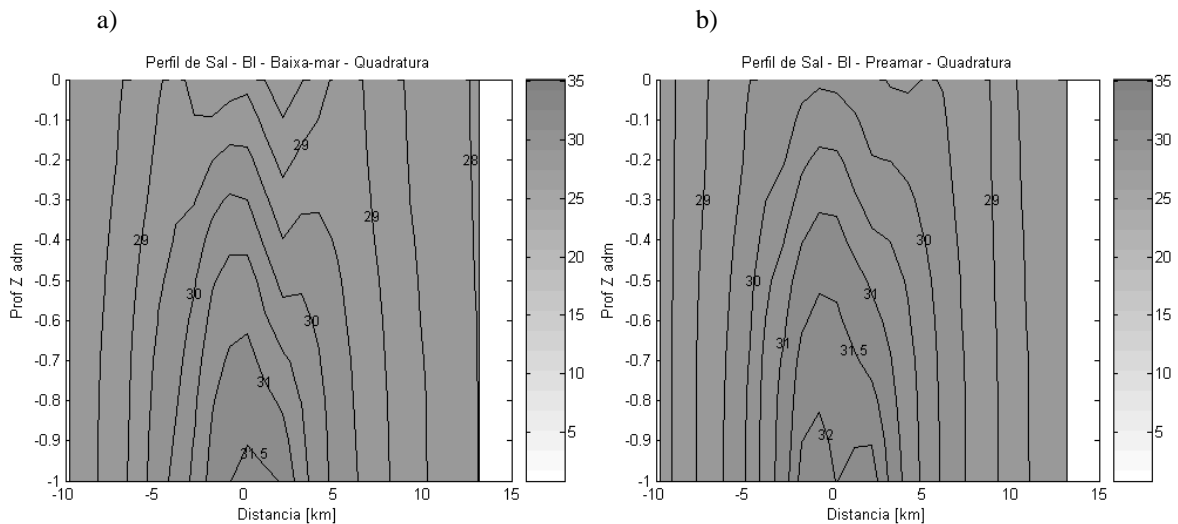
Na Baía de Iguape somente poderão ser utilizados os perfis ao longo dos canais dos setores Norte e Sul medidos em maré de sizígia e quadratura com vazão fluvial de  $15,6 \text{ m}^3/\text{s}$  dos dias 26/10/2003 e 02/11/2003.

O perfil médio na baixa-mar do dia 26/10/2003 mostra claramente a descarga fluvial na Baía de Iguape (km 5) onde a isohalina mínima foi de 25 (Figura 6.17a). No perfil da simulação essa característica foi representada, porém com a isohalina mínima de 27 (Figura 6.17b) e uma diluição maior do sal em toda a camada superficial entre os km -3 e 3 (setor central da BI). Na preamar, como indicado nos perfis do eixo longitudinal do estuário, a penetração do sal foi menor na simulação (28 a 31) do que a observada (31,5 a 33,5).



**Figura 6.17.** Perfis longitudinais de sal nos canais dos setores Norte e Sul da Baía de Iguape – 26/10/2003 – maré de sizígia e vazão de  $15,6 \text{ m}^3/\text{s}$ . Perfil da baixa-mar observado (a) e simulado (c); perfil da preamar observado (b) e simulado (d). Distâncias negativas correspondem ao canal do setor Sul, enquanto que as distâncias positivas são no canal do setor Norte.

Os perfis da maré de quadratura, com vazão de  $15,6 \text{ m}^3/\text{s}$ , no dia 02/11/2001 somente foram medidos na camada superficial (até cerca de 3m) (Anexo 2). Nessa situação, na baixa-mar os valores de salinidade variaram entre 28 e 30, enquanto que na preamar ficaram entre 31 e 33. Os perfis simulados mostraram valores de salinidade compatíveis, com valores entre 28,5 e 31 na baixa-mar (Figura 6.18a) e entre 28,5 e 32 na preamar (Figura 6.18b). Novamente, na preamar a penetração do sal foi menor.

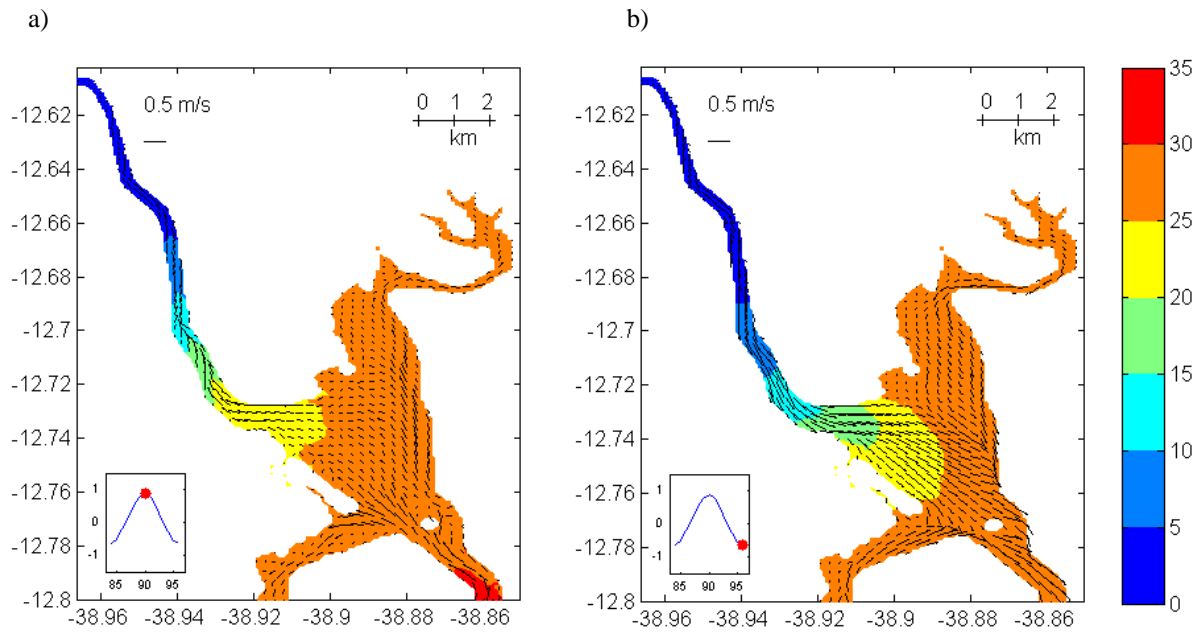


**Figura 6.18.** Perfis longitudinais de sal nos canais dos setores Norte e Sul da Baía de Iguape – 02/11/2003 – maré de quadratura e vazão de  $15,6 \text{ m}^3/\text{s}$ . Perfil observado na baixa-mar (a) e preamar (b). Distâncias negativas = canal do setor Sul e distâncias positivas = no canal do setor Norte.

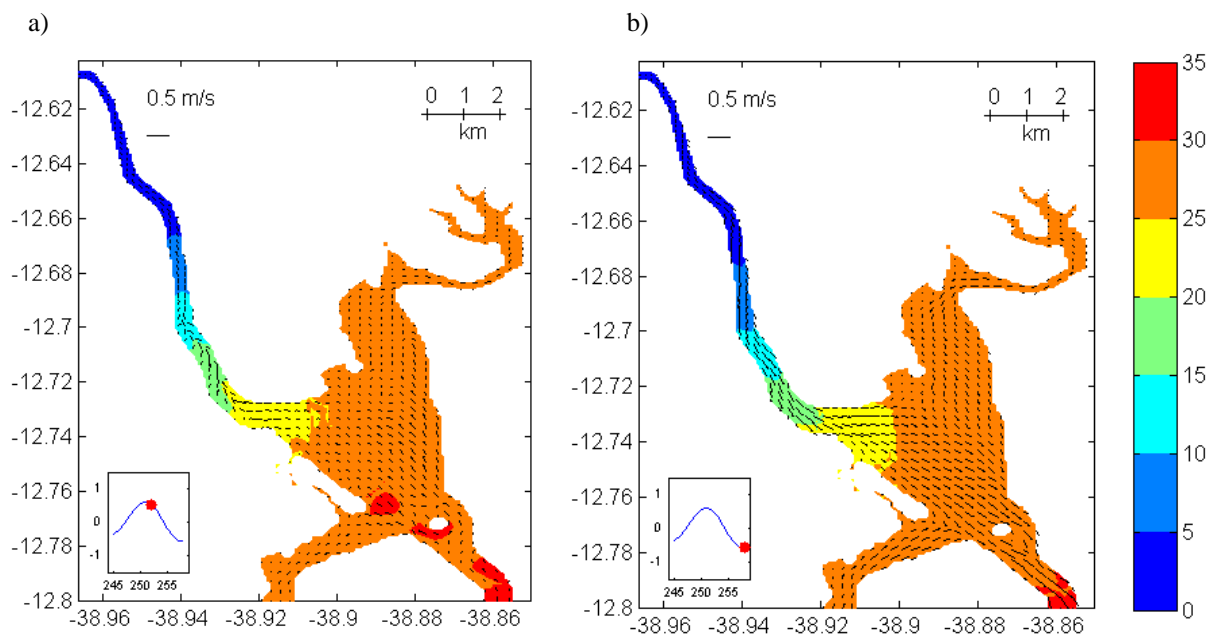
## 6.4.2 Distribuição espacial do sal no baixo curso do rio e Baía de Iguape

### 6.4.2.1 Cenário 1 - vazão natural $Q_{90} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$

Com a vazão mínima de  $6 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $Q_{90}$ ), a distribuição da salinidade na preamar (na entrada do baixo curso do rio) da maré de sizígia (Figura 6.19) e de quadratura (Figura 6.20) apresenta a zona de mistura restrita ao baixo curso do rio e início da BI. Na baixa-mar, a zona de mistura recua, e em sizígia a isohalina de 5 passa do km 33 para 29, ocorrendo salinidade menor que 20 na BI abaixo da desembocadura do rio (Figura 6.19). Na quadratura, as águas com salinidade menor que 20 estão acima da desembocadura do rio (Figura 6.20).



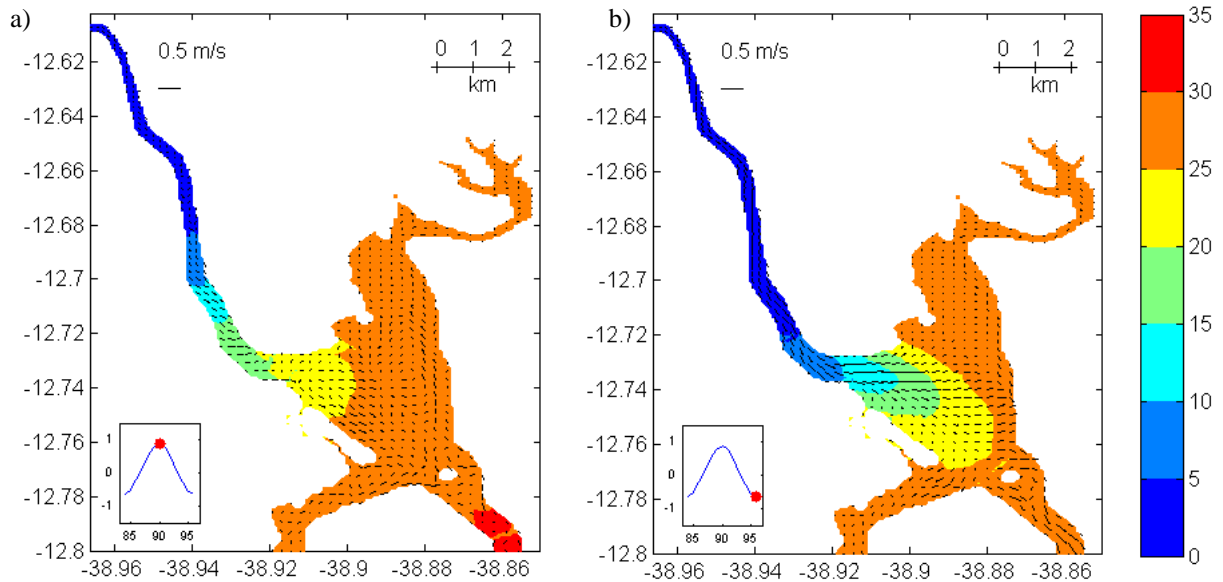
**Figura 6.19. Distribuição de sal e campo de correntes na superfície – sizigia – preamar (a) e baixa-mar (b) na entrada do baixo curso do rio Paraguaçu – Cenário 1**



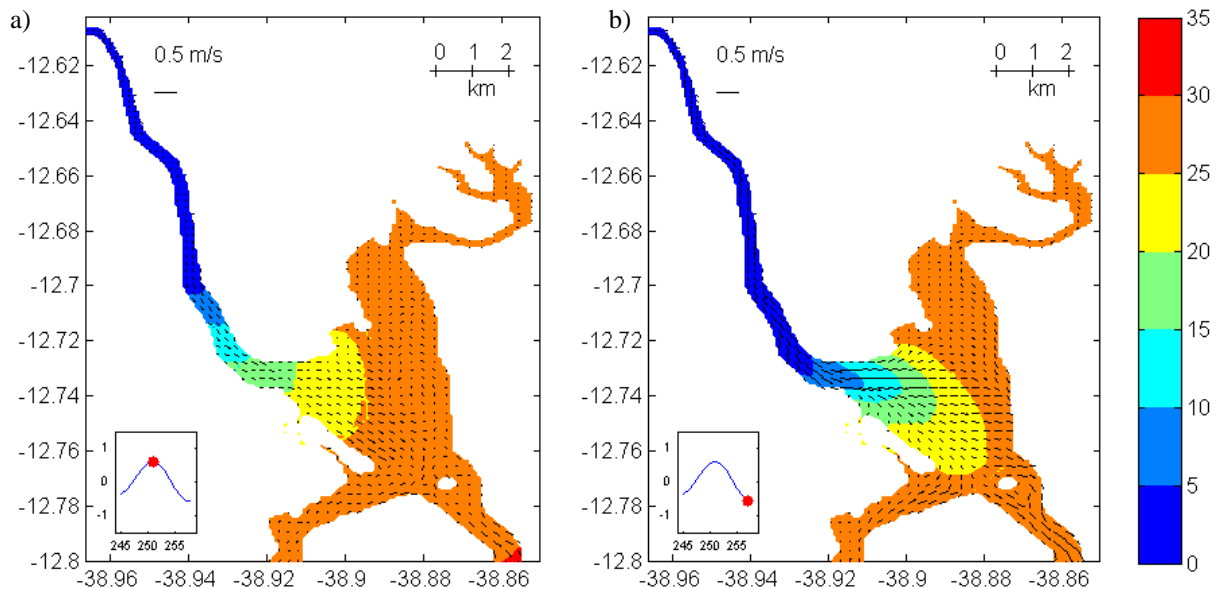
**Figura 6.20. Distribuição de sal e campo de correntes na superfície – quadratura – preamar (a) e baixa-mar (b) na entrada do baixo curso do rio Paraguaçu – Cenário 1.**

#### 6.4.2.2 Cenário 2 - vazão natural de inverno = 31 m<sup>3</sup>/s

A vazão do cenário de inverno (31m<sup>3</sup>/s) faz com que a penetração do sal recue em cerca de 2 km em comparação com a vazão de 6m<sup>3</sup>/s, com a isohalina de 5 se posicionando em torno do km 27 na baixa-mar tanto da maré de sizígia (Figura 6.21) quanto de quadratura (Figura 6.22), um forte gradiente de salinidade ocorre na região da BI central.



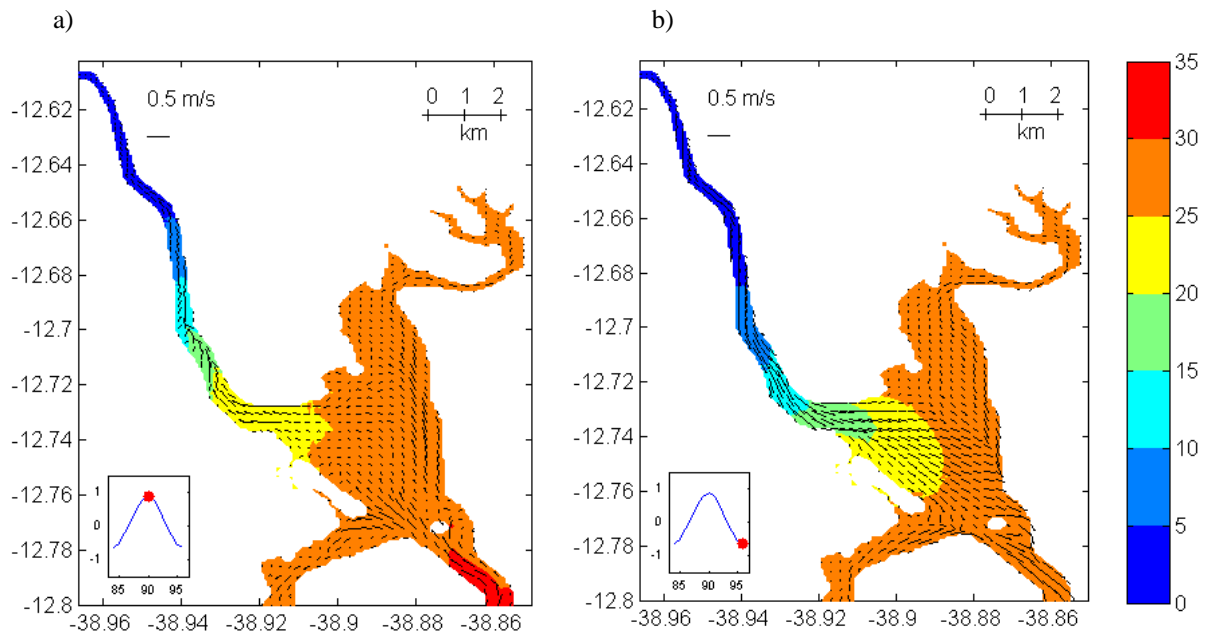
**Figura 6.21.** Distribuição de sal e campo de correntes na superfície – sizígia – preamar (a) e baixa-mar (b) na entrada do baixo curso do rio Paraguaçu – Cenário 2.



**Figura 6.22.** Distribuição de sal e campo de correntes na superfície – quadratura – preamar (a) e baixa-mar (b) na entrada do baixo curso do rio Paraguaçu – Cenário 2.

#### 6.4.2.3 Cenário 3 - vazão nula – comporta fechada

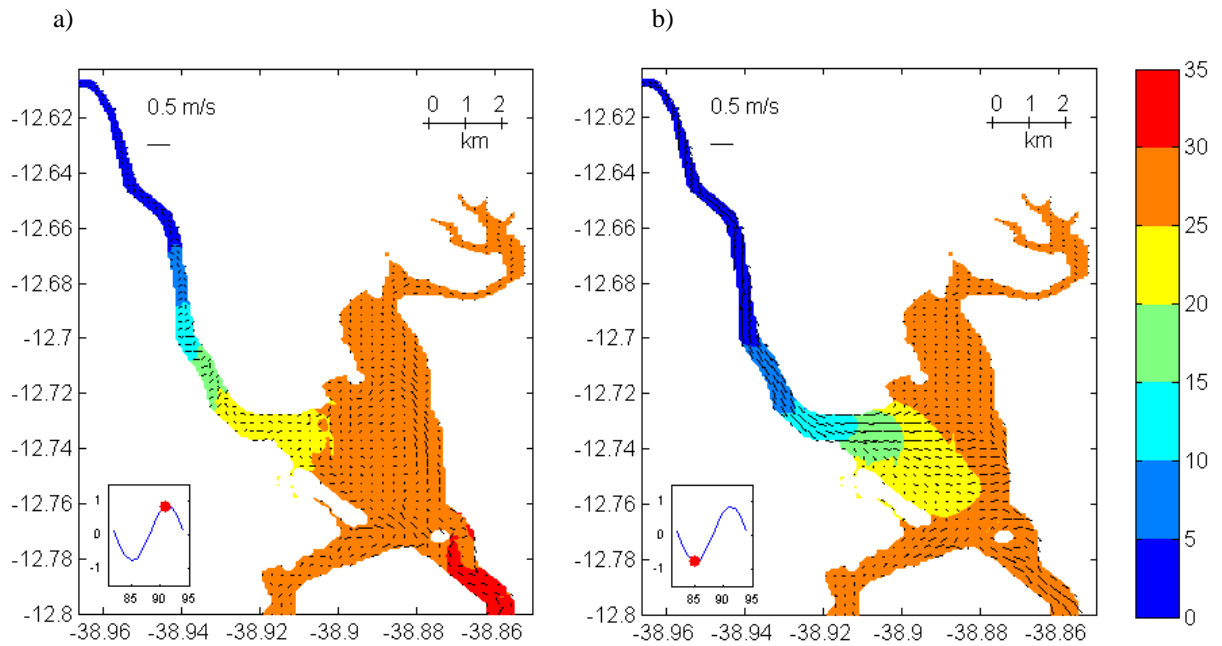
O cenário 3, que simula o fechamento das comportas, impedindo a entrada de água doce no estuário, mostra uma configuração de distribuição de sal no estuário na maré de sizígia (Figura 6.23) semelhante àquela do Cenário 1- vazão mínima de  $6\text{m}^3/\text{s}$  (Figura 6.19).



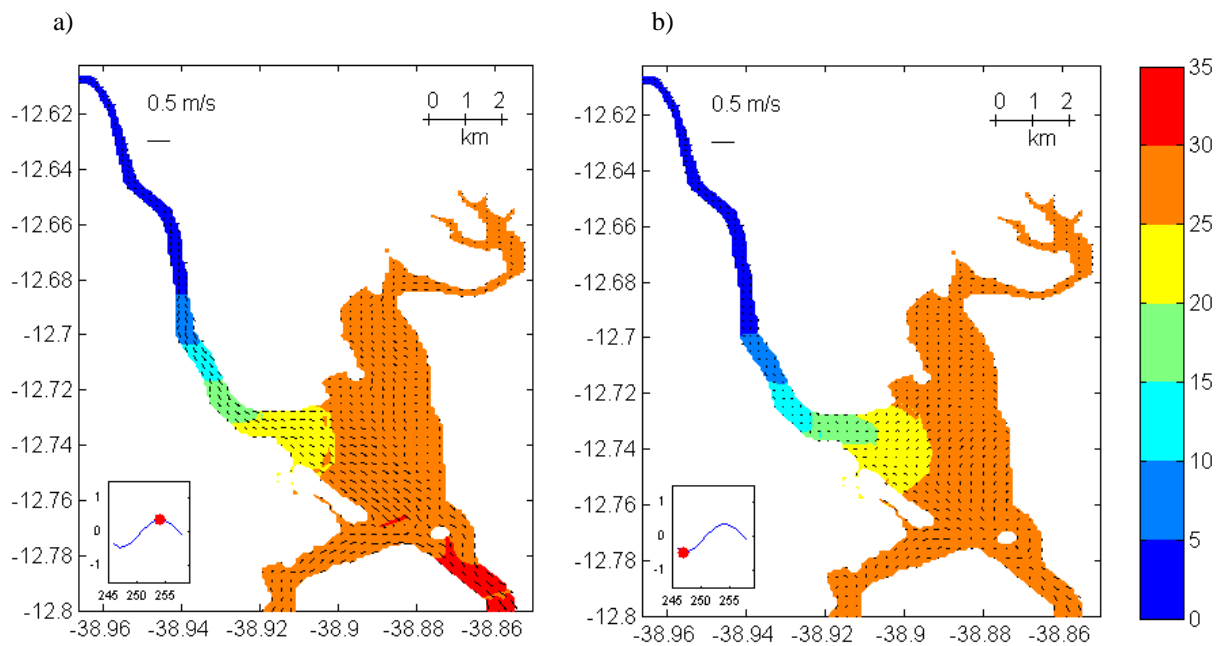
**Figura 6.23. Distribuição de sal e campo de correntes na superfície – sizígia – preamar (a) e baixa-mar (b) na entrada do baixo curso do rio Paraguçu – Cenário 3.**

#### 6.4.2.4 Cenário 4 - vazão mínima EMBASA = $11,2\text{m}^3/\text{s}$ ( $56\text{m}^3/\text{s}$ de 9 às 14 horas)

O cenário 4 simula a operação de abertura da comporta da barragem liberando  $56\text{m}^3/\text{s}$  durante 5 horas (de 9 às 14 horas), mostra uma configuração de distribuição da sal no estuário na maré de sizígia (Figura 6.24 e Figura 6.25) bem semelhante àquela da vazão mínima de  $6\text{m}^3/\text{s}$  (Figura 6.19).



**Figura 6.24. Distribuição de sal e campo de correntes na superfície – sizígia – preamar (a) e baixa-mar (b) na entrada do baixo curso do rio Paraguaçu – Cenário 4.**

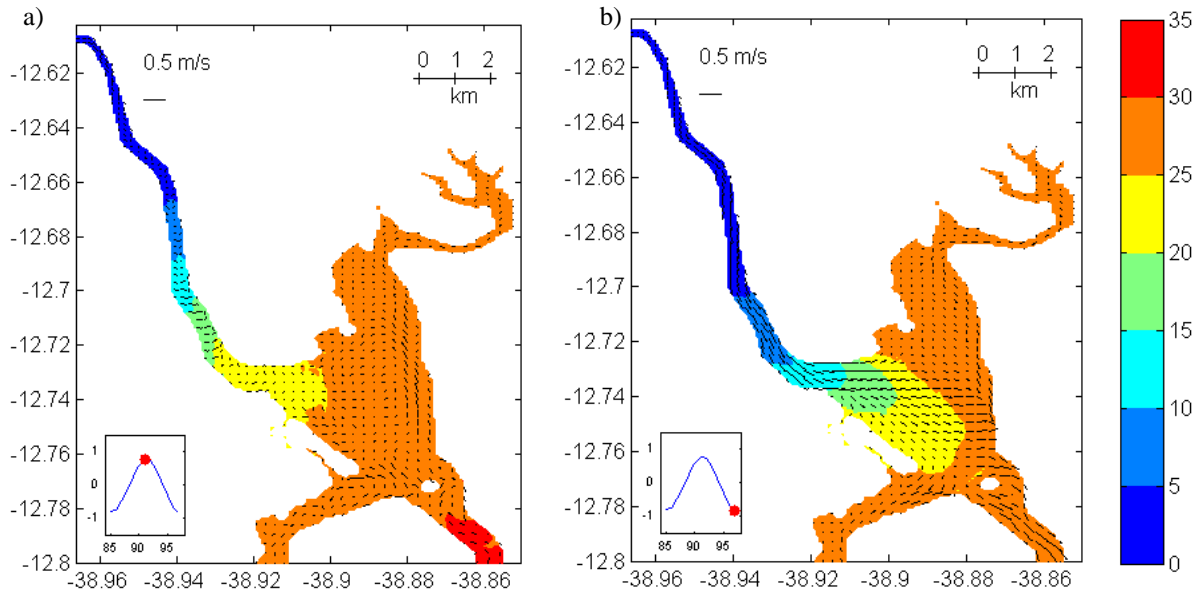


**Figura 6.25. Distribuição de sal e campo de correntes na superfície – quadratura – preamar (a) e baixa-mar (b) na entrada do baixo curso do rio Paraguaçu – Cenário 4.**

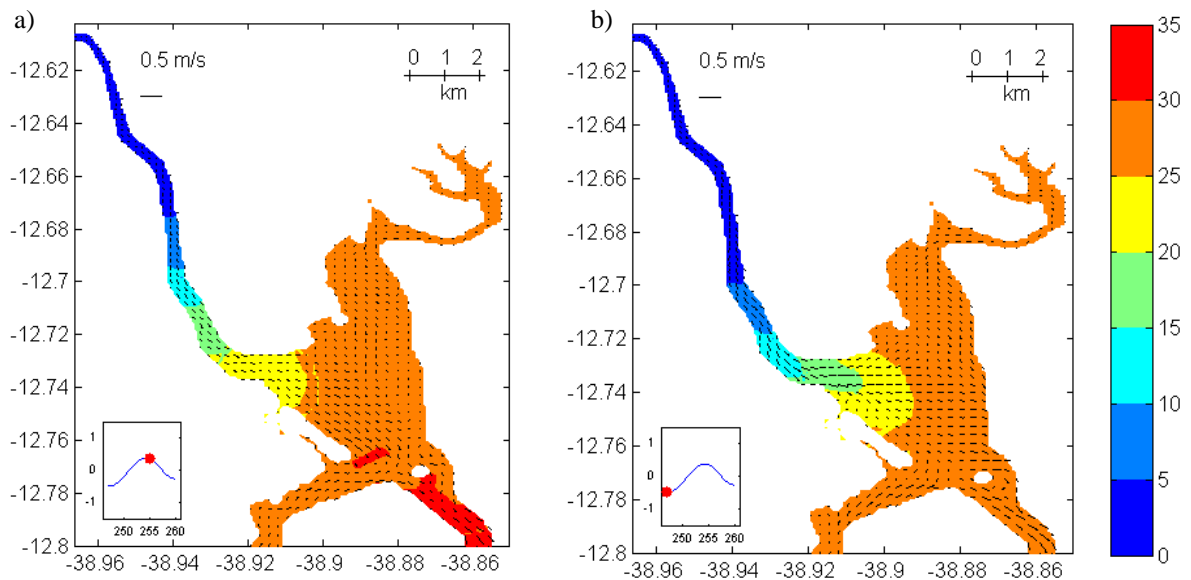
**6.4.2.5 Cenário 5 - vazão mínima UHE = 10m<sup>3</sup>/s (78m<sup>3</sup>/s de 18 às 21 horas)**

O cenário de simulação da vazão sanitária adotada pela UHE de 78m<sup>3</sup>/s, em geral liberada no horário de alta demanda do sistema elétrico, entre 18 e 21 horas, mostra um recuo

importante da penetração do sal na baixa-mar de sizígia e quadratura em relação ao pulso de vazão de operação da EMBASA. Embora a posição da isohalina de 5 seja praticamente a mesma (km 28,7 na baixa-mar de sizígia), as águas com salinidade maior que 20 se expandem na BI central tanto na sizígia quanto na quadratura (Figura 6.26 e Figura 6.27) em comparação com a configuração do pulso de operação da EMBASA (Figura 6.24 e Figura 6.25).



**Figura 6.26. Distribuição de sal e campo de correntes na superfície – sizígia – preamar (a) e baixa-mar (b) na entrada do baixo curso do rio Paraguaçu – Cenário 5.**



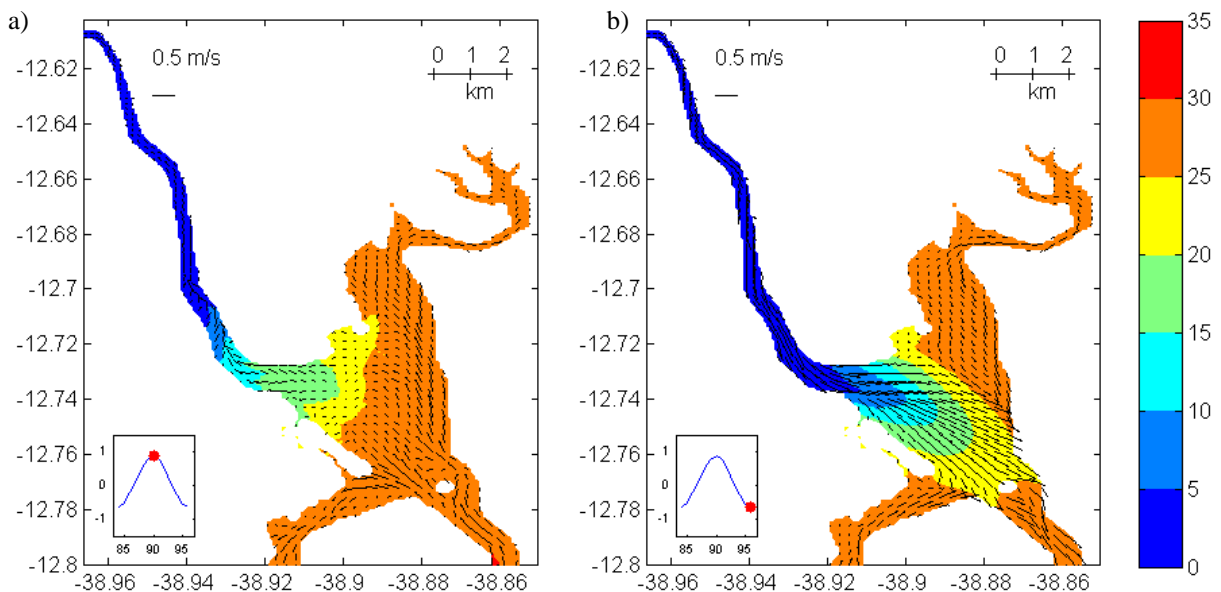
**Figura 6.27. Distribuição de sal e campo de correntes na superfície – quadratura – preamar (a) e baixa-mar (b) na entrada do baixo curso do rio Paraguaçu – Cenário 5.**

#### 6.4.2.6 Cenário 6 - vazão de uma turbina da UHE = 78m<sup>3</sup>/s

As vazões liberadas para a geração de energia pela UHE resultaram em importantes alterações na distribuição e penetração do sal no baixo curso do rio e BI quando comparado com o Cenário 2 - vazão de inverno, período onde deve ocorrer a operação com uma ou duas turbinas.

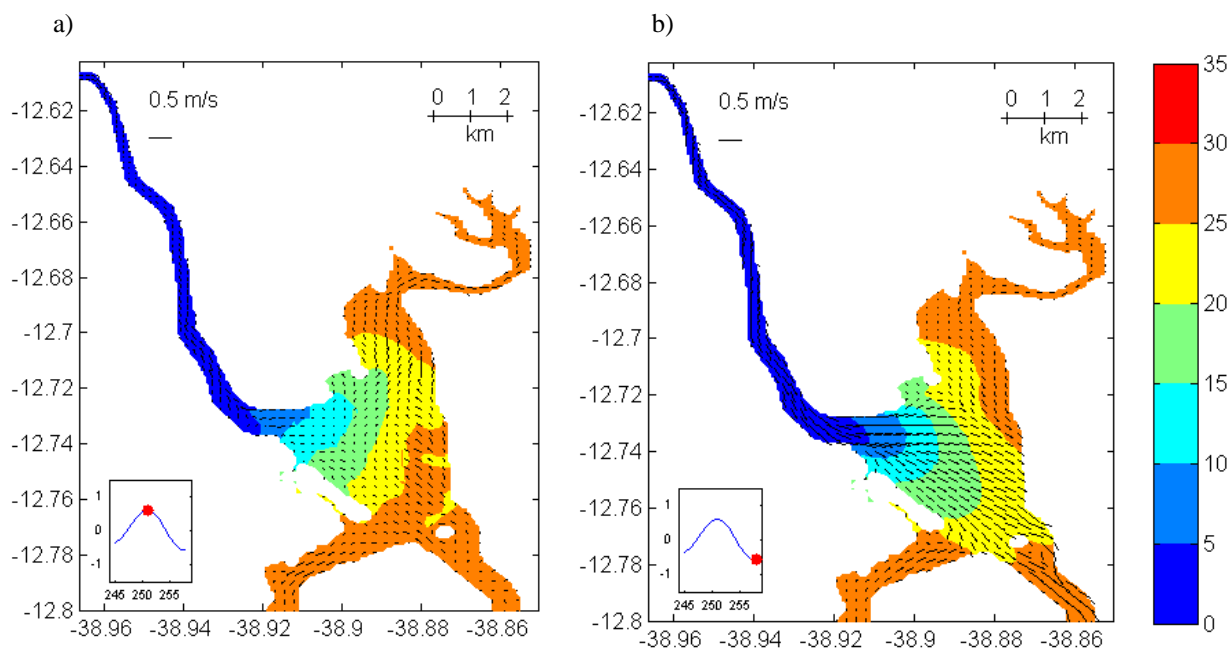
A vazão de 78 m<sup>3</sup>/s limita a isohalina de 5 entre os quilômetros 28,5 e 26 na preamar da maré de sizígia e de quadratura, respectivamente (Figura 6.28 e Figura 6.29). Na baixa-mar há um recuo de 2,4 km em sizígia e 2,6 km na quadratura em relação a situação da vazão de inverno, posicionando a isohalina de 5 nos km 24,6 e 24,2, respectivamente, dentro da região da BI central (Figura 6.28). Em comparação com a vazão média de operação da EMBASA no período de inverno (11,2m<sup>3</sup>/s) as alterações são ainda maiores, com um recuo na penetração do sal na baixa-mar de cerca de 4,5 km na posição da isohalina de 5.

Outra alteração significativa é a redução da salinidade no setor Norte da BI, que ocorre devido ao deslocando das águas menos salinas da BI central para o Norte pela maré enchente. Esse comportamento foi observado no monitoramento em campo de 7/2/2004, quando a vazão fluvial era de 258 m<sup>3</sup>/s. A Figura 6.29 mostra a penetração máxima da água salobra em direção a Santiago do Paraguaçu na preamar de quadratura e seu deslocamento na maré vazante.



**Figura 6.28. Distribuição de sal e campo de correntes na superfície – sizígia – preamar (a) e baixa-mar (b) na entrada do baixo curso do rio Paraguaçu – Cenário 6.**

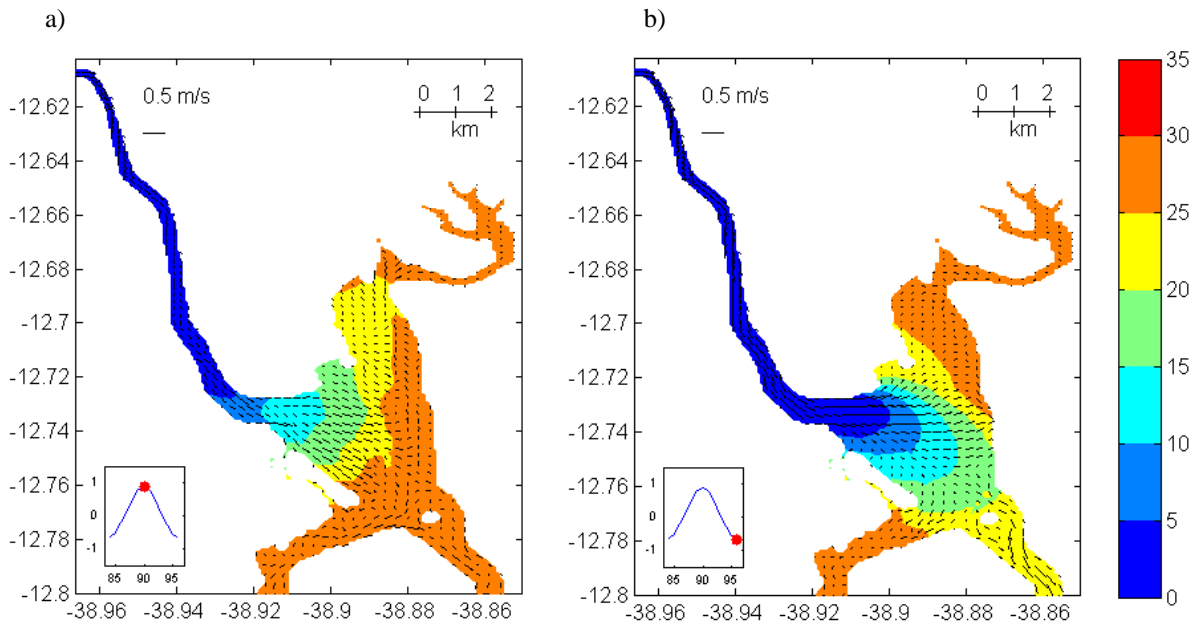




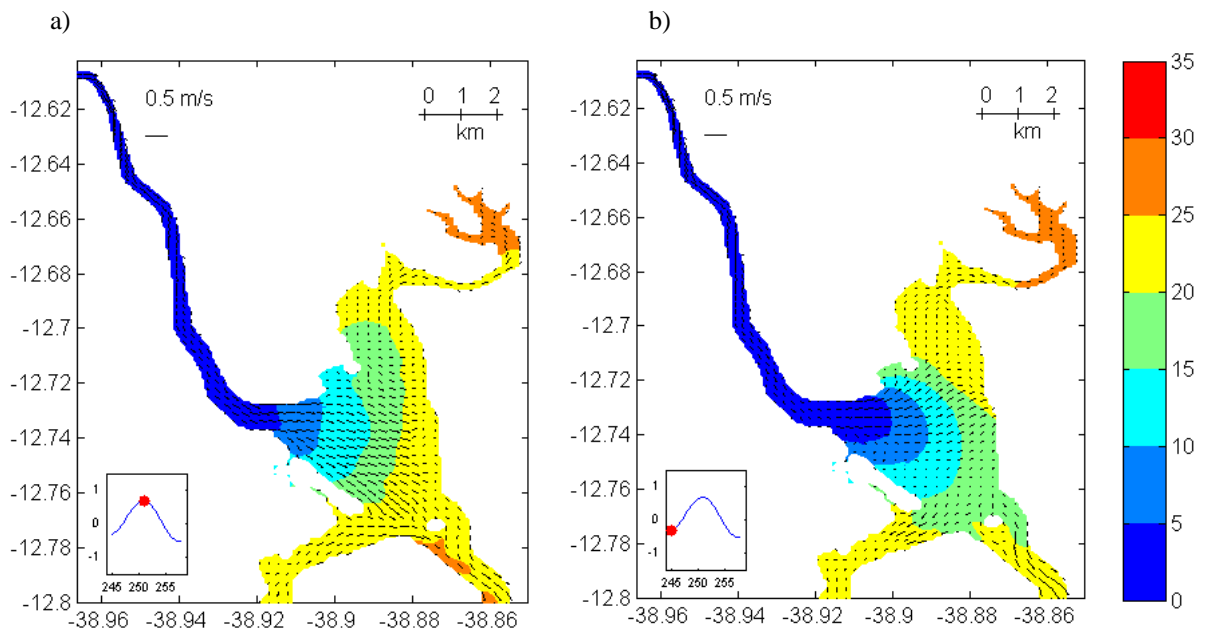
**Figura 6.29.** Distribuição de sal e campo de correntes na superfície – quadratura – preamar (a) e baixa-mar (b) na entrada do baixo curso do rio Paraguaçu – Cenário 6.

#### 6.4.2.7 Cenário 7 - vazão de duas turbinas da UHE = $156\text{m}^3/\text{s}$

A simulação da vazão de duas turbinas em operação na UHE ( $156\text{ m}^3/\text{s}$ ) (Figura 6.30 e Figura 6.31) mostrou um recuo maior da penetração do sal do que aquele ocorrido com a vazão de  $78\text{ m}^3/\text{s}$ , principalmente na maré de quadratura (Figura 6.29). O baixo curso do rio ficou preenchido por água doce e a isohalina posicionada no meio da região central da BI na baixa-mar. Além disso, acentuou a redução da salinidade no setor Norte da BI e resultou na redução da salinidade no setor Sul, o que não havia acontecido com a vazão de uma turbina (Figura 6.28 e Figura 6.29). A redução da salinidade nos setores Norte e Sul da BI deve ter ocorrido gradualmente com a passagem da maré de sizígia para quadratura, pois no início do ciclo de quadratura as alterações na salinidade estavam presentes (Figura 6.31).



**Figura 6.30. Distribuição de sal e campo de correntes na superfície – sizígia – preamar (a) e baixa-mar (b) na entrada do baixo curso do rio Paraguaçu – Cenário 7.**



**Figura 6.31. Distribuição de sal e campo de correntes na superfície – quadratura – preamar (a) e baixa-mar (b) na entrada do baixo curso do rio Paraguaçu – Cenário 7.**

## 6.5 DISCUSSÃO

### 6.5.1 Desempenho do modelo

A implantação do POM no estuário do Rio Paraguaçu teve que se adequar às limitações de profundidade, dado que a estrutura atual do modelo não permite a simulação de inundação e secagem das células. Em consequência, a adoção de uma profundidade mínima de 3m levou ao aumento de volume do estuário. As áreas de mangue, que ocupam um espaço significativo na Baía de Iguape (28,1 km<sup>2</sup> = 37%) e são importantes na dinâmica estuarina (Lessa, 2000), tiveram que ser retiradas para reduzir o acréscimo de volume.

A grade de alta resolução, com elementos retangulares, exigiu a suavização da batimetria de fundo e alargamento de regiões “estranguladas” (principalmente na desembocadura do rio e saída da BI para o Canal do Paraguaçu) para que não houvesse acúmulo de água no estuário devido a erros numéricos, e possibilitasse a redução do parâmetro  $T_f$  da condição de contorno da elevação. O modelo mostrou maior sensibilidade às alterações no valor de  $T_f$  do que em relação ao parâmetro de atrito e viscosidade. Em uma fase inicial, a simulação do estuário do Rio Paraguaçu no modo barotrópico e com uma grade curva de elementos variáveis chegou ao valor mínimo de  $T_f = 3.600$  e ainda assim a altura da maré em sizígia foi de 67% da altura real (resultado não apresentado). Essa mesma grade não suportou simular o modo baroclínico com  $T_f = 36.000$ . Na grade retangular adotada, o valor final de  $T_f = 9.000$  resultou na subestimação da altura da maré.

Os trabalhos em regiões estuarinas e baías utilizando o POM apresentados na literatura, incluindo o clássico de Oey et al. (1985a,b), não reportam subestimação da maré na magnitude daquela obtida nesta simulação. No estuário Hudson-Raritan, trabalhando com células de 530m, a diferença entre a amplitude da componente  $M_2$  foi de apenas 6% (Oey et al., 1985b). No estuário de micromaré do Rio Pearl, China, Wong et al. (2003) trabalharam com uma grade de 500 m no estuário e 1000m na plataforma, chegando a um erro na amplitude da maré foi de 7%. A grade de simulação do estuário estava aninhada ao modelo de circulação da plataforma e Mar da China. No rio East, Nova York (EUA), onde a maré semi-diurna tem altura variando de 2 a 2,6 m, Blumberg e Pritchard (1997), utilizando uma grade com células variando de 70 a 1000 m de largura e 300 a 3.000 m de comprimento, chegaram a uma precisão de 99% na maré calculada. Na modelagem da região portuária de Nova York (EUA), Blumberg et al. (1999) obtiveram correlações entre a maré observada e calculada

acima de 0,90, sendo que a grade variou de 100 m nos rios (incluindo a região simulada em 1997 no rio East) à 50 km no Cânion de Nova York.

No Brasil, Picarelli (2001) trabalhando no estuário de Cananéia-Iguape/SP, utilizou uma grade básica de resolução de 100 m aninhada à uma grade na região oceânica com células de 1000 m. O desvio padrão do erro da maré calculada para Cananéia foi de 0,065 m. Conceição (2004) simulando o comportamento da cunha salina no estuário de micromaré do Rio Itajaí/SC, com uma a grade de 200 m de resolução, abrangendo o rio, representado por poucas células na seção transversal (1 a 3), e cerca de 60 km da região oceânica adjacente, forçou a micromaré com  $T_f = 0$  no contorno Leste,  $T_f = 10^6$ s na borda Norte e uma condição não-gradiente na borda Sul. Com esta configuração, a maré foi bem reproduzida no Porto de Itajaí.

A grande diferença da simulação com o POM no estuário do Rio Paraguaçu em relação a maioria dos trabalhos citados acima reside no fato das grades adotadas se estenderem até a região oceânica, aninhados ou não, possibilitando especificar as correntes no contorno da entrada do estuário ou baía, no lugar da elevação, e assim, assegurar condições de fluxo próximo do real.

Apesar da subestimação da altura de maré e das velocidades no estuário do Rio Paraguaçu, o modelo mostrou desempenho razoável na estimativa de fluxo no baixo curso do rio, resultando em uma boa representação da penetração do sal no baixo curso e na Baía de Iguape, conforme será visto a seguir.

### **6.5.2 Relação entre a penetração do sal e a vazão**

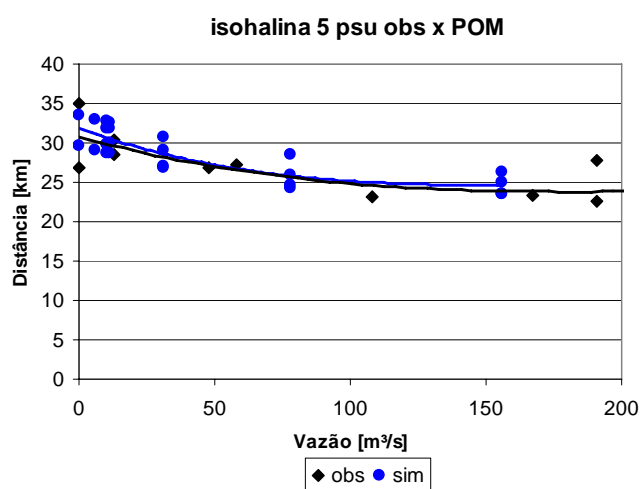
A relação da penetração do sal, representada pela posição da isohalina de 5, com a vazão foi obtida através dos perfis longitudinais simulados para os 7 cenários, em marés de sizígia e quadratura e em situações de preamar e baixa-mar. A Tabela 6.2 relaciona os resultados e a Figura 6.32 compara a posição da isohalina de 5 obtida com a simulação e aquela medida em campo. Apesar da menor penetração do sal nos resultados simulados na preamar, no geral o ajuste aos dados observados é razoável (correlação linear  $R^2 = 0,7$ ). Para a faixa de vazões até 191 m<sup>3</sup>/s a diferença média foi de -1 km (subestimação da simulada) com desvio padrão de 2,1 km. Os valores da posição da isohalina de 5 na superfície e fundo (não apresentados) mostram que o modelo está gerando uma mistura maior que a observada para

vazões acima de 58 m<sup>3</sup>/s, não conseguindo representar a inclinação da haloclina no baixo curso do rio e Baía de Iguape.

**Tabela 6.2. Posição da isohalina de 5 obtida pelo POM para diversas condições de maré e vazão.**

Cenário	Maré	Estágio	Vazão [ m <sup>3</sup> /s]	Posição da isohalina de 5 [km]	Distância pm-bm [km]
1	Sizígia	pm	6	33,0	
1	Sizígia	bm	6	29,0	4,01
2	Sizígia	pm	31	30,8	
2	Sizígia	bm	31	27,0	3,81
3	Sizígia	pm	0	33,5	
3	Sizígia	bm	0	29,7	3,80
4	Sizígia	pm	11,2	32,6	
4	Sizígia	bm	11,2	28,7	3,91
5	Sizígia	pm	10	32,7	
5	Sizígia	bm	10	28,7	4,01
6	Sizígia	pm	78	28,5	
6	Sizígia	bm	78	24,6	3,91
7	Sizígia	pm	156	26,3	
7	Sizígia	bm	156	23,6	2,71
2	Quadratura	pm	31	29,0	
2	Quadratura	bm	31	26,8	2,21
4	Quadratura	pm	11,2	31,9	
4	Quadratura	bm	11,2	30,0	1,90
5	Quadratura	pm	10	31,8	
5	Quadratura	bm	10	29,7	2,11
6	Quadratura	pm	78	26,0	
6	Quadratura	bm	78	24,2	1,80
7	Quadratura	pm	156	24,9	
7	Quadratura	bm	156	23,6	1,30

Obs.: pm = preamar; bm = baixa-mar



**Figura 6.32. Posição da isohalina observada em campo e simulada pelo POM.**

Considerando-se que a posição da penetração do sal na baixa-mar é bem próxima aos valores medidos e que na preamar a estimativa é conservadora (menor penetração que o observado), as simulações podem ser utilizadas para avaliar os efeitos da barragem sobre o estuário no baixo curso do rio e na Baía de Iguape.

Desta maneira as simulações dos cenários pré e pós-barragem indicam que a vazão de operação da EMBASA de 56 m<sup>3</sup>/s durante 5 horas estabelece uma distribuição de sal próxima daquela que corresponde à vazão mínima de 6 m<sup>3</sup>/s, quando a descarga ocorre no período de maré enchente. O mesmo comportamento acontece com a vazão nula, porém a penetração está subestimada, conforme indica a Figura 6.32.

Os resultados das simulações com as vazões de operação das turbinas da UHE (78 m<sup>3</sup>/s e 156 m<sup>3</sup>/s) mostraram impactos importantes na distribuição do sal no estuário, limitando a entrada de águas marinhas no baixo curso do rio, estabelecendo um alto gradiente de salinidade no setor Central da Baía de Iguape e reduzindo a salinidade nos setores Norte e Sul, especialmente com a vazão de duas turbinas. Como os manguezais foram suprimidos da grade de simulação, a área de expansão do escoamento nos setores Norte e Sul ficou comprometida, e as correntes simuladas são menores que as observadas é provável que na realidade a redução da salinidade seja acentuada nos pontos mais extremos dos setores da Baía de Iguape.

## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A caracterização do regime hidrológico do Rio Paraguaçu indicou que não ocorreram mudanças significativas na tendência das suas vazões médias anuais e que as diferentes magnitudes das vazões ao longo dos anos últimos 73 anos são decorrentes da variabilidade climática. Essa variabilidade decorre da superposição de vários ciclos com períodos entre 2,4 e 11 anos. As oscilações do ciclo de 11 anos são marcantes e seus valores extremos superam o valor de meio desvio padrão da vazão média anual (25 m<sup>3</sup>/s em Argoim). Há fortes indícios que esse ciclo decenal tenha conexões com a variação da TSM no Oceano Atlântico. Destacou-se um período mais seco, com valores menores e tendência de redução nas vazões anuais, a partir da década de 1980, em contraste ao período anterior, mais úmido e com tendência de crescimento das vazões.

No que se refere à água doce afluente ao estuário do Rio Paraguaçu, a implantação e operação da Barragem Pedra do Cavalo resultou na redução das vazões de praticamente todas as faixas da curva de permanência, com destaque para o grande número de vazões nulas e a redução das vazões médias mensais após o período de cheia.

A investigação da dinâmica do estuário do Rio Paraguaçu mostrou importantes características de propagação da maré no baixo curso do rio associadas à presença do delta de cabeceira localizado na Baía de Iguape. O delta faz com que o nível na baixa-mar de sizígia seja sustentado, provocando o seu retardo e o aumento do nível médio. O outro efeito é a inversão da assimetria de duração de positiva (tempo de maré enchente maior que o tempo de maré vazante), para negativa durante a maré de sizígia.

As características de mistura e das correntes variam com a maré de sizígia e de quadratura. Em sizígia o perfil vertical médio de salinidade foi homogêneo, enquanto que em quadratura ocorreu um pequeno gradiente. Na maré de sizígia, com baixa vazão fluvial, os perfis de velocidade foram bem desenvolvidos em toda a coluna d'água e o campo residual apresentou cisalhamento lateral. A assimetria positiva prevaleceu, bem como o domínio das velocidades de vazante. Em quadratura, houve a formação de circulação gravitacional apesar do pequeno gradiente de sal, resultando em um campo residual em duas camadas. Verificou-se uma simetria da maré enchente e vazante de quadratura tanto na duração quanto nas

velocidades. No entanto, a assimetria da maré parece ter pouco impacto no campo de correntes residuais, o qual parece ser estabelecido pela desigualdade diurna da maré. Estas desigualdades variam ao longo do ciclo sizígia-quadratura, favorecendo correntes residuais de enchente entre quadratura e sizígia e correntes residuais de vazante entre sizígia e quadratura (Figura 5.95). Os valores máximos da corrente residual superam em duas e quatro vezes àquelas que ocorrem na BTS segundo Cirano *et al.* (2006), na maré de quadratura e sizígia, respectivamente. Além disso, com a mudança de assimetria da maré de quadratura para sizígia e vice-versa, deve estar ocorrendo também uma mudança na vazão residual, com períodos de dias sequenciais de domínio de enchente/vazante associado à desigualdade favorável à enchente/vazante.

O estuário, a partir dos dados do Canal do Paraguaçu, com baixa descarga fluvial (15,6 m<sup>3</sup>/s) foi classificado, segundo Hansen e Rattray (1966), no tipo 1 (bem misturado) na sizígia e como tipo 2a em transição para 2b (parcialmente misturado) na quadratura. Desta maneira, o estuário está sujeito a ciclos de estabilização e desestabilização na estrutura de salinidade na coluna d'água condicionados à ocorrência da maré de quadratura e sizígia conforme foi descrito por Uncles *et al.* (1990) e Jay e Smith (1990).

Em relação aos sedimentos, a variação da concentração foi controlada pela intensidade da turbulência. Em geral, os perfis verticais apresentaram um crescimento da concentração com a profundidade, formando zonas de intensa turbidez. Devido à morfologia do estuário, que tem a Baía de Iguape quase transversal ao canal do baixo curso e a mudança acentuada da batimetria nos canais da baía e no Canal do Paraguaçu, uma situação pouco comum na região interna de estuários ocorreu durante a cheia de janeiro de 2004. Na maré de quadratura (30/1), os sedimentos estavam na camada superior da coluna de água, associados à massa d'água fluvial, e praticamente ao longo de toda a região da Baía de Iguape. Com a passagem para a maré de sizígia (8/2), houve a quebra da estratificação e a precipitação e a acumulação dos sedimentos junto ao fundo. Em geral o material em suspensão é levado até o oceano.

A influência da descarga fluvial sobre a dinâmica do estuário não foi verificada no Canal do Paraguaçu, onde a vazão de 191 m<sup>3</sup>/s não resultou em alteração significativa da circulação. No entanto, o baixo curso do rio e a Baía de Iguape são mais sensíveis às variações da vazão. Na desembocadura do baixo curso do rio, a classificação quanto a circulação e estratificação em um ciclo de maré de sizígia mudou de tipo 1a (bem misturado),



com vazão nula, para tipo *Ib* (misturado, forte estratificação), com vazão de 78 m<sup>3</sup>/s (uma turbina da UHE em funcionamento).

A ocorrência de enchente do Rio Paraguaçu, como em janeiro de 2004, muda radicalmente as condições estuarinas. Em maré de quadratura, o estuário ficou com forte estratificação, sendo que no período que transcorreu durante a semana seguinte, a estratificação foi gradualmente sendo quebrada pela maior capacidade de mistura da maré de sizígia. Destaca-se que sob condição de alta descarga, o setor Norte apresentou maior dinamismo em relação ao setor Sul, sugerindo que estes dois setores têm dinâmicas distintas, relativamente independentes.

A resposta da penetração do sal no estuário em relação à descarga fluvial e à maré foi estabelecida para a isohalina de 5 com base em dados medidos e simulações numéricas. A partir desta relação os efeitos da Barragem Pedra do Cavalo sobre o estuário foram caracterizados. Durante o período de operação da EMBASA, o fechamento das comportas deve ter permitido a maior penetração do sal. A operação de vazão mínima, com vazão de 56 m<sup>3</sup>/s liberadas durante 5 horas, apresentou uma distribuição de sal semelhante àquela que seria encontrada com a vazão mínima ( $Q_{90}$ ) igual a 6 m<sup>3</sup>/s, com a zona de mistura restrita ao baixo curso do rio e início da BI. No entanto, esse padrão de operação de vazão mínima foi realizada muitas vezes no período de inverno do Recôncavo, quando costumavam ocorrer vazões médias mensais de 31,6 m<sup>3</sup>/s. Essa vazão deveria provocar no período anterior à barragem, um recuo na penetração do sal em cerca de 2km, em comparação com a vazão de 6 m<sup>3</sup>/s, formando um forte gradiente na região central da Baía de Iguape.

A simulação da operação da barragem para geração de energia elétrica na UHE Pedra do Cavalo, iniciada em 2005, com descargas de 78 m<sup>3</sup>/s e 156 m<sup>3</sup>/s, indicou importantes alterações na distribuição e penetração do sal no baixo curso do rio e Baía de Iguape quando comparadas à vazão de inverno, período onde deve ocorrer a geração de energia. A isohalina de 5, que para a vazão de inverno estava restrita ao baixo curso do rio, na baixa-mar deve recuar até a região central da Baía de Iguape. A salinidade no setor Norte da Baía de Iguape sofre redução em cerca de 4 para a vazão de uma turbina. Com a vazão de duas turbinas, na maré de quadratura, a redução da salinidade no setor Norte da Baía de Iguape pode chegar à 10, bem como o início do setor Sul da Baía de Iguape. Verificou-se que o momento de operação das turbinas tem diferente efeito sobre a penetração do sal se ocorre durante a maré enchente ou vazante. Destaca-se que existem imprecisões na posição exata da isohalina

simulada pelo modelo, sendo que em comparação aos dados medidos foi verificado uma subestimação média de 1 km na penetração do sal.

As vazões que ocorrem durante os eventos de cheias e se igualem ou superem a vazão máxima média anual (900 m<sup>3</sup>/s), bem como a vazão de operação da barragem (1.500 m<sup>3</sup>/s), devem preencher de água doce o baixo curso do rio e a Baía de Iguape, gerando forte estratificação se coincidir com a maré de quadratura.

O impacto da Barragem Pedra do Cavalo sobre o regime hidrológico do estuário do Rio Paraguaçu está associado: 1) à tática operacional dos usos do reservatório; e 2) aos dispositivos de descarga. A inexistência de um dispositivo de descarga de fundo limita a liberação de vazões baixas, compatíveis com o período de estiagem. Esta limitação associada à operação de fechamento das comportas levou ao grande número de vazões nulas ocorridas até 1997. As reduções nas vazões mensais no período úmido do Recôncavo foram decorrentes das regras operacionais adotadas pela EMBASA e poderiam ter sido evitadas com a abertura permanente de uma comporta.

A relação da penetração do sal no estuário em relação à descarga fluvial e à maré, estabelecida para a isohalina de 5, quando adotada como o instrumento de gestão para o estabelecimento das vazões afluentes ao estuário com um padrão mais próximo do regime hidrológico natural, permite propor alternativas de operação da UHE. Dadas as características materializadas pelas turbinas implantadas na Barragem Pedra do Cavalo, propõe-se que:

1) As duas turbinas (156 m<sup>3</sup>/s) sejam limitadas à utilização para a geração de energia no período das cheias, tendo prioridade de abertura sobre as comportas, e permaneçam em funcionamento enquanto a barragem estiver em operação de controle de cheia;

2) Uma turbina (78 m<sup>3</sup>/s) seja utilizada de forma plena após o período de cheia enquanto as vazões afluentes a barragem superem o valor de 78 m<sup>3</sup>/s.

3) Estágios parciais de geração de energia com uma turbina podem ser utilizados, adotando o valor de vazão liberada na UHE igual ou menor que a vazão afluente a barragem.

Ainda assim, a perspectiva para o futuro é que o baixo curso do rio fique com água de baixa salinidade durante o período de geração de energia, que ocorrerá, em geral, após o período das cheias, sendo que a situação se tornará mais acentuada caso as propostas de operação da UHE indicadas acima não sejam adotadas. Por outro lado, é provável que o número de pulsos de vazões baixas diminua, considerando que a geração de energia seja

contínua durante e após a época de cheias. Até que as novas regras operacionais sejam adotadas, as reversões nas vazões poderão ocorrer em qualquer dia, já que quantidade de energia a ser gerada é imposta pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), segundo as condicionantes estabelecidas na época da concessão da usina, as quais não consideraram o regime hidrológico natural do rio e a existência do estuário a jusante.

É importante frisar que a avaliação do grau de regularização da Barragem Pedra do Cavalo indicou a subutilização de sua capacidade de fornecimento de água, podendo implicar em maiores alterações hidrológicas na entrada de água doce ao estuário caso novas demandas sejam adicionadas. Essa maior demanda poderá ser compensada caso novamente ocorram períodos úmidos na bacia hidrográfica, com vazões maiores àquelas verificadas após a implantação da barragem, e para isso será necessário considerar a variabilidade climática na gestão do reservatório.

As recomendações para os estudos futuros são: 1) investigar em detalhe a influência da desigualdade diária da maré sobre a vazão e transporte residual; 2) investigar a penetração do sal em relação a coincidência de maré enchente ou vazante (sizígia e quadratura) com as horas de geração da UHE para formação da vazão sanitária; 3) intensificar o monitoramento nos setores da Baía de Iguape para caracterizar variadas situações de maré e vazão fluvial; 4) estabelecer as vazões mínimas ao estuário do Rio Paraguaçu com base na relação entre a penetração do sal e a vazão, associada com estudos ecológicos baseados na variação da salinidade; 5) implantar um modelo hidrodinâmico que simule a inundação e secagem de células; 6) implantar uma grade de simulação que se estenda para a BTS e oceano.

Sugere-se ainda desenvolver metodologia para incluir a variabilidade climática no estabelecimento das vazões mínimas e investigar as bases físicas da relação entre a variação da TSM no Oceano Atlântico e as vazões no Rio Paraguaçu e outros rios da Bahia, de forma a permitir a previsão do regime hidrológico com antecedência e uma melhor gestão dos recursos hídricos. Além disso, as perdas líquidas devido à evaporação nos reservatórios devem ser inseridas na avaliação das vazões mínimas a serem mantidas à jusante dos reservatórios nos procedimentos de outorga de uso da água. Destaca-se que os métodos utilizados para avaliar as alterações hidrológicas neste trabalho podem ser aplicados na época de projeto, necessitando para isso a desenvolvimento ou adequação de modelos de simulação de reservatório para intervalo de tempo diário, ou menor, que contemple as regras operacionais, inclusive aquelas referentes à geração de energia elétrica.

## 8 BIBLIOGRAFIA

Abraham, B., Ledolter, J. 1983. *Statistical Methods for Forecasting*. John Wiley & sons, Inc. p. 174-178.

Adams, J.B., Bate, G.C., Harrinson, T.D., Huizinga, P., Taljaard, S. van Niekerk, L., Plumstead, E.E., Whitfield, A.K., Wooldridge, T.H. 2002. A Method to Assess the Freshwater Inflow Requirements of Estuaries and Application to the Mtata Estuary, South África. *Estuaries*, 25, 6B, 1382-1393.

Alber, M. 2002. A Conceptual Model of Estuarine Freshwater Inflow Management. *Estuaries*, 25, 6B, 1246-1261.

Aragão, J.O.R. de, 2004. A influência dos oceanos Pacífico e Atlântico na dinâmica do tempo e do clima do Nordeste do Brasil. In: *Oceanografia: um cenário tropical*. Orgs. Eskinazi-Leça, E., Neumann-Leitão, S., Costa, M.F. Recife: Bagaço. p.131-184.

Aubrey, D.G., Friedrichs, C.T. 1988. Seasonal climatology of tidal non-linearities in a shallow estuary. In: Aubrey, D.G. e Weichar, L. (eds.), *Hydrodynamics and Sediment Dynamics of Tidal Inlets*. Lectures Notes on Coastal and Estuarine Studies, Vol. 29, p.103-124.

Avanzo, P.E. 1977. A sedimentação no setor central da Baía de Maragogipe – Bahia. Salvador. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia. 85p.

BAHIA, 1980. Barragem Pedra do Cavalo: Projeto Executivo. Separata de Dados Hidráulicos e Hidrológicos. Companhia de Desenvolvimento do Vale do Paraguaçu – DESENVALE. Consórcio Nacional de Engenheiros Consultores S.A - CNEC.

BAHIA, 1984. Aproveitamento Pedra do Cavalo. Projeto Básico - Memorial Descritivo. Companhia de Desenvolvimento do Vale do Paraguaçu – DESENVALE. Governo do Estado da Bahia. 123p.

BAHIA, 1996. Plano Diretor de Recursos Hídricos do Médio e Baixo Rio Paraguaçu. Volume VI - Documento Síntese. Superintendência de Recursos Hídricos. Governo do Estado da Bahia. 195p.

- BAHIA, 2000. Modelamento e Avaliação Ambiental. Desenvolvimento de Modelos Computacionais de Circulação Hidrodinâmica, de Transporte de Contaminantes e de Qualidade da Água da BTS, e Elaboração do seu Diagnóstico. Relatório de Estudos Básicos. RT-257-03-GR-002-RF. Projeto de Saneamento Ambiental da Baía de Todos os Santos. Centro de Recursos Ambientais. Governo do Estado da Bahia. 248p.
- BAHIA, 2003. Sistema de Informações Georeferenciadas. Governo do Estado da Bahia. Superintendência de Recursos Hídricos. Série: Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos - SIRH. Volume 1. Em CD.
- BAHIA, 2004. I Fórum de Análise e Previsão Climática para o Nordeste do Brasil. Tempo e Clima. Superintendência de Recursos Hídricos. Governo do Estado da Bahia. (<http://www.srh.ba.gov.br/> - acesso em 27/1/2005).
- Barreto, M.A.S., Paredes, J.F. 1995, Estudos hidrodinâmicos no estuário do Rio Paraguaçu. Ciência e Tecnologia, Brasília, CPRM, 5:46-51.
- Benn, P.C., Erskine, W.D. 1994. Complex channel response to flow regulation: Cudgegong River below Windamere Dam, Australia. Applied Geography 14:153-168.
- Bergamo, A.L., Miranda, L.B., Corrêa, M.A. 2002. Estuário: Programas para processamento e análise de dados hidrográficos e correntográficos. Relat. Téc. Inst. Oceanogr., 49:1-16. USP.
- Blumberg, A. F., Kantha, L.H. 1985. Open boundary conditions for circulation models. Journal of Hydraulics Engineering. 111(2):237-255.
- Blumberg, A. F. e Mellor, G. L. 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. Em Heaps, NS (Ed.), Three-Dimensional Coastal Ocean Models, Vol. 4 de Coastal and Estuarine Series, pp. 1-16. American Geophysical Union, Washington, DC, 208p.
- Blumberg, A. F., Prichard, D. W. 1997. Estimates of the transport through the East River, New York. J. Geophys. Res., 102(3), 5685–5703.
- Blumberg, A. F., Khan, L.A., John, P.S.J. 1999. Three-dimensional hydrodynamic model of New York Harbor region. Journal of Hydraulic Engineering, 125(8):799-816.
- Bonfim, Cid S, Carvalho, R.C, Lessa, G.C. 2003. Distribuição dos manguezais na Baía de Todos os Santos e seu impacto no balanço hídrico. In: IX Congresso sobre Planejamento e Gestão da Zona Costeira dos Países de Expressão Portuguesa. Recife/PE.

- Boon, J.B.,III, Byrne, R.J. 1981. On basin hypsometry and the morphodynamic response of coastal inlet systems. *Marine Geology*, 40:27-48.
- Brandt, S. A. 2000. Classification of geomorphological effects downstream of dams. *Catena*, 40, pp. 375-401.
- Brictha, A. 1977. A sedimentação na foz do Rio Paraguaçu. Salvador. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia. 113p.
- Brooks, D.A., Baça, M.W., Lo, Y.T. 1999. Tida circulation and residence time in a macrotidal estuary: Cobscook Bay, Maine. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 49:647-665.
- Browder, J. A., Moore, D. 1981. A new approach to determining the quantitative relationship between fishery production and the flow of freshwater to estuaries. *In* R. Cross and D. Williams (eds.), *Proceedings, national symposium on freshwater inflow to estuaries*, vol. 1. p. 403–430.
- Brown, J., Colling, A., Park, D, Phillips, J., Rothery, D. Wright, J. 1989. *Waves, Tides and Shallow-Water Processes*. In: *Ocenography Series*. Open University.
- Brockwell, P.J., Davis, R.A. 1996. *Spectral Analysis*. In: *Introduction to Time Series and Forecasting*. Chapter 4. p. 109-134. Springer-Verlag. New York Inc.
- Buchard, H., Baumert, H. 1998. The Formation of Estuarine Turbidity Maxima Due to Density Effects in the Salt Wedge. A Hydrodynamic Process Study. *Journal of Physical Oceanography*. Vol 28:309-321.
- CBDB. 2004. Cadastro de Barragens. Comitê Brasileiro de Barragens. <http://www.cbdb.org.br/barragem.htm>. Acesso 16/11/2004.
- Camargo, R. 1998. Estudo Numérico das Circulações Atmosférica e Oceânica na Região da Baía de Paranaguá. Tese de Doutorado. Instituto Astronômico e Geofísico. Universidade de São Paulo. 182 p.
- Campos, E. M. 2001. O assoreamento do baixo curso do rio de Contas: uma abordagem hidráulico-sedimentar. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia. p. 53.
- Cameron, W.M. and Pritchard, D.W. 1963. Estuaries. In: *The sea*. Vol. (II). M.N. Hill (ed) Interscience, New York. p. 306–324.
- Carvalho, N. O. 1994. *Hidrosedimentologia Prática*. Rio de Janeiro: CPRM. 372 p.

- Carvalho, N. O. 2000. Guia de Avaliação de Assoreamento de Reservatórios. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. 140 p.
- Carvalho, J.B. 2000. Caracterização morfoestratigráfica do preenchimento sedimentar da Baía de Iguape, Bahia – Influência das variações eustáticas do nível do mar e atividades tectônicas recentes. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia. 119p.
- Cirano, M, Lessa, G.C. 2002. Oceanographic characteristics of Baía de Todos os Santos, Brazil: circulation, seasonal variations and interactions with the coastal zone. In: 11th Int. Biennial Conf. on Physics of Estuaries and Coastal Seas. Hamburg, Germany, 17-20.
- Cirano, M, Lessa, G.C, Middleton, J.F. 2006. Oceanographic characteristics of Baía de Todos os Santos, Brazil. Part I: circulation and seasonal variations described from in situ data. Em preparação para o Journal of Geophysical Research – Oceans.
- Clarke, R. T., 1993. Hidrologia Estatística. In: Hidrologia: Ciência e Aplicação. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Associação Brasileira de Recursos Hídricos: Editora da Universidade de São Paulo. Capítulo 17. p. 659-702.
- Coelba/Odebrecht. 2001. Estudo para motorização da barragem de Pedra do Cavalo. 8 volumes.
- Collier, M., Webb, R., Schmidt, J. C. 2000. Dams and River: A Primer on the downstream Effects of Dams. United State Geological Survey. Circular 1126. 94 p.
- Comitê Brasileiro de Grandes Barragens. 2000. Highlights of Brazilian Dam Engineering. 75p.
- Conceição, G. 2004. Intrusões salinas no estuário do Rio Itajaí-Açu – uma abordagem numérica da influência meteorológica na circulação estuarina. Dissertação de Mestrado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Universidade de São Paulo. 155p.
- Costa, G. (1994) Caracterização histórica, geomorfológica e hidráulica do estuário do rio Paraíba do Sul. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 97p.
- Dalrymple, R.W., Zaitlin, B.A., Boyd, R. 1992. Estuarine facies models: conceptual basis and stratigraphic implications. *Journal of Sedimentary Petrology*, 62(6):1130-1146.

- DHN, 1978. Carta Náutica da Baía de Todos os Santos - Parte Oeste - No. 1107 - 2ª edição. Diretoria de Hidrografia e Navegação. Marinha do Brasil.
- Dias, K. A. 2003. Reavaliação das facies texturais de fundo da Baía de Todos os Santos. Monografia de Graduação, Curso de Graduação em Geologia, UFBA, 45 p.
- Dionne, J.C. 1963. Towards a more adequate definition of the St. Lawrence estuary. *Z. Geomorphology* 7: 36-44.
- DESENVALE, 1984. Aproveitamento Pedra do Cavalo. Projeto Básico - Memorial Descritivo. Companhia de Desenvolvimento do Vale do Paraguaçu. Governo do Estado da Bahia. 123p.
- Dyer, K. JR. 1973. *Estuaries: A Physical Introduction*. John Wiley & Sons. 140 p.
- Dyer, K.R. 1986. *Coastal and Estuarine Sediment Dynamics*. John Wiley & Sons. p. 232.
- Dyer, K.R. 1997. *Estuaries: a physical introduction*. Second Edition. J. Wiley & Sons Ltd. 195p.
- Eiger, S. 1991. Qualidade da água em rios e estuários. In: Hidrologia Ambiental. Coleção ABRH de Recursos Hídricos. Editora da Universidade de São Paulo. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Parte II-1. p 69-163.
- Emery, W.J., Thomson, R.E. 1997. Time-series Analysis Methods. In: *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Chapter 5. p. 371-567. Pergamon Press.
- FEMAR – Fundação dos Estudos do Mar. 2005. Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras. [www.femar.com.br](http://www.femar.com.br) - acesso em 23/2 e 19/5/2005.
- Flannery, M.S., Peebles, E.B., Montgomery, R.T. 2002. A Percent-of-flow Approach for Managing Reductions of Freshwater Inflows from Unimpounded Rivers to Southwest Florida Estuaries. *Estuaries*. Vol 25, 6B, 1318-1332.
- Franco, A.S. 1988. *TIDES – Fundamentals, Analysis and Prediction*. Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica/USP. São Paulo. 2ª edição. 232p.
- Franco, A.S. 2003. Conjunto de Programas para Análise e Previsão de Marés e Correntes de Maré e para Solução de Problemas Correlatos. CD.
- Franks, S., Wagener, T. 2005. Regional hydrological impacts of climate change-hydroclimatic variability. IAHS Publication n. 296, p. 1-6.



- Friedrichs, C.T., Madsen, O.S. 1992. Non-linear diffusion of the tidal signal in frictionally dominated embayments. *Journal of Geophysical Research* 97: 5637-5650.
- Galperin, B. e Mellor, G. L. (1990a) A Time-dependent, Three-dimensional Model of the Delaware Bay and River System. Part 1: Description of the Model and Tidal Analysis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 31, 231-253.
- Galperin, B. e Mellor, G. L. (1990b) A Time-dependent, Three-dimensional Model of the Delaware Bay and River System. Part 2: Three-dimensional Flow Fields and Residual Circulation. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 31, 255-281.
- Garland, G., Moleko, L., 2000. Geomorphological impacts of Inanda Dam on the Mgeni estuary, north of Durban, South Africa. *Bull Eng Geol Env.* Vol 59, p. 119-126. Springer-Verlag.
- Genz, F., Lessa, G. C., Cirano, M., Lima, G. M. P. 2003. As tendências de longo prazo das vazões fluviais no litoral do Estado da Bahia. In: IX Congresso sobre Planejamento e Gestão da Zona Costeira dos Países de Expressão Portuguesa, Recife. v CD.
- Genz, F. Silva, F.F., Silva, L.C.M. 2005. Alterações hidrológicas no baixo curso do Rio São Francisco. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* (submetido).
- Guillén, J. e Palanques, A. 1992. Sediment dynamics and hydrodynamics in the lower course of a river highly regulated by dams: the Ebro River. *Sedimentology*, 39, 567-579.
- Ghil, M., Allen, R. M., Dettinger, M. D., Ide, K., Kondrashov, D., Mann, M. E., Robertson, A., Saunders, A., Tian, Y., Varadi, F., Yiou, P. 2002. Advanced spectral methods for climatic time series. *Reviews of Geophysics*. 40(1), p. 1.1-1.41.
- Hansen, D. V., Rattray, Jr, M. 1966. New dimensions in estuarine classification. *Limnology and Oceanography*, 18, 849-862.
- Hopkinson Jr, C. S., Vallino, J.J., 1995. The Relationships Among Man's Activities in Watersheds and Estuaries: A Model of Runoff Effects on Patterns of Estuarine Community Metabolism. *Estuaries*. Vol. 18, No. 4, p. 598-621.
- Hughes, M.G. 1992. Sediment Transport Mechanisms: preliminary investigation of tidal dynamics in the Hawkesbury River and suspended sediment transport near Gunderman. Australian Water Technologies Trading – Science and Environment Division. Report n. 92/12. 55p.

- Huizinga, P., 1995. River Basin Management and Estuarine Needs: The Great Brak Case Study. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 32, No. 5-6, p. 87-93. Pergamon Press.
- Hume, T.M., Bell, R.G., 1993. Methods for Determining Tidal Flows & Material Fluxes in Estuarine Cross-sections. Water Quality Centre Publication n. 32. Hamilton, New Zealand. 43p.
- ICOLD. 1998. World Register of Dams. International Commission on Large Dams. 319 p.
- Jay, D.A., Smith, J.D. 1990. Circulation, density distribution and neap-spring transitions in the Columbia River Estuary. *Progress in Oceanography*, 25:81-112.
- Kimmerer, W.J. 2002. Physical, biological and management responses to variable freshwater flow into the San Francisco estuary. *Estuaries*, 25, 6B, 1275-1290.
- Kjerfve, B. 1989a. Estuarine Geomorphology and Physical Oceanography. In: *Estuarine Ecology*. Ed (s) John W. Davis Jr, Charles a. S. Hall, W Michael Kemp e Alejandro Yáñez-Aranciba. John Wiley & Sons, Inc. pp. 47-78.
- Kjerfve, B. 1989b. Physical Processes in Charleston Harbor. In: *Charleston Harbor: Issues, Resources, Status and Management*. NOAA Estuary-of-the-Month Seminar Series no. 16, p.13-24.
- Kjerfve, B., Ribeiro, C.H.A., Dias, G.T.M, Filippo, A.M., Quaresma, V.S. 1997. Oceanographic characteristics of an impacted coastal bay: Baía de Guanabara, Rio de Janeiro, Brazil. *Continental Shelf Research*, 17(13):1609 –1643.
- Labat, D., Ronchail, J., Callede, J. Guyot, J.L., De Oliveira, E., Guimarães, W. 2004. Wavelet analysis of Amazon hydrological regime variability. *Geophysical Research Letters*, 31, L02501.
- Lessa, G.C. 2000. Morphodynamic controls on tides and tidal currents in two macrotidal shallow estuaries, NE Australia. *Journal of Coastal Research*, 16(4):976-989.
- Lessa, G.C., Bittencourt, A.C.S.P., Brichta, A., Dominguez, J.M.L. 2000. A reevaluation of the Late Quaternary Sedimentation in Todos os Santos Bay (BA), Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 72 (4), 573-590.
- Lessa, G.C., Dominguez, J.M.L., Bittencourt, A.C.S.P., Brichta, A. 2001. The Tides and Tidal Circulation of Todos os Santos Bay, Northeast Brazil: a general characterization. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 73(2):245-261.

- Lewis, R. 1997. *Dispersion in Estuaries and Coastal Waters*. John Wiley & Sons. 312p.
- Lima G.M.P., Lessa, G.C. 2002. The freshwater discharge in Todos os Santos Bay (BA) and its significance to the general water circulation. *Pesquisas em Geociências*, 28(2):85-97.
- Lincoln, J.M., FitzGerald, D.M. 1988. Tidal distortions and flood dominance at five small tidal inlets in southern Maine. *Marine Geology*, 82:133-148.
- Mantovanelli, A., Marone, E., Silva, E.T., Lautert, L.F., Klingefuss, M.S., Prata Jr, V.P., Noernberg, M.A., Knoppers, B.A., Angulo, R.J. 2004. Combined tidal velocity and duration asymmetries as a determinant of water transport and residual flow in Paranaguá Bay estuary. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 59:523-537.
- Mattson, R. A. 2002. A Resource-based Framework for Establishing Freshwater Inflow Requirements for the Suwannee River Estuary. *Estuaries*. Vol 25, 6B, 1333-1342.
- McDowell, D. M., O'Connor, B.A. 1977. *Hydraulics Behaviour of Estuaries*. The MacMillan Press LTD. 292 p.
- Medeiros, C. H. A. C., Landim, J. M. D., Medeiros, Y. D. P., Oliveira, M. Q. C., Schaer, M., Genz, F.e Teixeira, E. C.. 1999. Estudo exploratório do estuário do Rio São Francisco com vista a avaliação da dinâmica fluvial e sua influência na área estuarina. *Anais XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Belo Horizonte. (publicação digital).
- Mellor, G.L., Yamada, T. 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20:851-875.
- Mellor, G.L. 2003. *A three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model. Users Guide*. Program in Atmospheric and Oceanic Sciences. Princeton University, Princeton, NJ. 43p.
- Mélice, J.L., Servain, J. 2003. The tropical Atlântic meridional SST gradient index and its relationships with the SOI, NAO and Southern Ocean. *Climate Dynamics*, 20:447-464.
- Meyer, J., Alber, M., Duncan, W., Freeman, M., Hale, C., Jackson, R., Jennings, C., Palta, M., Richardson, E., Sharitz, R., Sheldon, J., Weyers, R. 2003. *Summary Report Supporting the Development of Ecosystem flow Recommendations for the Savannah River below Thurmond Dam*. Summary Report 6/03. 150 p.
- Miranda, L.B., Kjerfve, B. 1998. Circulation and mixing due to tidal forcing in the Bertioga Channel, São Paulo, Brazil. *Estuaries*, 21(2):204-214.

- Miranda, L.B., Castro, B.M. e Kjerfve, B. 2002. Princípios de Oceanografia Física de Estuários. Editora da Universidade de São Paulo. Acadêmica 42. 411 p.
- Miranda, L.B., Bérghamo, A.L, Castro, B.M. 2005. Interactions of river discharge and tidal modulation in a tropical estuary, NE Brazil. *Ocean Dynamics*, 55:430-440.
- Molion, L.C.B. 2003. Águas do Tocantins para o São Francisco. *Ciência Hoje*, 33(197):58-61.
- Moura, P. L. 1979. Material em Suspensão na Baía de Todos os Santos. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências. Universidade Federal da Bahia, Salvador, 49 p.
- Nichols, M.M., Biggs, R.B. 1985. Estuaries. *In*: Davis, R.A. (ed.). *Coastal Sedimentary Environments*. Berlin. Springer-Verlag. P. 77-186.
- Oey, L-Y, Mellor, G. L. e Hires, R. I. 1985a. A Three-dimensional simulation of the Hudson-Raritan estuary. Part I: Description of the model and model simulations. *J. Phys. Oceanogr.*, 15, 1676-1692.
- Oey, L-Y, Mellor, G. L. e Hires, R. I. 1985b. A Three-dimensional simulation of the Hudson-Raritan estuary. Part II: Comparison with observation. *J. Phys. Oceanogr.*, 15, 1693-1709.
- Oliveira, M. Q. C. 1999. Impacto de mudanças no uso do solo nas características hidrossedimentológicas da bacia hidrográfica do rio Joanes e sua repercussão na zona costeira. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia. 93 p.
- ONS, 2003. Vetores de evaporação líquida para o subsistema Nordeste. Operador Nacional do Sistema Elétrico. NT – 074/2003. 44 p.
- Patty, S. S., Roth, N., Mountain, D. 1999. Maryland, the Power Plant Research Program, and the Chesapeake Bay watershed. *The Science of Total Environment*, 240, 171-188. Elsevier Science B. V.
- Pekárová, P., Miklánek, P., Pekár, J. 2003. Spatial and temporal runoff oscillation analysis of the main rivers of the world during the 19th–20th centuries. *Journal of Hydrology*, 274, pp. 62-79.
- Perillo, G. M. E. 1995. Definitions and Geomorphologic Classification of Estuaries. *In*: *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries*. Chapter 2. *Developments in Sedimentology* 53. p. 17-47.

- Picarelli, S. S. 2001. Modelagem numérica da circulação de maré na região costeira centro sul do Estado de São Paulo. Dissertação de Mestrado. Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. 116p.
- Pina, L.C. 1976. Estudo do comportamento dos elementos C, O, Ca, Mg, no estuário do Rio Paraguaçu – Bahia. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências. Universidade Federal da Bahia, Salvador. 52p.
- Plumstead, E.E. 1990. Changes in ichthyofaunal diversity and abundance within the Mbashe estuary, Transkei, following construction of a river barrage. *South African Journal of Marine Science* 9: 399-407.
- Pond, S., Pickard, G. 1983. Tides. In: *Introductory Dynamical Oceanography*. Cap 13, p. 253-281. Butterworth-Heinemann Ltd.
- Powell, G.L., Matsumoto, J., Brock, D.A. 2002. Methods for Determining Minimum Freshwater Inflow Needs of Texas Bays and Estuaries. *Estuaries*. Vol 25, 6B, 1262-1274.
- Pritchard, D.W., 1952. Estuarine hydrography. In: *Advances in Geophysics*, Vol. 1, Academic Press, New York, pp. 243-280.
- RD Instruments. 2002. WorkHorse Installation Guide. P/N 957-6152-00. p. 33-36.
- RD Instruments. 1996. Acoustic Doppler Current Profiler: Principles of Operation – A Practical Primer. P/N 951-6069-00. p. 20-21.
- Reddering, J.S.V. 1988. Prediction of the effects of reduced river discharge on the estuaries of the south-eastern Cape Province, South Africa. *South Africa Journal of Sciences* 86:425-428.
- Richter, B.D., Baumgartner, J.V., Powell, J., Braun, D.P. 1996. A Method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems. *Conservation Biology*, 10, n. 4, 1163-1174.
- Richter, B.D., Baumgartner, J.V., Wigington, R., Braun, D.P. 1997. How much water does a river need? *Freshwater Biology*, 37, 231-249.
- Richter, B. 1999. Characterizing Hydrologic Regimes in Ecologically Meaningful Terms. Stream Systems Technology Center. United States Department of Agriculture - Forest Service. Stream Notes, January. (<http://www.stream.fs.fed.us/news/>).
- Robertson, A.W., Mechoso, C.R. 1998. Interannual and Decadal Cycles in River Flows of Southeastern South America. *Journal of Climate*. 11:2570-2581.

- Rubin, J. A., Gordon, C., Amatekpor, J. K. 1998. Causes and consequences of Mangrove Deforestation in the Volta Estuary, Ghana: some Recommendation for Ecosystem Rehabilitation. *Marine Pollution Bulletin*, vol 37, n. 8-12, 441-449.
- Scharler, U.M., Baird, D. 2000. The effects of a single freshwater release into the Kromme Estuary. 1: General description of the study area and Physico-chemical responses. *Water SA*. Vol 26 N 3. p 291-300.
- Schettini, C. A. F. 2001. Dinâmica de Sedimentos Finos no Estuário do Rio Itajaí-açu, SC. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. p. 32.
- Silva, F. R., Dominguez, J. M. L., Bittencourt, A.C.S.P. 2002. Mudanças na Desembocadura do Rio São Francisco. In: *Anais. XLI Congresso Brasileiro de Geologia, João Pessoa/Pb. v.1. p.111.*
- Sklar F.H., Browder, J.A.1998. Coastal Environmental Impacts Brought About by Alterations to Freshwater Flow in the Gulf of Mexico. *Environmental Management*, 22 (4):547-562.
- Souza, E.B, Alves, J.M.B, Xavier, T.M.B.S. 1998. A estação chuvosa no semi-árido nordestino nos anos de predominância de aquecimento ou resfriamento em toda bacia do Atlântico Tropical. In: *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 3, n. 2, p.47-55.
- Souza Filho, F.A., Lall, U. 2004. Modelo de previsão de vazões sazonais e interanuais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 9, n. 2, p. 61-74. Porto Alegre.
- The Open University. 1989. *Waves, tides and shallow-water processes*. 187 p.
- Tucci, C.E.M, 1993. Escoamento Superficial. In: *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Associação Brasileira de Recursos Hídricos: Editora da Universidade de São Paulo. Capítulo 11. p. 391-441.
- Tucci, C.E.M. 2002. Impactos da variabilidade climática e uso do solo sobre os recursos hídricos. *Forum Brasileiro de Mudanças Climáticas*. Agência Nacional da Águas. 150p.
- Uncles, R.J., Ong, J.E., Gong, W.K. 1990. Observations and analysis of a stratification-destratification event in a Tropical estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 31(5):651-665.
- Uncles, R.J., Stephens, J.A. Smith, R.E. 2002. The dependence of estuarine turbidity on tidal intrusion length, tidal range and residence time. *Continental Shelf Research*, 22:1835 –1856.

- Vieira, M. E. C., Bordalo, A. A. 2000. The Douro estuary (Portugal): a mesotidal salt wedge. *Oceanologica Acta*, 23(5):585-594.
- Venice System. 1958 Symposium on the classification of brackish waters, Venice April 8–14, 1958. *Archives Oceanography and Limnology*. 11, suppl, 1–248.
- Walters, R.A, Heston, C. 1982. Removing Tidal-Period Variations from Time-Series Data Using Low-Pass Digital Filters. *Journal of Physical Oceanography*, 12:112-115.
- Weisstein, E.W. 2004. "Spencer's Formula." From [MathWorld](http://mathworld.wolfram.com/SpencersFormula.html)--A Wolfram Web Resource. <http://mathworld.wolfram.com/SpencersFormula.html> . Acesso em 14/12/2004.
- Wolanski E, Y. Mazda, B. King and S. Gay (1990) Dynamics, flushing and trapping in Hinchinbrook Channel, a giant mangrove swamp, Australia. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 31: 555-580.
- Wolanski, E., Moore, K., Spagnol, S., D'Adamo, N., Pattiaratchi, C. 2001. Rapid, Human-Induced Siltation of the Macro-Tidal Ord River Estuary, Western Australia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 53 : 717-732.
- Wolgemuth, K.M., Burnett, W.C., Moura, P.L. (1981) Oceanography and suspended material in Todos os Santos Bay. *Revista Brasileira de Geociências*, 11(3):172-178.
- Wong, L.A., Chen, J.C., Xue, H., Dong, L.X., Su, J.L., Heinke, G. 2003. A model study of the circulation in the Pearl River Estuary (PRE) and its adjacent coastal water: 1. Simulations and comparison with observations. *J. Geophys. Res.* 108(25):1-17.
- World Commission on Dams. 2000. Dams and Development. Final Report. [www.dams.org/report/wcd\\_sumario.htm](http://www.dams.org/report/wcd_sumario.htm).
- Williams, G. P., Wolman, M. G. 1984. Downstream effects of dams on alluvial rivers. Professional Paper 1286. United State Geological Survey. 83 p.

# ANEXO 1 – HIDROLOGIA

## PREENCHIMENTO DE FALHAS NAS SÉRIES DE VAZÕES

Os dados de vazão dos postos 51350000 e 51460000 foram objeto de análise para o preenchimento de falhas de dados diários, mensais e anuais, de maneira a definir as séries de vazões anuais e desenvolver as análises de alterações hidrológicas. Os postos a montante serviram de apoio às análises de correlação. É comum utilizar regressão linear na aplicações hidrológicas (Clarke, 1993).

### Preenchimento das lacunas associados aos dados diários

De 8 a 16/nov/1952:  $Q_{5135} = 1,0102 Q_{5128} + 1,104$  ( $R^2 = 0,944$ ) – 2 dias de defasagem no tempo

De 1 a 15/abr/1957:  $Q_{5135} = 1,3095 Q_{5128} - 47,269$  ( $R^2 = 0,918$ ) – 2 dias de defasagem no tempo

De 16 a 31/ago/1960:  $Q_{5135} = 43,013 \text{Ln}(Q_{5128}) - 108,74$  ( $R^2 = 0,964$ ) – 1 dia de defasagem no tempo

De 1 a 14/jan/1963:  $Q_{5135} = 1,1331 Q_{5128} + 16,486$  ( $R^2 = 0,854$ ) – 2 dias de defasagem no tempo

5 a 10/mai/1964:  $Q_{5135} = 1,77 Q_{5128} - 16,002$  ( $R^2 = 0,944$ ) – 2 dias de defasagem no tempo

### Preenchimento das lacunas associados aos dados mensais

1946 a 1964:  $Q_{5135} = 0,9184 Q_{5128}^{1,0418}$  ( $R^2 = 0,957$ ) – Dados de 1946 a 1964

1979:  $Q_{5146} = 3,1484 Q_{5143} + 0,7525$  ( $R^2 = 0,983$ ) - Dados de 1980 e 1981

1969 a 1971:  $Q_{5144} = 0,1068 Q_{5142}^2 + 0,8964 Q_{5142}$  ( $R^2 = 0,975$ ) – Dados de 1968 a 1973



onde  $Q_{5135}$  = vazão mensal no posto 51350000;  $Q_{5128}$  = vazão mensal no posto 51280000;  $Q_{5146}$  = vazão mensal no posto 51460000;  $Q_{5144}$  = vazão mensal no posto 51440000;  $Q_{5143}$  = vazão mensal no posto 51430000;  $Q_{5142}$  = vazão mensal no posto 51420000.

Preenchimento das lacunas associados aos dados anuais

1969 e 1971:  $Q_{5146} = 2,06 Q_{5144} + 0,75$  ( $R^2 = 0,805$ )

onde  $Q_{5146}$  = vazão mensal no posto 51460000;  $Q_{5144}$  = vazão mensal no posto 51440000.

## SÉRIES DE VAZÕES MÉDIAS ANUAIS

Séries de vazões médias anuais [m <sup>3</sup> /s] - postos Argoim (Rio Paraguaçu) e Ponte Rio Branco (Rio Jacuípe)					
Ano	Argoim	Ponte Rio Branco	Ano	Argoim	Ponte Rio Branco
1930	-	25,34	1967	60	2,55
1931	-	0,62	1968	116	15,13
1932	-	1,74	1969	146	26,62
1933	-	3,49	1970	123	8,68
1934	-	1,26	1971	62	3,55
1935	-	7,92	1972	55	2,07
1936	-	3,27	1973	75	2,56
1937	-	4,18	1974	97	8,13
1938	-	0,60	1975	113	11,27
1939	-	0,33	1976	45	2,49
1940	-	18,79	1977	92	3,14
1941	-	11,70	1978	218	28,86
1942	-	2,85	1979	115	11,87
1943	-	6,77	1980	171	43,26
1944	-	3,08	1981	129	14,62
1945	-	27,45	1982	46	6,01
1946	-	3,25	1983	58	7,75
1947	51	3,28	1984	59	1,15
1948	137	19,57	1985	68	4,83
1949	85	13,57	1986	82	15,76
1950	72	12,83	1987	42	1,24
1951	52	1,30	1988	44	3,31
1952	24	1,16	1989	34	4,50
1953	52	8,54	1990	141	34,26
1954	87	10,13	1991	45	1,89
1955	81	11,34	1992	181	22,50
1956	75	1,47	1993	36	0,28
1957	185	23,35	1994	45	4,62
1958	70	3,21	1995	21	1,05

Séries de vazões médias anuais [m <sup>3</sup> /s] - postos Argoim (Rio Paraguaçu) e Ponte Rio Branco (Rio Jacuípe)					
Ano	Argoim	Ponte Rio Branco	Ano	Argoim	Ponte Rio Branco
1959	56	1,17	1996	27	5,43
1960	171	38,63	1997	132	19,40
1961	44	0,33	1998	17	0,38
1962	29	0,68	1999	40	3,64
1963	47	2,38	2000	103	2,74
1964	223	37,29	2001	54	5,11
1965	73	4,04	2002	98	14,84
1966	99	23,68	2003	32	-
			Média	83	9,51
			Máxima	223	43
			Mínima	17	0,28
			Desvio Padrão	50,1	10,5

## COEFICIENTE DA CURVA DE RECESSÃO DOS HIDROGRAMAS DE CHEIA

Vazão máxima [ m<sup>3</sup>/s] e coeficiente da curva de recessão dos hidrogramas nos rios Paraguaçu e Jacuípe

Evento	Data	N dias*	Argoim		Ponte Rio Branco		Argoim+Ponte Rio Branco	
			Vazão	k	Vazão	k	Vazão	k
1	mar/48	6	420	0,14				
2	dez/48	6 (4)	1280	0,23	630	0,51	1910	0,26
3	dez/49	5	1004	0,21	985	0,58		
4	abr/50	4	780	0,26				
5	dez/52	5	880	0,18	616	0,61	1496	0,28
6	dez/52	5	660	0,20				
7	dez/53	1	603	0,81	703	0,90	1312	0,49
8	dez/53	4	393	0,22				
9	abr/54	3	390	0,27				
10	dez/54	8 (4)	1000	0,25	1025	0,92		
11	jan/55	6 (4)	600	0,21	87	0,68	507,4	0,28
12	mar/56	4	414	0,20				
13	dez/56	6 (4)	920	0,20	216	0,64	1136	0,23
14	mar/57	6 (9)	1934	0,23	618	0,30	2256	0,24
15	jan/58	4	450	0,40				
16	fev/58	4			132	0,77		
17	jan/60	4	555	0,54				
18	fev/60	4	1012	0,48	711	0,67		
19	mar/60	4 (3)	2156	0,19	1298	0,45	3454	0,22
20	dez/63	3	892	0,22				
21	jan/64	4	2090	0,25	1039	0,62	3129	0,33
22	dez/64	3	492	0,35	86	0,61		
23	dez/64	5	525	0,30				

Evento	Data	N dias*	Argoim		Ponte Rio Branco		Argoim+Ponte Rio Branco	
			Vazão	k	Vazão	k	Vazão	k
24	mar/66	6	501	0,16				
25	abr/66	8	1060	0,22	618	0,68	1678	0,25
26	dez/66	4	399	0,14	112	0,84		
27	jan/67	4	375	0,41				
28	dez/67	3	844	0,51				
29	jan/67	7			508	0,47		
30	fev/68	5	534	0,12				
31	mar/68	5	501	0,18	141	0,38		
32	nov/68	10	852	0,19	502	0,69	1354	0,23
33	fev/69	5	639	0,29				
34	mar/69	10 (5)	1260	0,16	693	0,41	1857	0,17
35	jan/70	4	441	0,24				
36	fev/70	5	800	0,28				
37	mar/70	4	393	0,21				
38	nov/70	4	872	0,26				
39	jan/73	6	908	0,34				
40	abr/74	7	474	0,21				
41	dez/74	9 (4)	788	0,23	120	0,87		
42	jan/75	4			489	0,75		
43	fev/75	5	519	0,19	429	1,17		
44	abr/75	3	384	0,38				
45	fev/76	6 (3)	486	0,29	277	0,96		
46	out/76	5	462	0,32				
47	dez/76	6	555	0,27				
48	fev/78	6	1252	0,21	376	0,46		
49	mar/78	3	740	0,20	236	0,88		
50	abr/78	6	1100	0,24				
51	mai/78	4	450	0,22	596	0,58		
52	jan/79	5	944	0,32	580	0,84		
53	fev/79	4	736	0,33				
54	fev/80 -1	3	1706	0,36				
55	fev/80 -2	3	2500	0,61				
56	fev/80 -3	3	976	0,24				
57	nov/80	5			356	0,80		
58	mar/81	3	2103	0,36				
59	dez/89	4	3972	0,25	2400	0,66	6372	0,36
<b>Média</b>				<b>0,28</b>		<b>0,68</b>		<b>0,28</b>

\* duração da recessão no Rio Jacuípe entre () quando diferente do Rio Paraguaçu.

## VAZÕES MÉDIAS MENSAIS DE PROJETO DA BARRAGEM PEDRA DO CAVALO

Vazões médias mensais do Rio Paraguaçu no posto Pedra do Cavalo [m<sup>3</sup>/s] (BAHIA, 1980)

Ano	Jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1930	36,5	38,5	74,5	194,0	71,2	115,0	60,1	44,9	13,7	9,7	101,0	357,0
1931	39,0	30,4	28,3	38,7	43,7	19,5	47,3	74,0	27,2	16,5	226,0	23,7
1932	47,7	40,8	55,1	33,7	10,8	23,5	43,9	32,3	8,8	8,0	75,6	50,8
1933	22,7	27,0	54,0	34,1	126,0	24,9	66,1	79,2	35,9	37,5	191,0	180,0
1934	176,0	26,8	30,3	14,1	56,2	55,8	28,3	31,2	22,6	31,5	61,2	43,0
1935	189,0	248,0	262,0	203,0	203,0	89,2	187,0	86,0	54,6	22,2	18,4	125,0
1936	175,0	351,0	109,0	337,0	300,0	150,0	114,0	94,1	29,1	26,6	64,6	88,4
1937	93,4	449,0	92,7	201,0	168,0	64,9	50,8	39,7	17,3	12,9	27,6	129,0
1938	85,9	24,6	126,0	81,3	40,2	27,1	44,4	24,6	22,9	26,1	29,6	89,6
1939	112,0	175,0	23,7	9,4	9,0	17,4	27,2	57,0	78,2	32,2	72,7	83,2
1940	115,0	215,0	738,0	123,0	90,7	103,0	34,0	43,2	29,9	90,7	216,0	79,4
1941	66,6	63,1	326,0	314,0	97,3	80,8	46,3	46,7	32,7	12,5	104,0	154,0
1942	69,0	59,9	40,5	40,8	36,2	38,1	33,7	60,2	27,7	119,0	517,0	739,0
1943	211,0	117,0	186,0	168,0	140,0	40,1	40,7	24,0	23,2	28,0	106,0	335,0
1944	247,0	54,8	21,8	118,0	56,6	41,6	29,1	38,0	17,5	25,6	23,1	446,0
1945	494,0	74,8	42,6	317,0	112,0	102,0	91,4	110,0	54,2	148,0	94,6	131,0
1946	182,0	61,1	60,6	133,0	116,0	68,0	60,4	66,2	26,2	17,2	43,0	59,5
1947	45,0	42,9	251,0	199,0	76,6	115,0	64,0	26,0	12,4	34,1	496,0	723,0
1948	118,0	49,6	190,0	78,6	74,6	92,5	190,0	83,3	74,4	39,1	25,9	734,0
1949	146,0	88,5	44,7	90,1	87,8	120,0	74,3	32,7	51,4	37,5	124,0	467,0
1950	73,0	36,6	115,0	232,0	123,0	61,0	39,8	39,0	23,6	25,7	143,0	94,9
1951	87,1	21,1	124,0	150,0	76,3	117,0	57,3	27,5	16,6	10,2	6,3	75,4
1952	32,8	7,5	109,0	38,9	47,4	39,8	21,9	49,5	17,0	19,9	104,0	476,0
1953	76,6	19,3	40,4	27,5	9,4	39,7	43,4	23,6	11,7	17,9	38,1	263,0
1954	49,9	257,0	122,0	404,0	80,0	52,6	37,7	84,7	27,9	10,3	102,0	571,0
1955	135,0	207,0	49,5	65,1	27,4	16,0	70,8	42,1	15,4	11,1	230,0	316,0
1956	79,6	80,6	230,0	111,0	62,8	33,1	42,6	41,7	18,7	30,8	417,0	269,0
1957	184,0	144,0	911,0	460,0	187,0	102,0	189,0	69,4	62,8	54,7	44,2	86,4
1958	216,0	310,0	132,0	119,0	111,0	50,6	81,4	58,9	30,0	112,0	160,0	44,7
1959	236,0	51,4	60,8	34,7	20,8	22,9	63,5	37,2	17,3	10,3	43,6	25,6
1960	218,0	439,0	925,0	522,0	144,0	144,0	109,0	78,8	86,5	34,0	80,1	132,0
1961	100,0	80,1	50,0	80,9	28,8	57,7	122,0	43,3	15,6	8,2	10,3	16,4
1962	58,4	41,5	58,9	54,8	65,9	33,1	42,7	30,2	21,1	20,4	25,1	211,0
1963	123,0	172,0	54,0	72,0	139,0	27,7	23,8	36,5	17,7	14,6	117,0	225,0
1964	1472,0	855,0	234,0	244,0	287,0	83,2	67,4	64,5	57,1	63,5	69,2	350,0
1965	39,2	34,3	14,3	178,0	50,9	56,3	76,4	68,2	39,8	89,9	104,0	53,1
1966	25,4	282,0	181,0	513,0	85,9	37,1	109,0	49,8	32,5	13,9	40,4	221,0
1967	107,0	39,9	62,6	89,1	63,6	98,9	140,0	67,6	48,5	51,2	171,0	403,0
1968	186,0	290,0	392,0	134,0	66,1	71,3	66,0	31,3	20,4	77,8	335,0	304,0
1969	82,5	423,0	745,0	170,0	141,0	101,0	76,9	50,8	21,2	28,3	13,3	316,0
1970	534,0	254,0	184,0	83,5	102,0	122,0	134,0	100,0	40,4	67,2	344,0	153,0
1971	38,0	26,6	21,7	43,2	23,0	15,2	95,9	22,1	60,8	10,7	155,0	51,2
1972	54,2	31,7	62,7	34,0	15,6	59,9	39,0	21,9	31,1	49,6	14,1	415,0
1973	123,0	23,1	81,1	90,5	25,4	64,4	55,4	21,6	11,2	73,9	73,3	117,0
1974	27,1	108,0	255,0	129,0	302,0	164,0	33,5	32,3	16,3	38,0	202,0	294,0
1975	192,0	205,0	57,5	194,0	47,5	30,7	59,9	70,1	53,4	26,0	71,0	62,4

## ANÁLISE DAS ALTERAÇÕES HIDROLÓGICAS – MÉTODO IHA

**Resultado do IHA para o Rio Paraguauçu - Barragem Pedra do Cavalo**

	Montante				Jusante				Resultado		
			Limite				Limite		Limites RVA		IHA
	Média	Dp	Inf	Sup	Média	Dp	Inf	Sup	Inf	Sup	
	Grupo #1										
Outubro	11	2,45	0,2	43,7	10,5	0,8	1,5	107,3	6,43	30,68	<b>0,57</b>
Novembro	56	1,97	4,4	193,4	65,4	2,34	1,5	375,7	14,53	105,7	<b>0</b>
Dezembro	91,3	1,66	5,6	1907	81	2,09	1	1876,3	65,99	181,1	<b>-0,29</b>
Janeiro	75,3	1,86	5	698,9	59,2	2,25	0,3	629,1	45,53	112,4	<b>-0,29</b>
Fevereiro	32,3	1,76	5	1444	15,9	4,14	0	1313	13,99	63,01	<b>-0,29</b>
Março	46,3	1,76	4,1	946	11,9	1,21	1,8	607,3	24,52	70,18	<b>-0,86</b>
Abril	45,3	2,05	4,3	388,5	12,2	1,99	0	456,7	19,41	84,54	<b>-0,14</b>
Mai	30,5	1,31	4,1	154,7	11,6	1,14	0	137,8	23,6	40,11	<b>-0,71</b>
Junho	23,8	1,4	5,6	65,8	10,6	0,74	1,9	45,1	19,29	43,45	<b>-0,86</b>
Julho	26,6	0,86	8,5	67,5	12,7	0,73	1,7	23,3	17,84	32,66	<b>-0,71</b>
Agosto	23,1	0,74	4,1	35	11,4	0,78	1,7	113,3	11,95	25,92	<b>-0,29</b>
Setembro	16	0,76	1,9	43,4	11,1	0,4	1,6	38,9	11,15	18,82	<b>-0,14</b>
	Grupo #2										
Vazão mínima 1 dia	4,1	0,63	0	9,7	0	0	0	0	3,96	5,17	<b>-1</b>
Vazão mínima 3 dias	4,1	0,51	0	10	0	0	0	4,2	4	5,3	<b>-0,75</b>
Vazão mínima 7 dias	4,1	0,58	0	10,3	3,7	2,29	0	10,1	3,99	5,6	<b>-0,57</b>
Vazão mínima 30 dias	4,7	0,59	0	13,4	5	1,1	0	11,6	4,19	5,79	<b>-0,43</b>
Vazão mínima 90 dias	12,4	0,84	1,8	27,2	9,5	0,78	0,4	17	5,35	13,89	<b>0,57</b>
Vazão máxima 1 dia	611	3,3	181	8302	946	1,08	161	5726	374,1	999,5	<b>-0,14</b>
Vazão máxima 3 dias	468	2,35	162,7	5988	789	1,37	160	5548	351,23	896,2	<b>-0,29</b>
Vazão máxima 7 dias	386,3	1,5	112,2	4062	606	1,5	150	4431,6	313,59	671,1	<b>-0,43</b>
Vazão máxima 30 dias	203	1,93	75,2	2036	256	1,68	50	2160,2	171,9	328,7	<b>-0,43</b>
Vazão máxima 90 dias	147,6	2,33	45,3	778,7	143,2	2,02	32,5	826,5	117,29	224,7	<b>0</b>
N,dias de vazão nula	0	0	0	34	63	2,2	7	195	0	0	<b>-1</b>
Escoamento de Base	0,08	0,87	0	0,18	0,06	1,73	0	0,43	0,05	0,1	<b>-0,14</b>
	Grupo #3										
Dia da mínima	291	0,14	75	356	277	0,02	8	303	275,7	317,2	<b>0,29</b>
Dia da máxima	8	0,25	7	359	346	0,16	8	361	69,78	331,8	<b>0</b>
	Grupo #4										
Número de pbv	7	0,43	2	14	19	1,63	5	112	6	8	<b>-0,67</b>
Duração dos pbv	10,1	1,8	2,5	54,8	6,2	4,38	1,2	48	7,56	13,77	<b>-0,86</b>
Número de pav	8	0,75	4	15	5	2,1	1	26	6	11	<b>-0,89</b>
Duração dos pav	12,6	0,96	6	54,5	10	1,63	1,7	34,5	10,21	17,51	<b>-0,57</b>
Limite do pbv	14,4										
Limite do pav	35,5										
	Grupo #5										
Taxa de ascensão	24,7	2,1	8,6	141,6	38,4	0,78	10,7	108,4	18,67	34,3	<b>-0,57</b>
Taxa de recessão	-8,2	1,84	-46,3	-2,7	-29,6	1,08	-111	-8,9	-14,13	-6,18	<b>-0,71</b>
Número de reversões	73	0,19	52	100	89	1	31	267	68,82	76,12	<b>-0,71</b>

(Dp - desvio padrão; pbv - pulso de baixa vazão; pav - pulso de alta vazão)

**Resultado do IHA para o Rio Paraguaçu - Barragem Pedra do Cavalo**  
**Comparação das frequências esperadas e observadas**

	Dentro do RVA			Acima do RVA			Abaixo do RVA		
	Esp,	Obs,	Alter,	Esp,	Obs,	Alter,	Esp,	Obs,	Alter,
	Grupo #1								
Outubro	7	11	0,57	5	2	-0,6	5	4	-0,2
Novembro	7	7	0	5	7	0,4	5	3	-0,4
Dezembro	7	5	-0,29	5	5	0	5	7	0,4
Janeiro	7	5	-0,29	5	5	0	5	7	0,4
Fevereiro	7	5	-0,29	5	4	-0,2	5	8	0,6
Março	7	1	-0,86	5	3	-0,4	5	13	1,6
Abril	7	6	-0,14	5	1	-0,8	5	10	1
Mai	7	2	-0,71	5	1	-0,8	5	14	1,8
Junho	7	1	-0,86	5	1	-0,8	5	15	2
Julho	7	2	-0,71	5	0	-1	5	15	2
Agosto	7	5	-0,29	5	3	-0,4	5	9	0,8
Setembro	7	6	-0,14	5	2	-0,6	5	9	0,8
	Grupo #2								
Vazão mínima 1 dia	7	0	-1	5	0	-1	5	17	2,4
Vazão mínima 3 dias	8	2	-0,75	5	0	-1	4	15	2,75
Vazão mínima 7 dias	7	3	-0,57	5	5	0	5	9	0,8
Vazão mínima 30 dias	7	4	-0,43	5	7	0,4	5	6	0,2
Vazão mínima 90 dias	7	11	0,57	5	1	-0,8	5	5	0
Vazão máxima 1 dia	7	6	-0,14	5	8	0,6	5	3	-0,4
Vazão máxima 3 dias	7	5	-0,29	5	8	0,6	5	4	-0,2
Vazão máxima 7 dias	7	4	-0,43	5	7	0,4	5	6	0,2
Vazão máxima 30 dias	7	4	-0,43	5	6	0,2	5	7	0,4
Vazão máxima 90 dias	7	7	0	5	5	0	5	5	0
N,dias de vazão nula	15	0	-1	2	17	7,5	0	0	0
Escoamento de Base	7	6	-0,14	5	4	-0,2	5	7	0,4
	Grupo #3								
Dia da mínima	7	9	0,29	5	0	-1	5	8	0,6
Dia da máxima	7	7	0	5	6	0,2	5	4	-0,2
	Grupo #4								
Número de pbv	9	3	-0,67	4	13	2,25	4	1	-0,75
Duração dos pbv	7	1	-0,86	5	7	0,4	5	9	0,8
Número de pav	9	1	-0,89	4	5	0,25	4	11	1,75
Duração dos pav	7	3	-0,57	5	5	0	5	9	0,8
	Grupo #5								
Taxa de ascensão	7	3	-0,57	5	10	1	5	4	-0,2
Taxa de recessão	7	2	-0,71	5	0	-1	5	15	2
Número de reversões	7	2	-0,71	5	11	1,2	5	4	-0,2

(Esp - esperado; Obs - observado; Alter - Alteração; pbv - pulso de baixa vazão; pav - pulso de alta vazão)

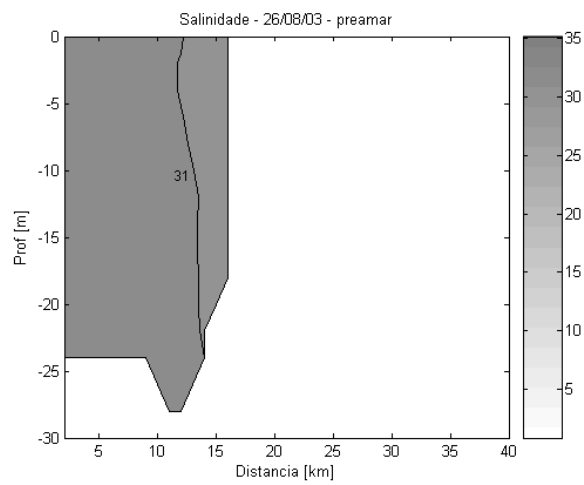
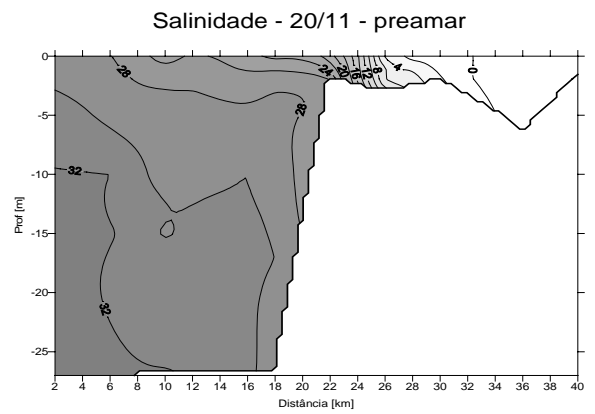
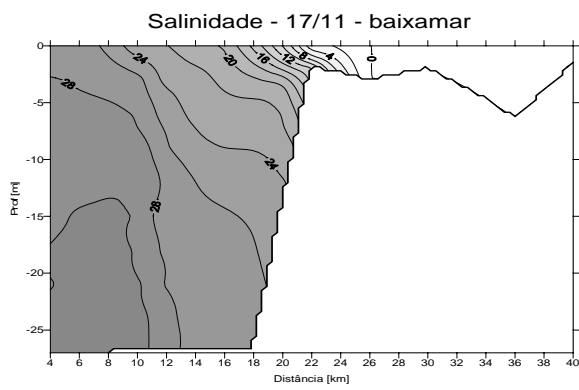
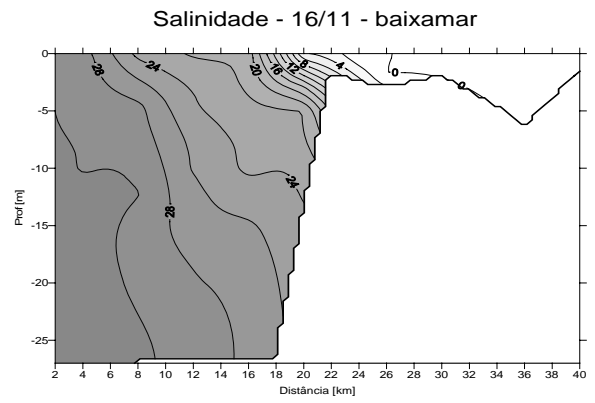
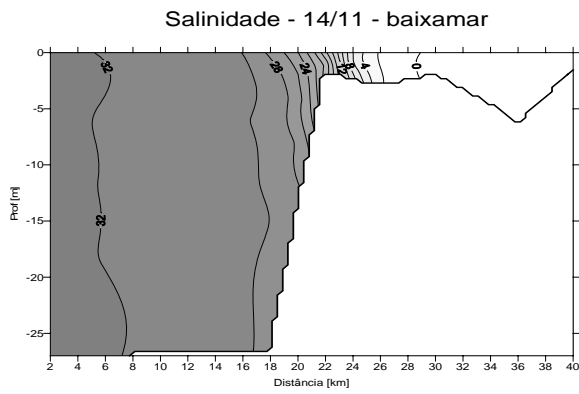
## ANEXO 2 – HIDROGRAFIA

### PARÂMETROS PARA O PROCESSAMENTO DOS DADOS DE CORRENTE ATRAVÉS DA ROTINA *ADCP\_PROCESSING*

Seção (Figura 5.4)	Ângulo do rio [°]	N. verticais	Altura da célula vertical [m]	Distância CTD à Margem Esquerda [m]	
				1	2
I - Canal do Paraguaçu	30	40	2	500 200(29/08/2003)	1000
V – BI – setor Norte	170	40	1	200	
IV – BI – setor Sul	70	40	1	380 (31/1/2004) 350 (8/2/2004)	
III – Canal do Paraguaçu a montante da Ilha do Francês	145	60	2	350	1500
VI – Baixo curso do rio 27/8/2003	90	20	0,5	400	
VI – Baixo curso do rio 22/05/2005	100	20	0,5	345	

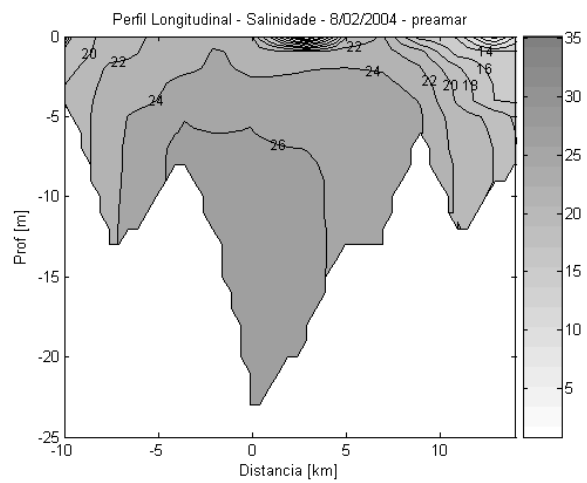
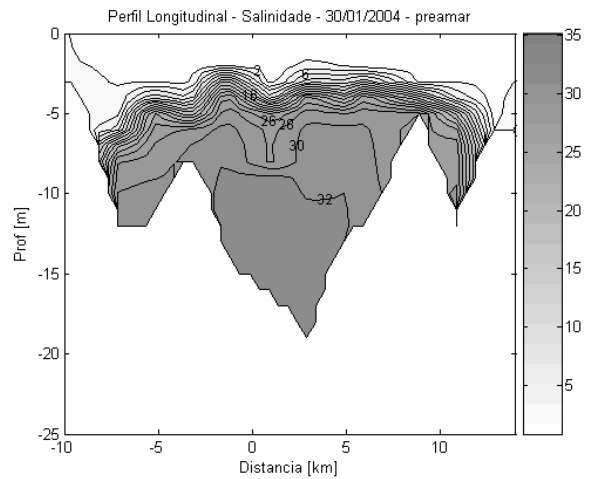
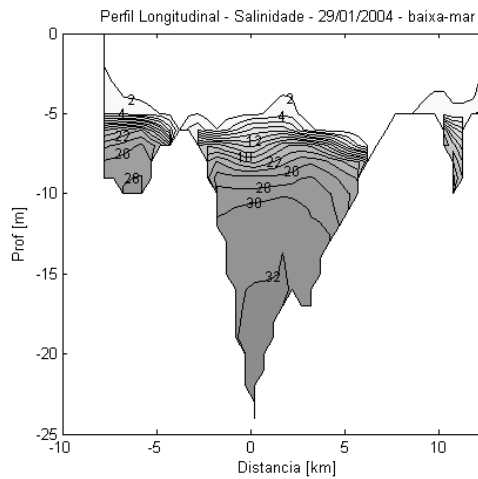
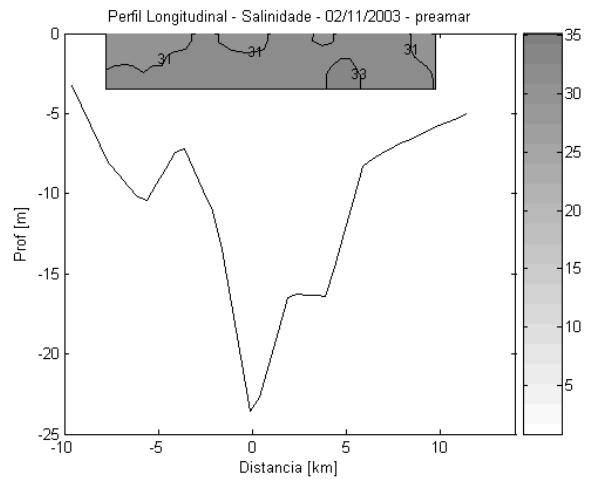
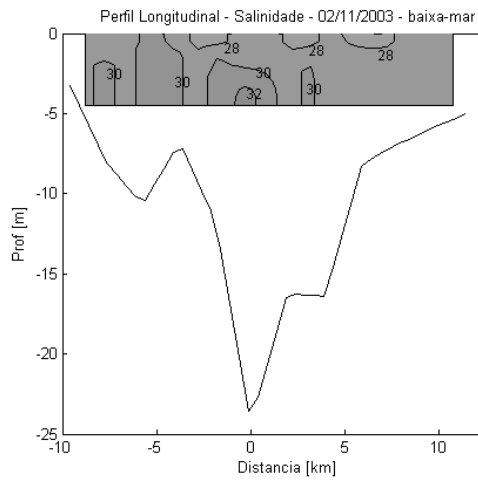
# PERFIS HIDROGRÁFICOS

## Salinidade – Rio Paraguaçu



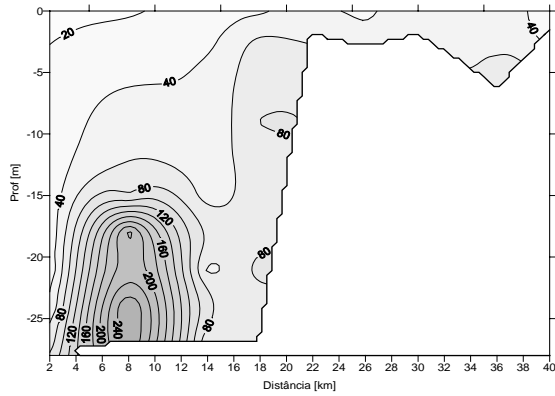


# Salinidade - Baía de Iguape

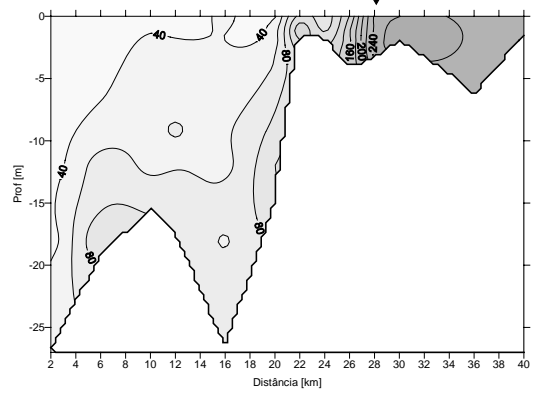


# Sedimentos em Suspensão – Rio Paraguaçu

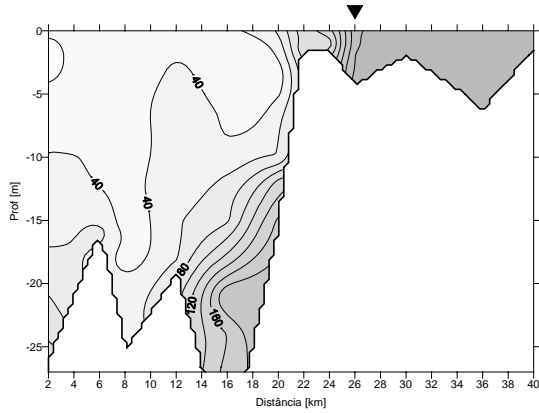
Sedimentos em Suspensão [mg/l] - 13/11 - baixamar



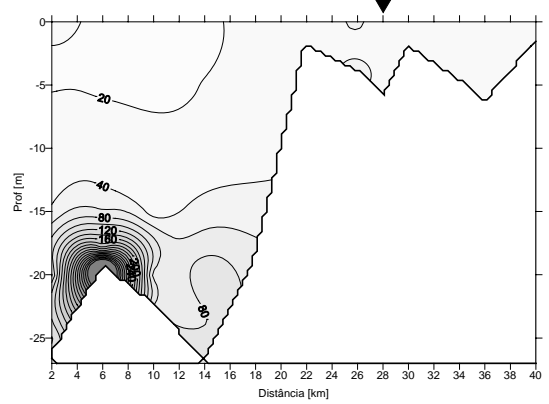
Sedimentos em Suspensão [mg/l] - 14/11 - baixamar



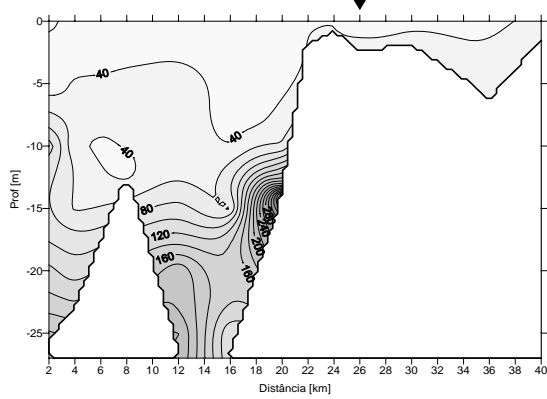
Sedimentos em Suspensão [mg/l] - 15/11 - baixamar



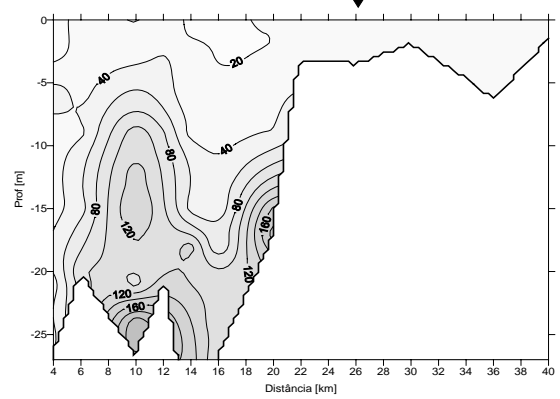
Sedimentos em Suspensão [mg/l] - 15/11 - preamar



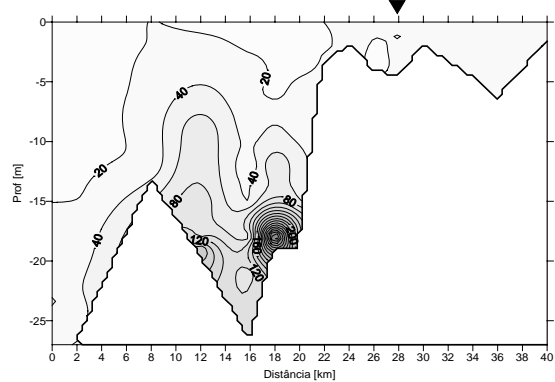
Sedimentos em Suspensão [mg/l] - 16/11 - baixamar



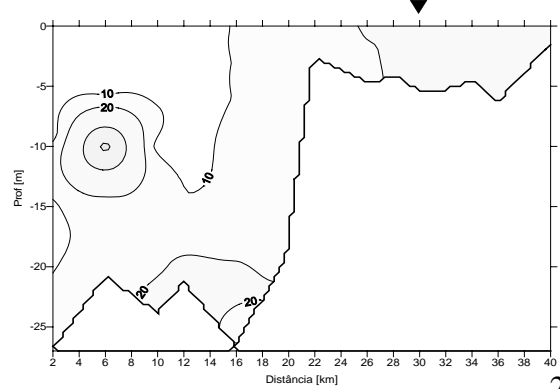
Sedimentos em Suspensão [mg/l] - 17/11 - baixamar



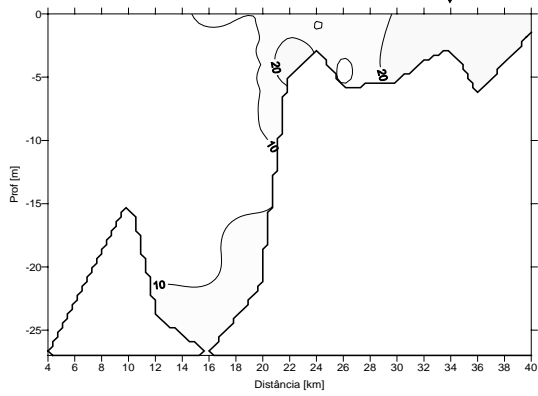
Sedimentos em Suspensão [mg/l] - 18/11 - baixamar



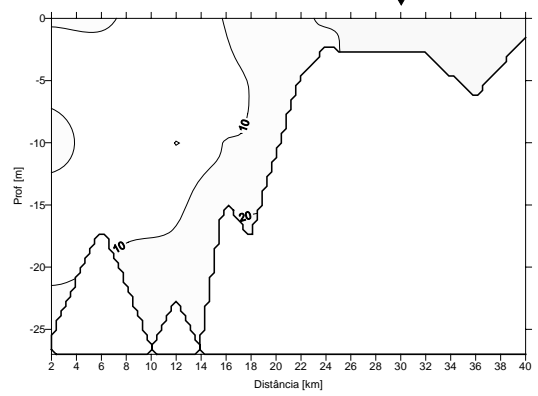
Sedimentos em Suspensão [mg/l] - 19/11 - preamar



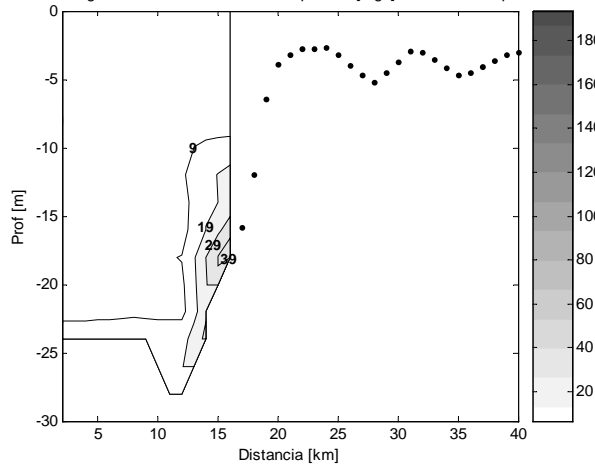
Sedimentos em Suspensão [mg/l] - 21/11 - preamar



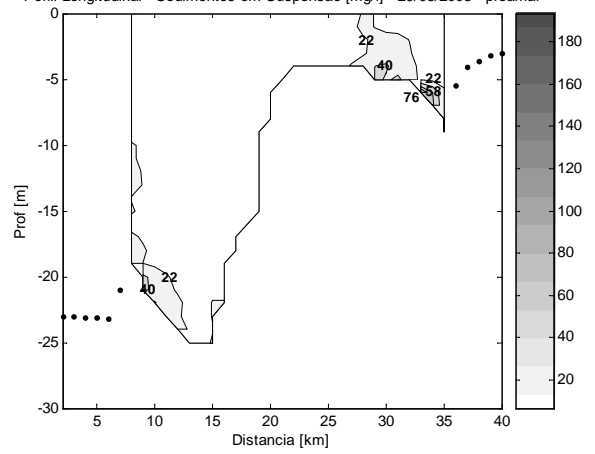
Sedimentos em Suspensão [mg/l] - 20/11 - preamar



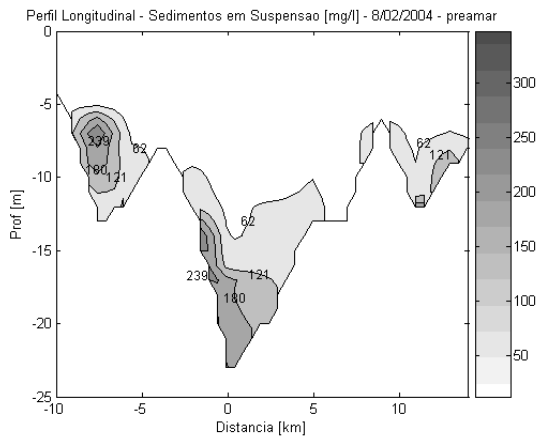
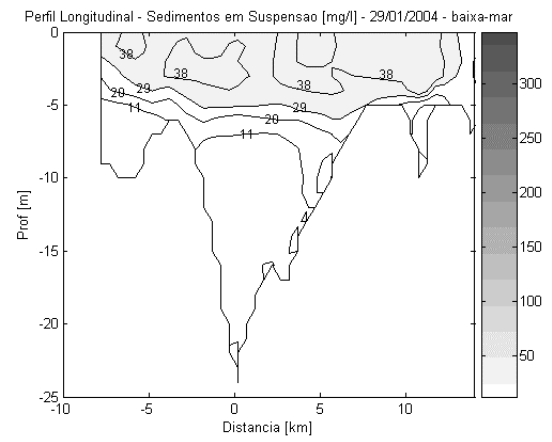
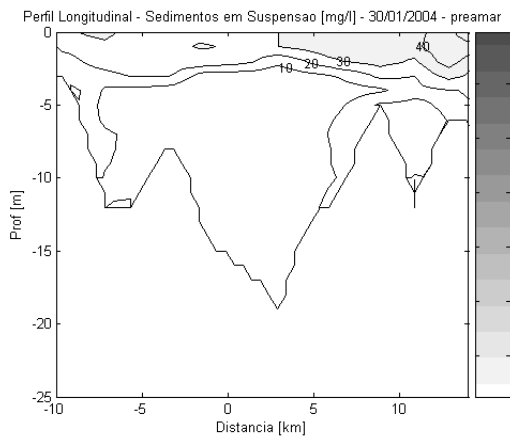
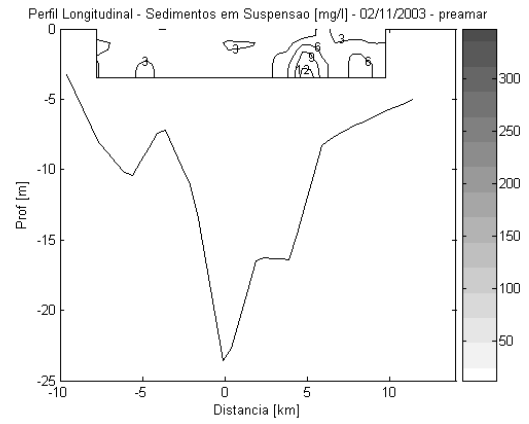
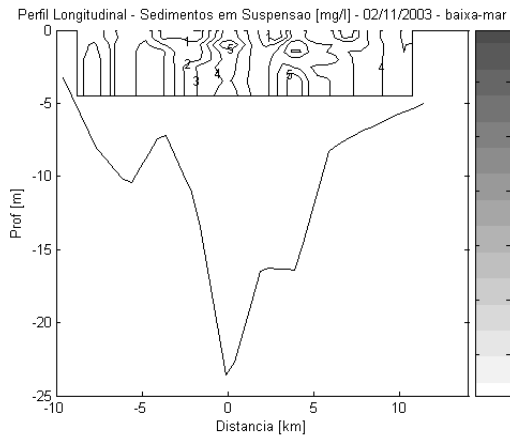
Perfil Longitudinal - Sedimentos em Suspensão [mg/l] - 26/08/2003 - preamar



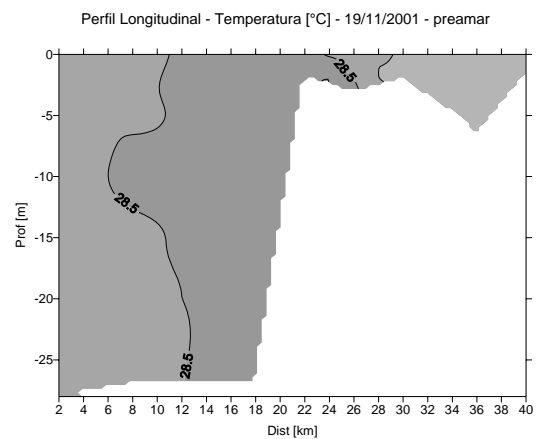
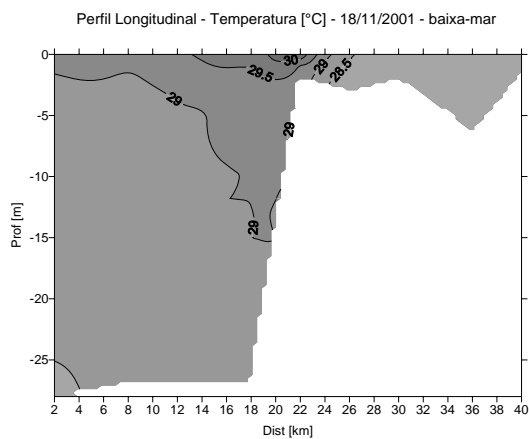
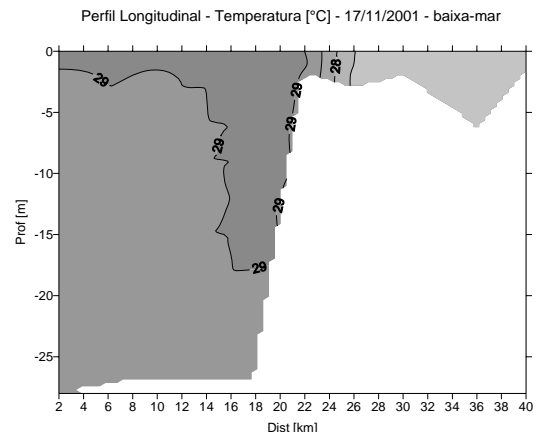
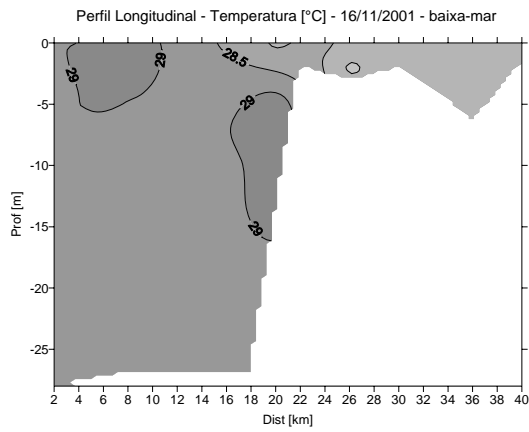
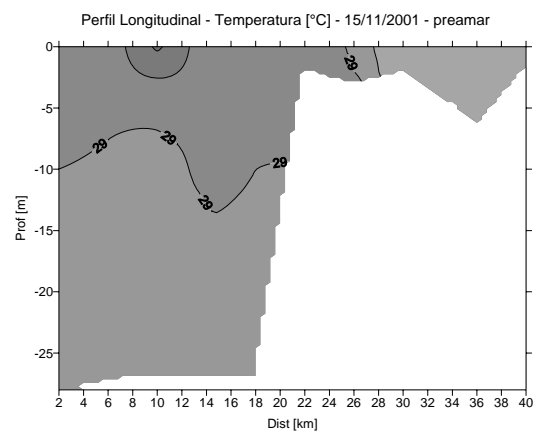
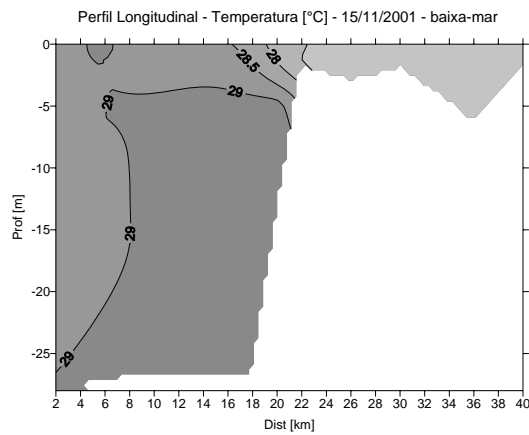
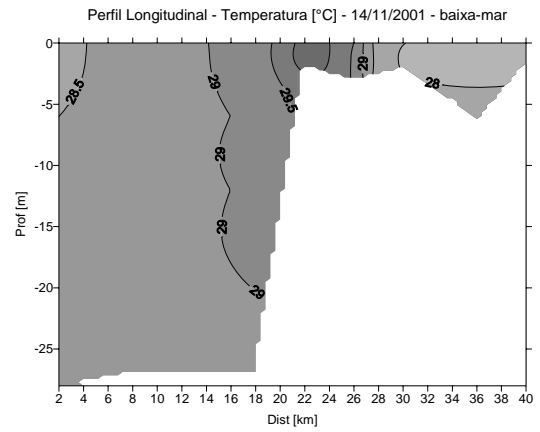
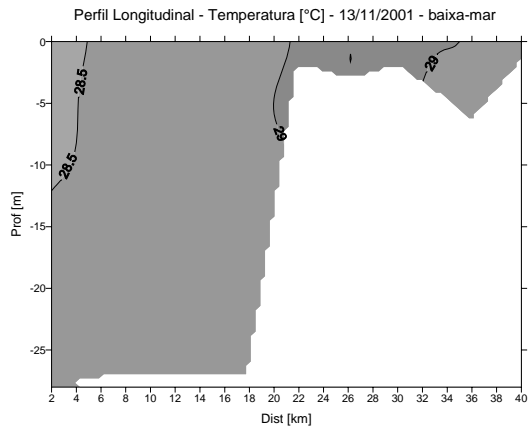
Perfil Longitudinal - Sedimentos em Suspensão [mg/l] - 29/08/2003 - preamar

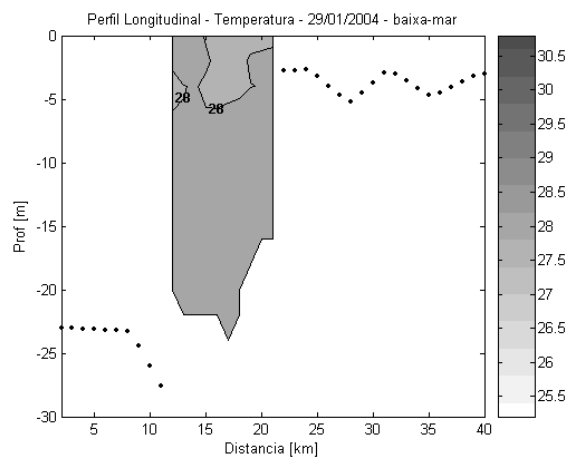
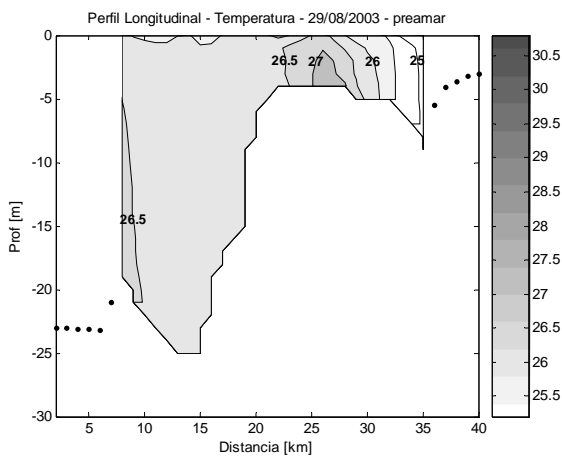
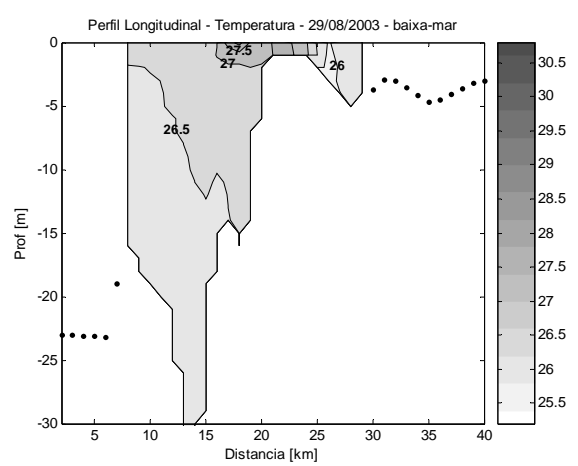
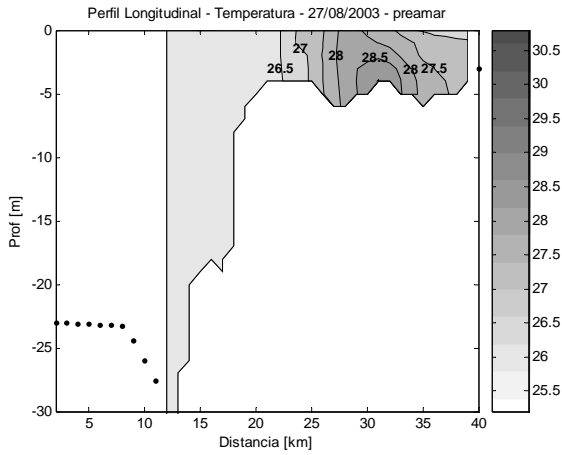
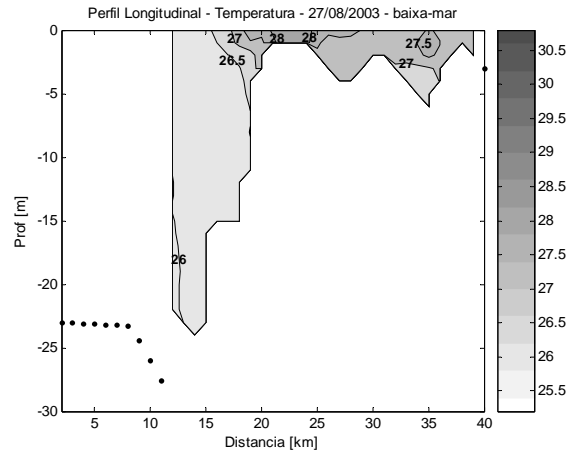
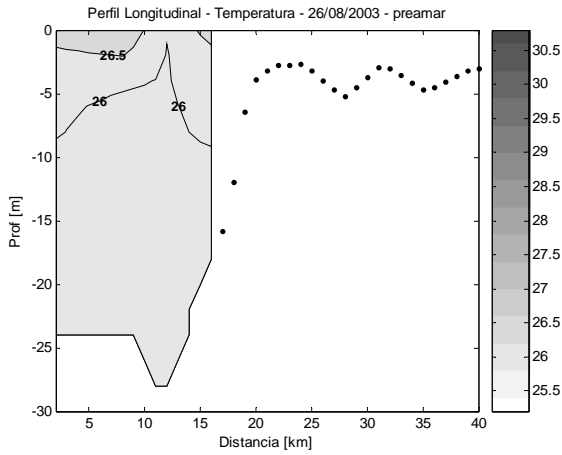
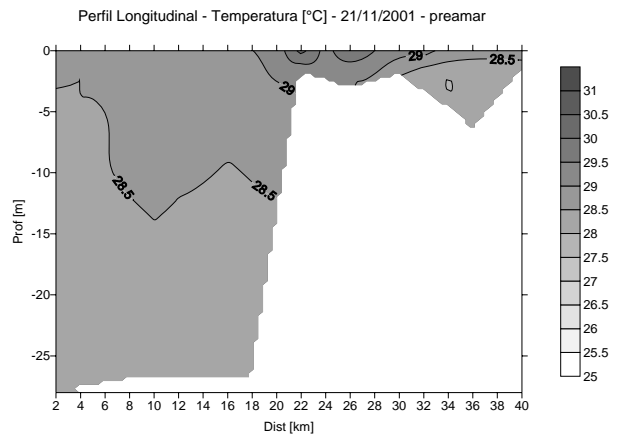
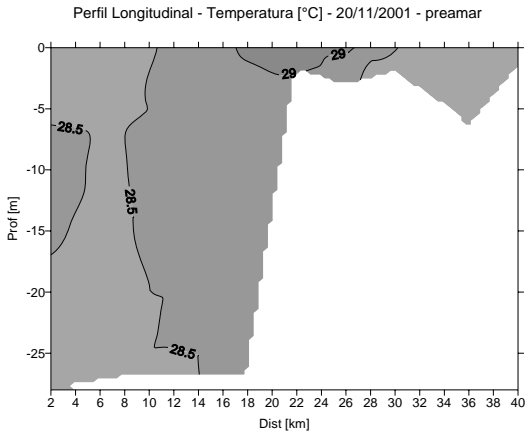


## Sedimentos em Suspensão – Baía de Iguape

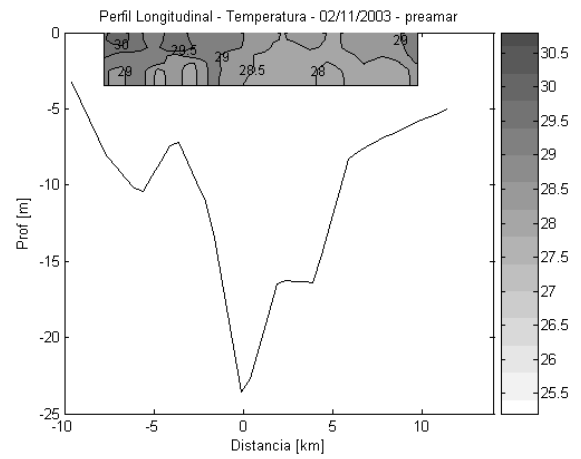
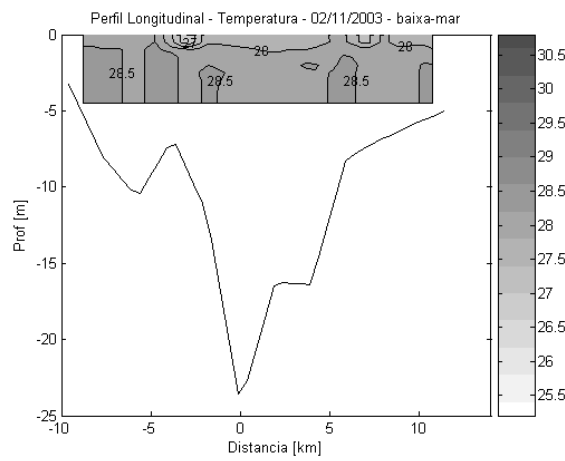
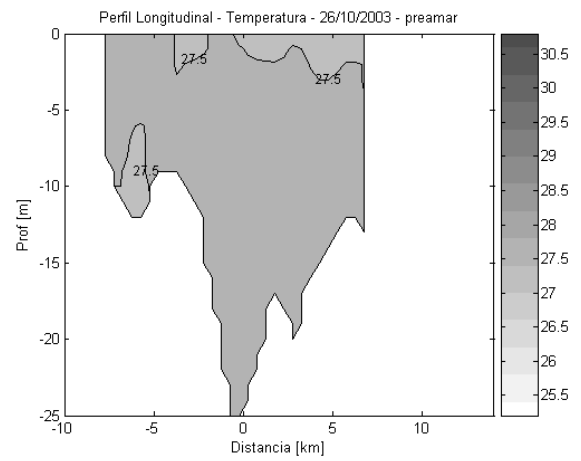
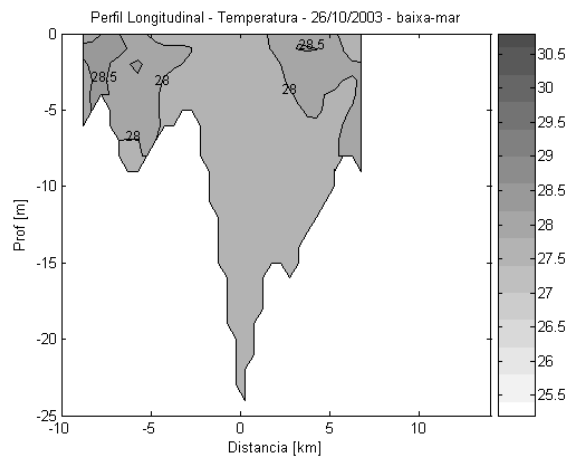
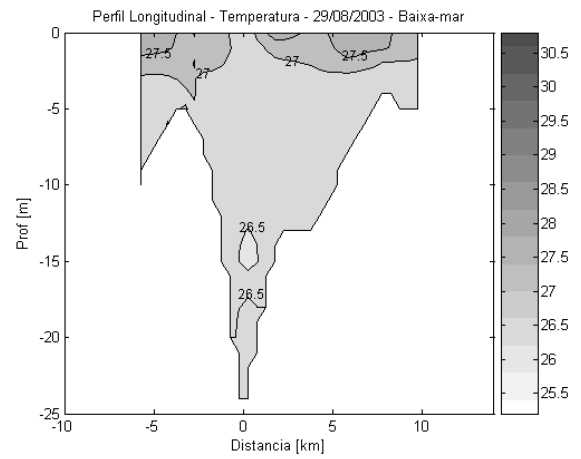
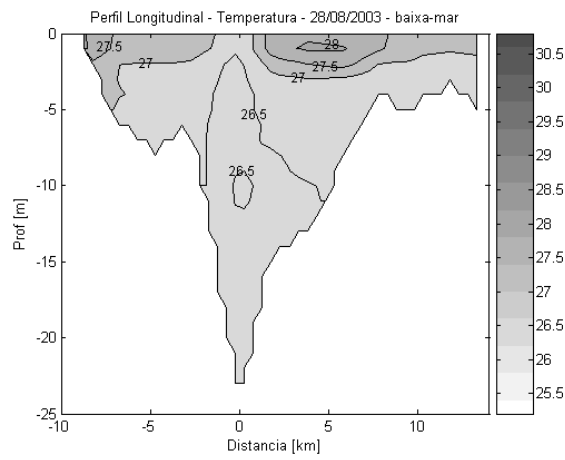


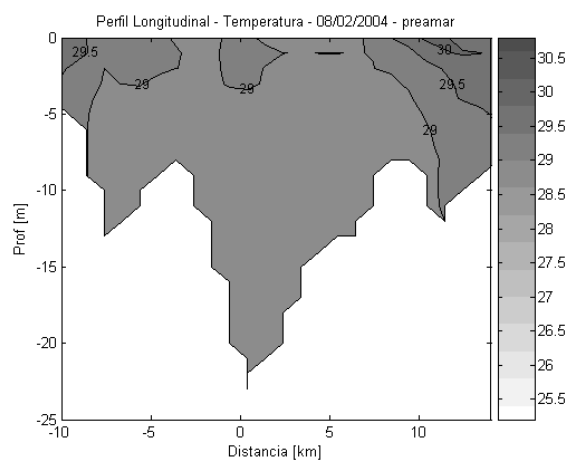
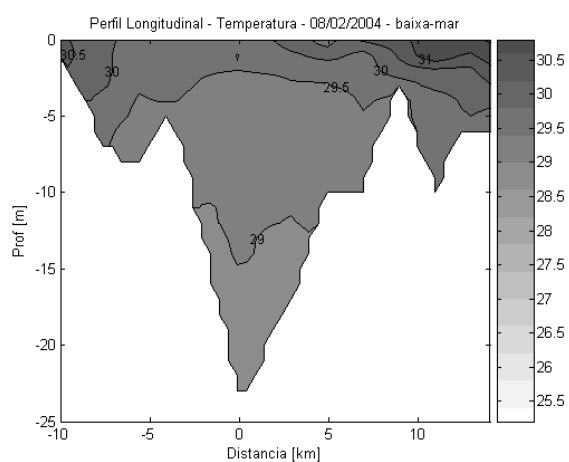
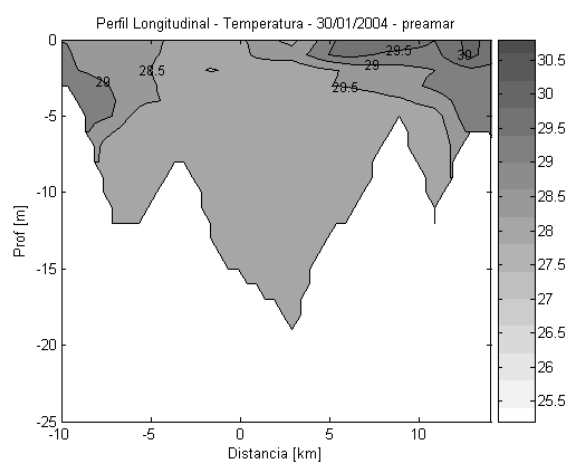
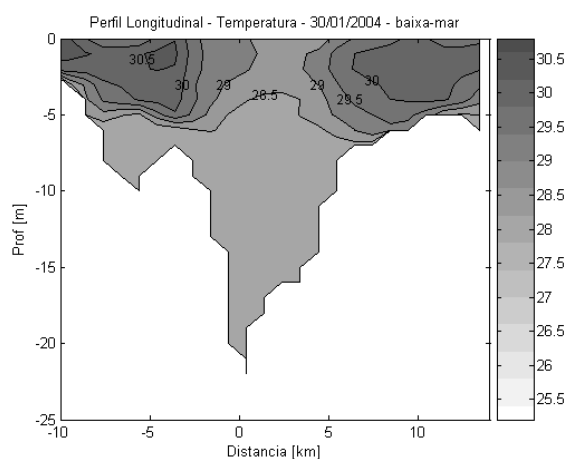
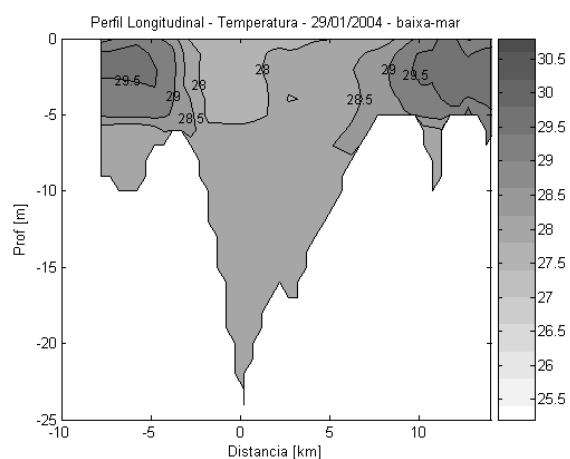
# Temperatura – Rio Paraguaçu





## Temperatura – Baía de Iguape







# NÚMERO DE RICHARDSON - $Ri_L$

