

4 – Apresentação e discussão dos resultados do modelo

4.1 – Estuário do rio Curimataú

4.1.1 – Salinidade

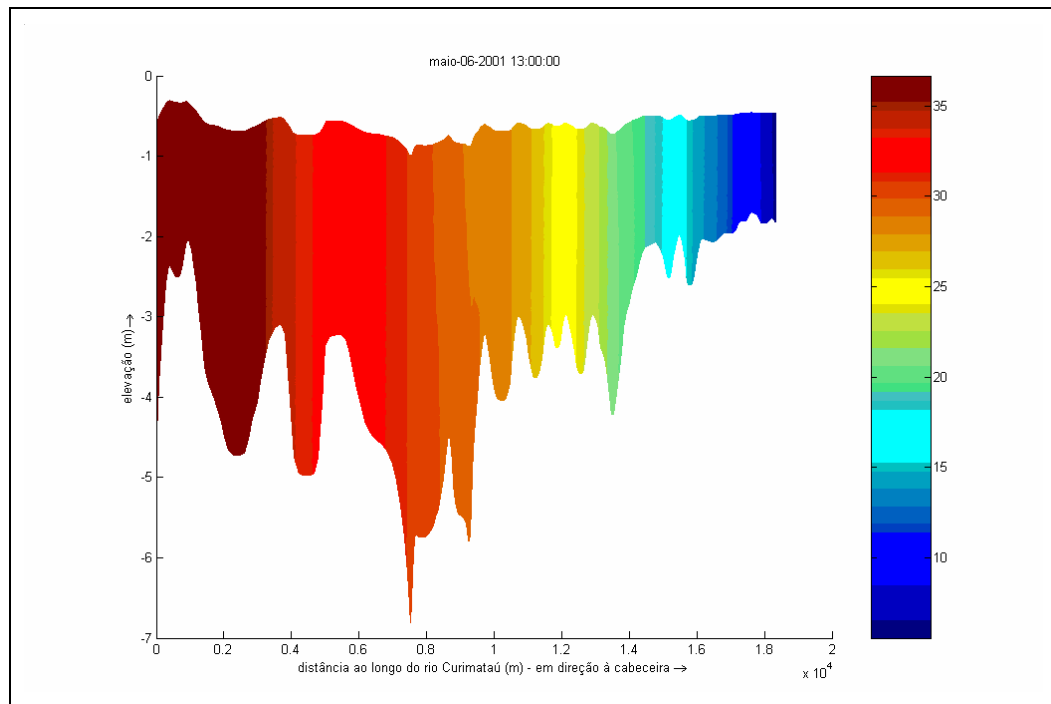
Na figura 4.1a,b,c,d apresentam-se resultados teóricos da variação da estrutura longitudinal da salinidade, durante quatro instantes de tempo consecutivos de maré de sizígia, 13:00 h, 16:00 h, 19:00 h e 23:00 h, do dia 06 de maio de 2001; esses instantes correspondem, de acordo com os resultados experimentais e teóricos (Fig. 3.17), às condições de maré de enchente (baixamar+3h) e vazante (preamar+3h), respectivamente.

A estrutura vertical da salinidade durante a enchente (13:00 h) apresenta-se praticamente bem misturada devido à influência difusiva e advectiva da maré (Fig. 4.1 a); como demonstrado na análise dos dados experimentais (Miranda et al., 2005) o estuário estava dominado pela maré ($R_{ie}=5,6$). No decorrer do penúltimo instante 19:00 h, condição de maré vazante, verifica-se uma intensificação da estratificação vertical da salinidade (Fig. 4.1 b).

Valores de salinidade de aproximadamente 5,0 e 36,5 foram obtidos nas proximidades da cabeceira do estuário (≈ 18.000 m) e da boca (≈ 1.200 m). Nessa figura observa-se também o avanço e o retrocesso das isohalinas de 25,0 e 30,0 de 2,5 km e 2,9 km, respectivamente, de acordo com os resultados experimentais apresentados na figura 2.14.

No decorrer desse experimento, as isohalinas são comprimidas e estendidas longitudinalmente, como o efeito da compressão e expansão da pressão por ocasião da propagação de ondas sonoras num meio compressível, como se observa comparando-se as figuras 4.1 a,b,c,d; o efeito advectivo de difusivo da maré é a forçante principal, uma vez que a descarga fluvial foi considerada constante. Entretanto, este efeito é variado ao longo da coluna de água, basta observar o comportamento de uma isohalina desde a superfície até o fundo nos diferentes instantes.

(a)



(b)

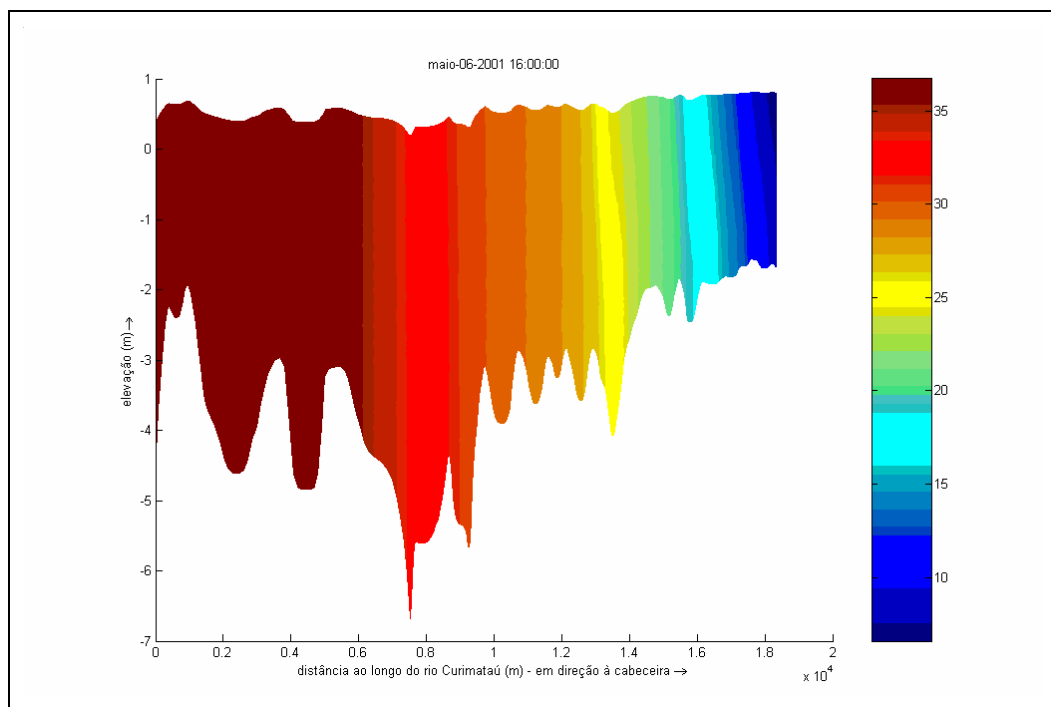
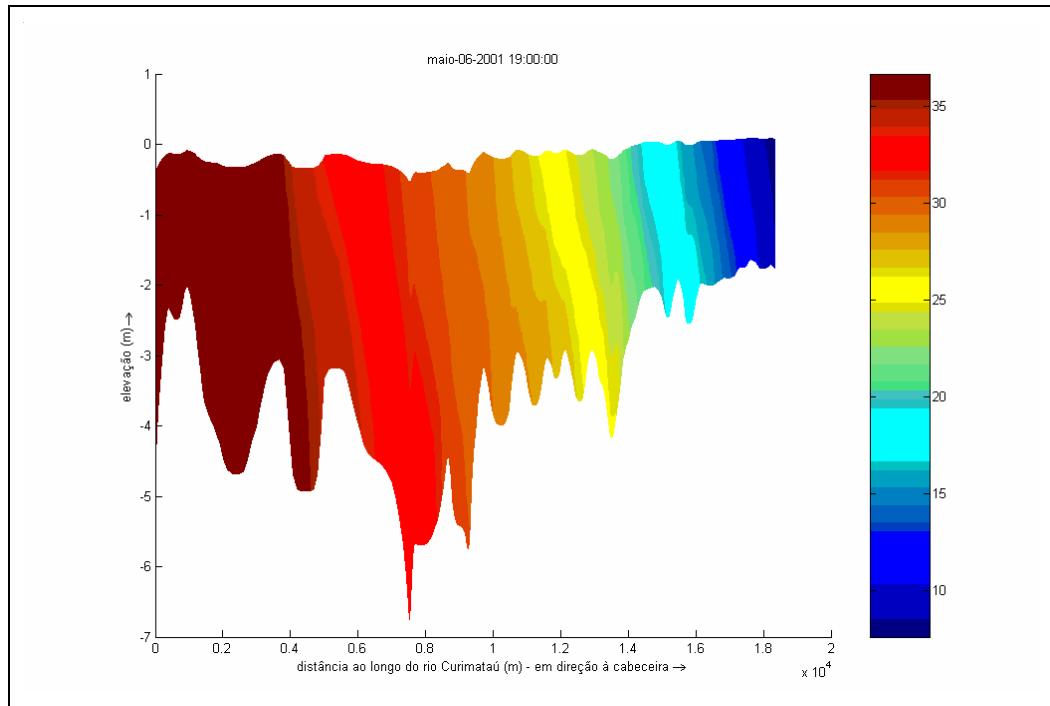
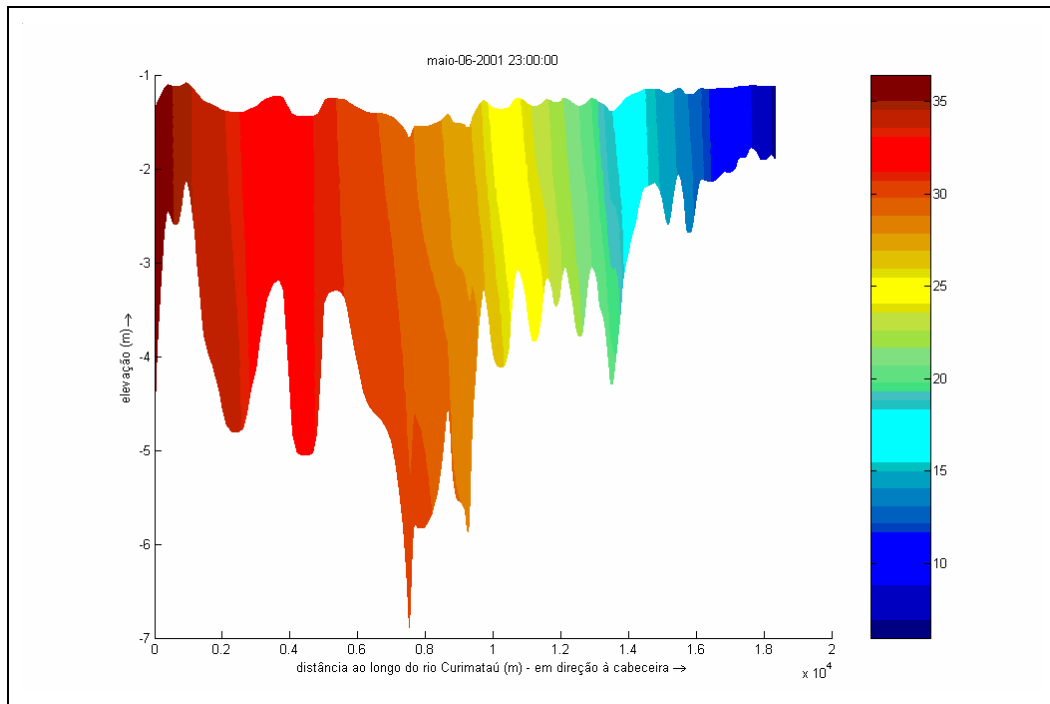


Figura 4.1 – Estrutura longitudinal da salinidade no estuário do rio Curimatá simulada para as 13 h (a) e 16 h (b), do dia 06/05/2001, na enchente (maré de sizígia).

(c)



(d)



Cont. **Figura 4.1** – Estrutura longitudinal da salinidade no estuário do rio Curimataú simulada para as 19 h (c) e 23 h (d), do dia 06/05/2001, na vazante (maré de sizígia).

4.1.2 – Velocidade longitudinal

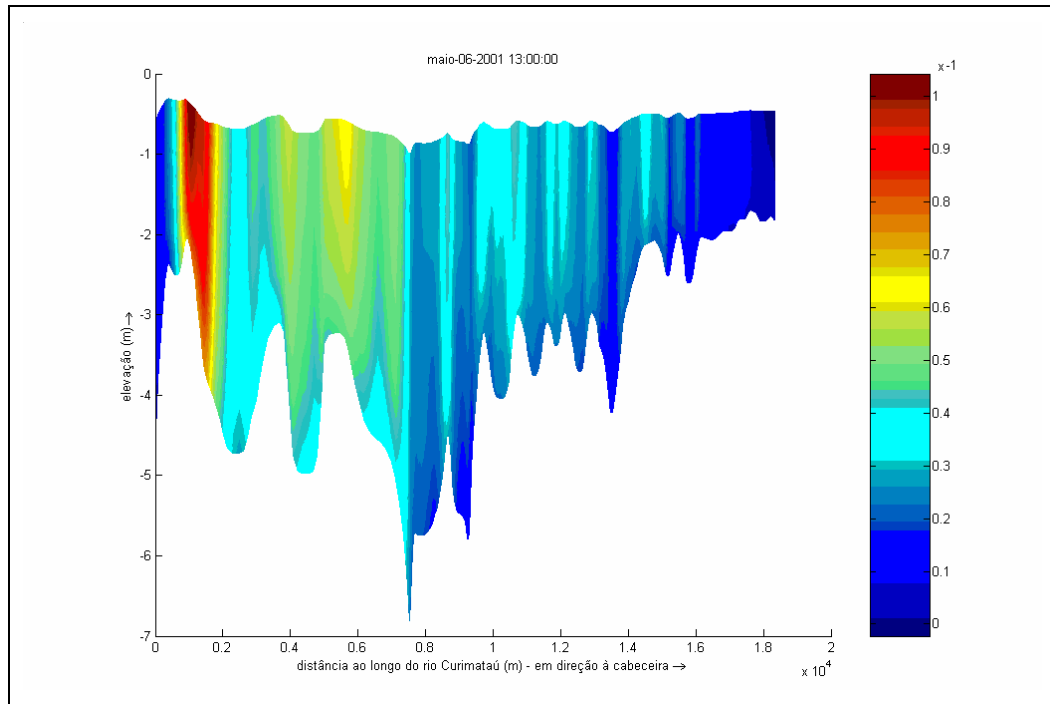
Na figura 4.2a,b apresenta-se à variação da estrutura longitudinal de velocidade (m.s^{-1}) simulada numericamente ao longo do estuário do rio Curimataú, no dia 06 de maio de 2001, em dois instantes de tempo durante a maré sizígia; esses instantes 13:00 h e 20:00 h correspondem à condição de enchente (baixa-mar+3h) e vazante (preamar +4h), respectivamente.

Durante a enchente (Fig. 4.2a) o movimento é unidirecional e as velocidades são decrescentes (em módulo) da boca à cabeceira do estuário, variando de valores próximos a $-1,0 \text{ m.s}^{-1}$ a $-0,1 \text{ m.s}^{-1}$. Os maiores valores ocorreram na boca do estuário, devido o estreitamento do canal estuarino e a presença de bancos de areia nas proximidades da desembocadura. Em geral, o cisalhamento vertical de velocidade é pequeno e este resultado, associado ao movimento unidirecional, está em concordância com os valores experimentais apresentados na figura (3.1).

No instante das 20:00 h (vazante) os movimentos também são unidirecionais e as velocidades máximas estuário acima são próximas a $1,0 \text{ m.s}^{-1}$ na boca do estuário (Fig. 4.2b). No geral, a intensidade do movimento decresce em direção ao interior do estuário, chegando a valores próximos a $0,1 \text{ m.s}^{-1}$. O cisalhamento vertical é pequeno em concordância com resultados experimentais (Fig. 3.1).

A análise comparativa das figuras 4.2a e 4.2b mostra simetrias entre os movimentos unidirecionais de enchente e vazante.

(a)



(b)

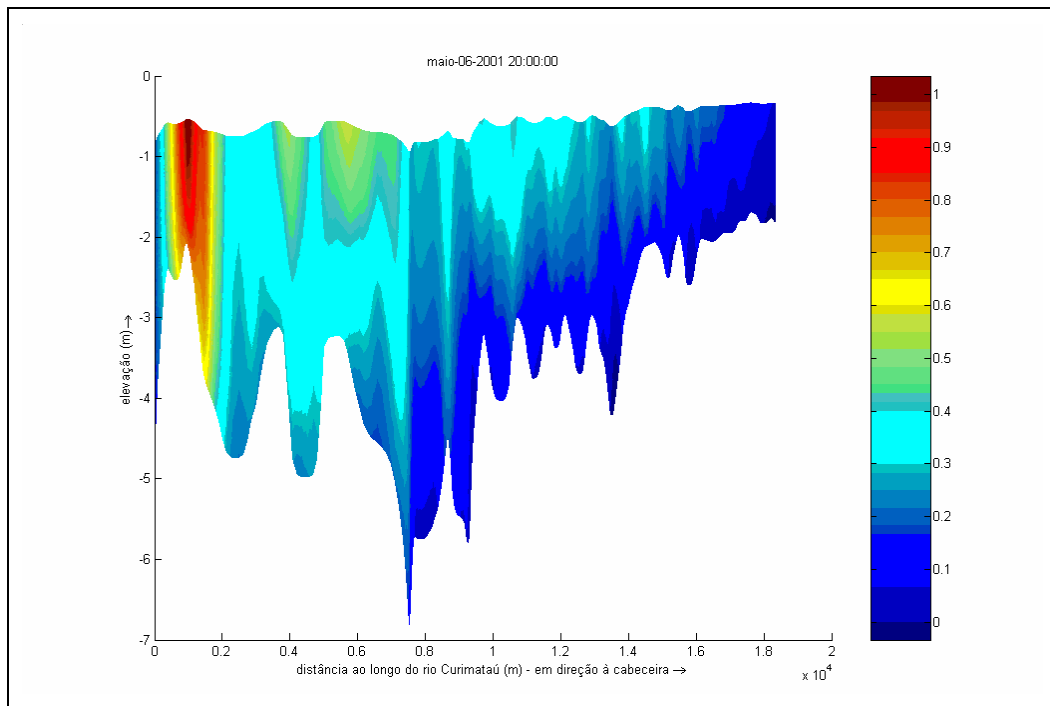


Figura 4.2 – Estrutura longitudinal da velocidade ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) no estuário do rio Curimatá simulada para as 13:00 h (a) e 20:00 h (b) do dia 06/05/2001 na enchente e vazante, respectivamente (maré sizígia).

Para ilustrar a ocorrência de movimentos bidirecionais no canal do Curimataú, devido à influência dos efeitos da descarga fluivial e das forçantes barotrópica e baroclínica, apresenta-se na figura 4.3 a simulação para o instante das 23:00 h, correspondente à estofa de baixa-mar (Fig. 3.17).

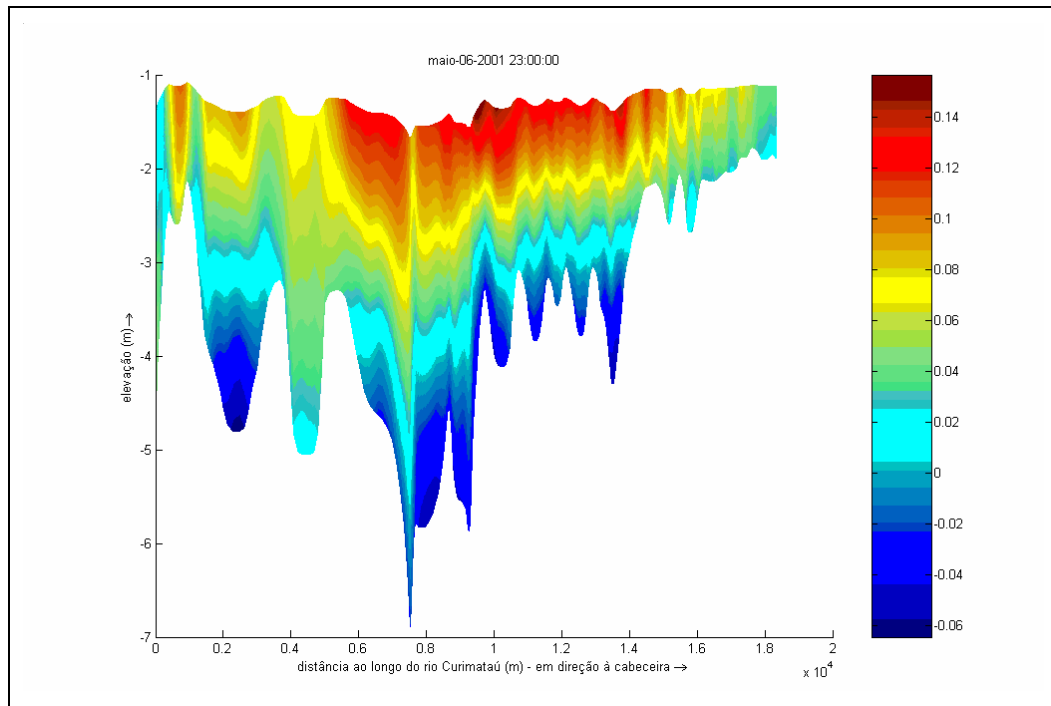


Figura 4.3 – Estrutura longitudinal da velocidade ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) no estuário do rio Curimataú simulada para as 23:00 h do dia 06/05/2001, correspondente à condição de estofa de baixa-mar (maré de sizígia).

Como era de se esperar, na condição de estofa de maré os movimentos são menos intensos (Fig. 4.3) e os resultados teóricos indicam tais movimentos; estuário abaixo ($u > 0$) na camada superficial, apresentando intensidades máximas próximas a $0,14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e estuário acima ($u < 0$) com intensidade de até $-0,08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. As maiores velocidades em direção à boca do estuário são observadas na região central do canal estuarino; entretanto, em direção à boca e à cabeceira, essas velocidades decrescem para valores entre $\approx 0,04 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $\approx 0,08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, indicando a ocorrência de regiões de convergência e divergência do campo de velocidade. Nas camadas de fundo os movimentos são forçados pelo efeito baroclínico para o interior do estuário ($u < 0$) e por continuidade, a esse efeito baroclínico superpõe-se ao da difusão da maré que transporta água mais salinas da camada de fundo para a superfície às quais, em superfície, são advectadas pelas correntes estuário abaixo.

4.1.3 – Velocidades transversais e verticais

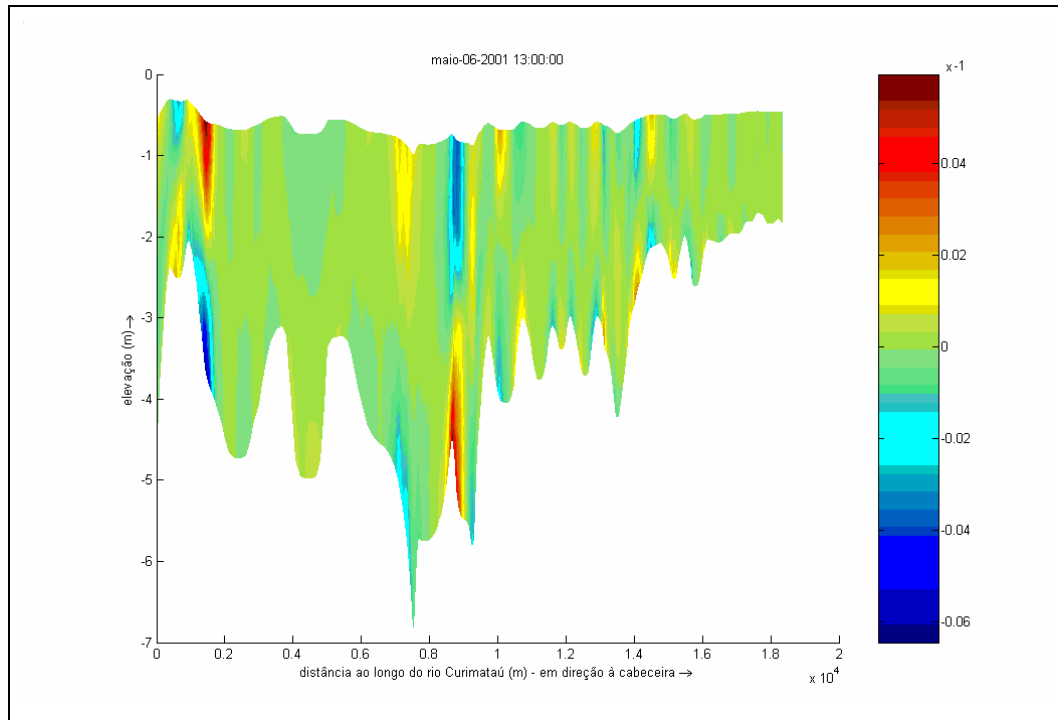
Tal como em oceano aberto, o campo de velocidade nos estuários é tridimensional e aos movimentos longitudinais analisados acima, superpõem-se os movimentos transversais (ou secundários) e verticais. Estes últimos são várias ordens de grandeza menores do que os movimentos longitudinais e transversais, tornando a sua medição experimental muito difícil, mas passível de ser calculada teoricamente com base na equação da continuidade.

As figuras 4.4a,b e 4.5a,b apresentam, respectivamente, a variação da estrutura de velocidade transversal e vertical no estuário do rio Curimataú. O regime de maré para estas observações foi o de sizígia realizadas em 06 de maio de 2001, às 13:00 h, durante a maré enchente (baixa-mar+3 h) e de vazante (preamar+3 h).

Os valores simulados do componente transversal da velocidade (Fig. 4.4), cujos valores variaram de $-0,09 \text{ m.s}^{-1}$ a $0,05 \text{ m.s}^{-1}$, são relativamente muito menores do que os longitudinais e as velocidades transversais mais intensas estiveram associadas às velocidades máximas longitudinais (Fig. 4.1). Esses valores teóricos estão em concordância com os resultados experimentais analisados por Miranda et al. (2005), no qual as velocidades transversais foram sempre menores ou iguais em módulo a $0,10 \text{ m.s}^{-1}$.

Durante a transição entre a maré enchente (Fig. 4.4a) e vazante (Fig. 4.4b) verifica-se que os máximos positivos e negativos atingidos para as velocidades transversais são de $\approx 0,06 \text{ m.s}^{-1}$ (\oplus saindo da figura) e $-0,05 \text{ m.s}^{-1}$ (\otimes entrando na figura). Ao longo do rio Curimataú são vistas células de recirculação transversal.

(a)



(b)

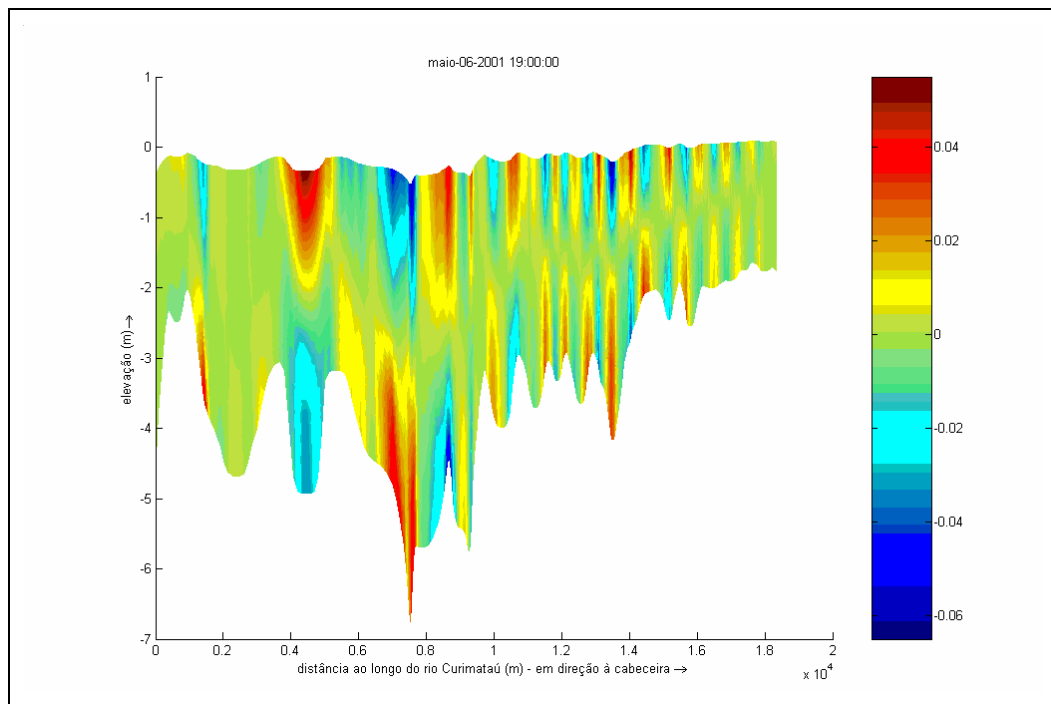
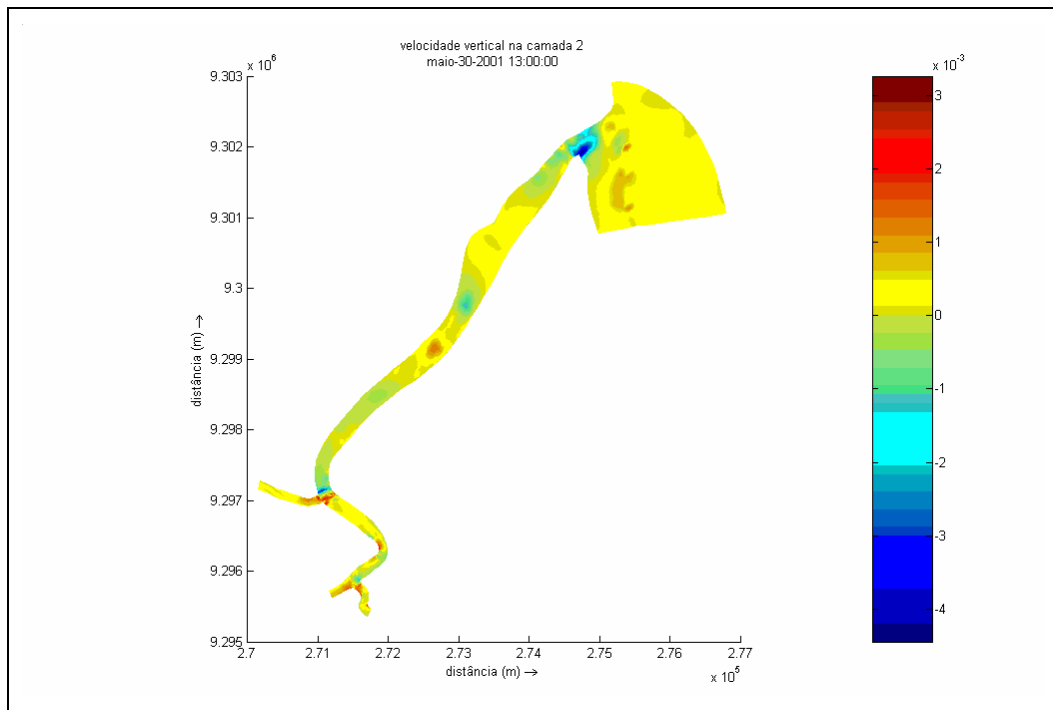


Figura 4.4 – Velocidade transversal, em $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, ao longo do estuário do rio Curimatá observadas às 13:00 h (a) e 19:00 h (b), em 06/05/2001 (maré de sizígia).

(a)



(b)

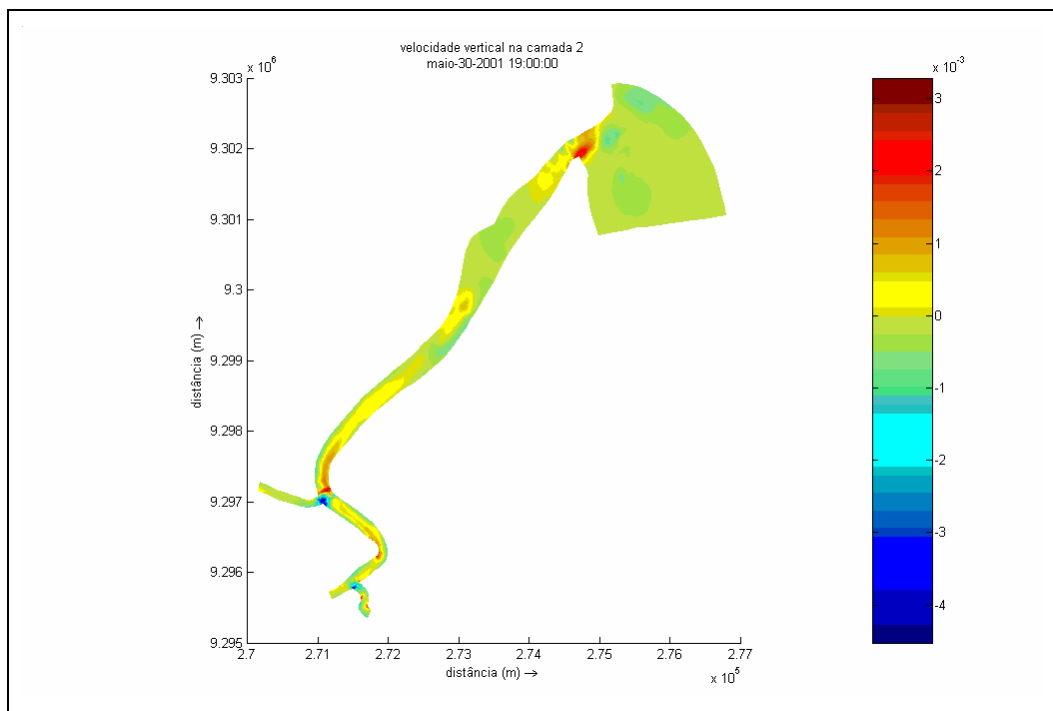


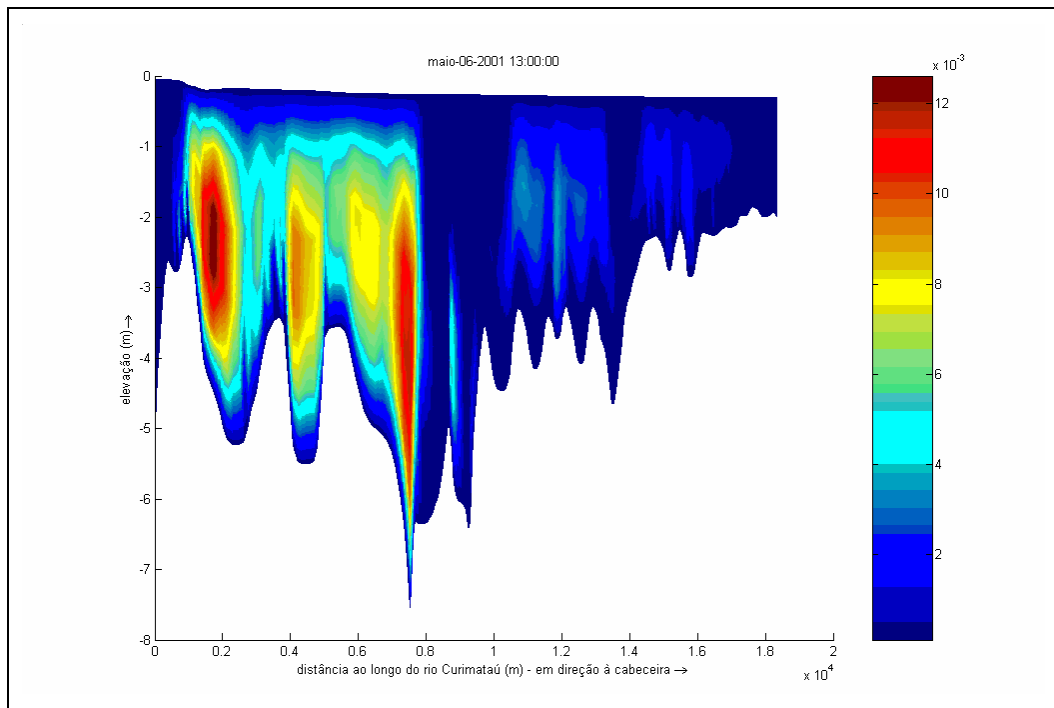
Figura 4.5 – Componentes verticais de velocidade (w) ao longo do rio Curimataú simuladas para as marés enchente (13:00 h) (a) e vazante (19:00 h) (b) do dia 06/05/2001 (maré de sizígia). Velocidade em $m.s^{-1}$.

A ocorrência de componentes verticais de velocidade com movimentos ascendentes ($w>0$) e descendentes ($w<0$), ao longo do estuário do rio Curimataú, é apresentada na figura 4.5a,b. Nessa figura observa-se a correspondência entre características geométricas do canal estuarino e a ocorrência de componentes mais intensas dos movimentos verticais (ascendentes $w>0$ e descendentes $w<0$). De fato, a análise dessa figura mostra que esses movimentos verticais ocorrem principalmente na boca do estuário, no ponto intermediário, na confluência com os canais dos rios Cunhaú e Guaratuba e nos trechos do canal com acentuada curvatura. Na enchente (Fig. 4.5a), os movimentos verticais descendentes mais intensos $\approx -8,0 \times 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ ocorreram na boca do estuário; entretanto, na vazante (Fig. 4.5b), os movimentos verticais nessa parte do estuário também são intensos porém com sentido oposto, atingindo cerca de $2,5 \times 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$. Por outro lado, na confluência com o Cunhaú (Fig. 4a,b) os movimentos verticais ocorrem na forma de um dipolo, com movimentos verticais ascendentes e descendentes muito próximos, cuja posição se alterna entre a enchente e a vazante; pela posição de ocorrência desse dipolo certamente ele é uma feição induzida topograficamente.

4.1.4 – Coeficientes cinemáticos de viscosidade e difusividade

Um dos subprodutos que pode ser extraído do processamento do Delft-3D Flow são resultados dos coeficientes cinemáticos de viscosidade K_V (Fig. 4.6a) e difusividade D_V (Fig. 4.6b) turbulentos. Esses coeficientes são determinados através do modelo de fechamento turbulento definido como $(K - \varepsilon)$ modelo de fechamento turbulento), com K e ε denotados como a energia cinética turbulenta e a taxa de energia cinética dissipada. Para exemplificar a ordem de grandeza desses coeficientes apresenta-se na figura 4.6a,b, valores calculados para a maré de sizígia, do dia 06/05/2001, em condições de enchente (baixa-mar+3h). Esse coeficiente apresenta o maior valor na parte inferior do estuário e em camadas intermediárias, atingindo cerca de $12 \times 10^{-3} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$.

(a)



(b)

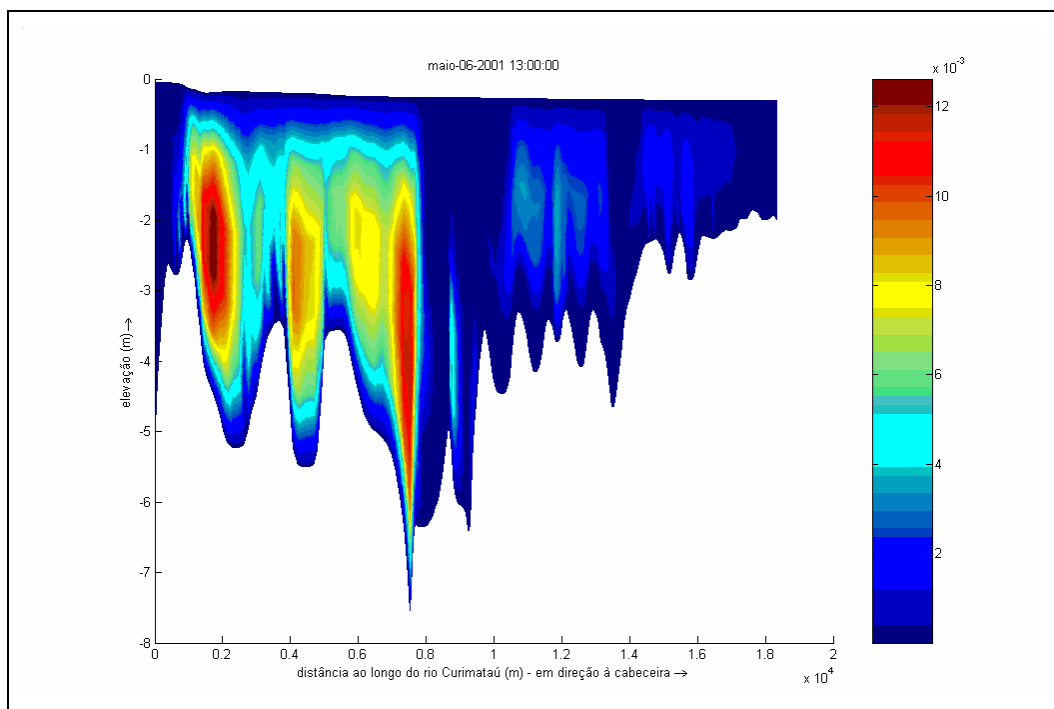


Figura 4.6 – Coeficientes cinemáticos de viscosidade (a) e difusividade (b) vertical ao longo do rio Curimataú, calculados para a enchente (13:00 h) de 06/05/2001 (maré de sizígia). Valores dos coeficientes em m².s⁻¹.

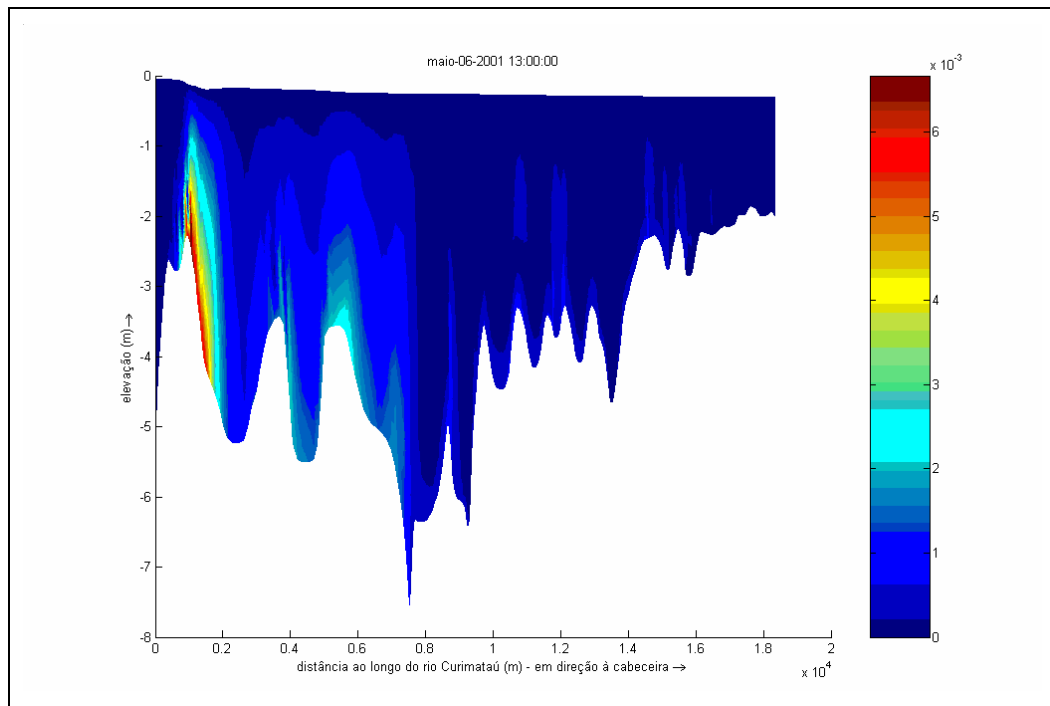
4.1.5 – Energia cinética turbulenta e dissipada

Na figura 4.7a,b são apresentadas as seções ao longo do estuário do estuário do rio Curimataú com a distribuição espacial de energia cinética turbulenta e a taxa energia cinética dissipada, por unidade de massa expressas em $[K]=L^2T^{-2}$ $[\varepsilon]=L^2T^{-3}$, respectivamente. Os resultados são para o dia 06/05/2001 para a maré de sizígia em condições de enchente (baixa-mar+3h) ocorrida às 13:00 h.

Valores máximos da energia cinética turbulenta ($K \approx 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) ocorreram a cerca de 1.200 m de distância da boca do estuário (Fig. 4.7a), indicando uma grande convergência de energia devido ao estreitamento do canal estuarino. As observações realizadas também indicaram que durante a maré enchente foram alcançados os valores mais intensos de K, associadas as maiores intensidades de velocidade.

As altas taxas de dissipação de energia próximas ao fundo são geradas pelo atrito da massa de água estuarina com o leito do canal estuarino. O valor máximo alcançado ($\varepsilon \approx 2,4 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$) encontra-se também nas proximidades da boca do estuário (Fig. 4.7b), confirmando os valores relativamente altos da energia cinética observada nessa parte do estuário.

(a)



(b)

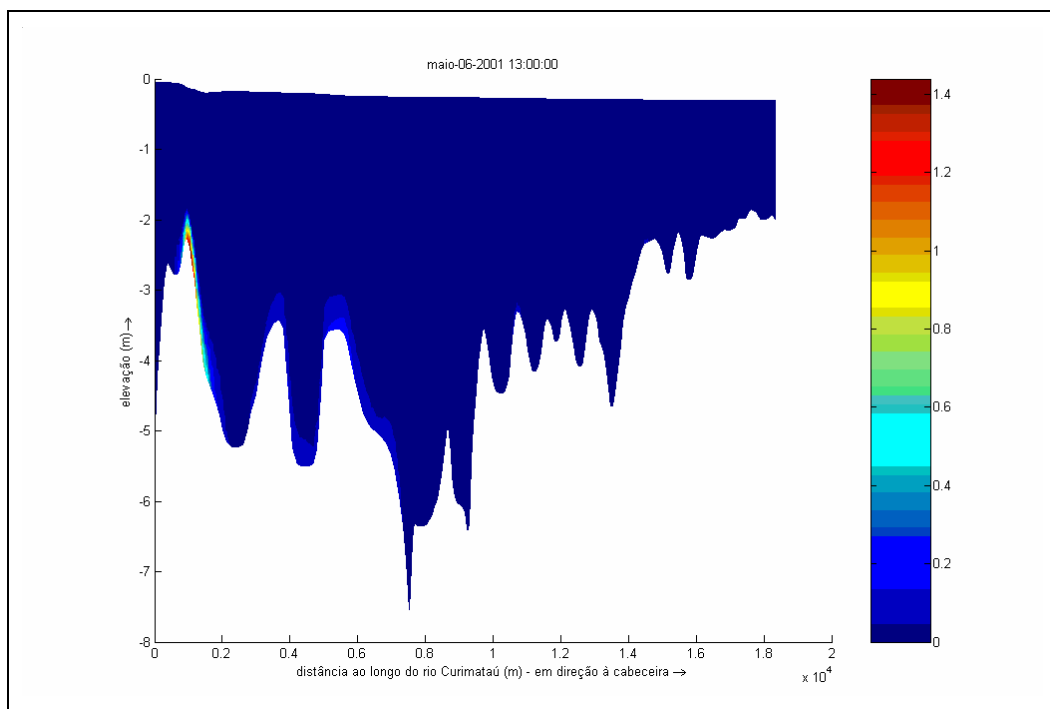


Figura 4.7 – Energia cinética turbulenta (a) e dissipada (b) ao longo do rio Curimataú calculada para as 13:00 h de 06/05/2001 (maré de sizígia). Os valores da energia turbulenta por unidade de massa em $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ e energia dissipada por unidade de massa e tempo em $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$.

4.1.6 – Número de Richardson

A figura 4.8 mostra a distribuição longitudinal do número de Richardson Ri observado às 19:00 h de 06/05/2001 durante a maré vazante de sizígia.

A caracterização da estratificação vertical foi feita através do gradiente do número de Richardson diferencial definido por:

$$Ri = \frac{-g \frac{\partial \rho}{\partial z}}{\rho \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]}, \quad (4.1)$$

em que $Ri \geq 0$ e $Ri < 0$ indicam condições de estratificação estável ou indiferente e instável, respectivamente.

Os resultados apresentados (Fig. 4.8) mostram condições de estabilidade vertical estável ($Ri > 0$) ou quase próxima ao equilíbrio indiferente ($Ri \approx 0$). Entretanto, valores relativamente altos ($2,0 < Ri < 3,2$), indicando condições de maior estabilidade vertical, são observados na região central do estuário. Baixa estabilidade vertical foram observados na camada superficial e na parte compreendida entre a boca do estuário até cerca de 2 km da boca.

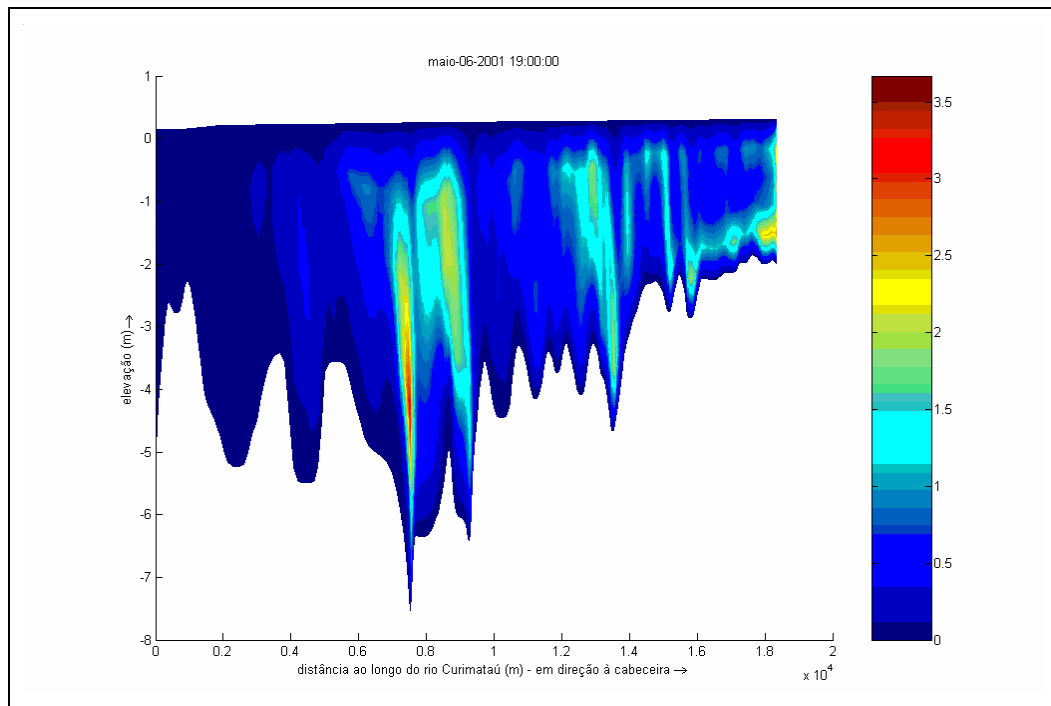


Figura 4.8 – Número de Richardson ao longo do rio Curimataú calculado para as 19:00 h de 06/05/2001 (maré vazante de sizígia). Os valores numéricos do número de Richardson são indicados pela barra de cores.

4.1.7 – Tempo de residência

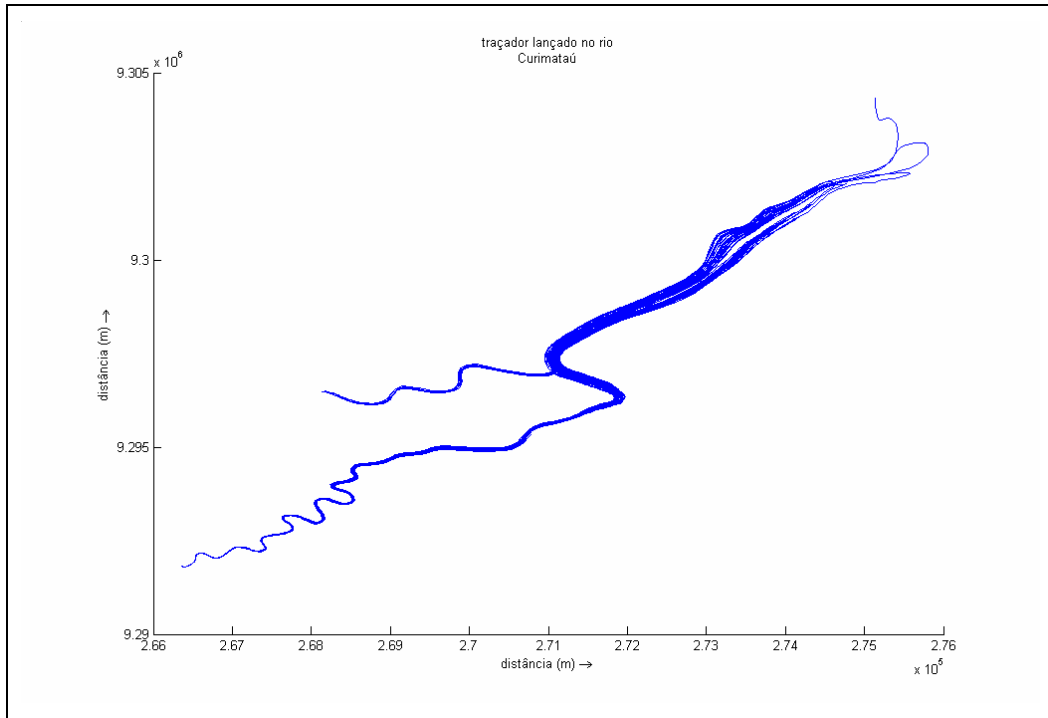
Traçadores foram lançados em superfície e nas proximidades da cabeceira do estuário (Fig. 4.9) às zero hora de 06/05/2001, correspondendo a maré enchente (baixa-mar+3h), e suas trajetórias, definidas com os modos barotrópico e baroclínico são apresentadas na figura 4.9a,b.

No modelo barotrópico o tempo de residência foi de aproximadamente 65 dias para o deslocamento desde a cabeceira até a boca (≈ 17.050 m), representando assim uma velocidade média de $\approx 0,003$ m.s⁻¹. Em certos momentos da simulação a corrente de maré advectou o traçador pelo canal estuarino do rio Cunhaú, percorrendo os primeiros quilômetros após o entroncamento com o Curimataú.

O modo baroclínico teve como resultado um intervalo de tempo de ≈ 14 dias para a permanência do traçador, representando então uma velocidade média de $\approx 0,014$ m.s⁻¹, resultado este muito diferente daquele obtido para o modelo barotrópico.

No modo baroclínico, tal como no barotrópico, o traçador também foi advectado alguns quilômetros rio acima do Cunhaú.

(a)



(b)

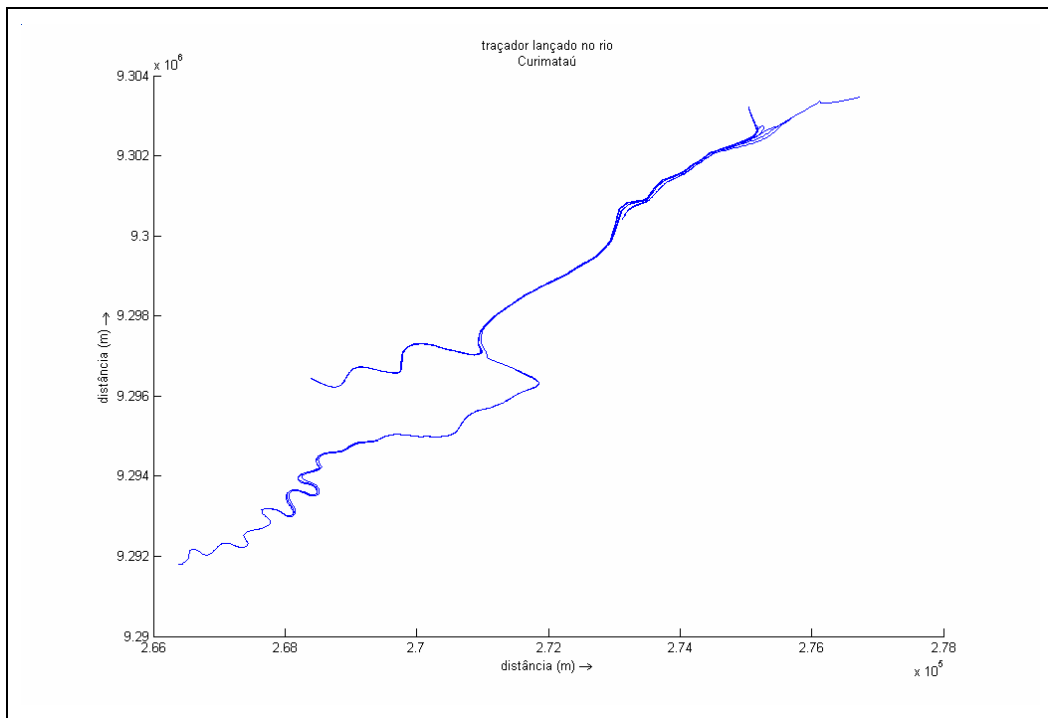


Figura 4.9 – Trajetória do traçador lançado nas proximidades da cabeceira do estuário do rio Curimataú aplicando-se os modos barotrópico (a) e baroclínico (b).

A causa para o modelo barotrópico divergir drasticamente da segunda solução, está ligada ao fato de que a velocidade média na superfície ($0,003 \text{ m.s}^{-1}$) que transporta o traçador é muito menor do que o correspondente valor de velocidade ($0,014 \text{ m.s}^{-1}$) para um estuário parcialmente misturado simulado no modo baroclínico, essas características de velocidade residual para estuários parcialmente misturados é discutida em Pritchard (1955).

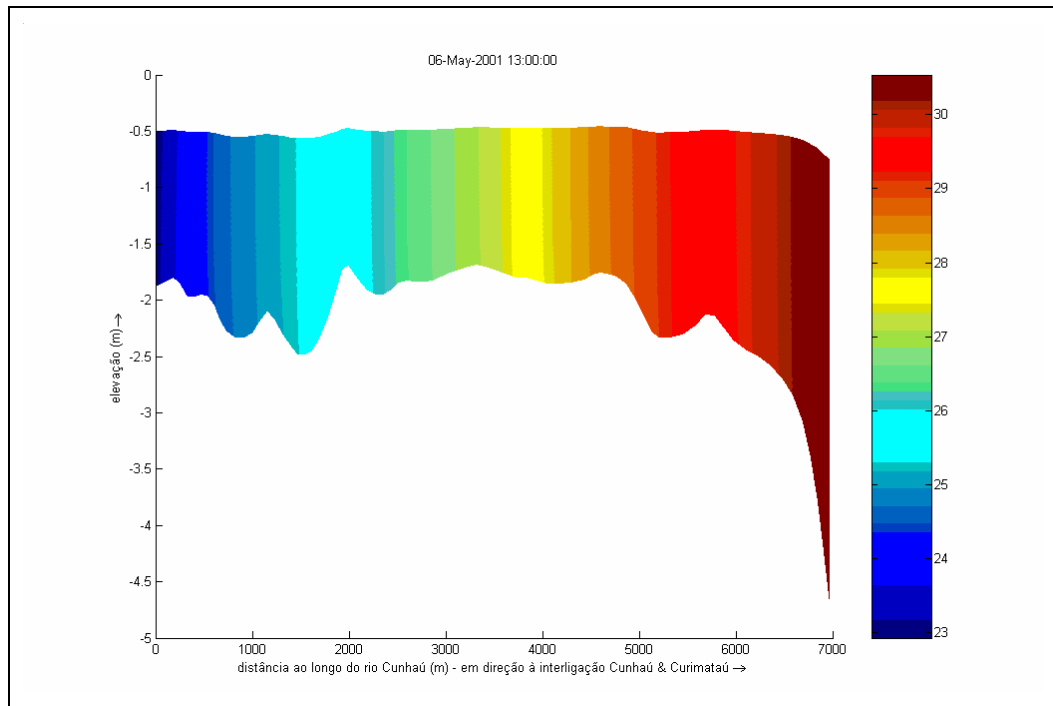
4.2 – Canal do Cunhaú

4.2.1 – Salinidade

A figura 4.10a,b,c,d mostra a variação temporal da estrutura de salinidade para o canal estuarino do rio Cunhaú durante os instantes de tempo de 13, 16, 19 e 22 horas de 06/05/2001 para a maré de sizígia. Essas figuras simulam um canal estuarino verticalmente homogêneo e fracamente estratificado. A maior estratificação vertical é indicada pelo surgimento de uma fraca haloclina, com gradiente vertical de $\approx 0,5$ na maré de vazante às 19:00 h (preamar+3h), como se observa na figura 10c.

Os valores médios de salinidade calculados teoricamente variaram de $\approx 32,0$, no entroncamento do Cunhaú com o Curimataú, a $\approx 23,0$ na parte mais interior localizada a cerca de 7,0 km desse entroncamento (Fig. 4.10a,b,c,d); a análise comparativa dessas figuras mostra que as salinidades indicadas pelas isohalinas de 27,0 e 29,0 avançaram e retrocederam aproximadamente 2,5 km e 3,0 km.

(a)



(b)

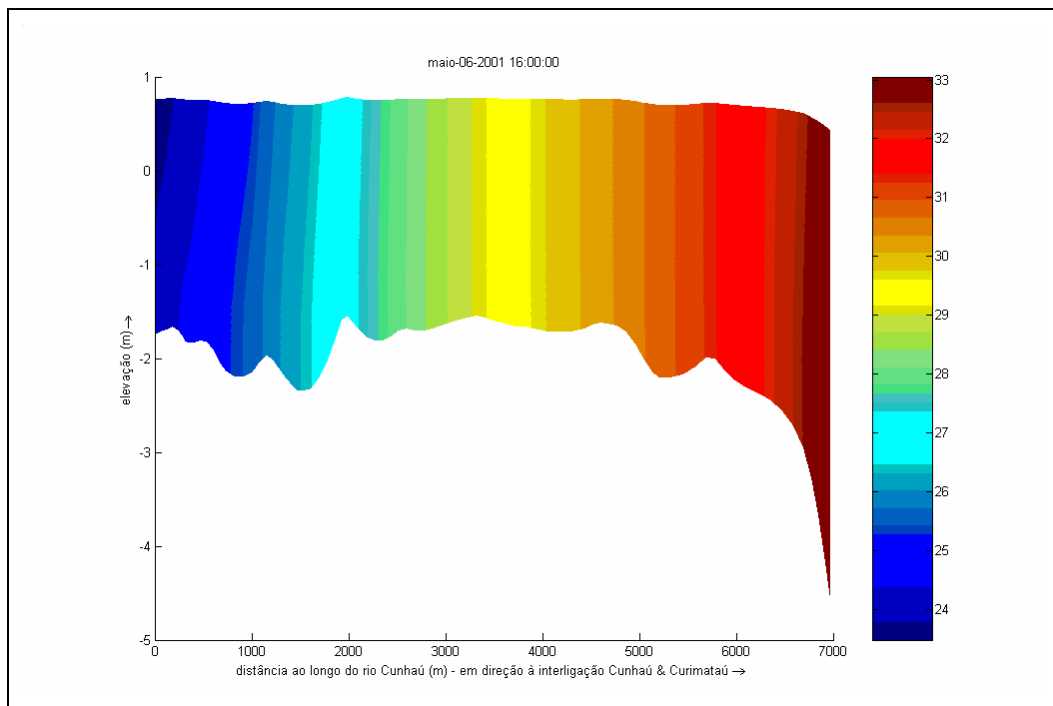
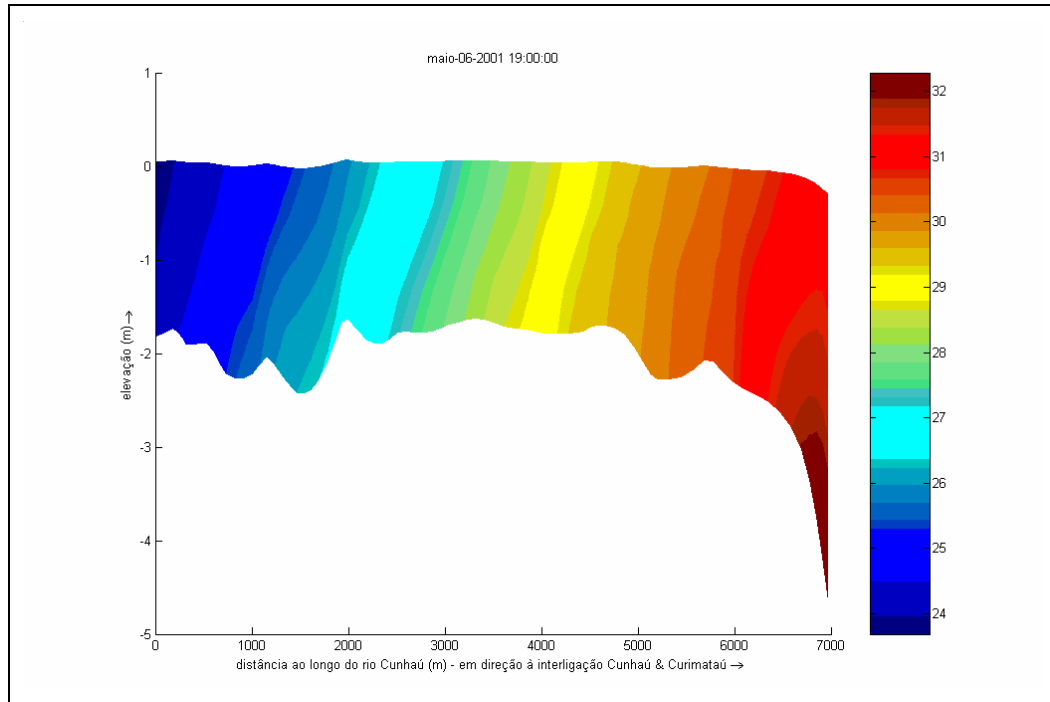
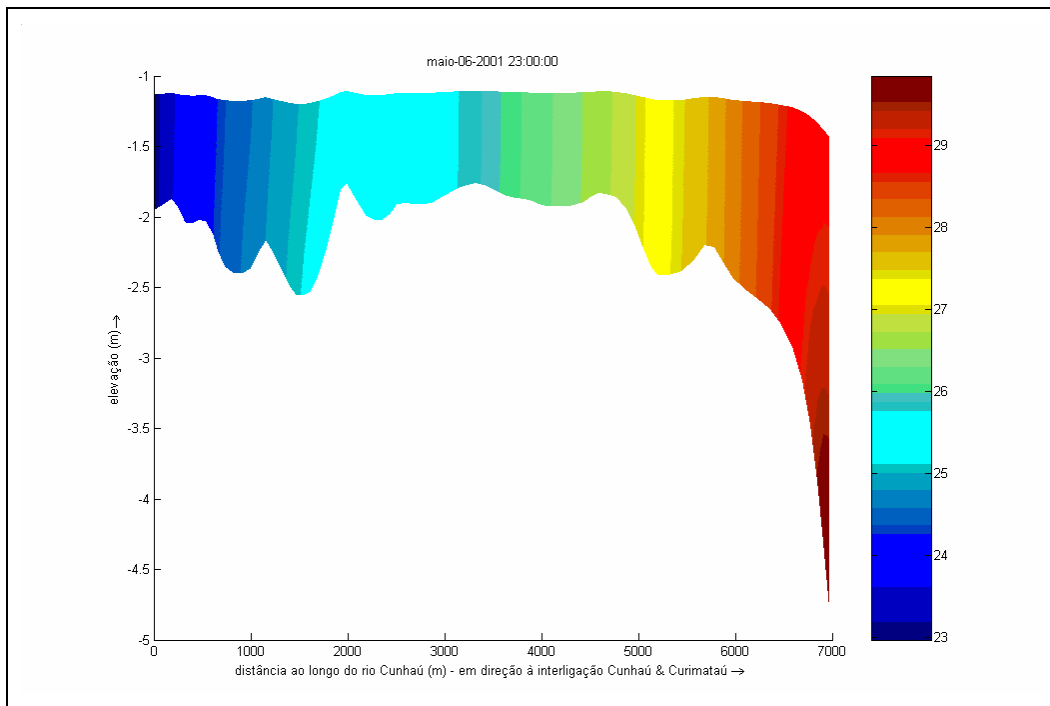


Figura 4.10 – Estrutura longitudinal da salinidade no canal do Cunhaú simulada para as 13 h (a) e 16 h (b), do dia 06/05/2001, na enchente (maré de sizígia).

(c)



(d)



Cont. Figura 4.10 – Estrutura longitudinal da salinidade no canal do Cunhaú simulada para as 19 h (c) e 23 h (d), do dia 06/05/2001, na vazante (maré de sizígia).

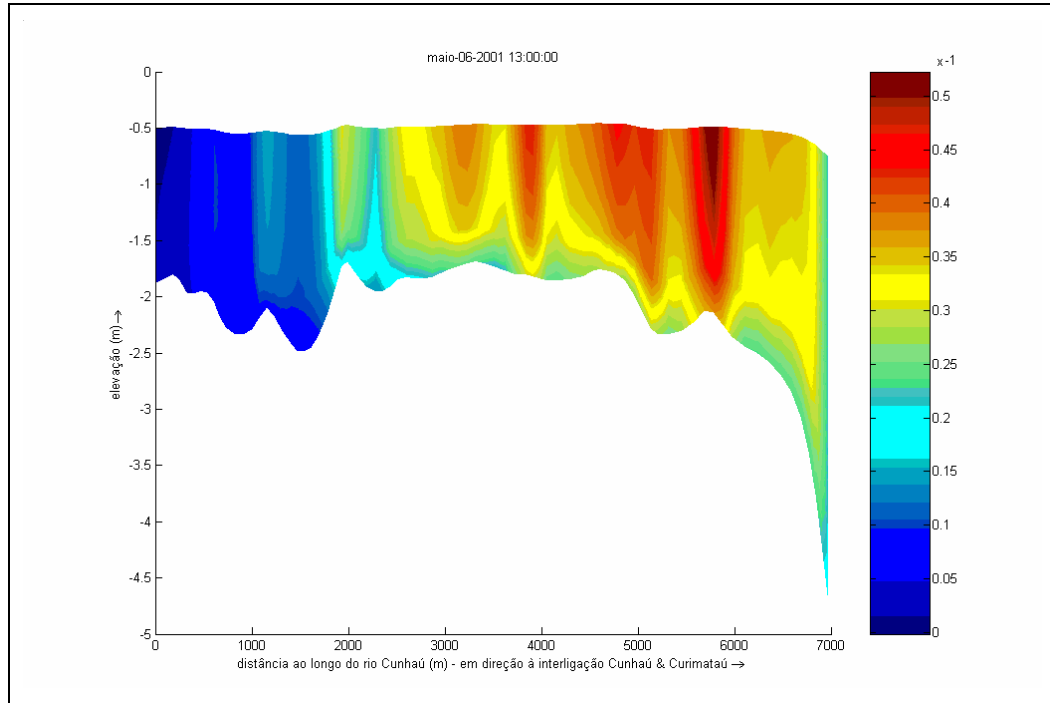
4.2.2 – Velocidade longitudinal

A figura 4.11a,b mostra a variação da estrutura de velocidade longitudinal ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) no estuário do rio Cunhaú para os instantes consecutivos (13 e 20 h) durante a maré de sizígia simulada para o dia 06 de maio de 2001, correspondentes a condições de enchente (baixa-mar+3h) e vazante (preamar+3h), respectivamente.

Durante a enchente ($u < 0$), nos três primeiros quilômetros da confluência com o Curimataú, os movimentos apresentam núcleos de velocidades com intensidades na superfície próximas a $-0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $-0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ indicando a ocorrência de cisalhamentos verticais e longitudinais das correntes. Na parte mais afastada dessa confluência, as velocidades decrescem para valores menores do que $-0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, e o campo de velocidade apresenta-se praticamente verticalmente uniforme (Fig. 4.11a).

Na maré de vazante (Fig. 4.11b) os movimentos revertem de sentido ($u > 0$) e se intensificam em direção à confluência com o Curimataú. A velocidade máxima do componente longitudinal tem valores menores do que enchente (Fig. 4.11a), não superando $0,35 \text{ m/s}$; na região interior do canal estuarino, ao contrário do que ocorreu na enchente, o cisalhamento vertical das correntes é mais acentuado.

(a)



(b)

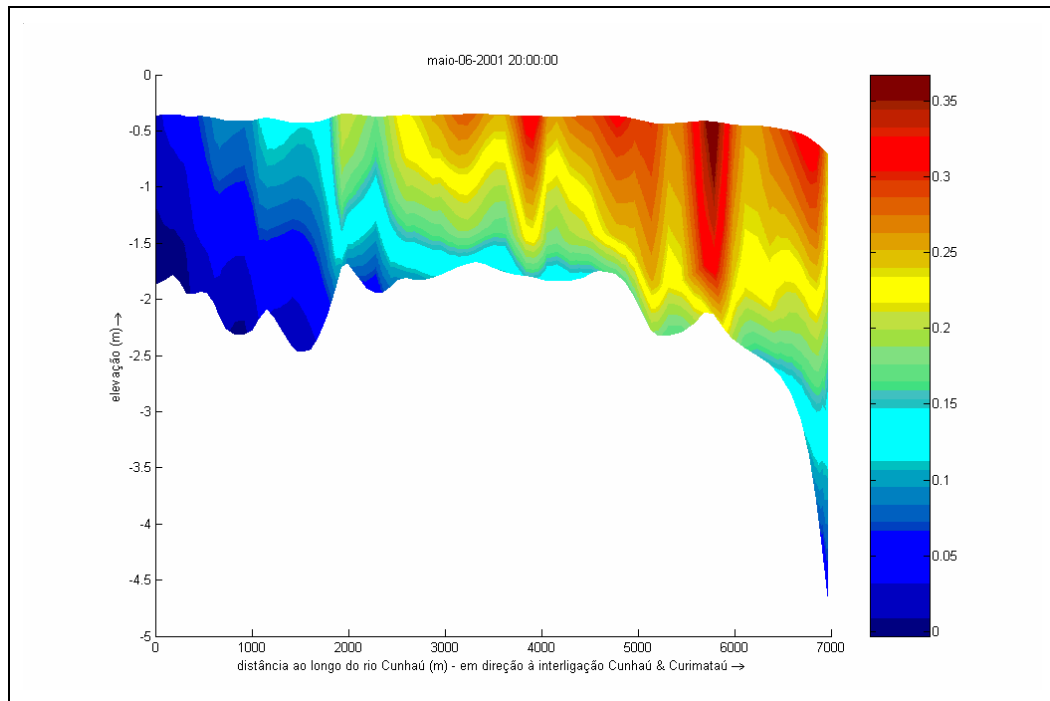


Figura 4.11 – Estrutura longitudinal da velocidade ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) no canal do rio Cunhaú simulada para as 13:00 h (a) e 20:00 h (b) do dia 06/05/2001 na enchente e vazante, respectivamente (maré sizígia).

Na figura 4.12, correspondente à estufa de preamar (Fig. 3.17), verifica-se a ocorrência de movimentos bidirecionais de pequena intensidade variando entre $-0,06$ m.s^{-1} a $0,05$ m.s^{-1} . Na parte mais interna do canal estuarino observa-se a ocorrência de movimentos convergentes e divergentes nas camadas superficial e profunda, respectivamente, separadas por uma profundidade de movimento nulo e eleva-se em direção à superfície.

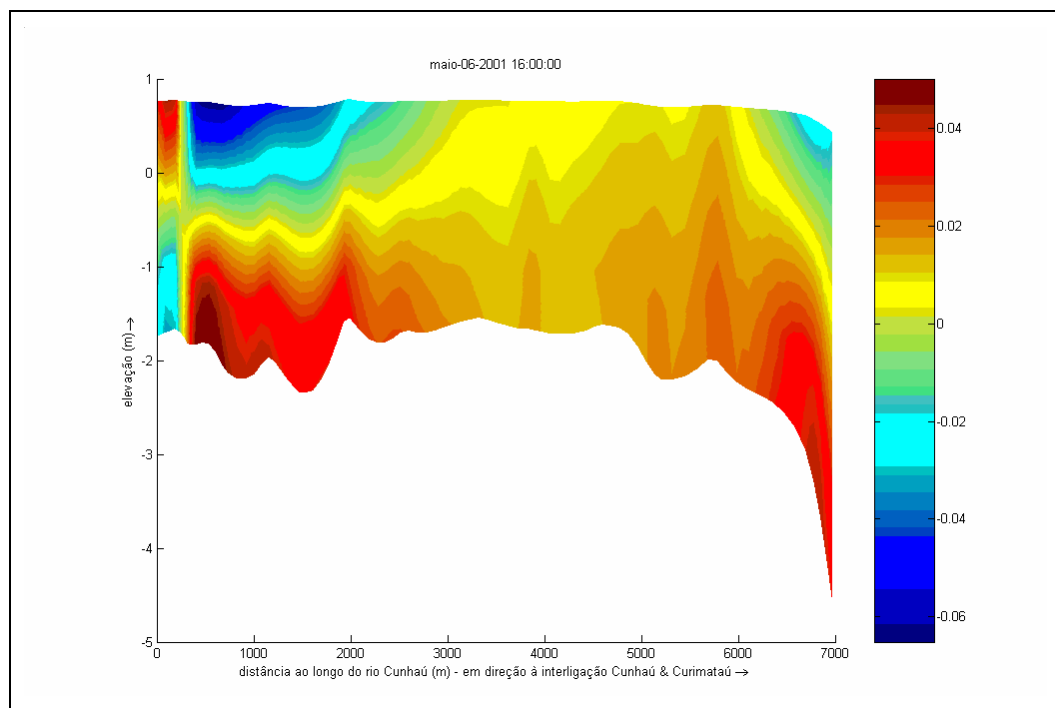


Figura 4.12 – Estrutura longitudinal da velocidade (m.s^{-1}) no canal do Cunhaú simulada para as 16:00 h do dia 06/05/2001, correspondente à condição de estufa de baixa-mar (maré de sizígia).

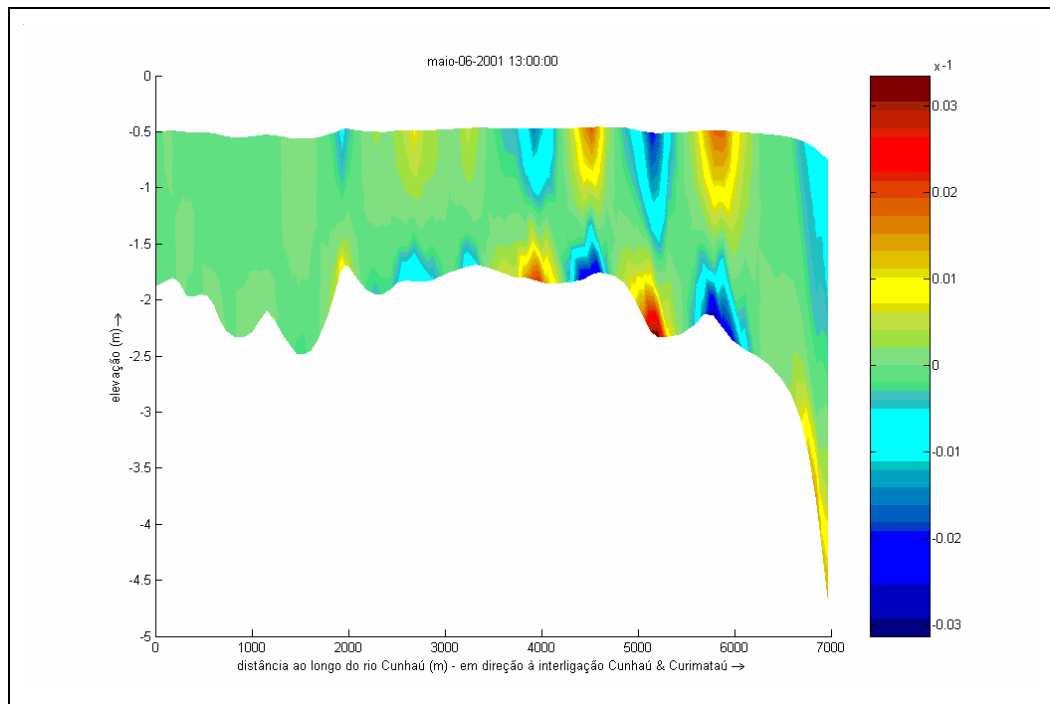
4.2.3 – Velocidades transversais e verticais

As figuras 4.13a,b e 4.14a,b mostram a variação da estrutura de velocidade transversal e vertical no canal estuarino do rio Cunhaú, respectivamente, para os horários de 13:00 h (maré de enchente) e 19:00 h (maré de vazante), observados no dia 6 de maio de 2001.

Os maiores valores das velocidades transversais durante a maré de sizígia estão vinculados às velocidades máximas longitudinais, mas suas intensidades variam apenas entre $-0,03 \text{ m.s}^{-1}$ e $0,03 \text{ m.s}^{-1}$, em concordância com os valores experimentais. Uma observação intrigante é que nos três quilômetros após a confluência com canal estuarino do rio Cunhaú ocorreram quatro células de recirculação transversal. Com base na figura 4.14, vê-se que estas células de recirculação coincidem com as quatro primeiras curvas a partir da confluência, implicando assim que essas células são provavelmente geradas pela aceleração centrífuga.

Componentes verticais do movimento, que tomam parte na circulação tridimensional dos movimentos estuarinos, também foram geradas teóricamente pelo modelo. As velocidades verticais (Fig. 4.14a,b) apresentam máximos positivos e negativos de $\approx 23,0.10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ (\uparrow dir. à superfície) e $\approx -9,0.10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ (\downarrow dir. ao fundo) próximo as quatro curvas após o entroncamento entre os rios Cunhaú e Curimataú, provavelmente também induzidas topograficamente.

(a)



(b)

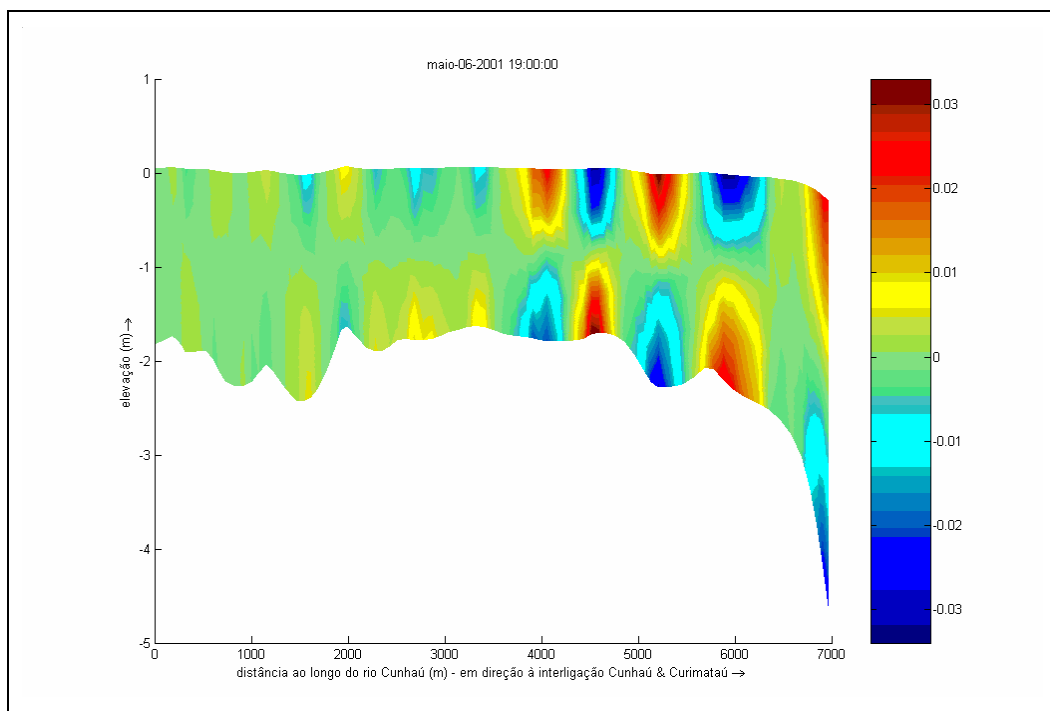
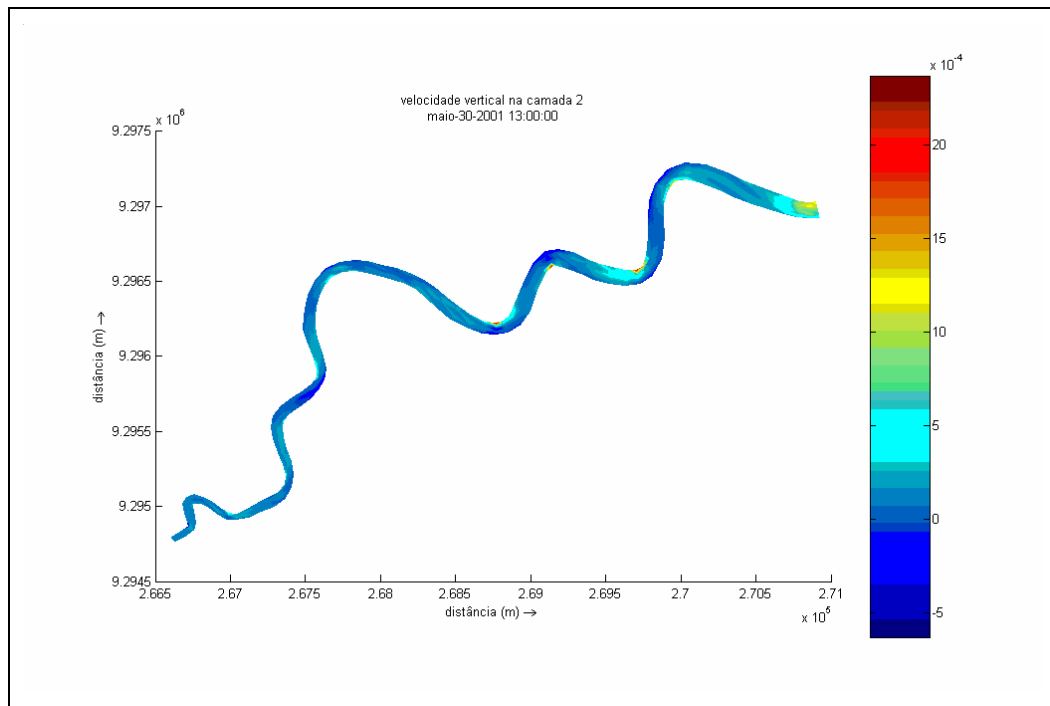


Figura 4.13 – Velocidade transversal, em $m \cdot s^{-1}$, ao longo do canal do Cunhaú observadas às 13:00 h (a) e 19:00 h (b), em 06/05/2001 (maré de sizígia).

(a)



(b)

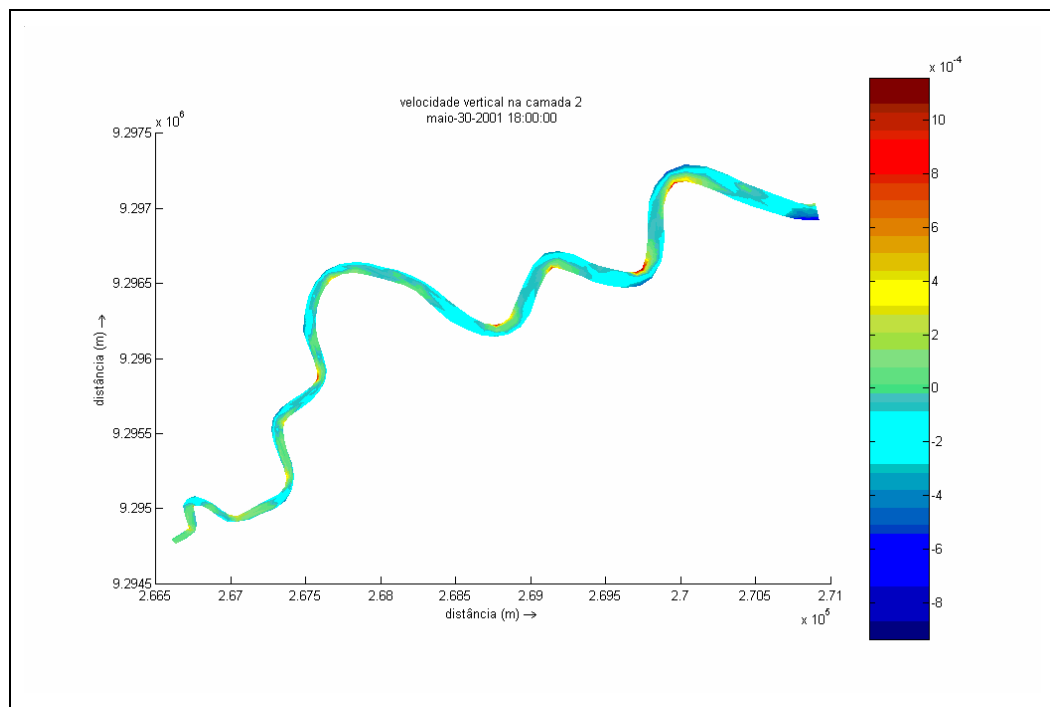


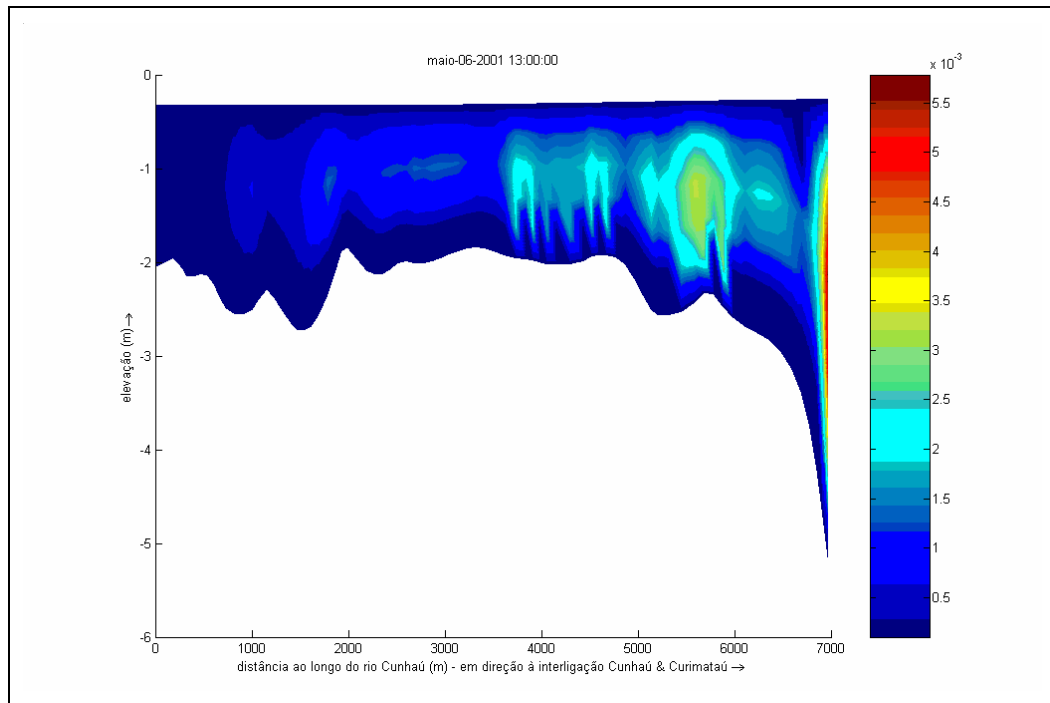
Figura 4.14 – Componentes verticais de velocidade (w) ao longo do canal do Cunhaú simuladas para as marés enchente (13:00 h) (a) e vazante (18:00 h) (b) do dia 06/05/2001 (maré de sizígia). Velocidade em $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

4.2.4 – Coeficientes cinemáticos de viscosidade e difusividade

Os coeficientes cinemáticos de viscosidade e difusividade turbulentos extraídos como subproduto do processamento do modelo são apresentados na figura 4.15a,b. Como vimos, esses coeficientes são determinados através do modelo de fechamento turbulento definido como ($K - \varepsilon$ modelo de fechamento turbulento), com K e ε denotando a energia cinética turbulenta e o raio correspondente associados ao comprimento de mistura L . Para exemplificar a ordem de grandeza desses coeficientes, apresenta-se na figura 4.15a,b, valores calculados para a maré de sizígia, do dia 06/05/2001, em condições de enchente (baixa-mar+3h).

Os maiores valores desses coeficientes ocorreram aproximadamente na mesma posição longitudinal do canal (na confluência com o Curimataú e a 1 km acima) e seus valores foram: $K_V \approx 5.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e $D_V \approx 5,5 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, respectivamente.

(a)



(b)

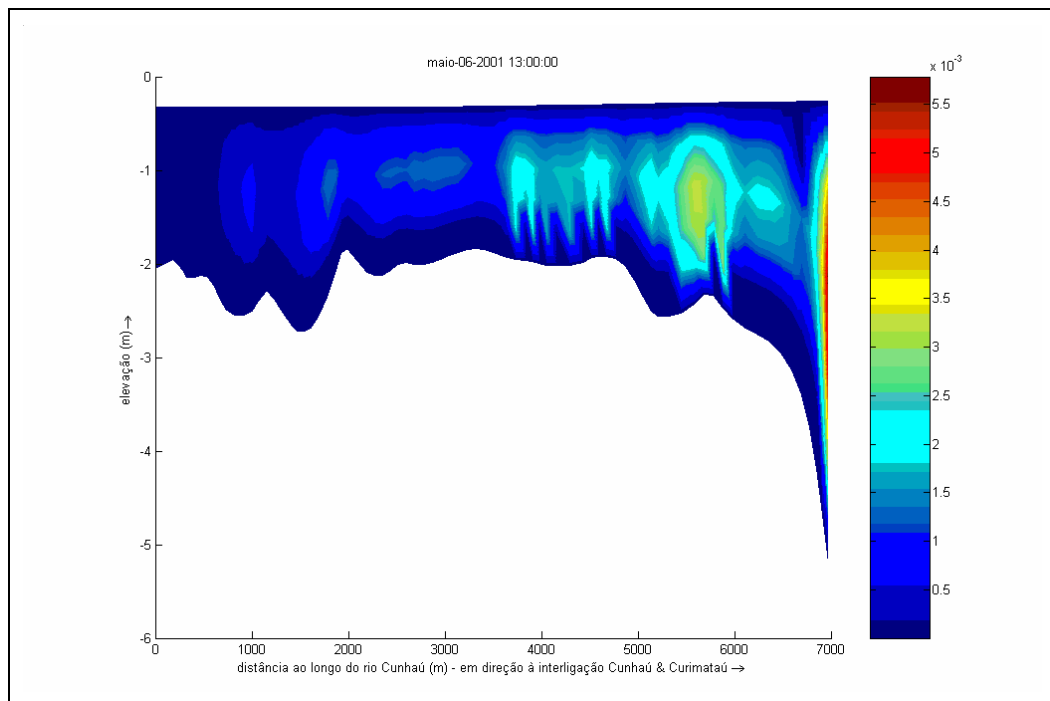


Figura 4.15 – Coeficientes cinemáticos de viscosidade (a) e difusividade (b) vertical ao longo do canal do Cunháú, calculado para a enchente (13:00 h) de 06/05/2001 (maré de sizígia). Valores dos coeficientes em m^2/s .

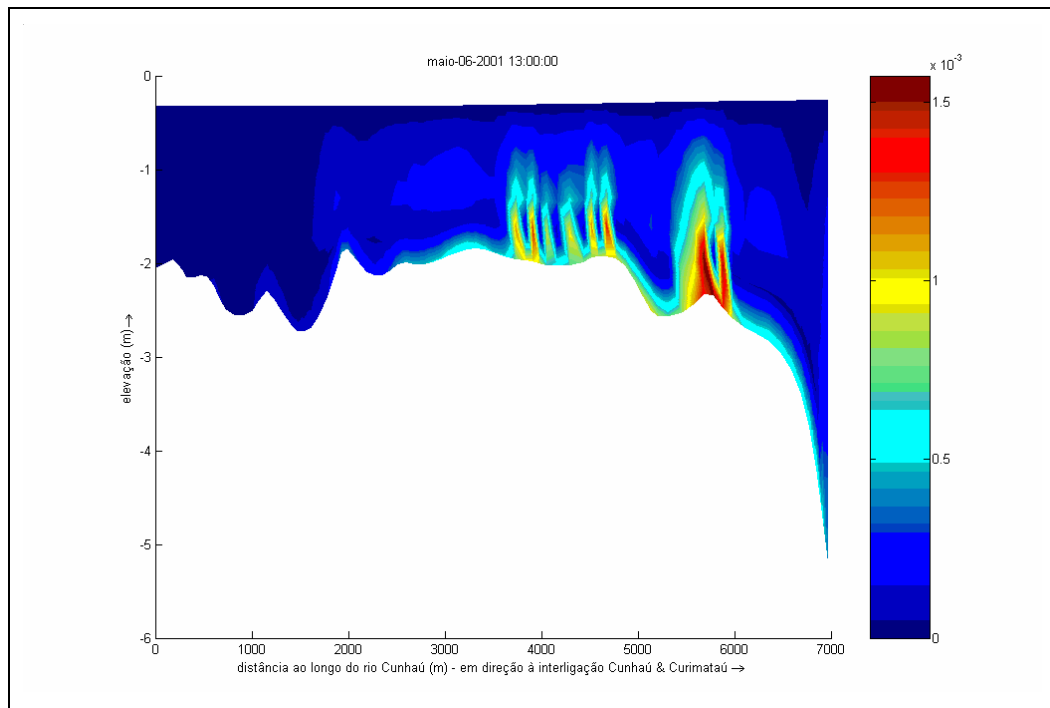
4.2.5 – Energia cinética turbulenta e dissipada

Na figura 4.16a,b são apresentadas respectivamente as seções ao longo do canal do Cunhaú com a distribuição espacial de energia cinética turbulenta e a energia cinética dissipada, por unidade de massa, $[K]=L^2T^{-2}$ e $[\varepsilon]=L^2T^{-3}$. Os resultados são para a maré de sizígia do dia 06/05/2001 em condições de enchente (baixa-mar+3h) ocorrida às 13:00 h.

Essas quantidades se distribuem ao longo do canal de forma mais ou menos uniforme, com valores inferiores a $0,5 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$. Entretanto, os valores são mais heterogêneos nas proximidades do fundo, aonde valores pontuais chegam a $\approx 1,6 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

As taxas de dissipação de energia se distribuem de forma quase uniforme no canal, com valores menores do que $\approx 0,5 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$. Entretanto, em correspondência com a energia cinética turbulenta, as maiores taxas de dissipação de energia ocorrem na camada de fundo devido ao atrito com valores máximos $\varepsilon \approx 0,16 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$.

(a)



(b)

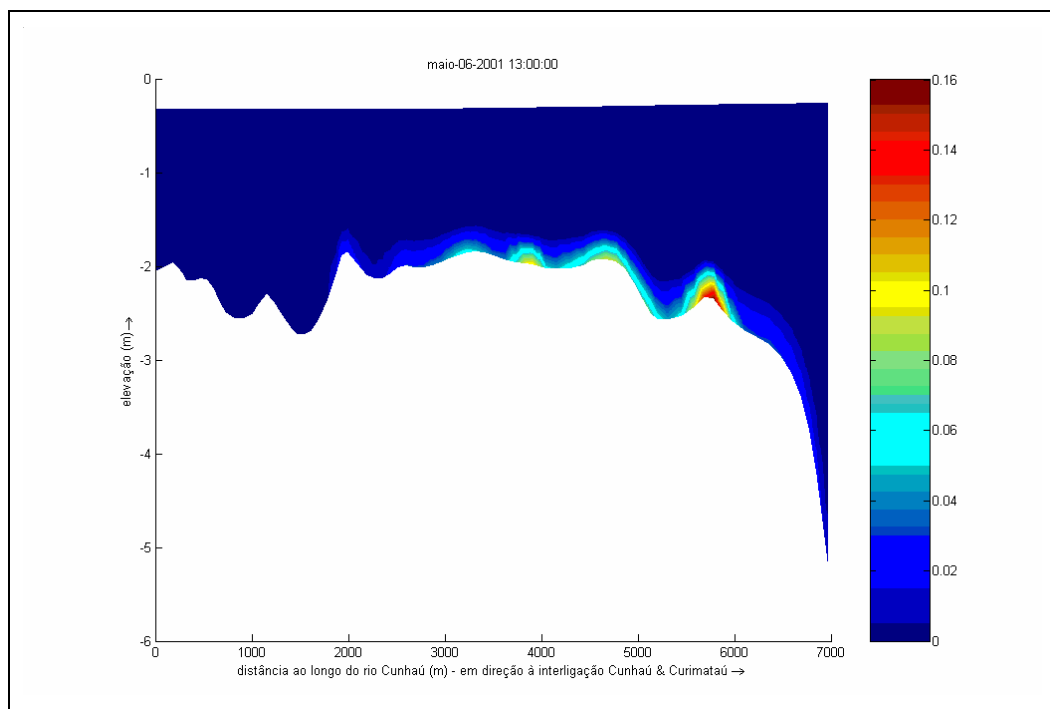


Figura 4.16 – Energia cinética turbulenta (a) e dissipada (b) ao longo do canal do Cunháú calculada para as 13:00 h de 06/05/2001 (maré de sizígia). Os valores da energia turbulenta por unidade de massa em m^2/s^2 e energia dissipada por unidade de massa e tempo em m^2/s^3 .

4.2.6 – Número de Richardson

A distribuição longitudinal do número de Richardson, Ri , calculado para as 13:00 h em maré enchente (baixa-mar+3h), indicou condições fracamente estratificadas e com equilíbrio indiferente, condição esta muito próxima a que foi obtida para as simulações de vazante (preamar+3h) ilustrada na figura 4.17. Apenas na parte mais interior do canal observa-se um aumento em profundidade da estabilidade vertical, com valores variando entre 3 e 5.

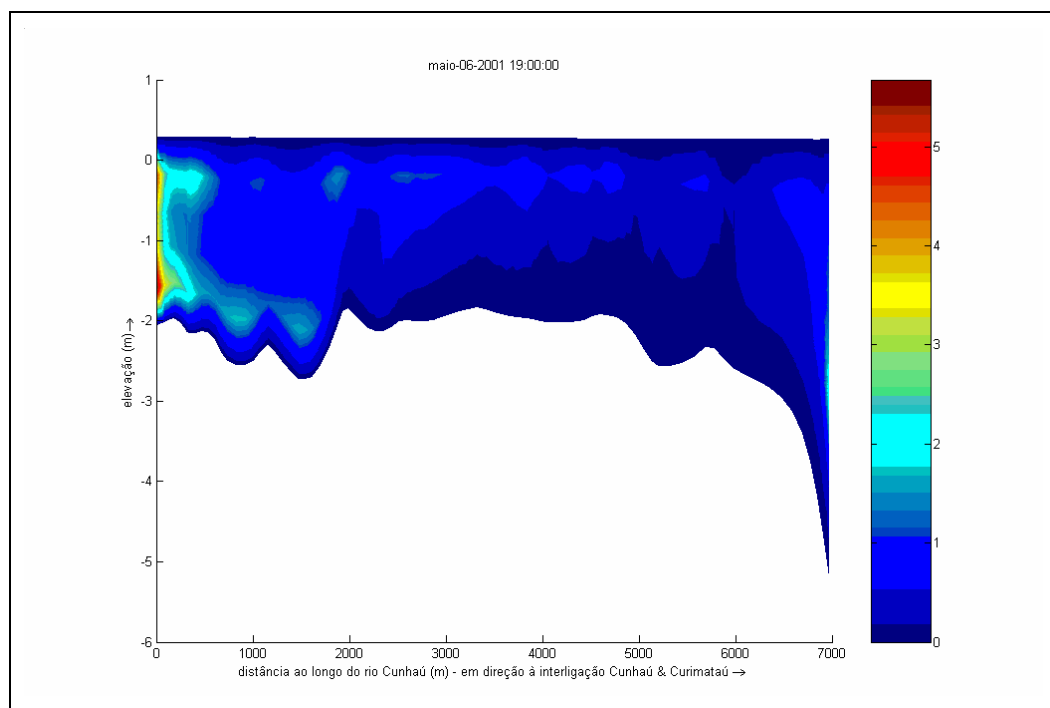
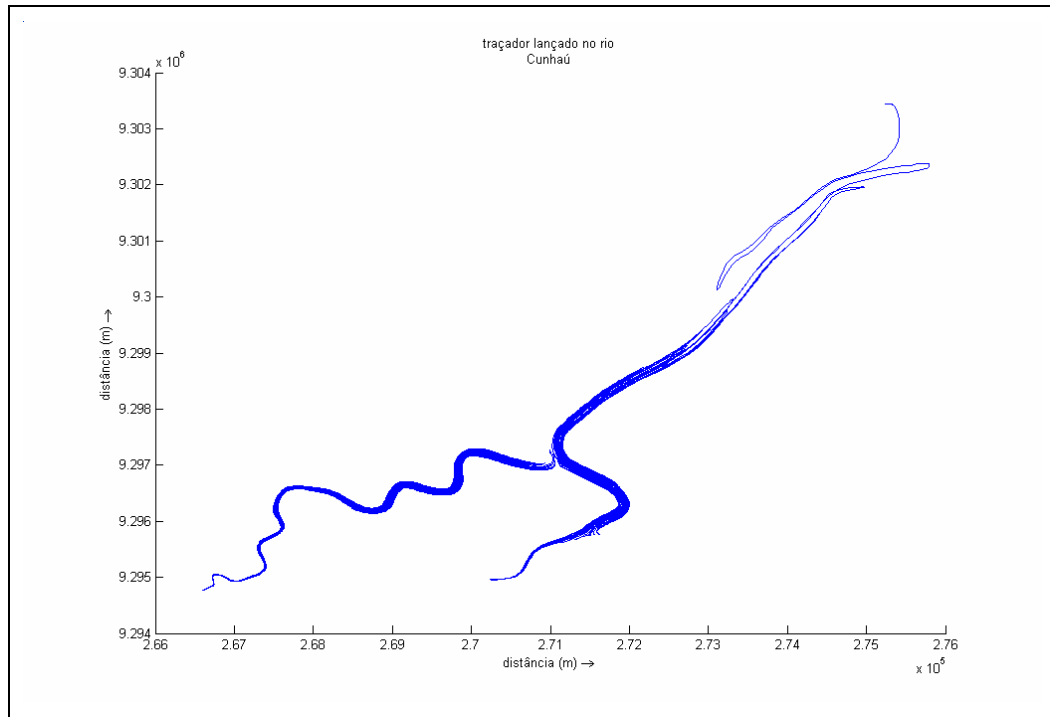


Figura 4.17 – Número de Richardson ao longo do canal do Cunhaú simulado para as 19 horas de 06/05/2001 (maré vazante de sizígia). Os valores numéricos do número de Richardson são indicados pela barra de cores.

4.2.7 – Tempo de residência

Simulações com um traçador lançado na região interior do canal estuarino do rio Cunhaú foi também pesquisada com os modos barotrópico e baroclínico obtendo-se tempos de 79 e 15 dias, respectivamente, para a saída do traçador do estuário.

Com base nesses tempos estimaram-se as velocidades médias estabelecidas por essas simulações em $u \approx 1,9 \times 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ e $1,0 \times 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$, respectivamente.



(b)

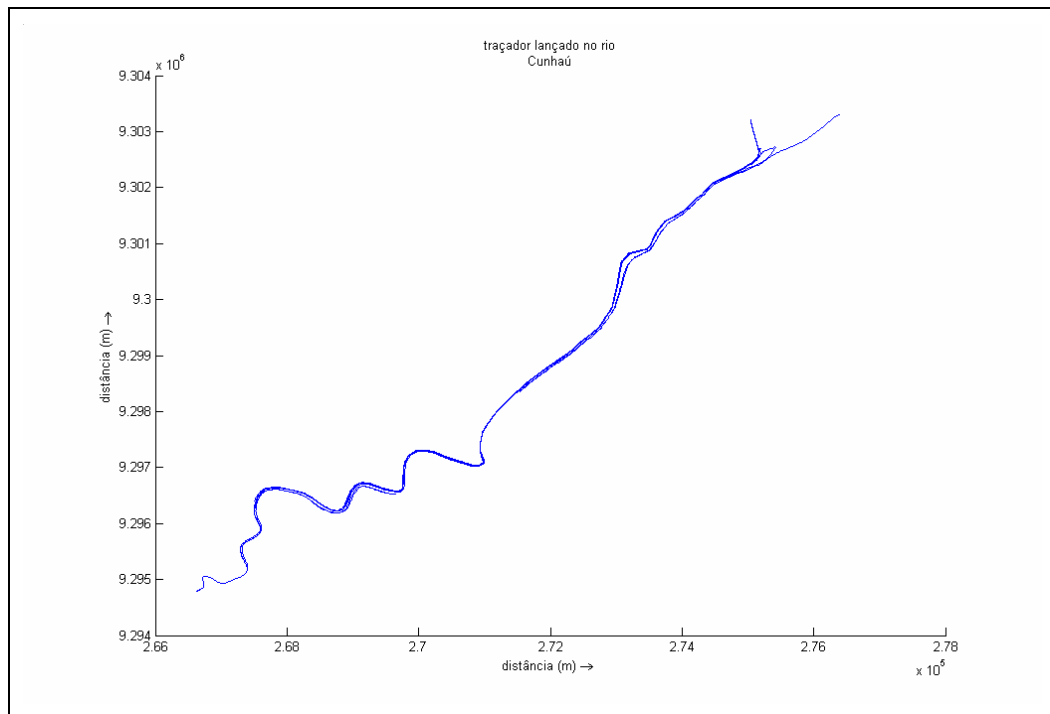


Figura 4.18 – Trajetória do traçador lançado na cabeceira do canal do Cunhaú nos modos barotrópico (a) e baroclínico (b).

4.3 – Resultados na estação fixa (estação 3)

Neste tópico final serão apresentadas simulações em séries temporais da altura da coluna de água, da salinidade, do componente longitudinal da velocidade e do transporte advectivo de sal calculados para a célula da grade correspondente à posição da estação 3 (estação fixa). Dentre essas simulações, especial atenção será dada ao período do ciclo quinzenal de marés de quadratura e de sizígia, de 22 de abril a 06 de maio de 2001. Esse período abrange as condições de quadratura e de sizígia dos ciclos de experimentos de quadratura (30 a 01/05) e de sizígia (06 a 07/05) utilizados na validação do modelo.

4.3.1 – Modo barotrópico

A variação da altura da coluna de água (Fig. 4.19) apresentada em intervalos horários durante 90 dias, a partir de 22 de abril de 2001, mostra claramente a modulação quinzenal durante as marés de sizígia e quadratura. Pode-se nessa figura verificar que durante as marés de sizíguas as oscilações da altura da coluna de água se encontram entre os valores aproximados de (4,40 e 6,60 m) e (4,75 e 7,00 m), muito próximos aos valores experimentais (Fig. 3.17).

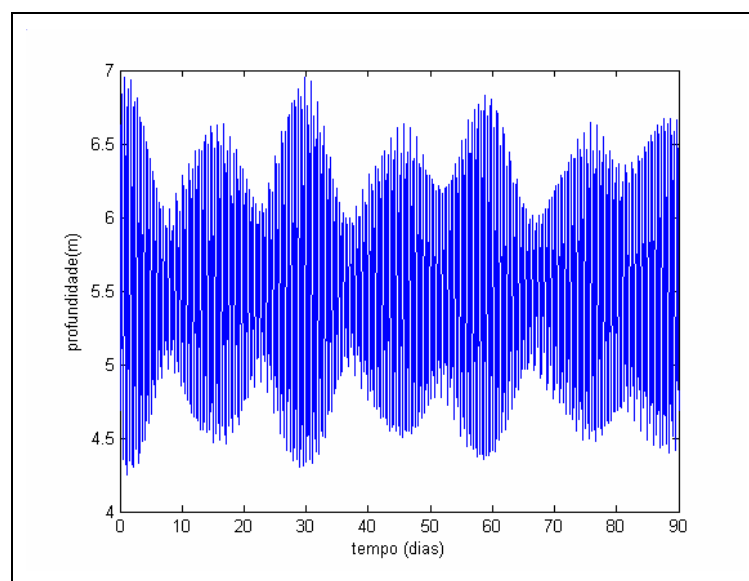


Figura 4.19 – Variação temporal da altura da coluna de água na estação 3 simuladas com modo barotrópico, a partir de 22/04/2001.

A variação temporal da salinidade obtida no modelo barotrópico (Fig 4.20), tal como a altura da coluna de água apresenta modulações quinzenais, resultantes do transporte advectivo de sal pelas correntes de maré; os valores simulados são muito próximos aos obtidos experimentalmente: i) máximo de salinidade é aproximadamente 36,8, indicando a intrusão da massa de água AT no estuário; ii) nas marés de sizígias as oscilações da salinidade se encontram entre os valores de ($\approx 29,4$ e $\approx 36,8$) e ($\approx 30,0$ e $\approx 36,8$); e iii) durante as marés de quadratura a oscilação da salinidade variou entre os valores ($\approx 32,5$ e $\approx 35,0$) e ($\approx 30,5$ e $\approx 36,0$).

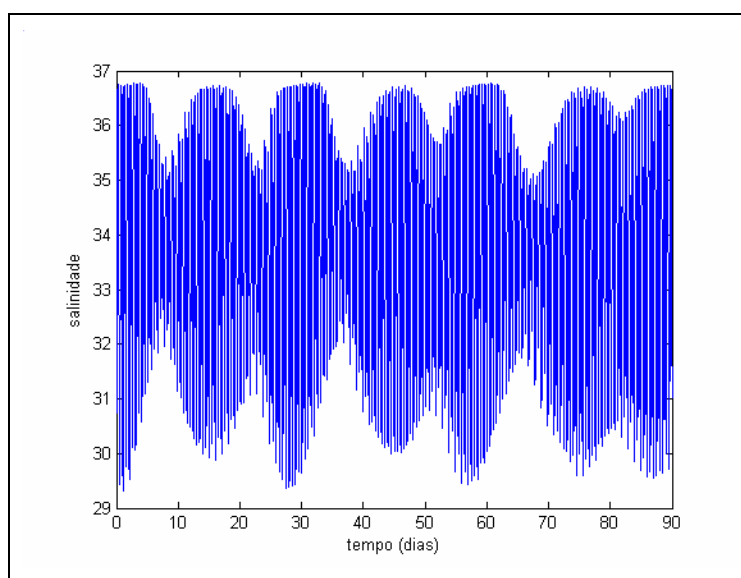


Figura 4.20 – Variação temporal horária da salinidade simuladas na estação 3 com modo barotrópico, a partir de 22/04/2001.

Analisando-se a variação temporal horária do componente longitudinal da velocidade obtida no modelo barotrópico (Fig. 4.21) verifica-se um comportamento parecido às observações anteriores (Figs. 4.19 e 4.20). Durante a maré de sizígia as maiores velocidades são estuário acima e as oscilações se encontram entre os valores aproximados de ($0,42 \text{ m.s}^{-1}$ e $-0,68 \text{ m.s}^{-1}$) e ($0,33 \text{ m.s}^{-1}$ e $-0,45 \text{ m.s}^{-1}$). Para as marés de quadratura a oscilação varia entre os valores de ($0,17 \text{ m.s}^{-1}$ e $-0,17 \text{ m.s}^{-1}$) e ($0,30 \text{ m.s}^{-1}$ e $0,30 \text{ m.s}^{-1}$).

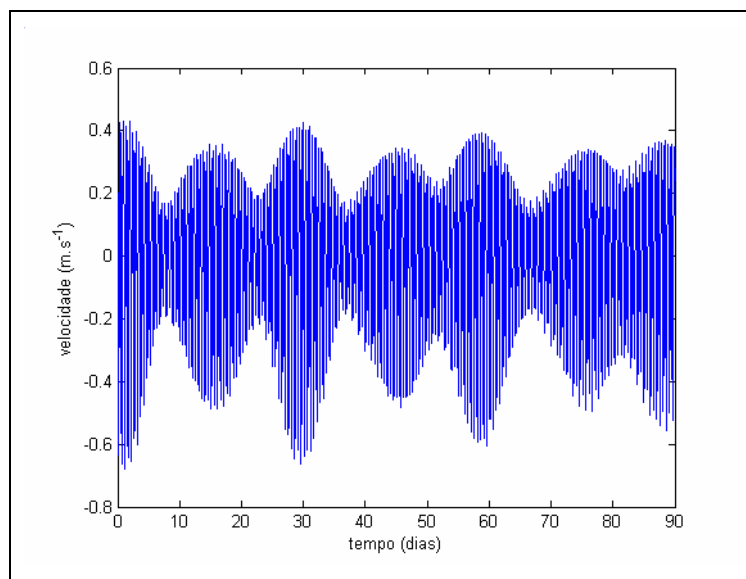


Figura 4.21 – Variação temporal horária do componente longitudinal da velocidade (m.s^{-1}) estação 3 simulada com o modo barotrópico, a partir de 22/04/2001.

A comparação entre a variação do transporte de sal resultante (T_S), durante dois ciclos semidiurnos de maré, por unidade de largura, e a velocidade longitudinal é apresentada na figura 4.22. O transporte de sal mostra claramente um comportamento cíclico com duração de aproximadamente 15 dias. Os picos do transporte estuário abaixo variam entre os valores aproximados de $4,2 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ e $6,4 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$, enquanto que o transporte de sal estuário acima mostra valores extremos entre aproximadamente $-4,0 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ e $-5,0 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$. Comparando a periodicidade entre as modulações da velocidade e do transporte de sal verifica-se que os pontos onde ocorre à inversão do transporte $T_S \approx 0$ são quase sempre coincidentes com os instantes de maior intensificação da maré de sizígia e as mínimas oscilações na quadratura. Na transição da maré de quadratura para a sizígia verifica-se que o máximo transporte de sal está orientado estuário abaixo ($T_S > 0$), enquanto que durante a passagem da maré de sizígia para a de quadratura estuário acima ($T_S < 0$).

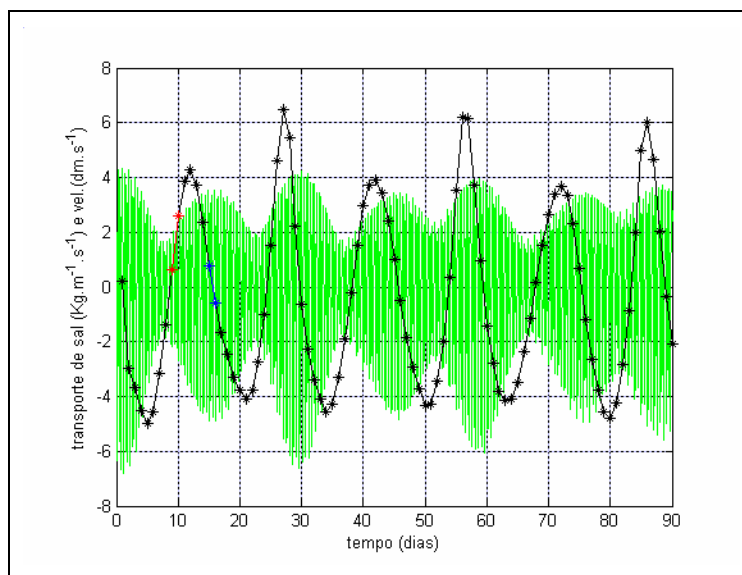


Figura 4.22 – Comparação das variações temporal da velocidade longitudinal média (dm.s⁻¹), e do transporte médio de sal (kg.m⁻¹.s⁻¹) na coluna de água obtidas na estação 3, em verde e preto respectivamente, simulada com o modo barotrópico, a partir de 22/04/2001.

4.3.2 – Modo baroclínico

As séries temporais do modo baroclínico são estudadas com base na variação de médias de perfis verticais, no intervalo de tempo de dois ciclos de maré, de salinidade, velocidade da corrente e do transporte advectivo de sal, abrangendo um intervalo de tempo de um ciclo quinzenal de maré. A série temporal tem início no dia 22 de abril de 2001.

Os perfis verticais médios de salinidade (Fig. 4.23) indicam condições bem misturadas e a formação de haloclinas nas condições de sizígia e de quadratura, respectivamente. Perfis típicos dessas condições são exemplificados para o nono dia (30/04/2001) e o décimo quinto dia (06/05/2001) da série de simulações para as marés de quadratura (azul) e de maré de sizígia (em vermelho), respectivamente. Esse resultado é compatível com as características dos processos de mistura que ocorrem nos estuários reais.

Na variação local da salinidade apresentada na forma de isopleias (Fig. 4.24), verifica-se que nos cinco primeiros dias, na transição de maré de sizígia para a de

quadratura, a coluna de água é quase homogênea, a seguir, do quinto dia até o décimo, a estabilidade vertical da coluna de água é maior, e próximo ao oitavo dia tem-se o máximo de estratificação vertical da salinidade.

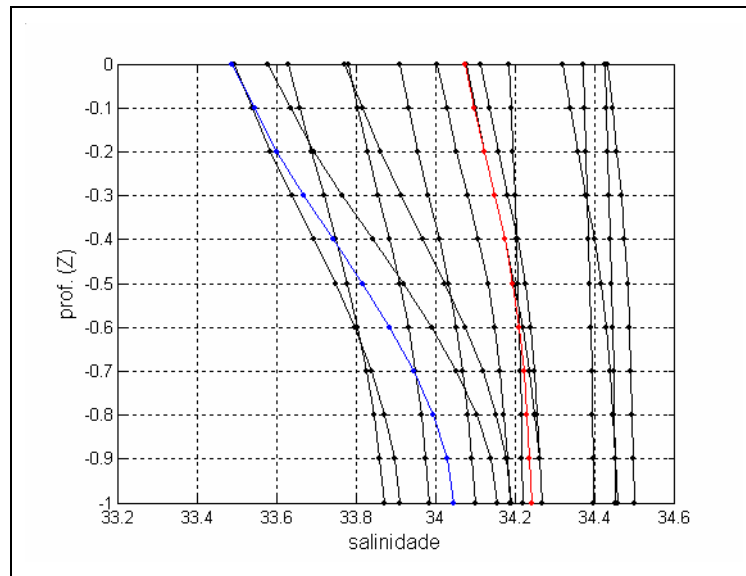


Figura 4.23 – Modulação de perfis verticais médios ($\langle S(Z) \rangle$) a cada dois ciclos semidiurnos de maré na estação 3, calculados com valores simulados com o modo baroclínico durante 16 dias, partir de 22/04/2001. Azul e vermelho indicam condições de quadratura e de sizígia, respectivamente.

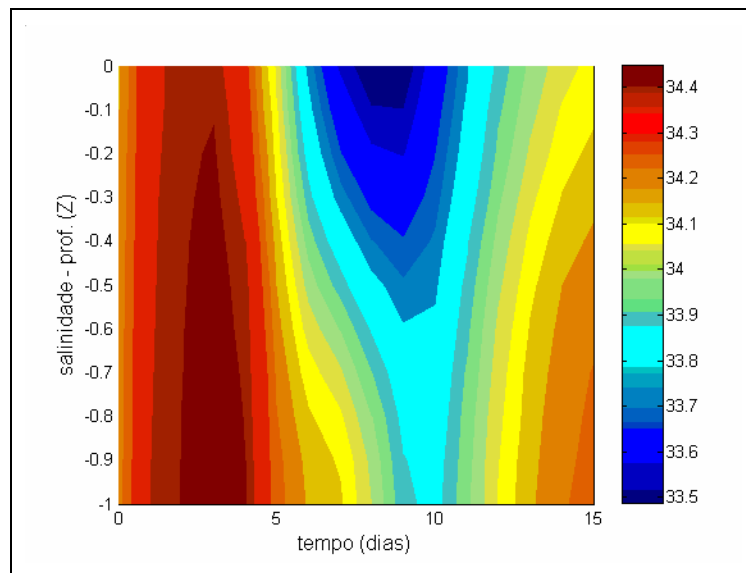


Figura 4.24 – Isopletas dos perfis médios ($\langle S(Z) \rangle$) obtidos a cada dois ciclos semidiurnos na estação 3, simuladas com modo baroclínico a partir de 22/04/2001.

A variação temporal dos perfis de velocidade $\langle u(Z) \rangle$ calculados a cada dois semiciclos diurnos é apresentada em (Fig. 4.25). Nessa figura observa-se que as características básicas da hidrodinâmica dos estuários parcialmente misturados está bem representada, ou seja, circulação gravitacional com movimentos mais intensos na quadratura do que na sizígia.

Os valores da velocidade na superfície estão compreendidos entre os máximo e mínimo de $u \approx 0,062 \text{ m.s}^{-1}$ e $u \approx -0,009 \text{ m.s}^{-1}$, respectivamente. Nas proximidades do fundo em ($Z = -0,9$), os resultados foram entre $u \approx 0,0 \text{ m.s}^{-1}$ e $u \approx -0,05 \text{ m.s}^{-1}$.

Para o dia 30/04/2001 (Fig. 4.24, perfil em azul), correspondente à maré de quadratura, observa-se à circulação bidirecional ou circulação gravitacional típica de estuários parcialmente misturados; velocidades estuário abaixo e acima na camada superficial e de fundo, respectivamente. Para este perfil a profundidade de movimento nulo, onde ocorre a inversão do sentido das velocidades, está localizada em $Z = -0,45$. Na maré de sizígia um perfil típico é apresentado em vermelho para o dia (06/07/2001) observando-se que a circulação gravitacional é bem menos intensa do que na quadratura e a inversão do movimento ocorre na profundidade $Z \approx -0,75$.

Comparando estes dois perfis tem-se que durante a quadratura alguns perfis apresentaram valores superiores de velocidade estuário acima e em determinadas ocasiões observou-se o fluxo plenamente para o interior do estuário. Para a sizígia também foi notificada a presença de velocidades estuário abaixo com maior intensidade em certos dias.

Na variação local da velocidade, apresentada na forma de isopletas (Fig. 4.26), verifica-se uma grande simetria do movimento médio estuário abaixo e acima. Durante a maré de quadratura observa-se inicialmente a presença de movimentos residuais estuário acima ($u < 0$) por quase toda a coluna de água, sendo mais intensos nas camadas mais profundas. Na transição entre a quadratura e a sizígia observa-se a ocorrência de movimentos bidirecionais ($u > 0$ e $u < 0$), com profundidade de movimento nulo aumentando com o tempo, e durante a sizígia os movimentos residuais estão orientados estuário abaixo ($u > 0$). Esses movimentos, obtidos com simulações horárias contínuas, apresentam dificuldades de verificação experimental,

mas seus resultados são concordantes com a dinâmica dos estuários parcialmente misturados.

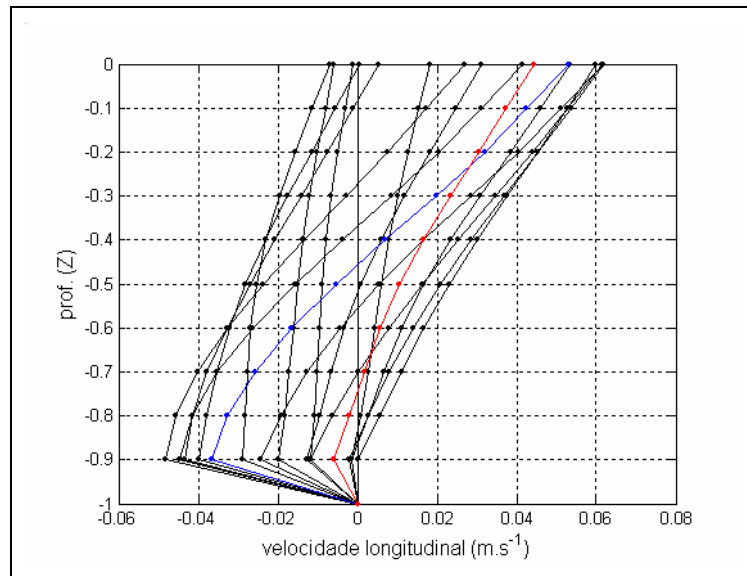


Figura 4.25 – Modulação de perfis verticais médios ($\langle u(Z) \rangle$), a cada dois ciclos semidiurnos de maré, na estação 3, com valores simulados com o modo baroclínico durante 16 dias, partir de 22/04/2001. Azul e vermelho indicam condições de quadratura e de sizígia, respectivamente.

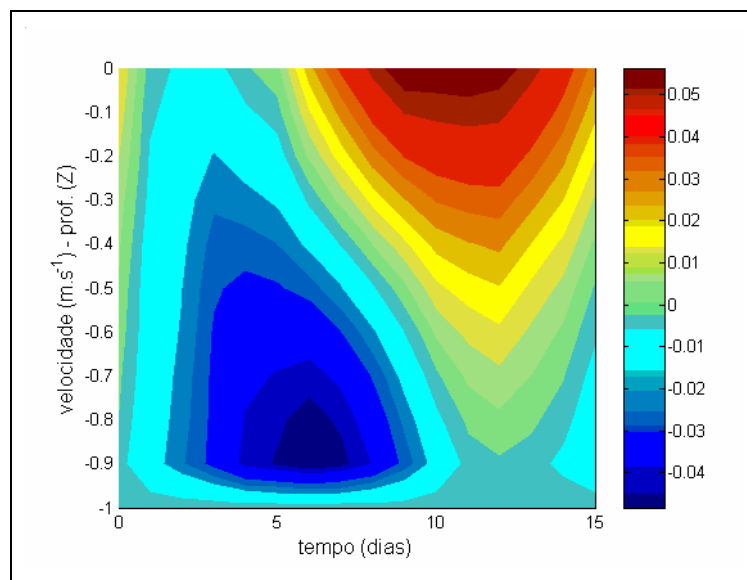


Figura 4.26 – Isopletas dos perfis médios de velocidade ($\langle u(Z) \rangle$) obtidos a cada dois ciclos semidiurnos na estação 3, simuladas com modo baroclínico a partir de 22/04/2001.

A figura 4.27 apresenta a variação dos perfis do transporte médio de sal $\langle T_s(Z) \rangle$, por unidade de largura, obtidos a cada dois ciclos semidiurnos de maré. Os valores observados próximos à superfície $Z = -0,1$ estão compreendidos entre os valores de $T_s \approx 1,50 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ e $T_s \approx -0,30 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$. Aproximando-se do fundo, em $Z = -0,9$, os limites para o transporte de sal foram de $T_s \approx 0,0 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ e $T_s \approx -1,45 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$.

Para o dia 30/04/2001 em azul, correspondente ao regime de maré de quadratura, verifica-se um comportamento similar ao observado para o perfil de velocidade (Fig. 4.22), com transporte de sal em duas direções, na camada de fundo estuário acima e na camada superficial abaixo.

Para a observação realizada na maré de sizígia em azul (06/07/2001) o transporte de sal é em grande parte estuário abaixo, desde a superfície $Z = 0,0$ até $Z \approx -0,75$, e na pequena faixa compreendida entre $Z = -1$ e $Z \approx -0,75$ apresentou o transporte estuário acima com intensidade de até $\approx 1,4 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$.

A variação local representada pela configuração das isopletas (Fig. 4.23) mostra um comportamento similar ao observado em (Fig. 4.22).

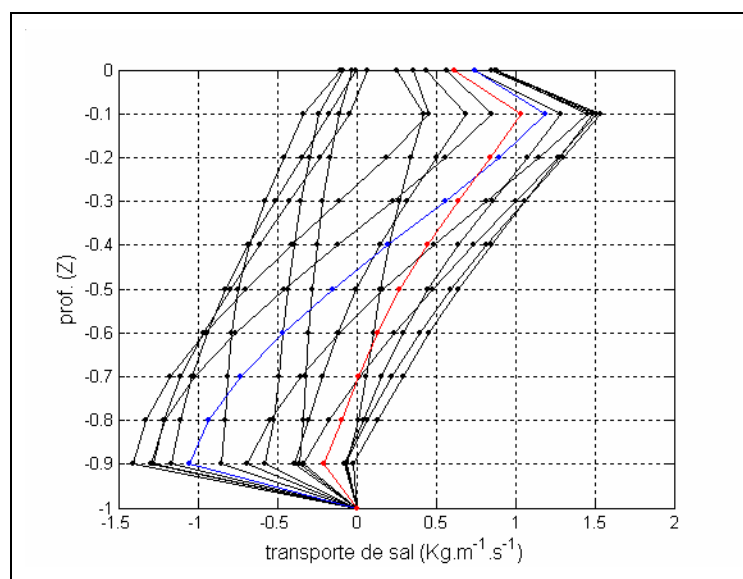


Figura 4.27 – Modulação de perfis verticais médios do transporte advectivo de sal (T_s), por unidade de largura, a cada dois ciclos semidiurnos de maré, na estação 3, com valores simulados com o

modo baroclínico durante 16 dias, partir de 22/04/2001. Azul e vermelho indicam condições de quadratura e de sizígia, respectivamente.

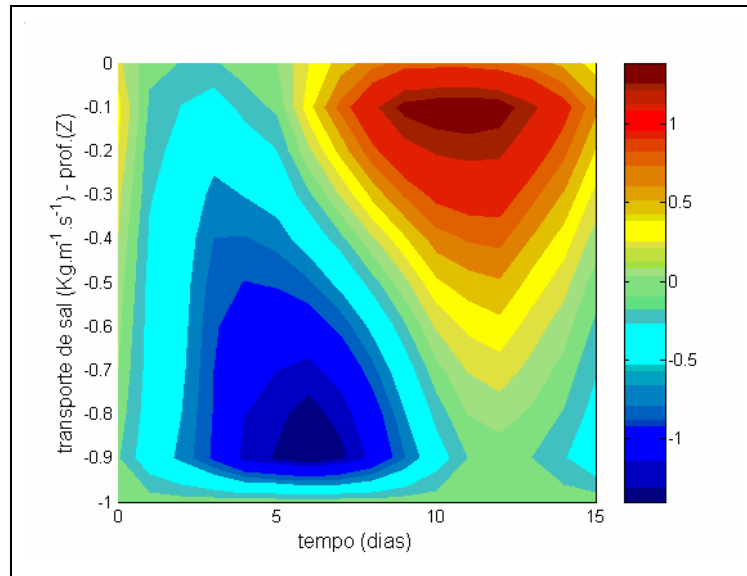


Figura 4.28 – Isopletas dos perfis médios do transporte advectivo de sal (T_s), por unidade de largura, obtidos a cada dois ciclos semidiurnos na estação 3, simuladas com o modo baroclínico a partir de 22/04/2001.

A variação do número de Richardson nesse ciclo de maré (Fig. 4.28) mostra na maré de quadratura a ocorrência do valor máximo de estabilidade vertical ($Ri_L \approx 100$), o qual diminui drasticamente na maré de sizígia para valores que indicam fraca estabilidade vertical ($Ri_L < 2$).

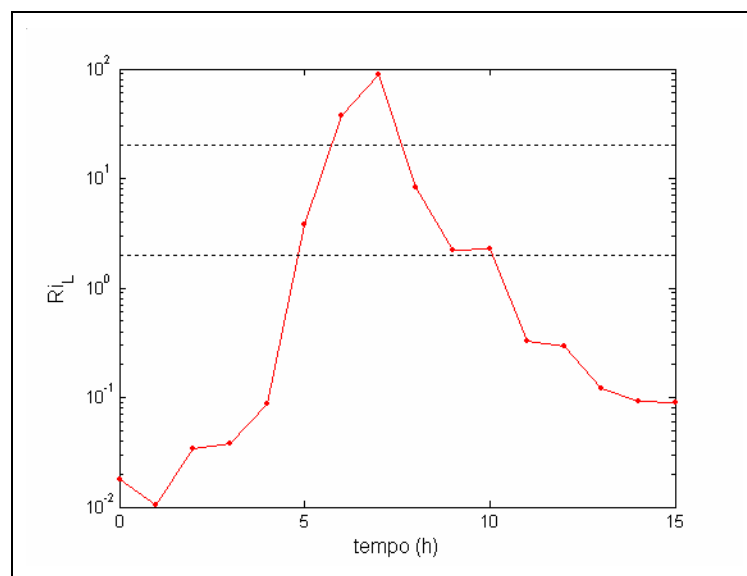


Figura 4.29 – Modulação quinzenal do número médio de Richardson por camada (Ri_L), para cada dois ciclos semidiurnos, na estação 3, simulado com o modo baroclínico a partir de 22/04/2001.

A seguir, as figuras 4.30 e 4.31 apresentam a modulação quinzenal da classificação do estuário segundo o critério dinâmico do Diagrama estratificação-circulação e dos parâmetros estratificação (pe) e circulação (pc), respectivamente.

As imagens dos parâmetros sobre o diagrama (Fig. 4.30) estão distribuídas da seguinte forma: i) no semi-plano 2a (delimitado pelas isolinhas v variando entre zero e um) e; ii) no semi-plano 1, para o qual esse parâmetro não tem significado físico. Em ambos os casos a distribuição dos pontos é de forma aleatória; no primeiro, a região inferior do Curimataú (estação 3) classifica-se como um estuário parcialmente misturado e com fraca estratificação vertical, apresentando a clássica circulação gravitacional, e no segundo, essa região classifica-se como bem misturada (tipo 1), com movimento residual estuário abaixo ($u > 0$).

O comportamento apresentado na variação temporal dos parâmetros estratificação (pe) e circulação (pc) indica que ambos atingiram o máximo valor na maré de quadratura, implicando assim que nessa condição o estuário é do tipo 2a, apresentando maior estratificação vertical de salinidade. Entretanto, na maré de sizígia, esses parâmetros tendem a valores menores e o estuário classifica-se como tipo 1 (fracamente estratificado). Os limites observados para os parâmetros de circulação e de estratificação foram de $0 \approx pc \approx 50$ e $0 \approx pe \approx 0,02$.

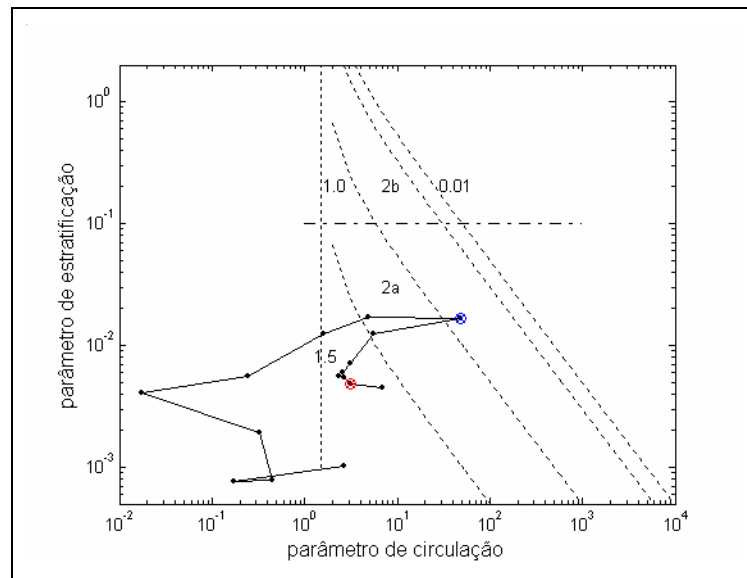


Figura 4.30 – Variação temporal da classificação do estuário segundo o Diagrama Estratificação-circulação obtida a cada dois ciclos semidiurnos na estação 3, com simulações com o modo baroclínico a partir de 22/04/2001.

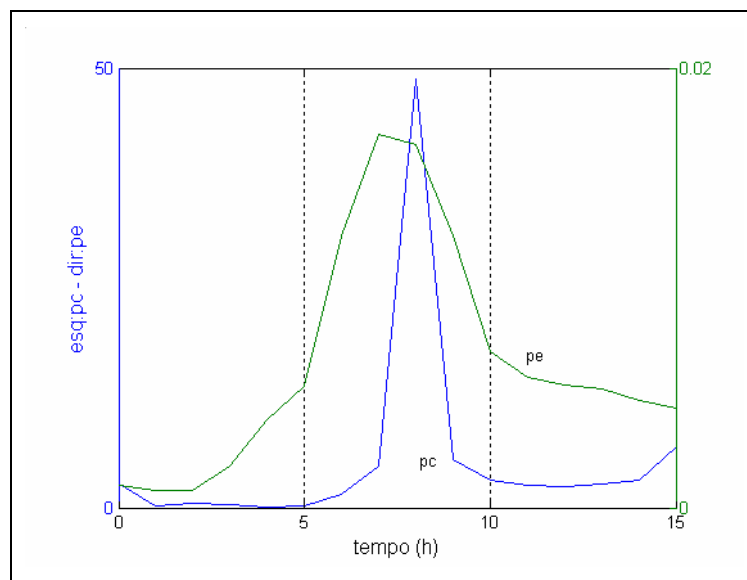


Figura 4.31 – Variação temporal dos parâmetros de circulação (pc) e de estratificação (pe) obtida a cada dois ciclos semidiurnos na estação 3, com simulações com o modo baroclínico a partir de 22/04/2001.