



5.1.6 Hidrodinâmica e Sedimentação Costeira

Em áreas de plataforma continental, a maré oceânica, devido à atração gravitacional e movimentos do sistema Terra-Sol-Lua, são claramente observados não apenas no nível do mar, mas também como movimentos horizontais periódicos - correntes de maré, com reversões em torno de 24 e 12 horas, principalmente, mas também com períodos maiores (15 dias e 1 mês) e menores (8 e 6 horas).

Esses movimentos têm maior amplitude quando há alinhamento entre os três astros (Terra-Sol-Lua) - nos períodos de sizígia, na lua nova ou cheia - e menor amplitude quando a distribuição dos astros forma ângulo de 90° - nos períodos de quadratura, na lua crescente ou minguante.

Além da forçante astronômica da circulação, a tensão de cisalhamento do vento na superfície do mar gera ondas de gravidade superficiais (OGS - com períodos típicos da ordem de 10 s e comprimentos de onda da ordem de 100 m) e movimentos de meso-escala na forma de correntes e oscilações do nível do mar (com escalas de tempo entre horas e dias e escalas espaciais entre dezenas e centenas de quilômetros). Tanto as ondas como os movimentos de meso-escala são dependentes da variabilidade das condições atmosféricas.

Porém, na plataforma continental, ondas de gravidade superficiais (OGS) são relativamente pouco importantes em termos de transporte de partículas e propriedades. Para OGS típicas, com 100 m de comprimento ($L = 2\pi / k$, onde k é o número de onda), período de 10 s ($T = 2\pi / \omega$, onde ω é a frequência angular) e amplitude de 1 m (η), as intensidades das velocidades horizontais (u), na superfície do mar, são da ordem de 1 m/s ($u = \eta g k / \omega$, sendo g a aceleração da gravidade). Essa intensidade diminui em direção ao fundo com $\exp(-kz)$, ou seja, a 10m de profundidade a velocidade típica diminui 50% (Le Blond & Mysak, 1978).

Entretanto, como o período é curto, essas velocidades produzem um deslocamento horizontal residual dos materiais de apenas poucos metros, aproximadamente $0,5 \text{ m/s} * 5 \text{ s} = 2,5 \text{ m}$ na superfície para uma OGS típica, em torno da posição inicial.

Por outro lado, campos de vento atuando sobre a plataforma geram divergência / convergência nessa região e, como conseqüência, movimentos verticais (variações do nível do mar) e horizontais (correntes) intensificados. No Hemisfério Sul (HS), uma costa a oeste de um oceano sob influência de vento sul apresenta nível do mar acima da média e correntes para noroeste, com intensidade proporcional à intensidade do vento, seguindo o modelo clássico de Ekman-Sverdrup (Bowden, 1983); no caso de vento norte, o nível do mar na costa fica abaixo da média e correntes são para sudeste.

Dentre as diversas escalas de atuação do vento na superfície do mar, como a sazonal e a dos sistemas frontais, há também o período diário, com o efeito da brisa marítima na circulação costeira. Entretanto, em geral essa componente da circulação só é significativa muito próximo à costa, sendo na maior parte dos casos considerada com a circulação de maré, através da componente de corrente S_2 e, eventualmente, sua modulação sazonal.

Completando os principais componentes de movimentos em plataformas continentais, além das influências de marés e vento, se tem a circulação gerada por variações espaço-temporais de temperatura e salinidade (gerando gradientes baroclínicos de pressão), variações espaciais de pressão atmosférica e desníveis da superfície (gerando gradientes barotrópicos de pressão) e ondas costeiras (como ondas de Kelvin e ondas costeiras aprisionadas) (Gill, 1982; Pedlosky, 2003).

Já muito próximo à costa, os movimentos do oceano são restringidos pela presença dos contornos do fundo e das áreas emersas. As ondas de maré são refletidas e dissipadas e as OGS passam a sofrer influência da presença do fundo marinho, onde mudam seu



comprimento, são fortemente dissipadas pelo atrito com o fundo e, eventualmente, quebram na praia. Os movimentos de meso-escala são intensificados próximo aos contornos - nível do mar e correntes têm sua maior variabilidade relativa.

Na região Sudeste do Brasil, a circulação marinha na plataforma continental interna (profundidades menores do que 50 m) é dominada pela dinâmica da maré e de movimentos gerados pelo vento, com pequena influência das correntes de densidade (Mesquita, 1983; FUNDESPA, 1999). Esta região, em geral, não é afetada por correntes litorâneas (devidas à quebra de ondas nas praias). Por outro lado, nas regiões estuarinas, correntes de densidade devem ser consideradas, principalmente em função dos aportes fluviais, como é o caso do Estuário de Santos – São Vicente.

Quanto à massas d'água, a plataforma continental interna no Estado de São Paulo é ocupada principalmente por Água Costeira (AC), resultante da mistura das águas sobre a plataforma continental com aporte de água doce, proveniente da drenagem continental e contribuições estuarinas, possuindo baixa salinidade e homogeneidade na vertical, devido à turbulência imposta pela tensão de cisalhamento do vento em coluna de água relativamente pequena.

No verão, ocorre a penetração da Água Central do Atlântico Sul (ACAS) na camada subsuperficial da região mais costeira da plataforma continental (ressurgência), enquanto que, no inverno, com o afastamento da ACAS, aumenta o domínio da AC na plataforma interna (Castro et al., 1987).

Na análise de massas d'água, o padrão homogêneo na vertical da plataforma continental interna é observado no litoral Norte do Estado de São Paulo (Castro, 1996), como também na região de Santos, onde correntes de densidade só são importantes quando ocorrem índices de pluviosidade muito altos, que aumentam a vazão de rios e a drenagem continental na área, provocando diminuição da densidade das águas estuarinas e costeiras e gerando correntes na superfície para fora do estuário de Santos – São Vicente. Muitas vezes, esses padrões de alta pluviosidade estão associados a eventos frontais intensos. Ao ultrapassarem a Baía de Santos, as correntes de densidade na superfície defletem para a esquerda, passando a ser para Nordeste, paralelas às isóbatas, e se tornando um adicional ao sistema de correntes geradas por ventos do quadrante Sul.

Nas proximidades de Santos, o nível do mar apresenta oscilações de maré com, aproximadamente, 1 m de amplitude (da crista ao cavado) durante as sizígias e de 0,40 m durante as quadraturas, enquanto as correntes apresentam amplitudes de 0,20 m/s e 0,05 m/s, respectivamente, com eixos maiores das elipses preferencialmente na direção NW – SE (Mesquita & Harari, 2003; Harari & Camargo, 2003). Quanto à dispersão devido à maré, resultam excursões de materiais em suspensão na água do mar dentro de um raio da ordem de 2 km durante as sizígias e de 500 m nas quadraturas, em torno da posição inicial.

Em relação à circulação gerada por efeitos meteorológicos, sob influência da Alta Subtropical, na região sudeste brasileira prevalecem ventos na superfície do quadrante leste moderados, em geral não ultrapassando 5 m/s, e pressões relativamente altas, da ordem de 1025 hPa.

Entretanto, instabilidades provocam um padrão de condições atmosféricas típico da evolução de sistemas frontais frios, com ventos do quadrante leste girando para ventos do quadrante norte, depois de oeste, pressão atmosférica caindo, da ordem de 10 hPa, seguido de ventos do quadrante sul, temperatura diminuindo e pressão atmosférica em elevação. Na seqüência, os ventos de sul vão girando novamente para ventos de leste, com temperatura e pressão aumentando, voltando a influência da Alta Subtropical.



A caracterização de frentes frias pode obedecer a vários critérios, tais como variações dos campos de pressão, temperatura do ar e intensidade e direção dos ventos. Um critério particularmente adequado é baseado na observação do comportamento dos ventos de superfície. Para a plataforma sudeste brasileira, quedas significativas da pressão atmosférica, seguidas de ventos do quadrante sul, com posterior queda de temperatura, podem ser usadas como os padrões de caracterização das frentes.

No caso dos ventos, intensidades maiores que 5 m/s, persistentes por mais de 24 horas (intervalo de tempo próximo ao período inercial na região, que corresponde ao tempo necessário para que a circulação marítima entre em equilíbrio com o vento) caracterizam sistemas meteorológicos com energia suficiente para afetar significativamente o deslocamento de materiais e poluentes na superfície do mar. Pode-se considerar que sistemas frontais ocorrem com frequência de 3 a 5 eventos por mês, sendo as menores frequência e intensidade observadas no verão – outono e maiores frequência e intensidade no inverno – primavera (Andrade, 2005).

Ainda que movimentos transientes no oceano, excitados pelas mudanças das condições atmosféricas, estejam sobrepostos na área costeira, o modelo de Ekman-Sverdrup pode ser utilizado para interpretar correntes geradas pelo vento na região de plataforma ao largo de Santos.

Nessa área, correntes marítimas são modeladas e observadas em medições (disponíveis em raras ocasiões), paralelas às isóbatas, e correlacionadas com o vento na superfície. Essas correntes são, em geral, verticalmente homogêneas (barotrópicas) e podem atingir picos de 0,8 m/s a 1 m/s, mas, persistentes por mais de um dia, são da ordem de 0,5 m/s, quando geradas por ventos de sul intensos que acompanham instabilidades atmosféricas na costa sudeste brasileira.

Por outro lado, correntes mais fracas, da ordem de 0,2 m/s, raramente excedendo 0,4 m/s, com o sentido geral para sul, estão presentes quando a região está sob influência da Alta do Atlântico Sul, com ventos de nordeste e leste (Camargo et al, 2006). Por influência do vento, substâncias na superfície da água podem sofrer deslocamentos de até 40 km em um dia, para nordeste, ou até 20 km para sudoeste, a partir do ponto de lançamento.

No estuário de Santos – São Vicente, os efeitos predominantes na circulação são os de maré e de cisalhamento do vento, mas deve ser considerada adicionalmente a circulação devida a variações de densidade em função dos aportes fluviais, que é típica de áreas estuarinas, com correntes de superfície predominantemente em direção ao mar aberto e correntes em profundidade em direção ao interior do estuário. Experimentos numéricos de Harari et al. (2009) demonstram que essas correntes possuem intensidades em torno de 0,1 m/s.

O estudo da dinâmica costeira na região do Porto de Santos foi realizado a partir de modelagem numérica hidrodinâmica, segundo uma grade computacional englobando o estuário de Santos – São Vicente (incluindo a Baía de Santos e os canais do Porto e de São Vicente – com espaçamento de 166,68 m). A grade estuarina foi implementada considerando as profundidades após a dragagem de aprofundamento para 15 m do canal de navegação (realizada em 2010 / 2011). Esta grade foi processada como aninhamento de uma grade maior cobrindo toda a plataforma do Estado de São Paulo, rotineiramente utilizada desde os trabalhos de Harari & Camargo (1994) e Camargo & Harari (1994).

A grade estuarina possui 220 por 150 pontos, sendo inclinada em relação às direções EW e NS. A batimetria desta grade (na versão após dragagem) é apresentada na Figura 5.1.6-1, com a posição do ADCP cujos dados foram utilizados para validar o modelo, próximo à Ilha das Palmas. Nesta figura também é apresentada a batimetria da região específica de interesse para o presente estudo, na qual foram selecionados 09 pontos,



em três radiais perpendiculares à costa, desde a parte mais rasa até o meio do canal de navegação, cujas posições são fornecidas no Quadro 5.1.6-1.

Para esta grade, foi processado modelo baseado no "Princeton Ocean Model – POM" (Blumberg & Mellor, 1987), com adaptações de Harari & Camargo (1998, 2003). O POM é um modelo tri-dimensional não linear com as equações hidrodinâmicas completas (nível do mar, correntes, temperatura, salinidade e densidade) cujas soluções são obtidas em sistema de coordenadas sigma (que acompanha o relevo submarino), considerando a separação de modos e fechamento turbulento de segunda ordem (Mellor, 1998).

O modelo foi processado considerando como forçantes:

- ✓ As marés nos contornos abertos, especificadas a partir dos resultados do modelo global de maré de Andersen et al. (2006a, b) e do modelo de maré da plataforma de Harari & Camargo (1994);
- ✓ Os ventos de superfície, disponibilizados pelo *National Center for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research* (NCEP/NCAR) (Kalnay et al., 1996);
- ✓ Dados de temperatura e salinidade do Banco de Dados Levitus 94 (Levitus & Boyer, 1994); e
- ✓ Os valores de oscilações de nível médio do mar nas bordas calculados pelo modelo de plataforma de Camargo & Harari (1994), considerando medições de nível do mar das estações maregráficas costeiras permanentes de Cananéia e Ubatuba.

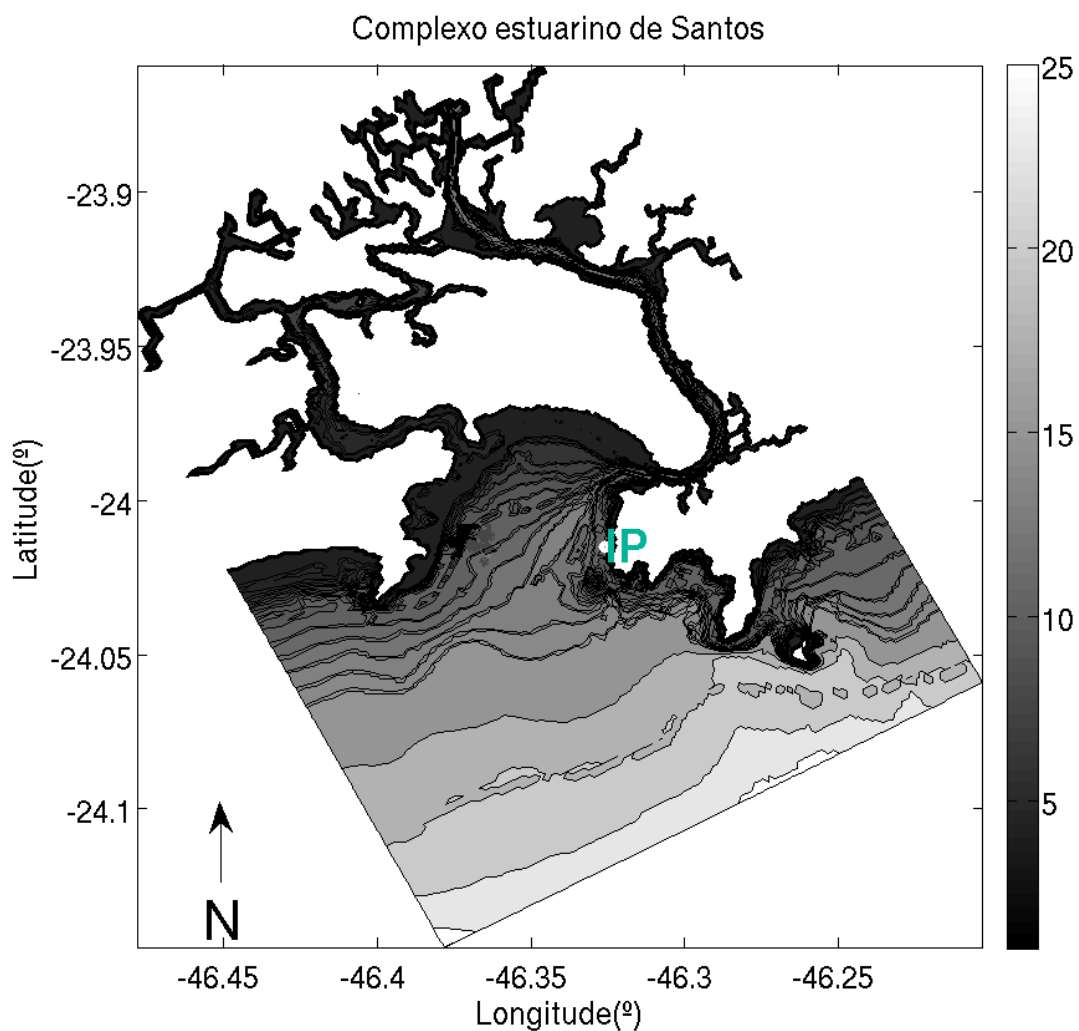
Especificamente para a grade estuarina, foram consideradas adicionalmente as seguintes forçantes:

- ✓ Dados de vazões fluviais na área do estuário (IME, 2008); e
- ✓ Dados de temperatura e salinidade do Projeto CIRSAN (Harari et al, 2009, 2009a).

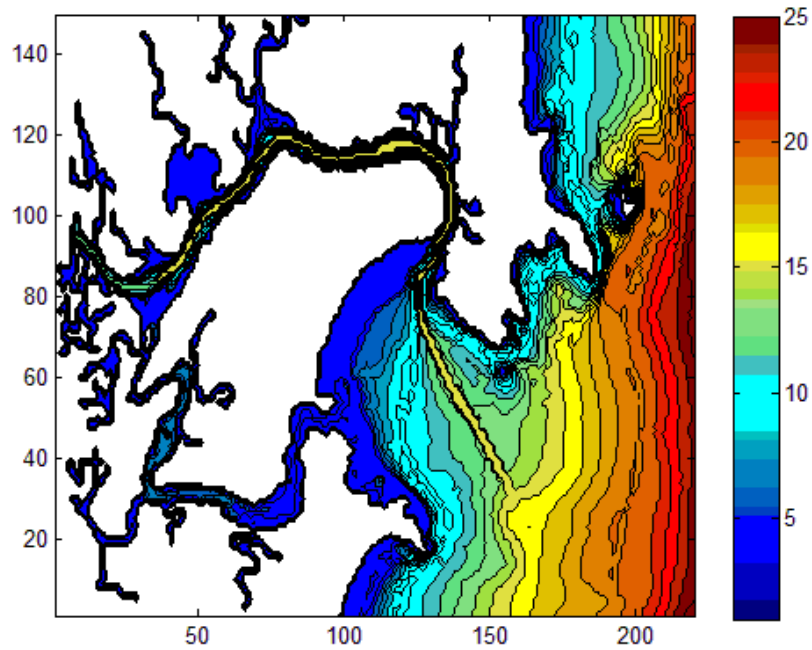
Este modelo hidrodinâmico tem sido intensamente utilizado na reprodução de elevação do nível do mar e correntes em regiões costeiras e de plataforma (Harari & Camargo, 1998, 2003; Camargo & Harari, 2001; Camargo, Harari & França, 2006; Harari et al., 2006).

De forma similar ao realizado na análise de padrões meteorológicos, as condições de elevações e correntes marítimas foram simuladas para dois meses, compreendendo janeiro e julho de 2009, de modo a cobrir condições de verão e inverno. O ano de 2009 foi escolhido para as simulações, por ser o ano mais recente e completo quando do início do estudo meteorológico e hidrodinâmico realizado; ademais, os dados desse ano, e os resultados de modelagem, representam satisfatoriamente o comportamento da região. Nas simulações, foram considerados 11 níveis sigma nas grades e passos de tempo de 12 segundos para o modo externo e 2 segundos para os modos internos.

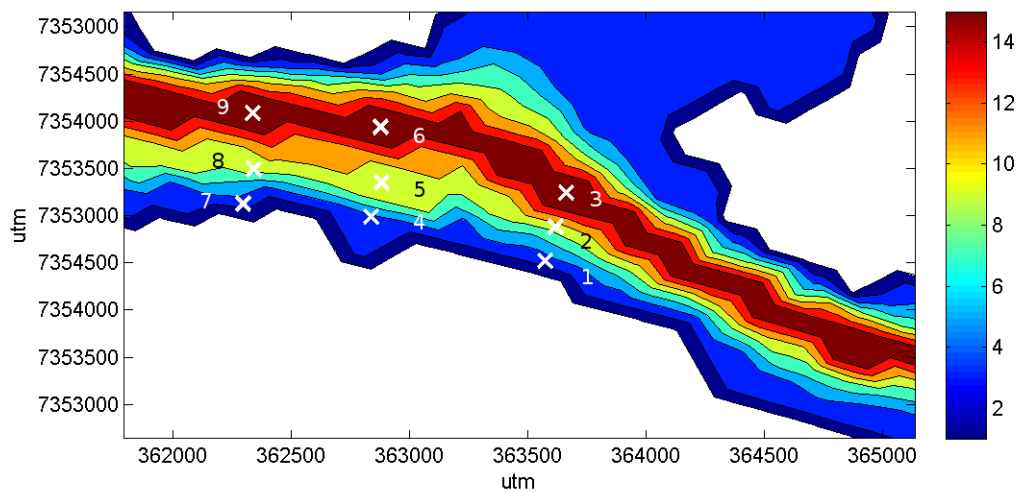
Figura 5.1.6-1 Batimetria (em metros) do estuário (com posição do ADCP próximo à Ilha das Palmas – IP) e a grade utilizada no modelo (a) e batimetria da área de interesse (em metros) e posições dos 09 pontos selecionados, em utm (b).



(a)



(b)





Quadro 5.1.6-1 Posições geográficas dos 09 pontos de controle da área específica do presente estudo.

Ponto	Longitude (W)	Latitude (S)	EW (utm)	NS (utm)
1	-46.3404	-23.9234	363572.78575	7353608.3235
2	-46.3400	-23.9221	363616.00956	7353752.1460
3	-46.3396	-23.9208	363659.73909	7353896.4161
4	-46.3477	-23.9216	362837.02713	7353795.4566
5	-46.3472	-23.9203	362882.58141	7353939.7470
6	-46.3472	-23.9182	362876.05709	7354175.5684
7	-46.3530	-23.9211	362294.29819	7353851.5105
8	-46.3525	-23.9198	362340.75182	7353997.0296
9	-46.3526	-23.9176	362334.50070	7354235.2903

A validação do modelo foi realizada com medições de perfilador acústico de correntes (ADCP) Sontek Argonaut XR instrumentado com sensor de pressão, sensor de temperatura e três transdutores acústicos operando em 750kHz, fundeado na posição 24° 0,757' S 46° 19,579' W, com profundidade de 11,0 m aproximadamente, local muito próximo à Ilha das Palmas.

O registro considerado cobre o período de 16:30 GMT de 16 de fevereiro de 2009 a 13:30 GMT de 30 de março de 2009, em intervalos de 30 minutos, com medidas de correntes na coluna d'água, temperatura no fundo e nível da superfície do mar. O aparelho foi configurado para a obtenção de medições de correntes em 10 células de 1,0 m, a partir de 0,5 m acima do fundo até 0,5 m abaixo do nível da superfície do mar.

A comparação quantitativa das observações com resultados do modelo é apresentada a seguir, a partir da representação gráfica de séries temporais de elevações e da componente NS de corrente a meia água (Figura 5.1.6-2).

A estatística da comparação é apresentada no Quadro 5.1.6-2, que contém as correlações modelo x medições (correl), as médias das diferenças (difmed), seus desvios padrão (dpadr), as médias dos erros absolutos (meabs) e o parâmetro de Wilmott (skill), o qual é mais próximo a 1 quanto melhor o ajuste do modelo às observações e mais próximo a zero quanto maior o desajuste (Wilmott, 1981).

Esta estatística considera elevações e correntes totais e as respectivas contribuições de maré. Quanto às correntes, as estatísticas contemplam os valores na superfície e a 05 e 10 m de profundidade, para a componente NS de corrente, cuja amplitude é bem maior que a EW, que é atenuada pela proximidade do contorno continental a leste.

A estatística comparativa demonstra que o modelo reproduz razoavelmente as medições do ADCP, embora o perfilador seja posicionado no interior da Baía de Santos, muito próximo à Ilha das Palmas, com componente de corrente EW muito reduzida.

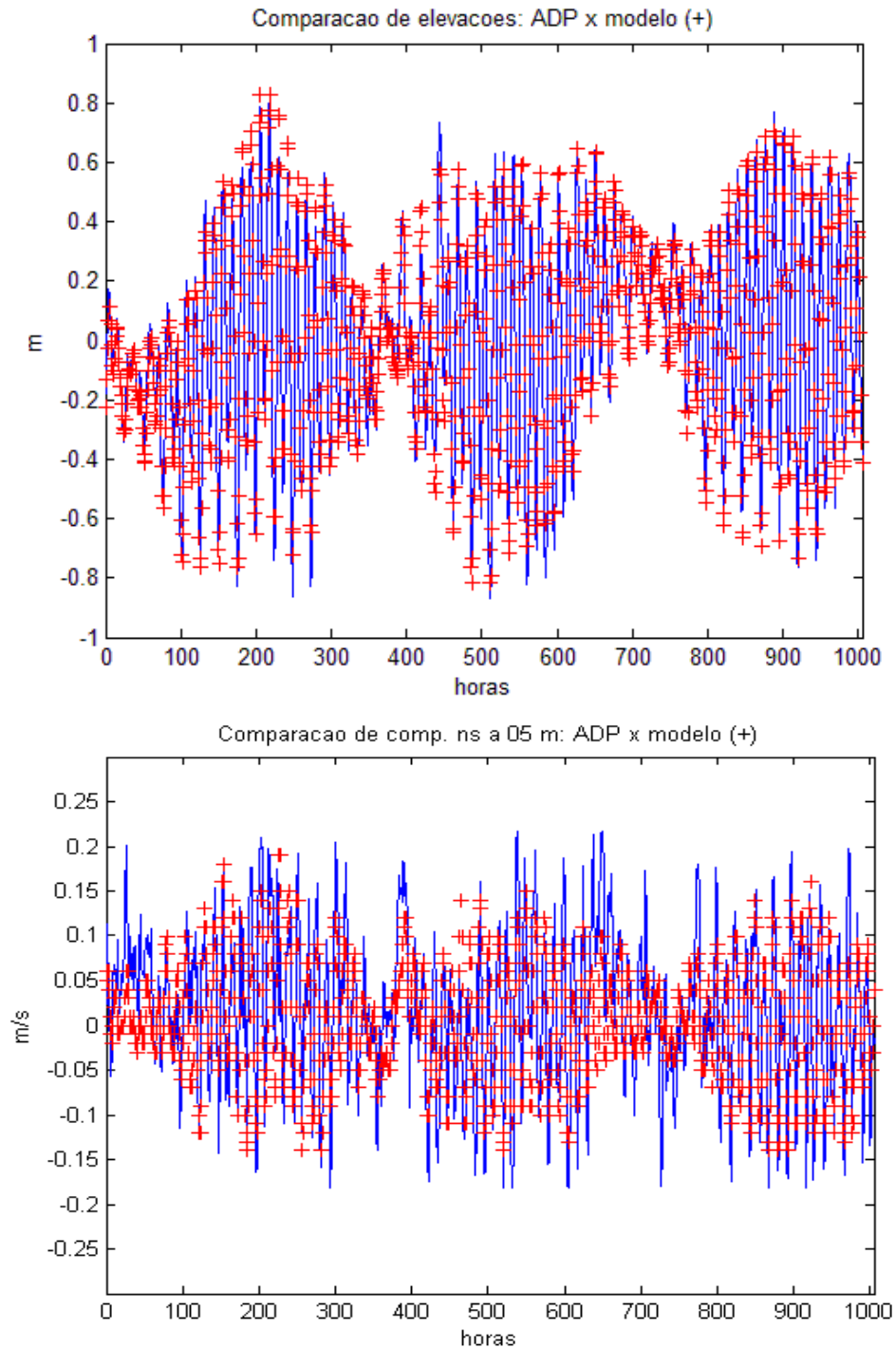
Entretanto, a correlação da componente de corrente mais significativa (NS) atinge 0,73 e o desvio padrão das diferenças é sempre menor que 0,1 m/s, com skill acima de 0,90; para a contribuição de maré, que é a feição dinâmica mais freqüente, os parâmetros estatísticos comparativos são ainda melhores, com correlações que superam 0,75 e desvios padrão que não ultrapassam 0,05 m/s, com skill acima de 0,90 (Quadro 5.1.6-2).

Uma limitação do modelo na reprodução das correntes medidas se encontra no cálculo de correntes mais fracas em diversos casos de valores extremos observados (Figura 5.1.6-2); estas discrepâncias são devidas à ocorrência de fortes jatos de vento locais, que não estão presentes no modelo atmosférico global, mas que produzem correntes intensas, principalmente na superfície (de fato, os desvios padrão das correntes em profundidade tendem a ser menores que os de superfície).



Quanto à reprodução do nível do mar, as correlações são muito elevadas, atingindo 0,95 para o total e para a contribuição de maré, com desvios padrão da ordem de 10% da amplitude e skill acima de 0,98 (Quadro 5.1.6-2).

Figura 5.1.6-2 Séries temporais de medições do ADCP (contínuo, azul) e de cálculos do modelo (pontilhado, vermelho) para a elevação da superfície (superior) e para a componente NS de corrente a 05 m de profundidade (inferior).

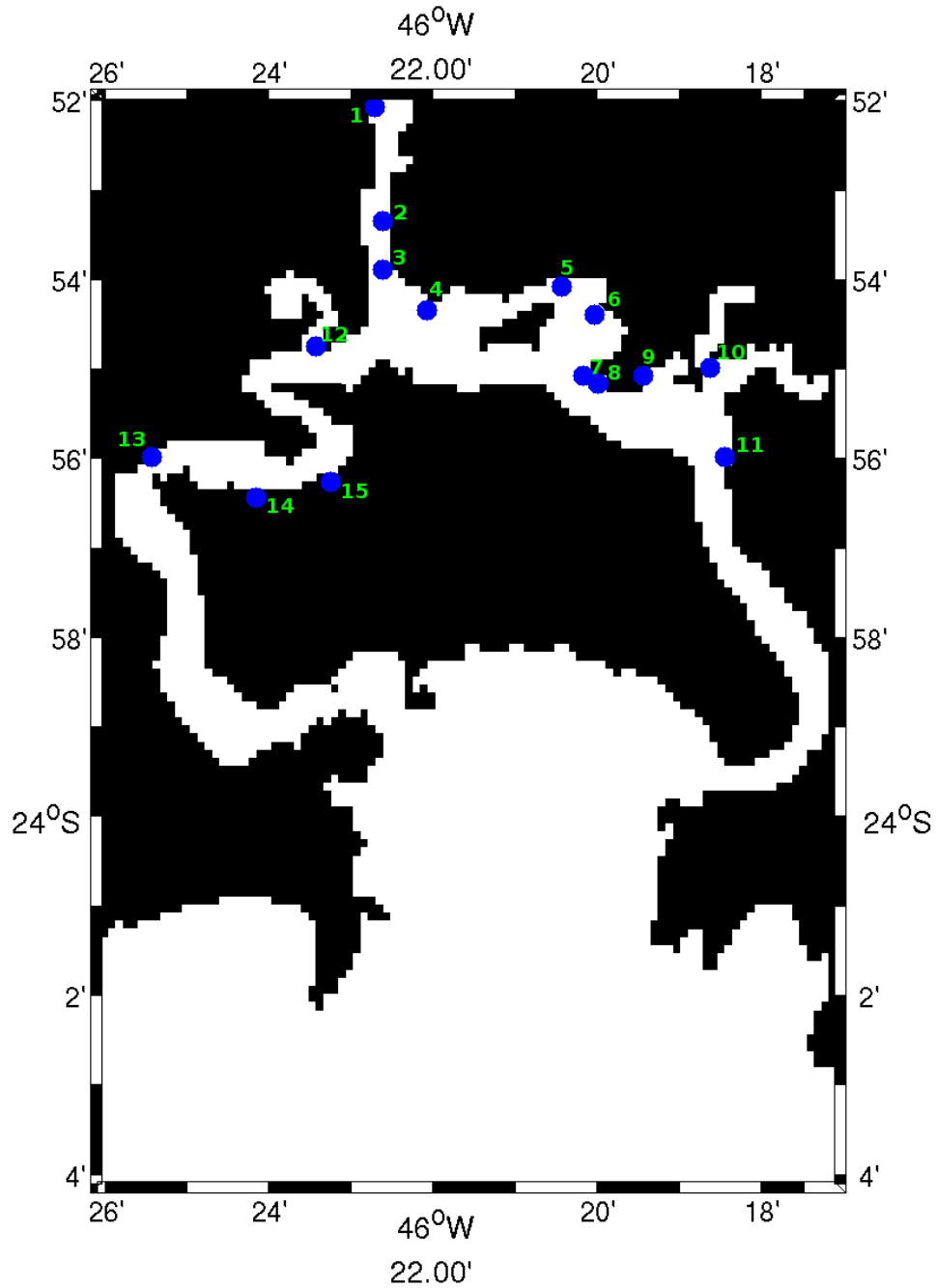


Quadro 5.1.6-2 Estatística comparativa de medições e resultados do modelo, considerando a elevação e a componente ns de corrente, na superfície e a 05 e 10 m de profundidade (valores totais e contribuição de maré): coeficientes de correlação e seus níveis de significância (correl, \pm), médias das diferenças (difmed) e seu desvios padrão (dpadr), médias dos erros absolutos (meabs) e parâmetros de Wilmott (skill).

	Total					Contribuição de maré				
	Correl \pm	Difmed (m)	Dpadr (m)	Meabs (m)	Skill	Correl \pm	Difmed (m)	Dpadr (m)	Meabs (m)	Skill
Elevação (m)	0,95 0,01	0,00	0,12	0,09	0,98	0,95 0,01	0,00	0,11	0,08	0,99
	Correl \pm	Difmed (m/s)	Dpadr (m/s)	Meabs (m/s)	Skill	Correl	Difmed (m/s)	Dpadr (m/s)	Meabs (m/s)	Skill
Componentes na sup	0,69 0,03	0,02	0,06	0,06	0,90	0,76 0,03	0,00	0,05	0,04	0,93
Componentes a 05 m	0,73 0,03	0,01	0,06	0,05	0,91	0,78 0,02	0,00	0,05	0,04	0,93
Componentes a 10 m	0,70 0,03	0,02	0,06	0,04	0,91	0,83 0,02	0,00	0,04	0,03	0,92

Como informação importante para os processamentos do modelo, a Figura 5.1.6-3 e o Quadro 5.1.6-3 apresentam as posições e as vazões fluviais consideradas na hidrodinâmica do estuário.

Figura 5.1.6-3 Mapa com a localização dos pontos de aporte fluvial (pontos em azul) utilizados como dados de entrada do modelo.





Quadro 5.1.6-3 Relação das vazões mínimas, médias e máximas para os rios/córregos inseridos no modelo numérico hidrodinâmico.

Rio/Córrego	E	N	Mínima (m ³ /s)	Média (m ³ /s)	máxima (m ³ /s)	Vazão Sólida (m ³ /ano)
Córrego das Neves	363.957	7357.061	0.021	0.084	12.47	2715.93
Rio Agari	368.613	7352.603	0.097	0.396	37.02	66920.38
Rio Cacheta	357.108	7351.822	0.042	0.172	47.61	32255.65
Rio Cubatão	356.090	7359.034	1.256	5.142	214.23	737694.35
Rio dos Bagres	358.931	7352.240	0.093	0.382	45.73	63478.36
Rio Jurubatuba	366.098	7358.075	0.98	4.012	90.32	56208.01
Rio Pereque	356.125	7359.100	0.535	2.191	98.82	35932.92
Rio 9	351.602	7353.506	0.016	0.065	11.99	14129.78
Rio 10	354.061	7356.380	0.009	0.038	7	4967.3
Rio 15	362.953	7358.473	0.013	0.054	7.45	1769.91
Rio 16	363.108	7355.889	0.009	0.037	5.14	795.89
Rio 17	362.202	7356.815	0.008	0.034	4.85	670.36
Rio 18	362.245	7358.263	0.021	0.084	10.59	13631.26
Rio 19	365.318	7358.240	0.016	0.067	8.47	14819.33
Rio 20	365.469	7357.375	0.007	0.029	3.67	4263.64
Rio 21	366.112	7357.999	0.011	0.045	5.29	506.45
Rio 22	365.940	7355.938	0.004	0.016	2.11	2071.92
Rio 23	368.704	7357.461	0.104	0.426	31.51	4873.36
Rio 24	368.889	7356.854	0.022	0.088	10.04	849.27
Rio 28	351.264	7355.296	0.004	0.016	3.56	666.68
Rio 29	357.555	7359.963	0.01	0.042	7.03	8030.33
Rio 31	357.192	7358.926	0.002	0.009	1.73	197.54
Rio 34	362.072	7356.816	0.002	0.007	1.49	136.38
Rio 36	367.001	7345.035	0.025	0.102	14.4	3083.56

Fonte: Adaptado de IME (2008).

5.1.6.1 Marés e nível médio do mar em Santos e Cananéia

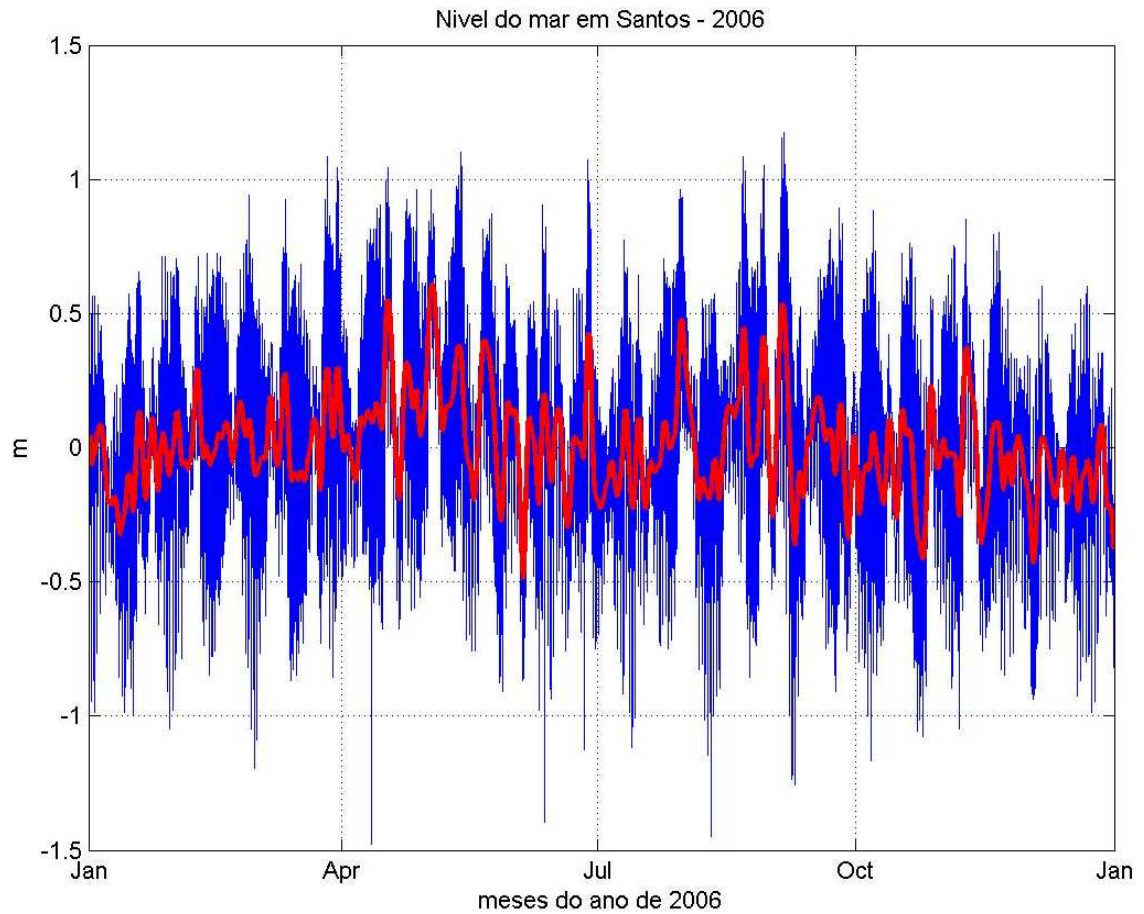
Medições de nível do mar em Santos (de 2006) e Cananéia (2007, 2008 e 2009) foram processadas, de modo a determinar as características da maré e das oscilações do nível médio do mar. Os dados de Santos foram fornecidos pela CODESP e os de Cananéia pelo Instituto Oceanográfico da USP (IOUSP). A Figura 5.1.6.1-1 apresenta a série temporal horária do nível do mar em Santos, referente a 2006.

No anexo XI – subitem A, são listadas as constantes harmônicas de vários pontos de interesse na área costeira de Santos e de Cananéia (Femar, 2000), sendo aqui reproduzidas apenas as de Ilha das Palmas e Ilha Barnabé (Quadro 5.1.6.1-1).

As constantes harmônicas do Quadro 5.1.6.1-1 demonstram uma pequena amplificação das principais componentes de maré na sua propagação da Baía de Santos para o interior do estuário, com a componente M2 passando de 35,3 cm para 35,8 cm de Ilha das Palmas para Ilha Barnabé e a S2 passando de 22,9 cm para 24,9 cm, sendo esta amplificação acompanhada de um aumento das respectivas fases (locais), de 81° para 85° (M2) e de 75° para 91° (S2).

As marés em Santos são semi-diurnas com desigualdades diurnas, tendo número de forma igual a 0,36, calculado através da relação de amplitudes das componentes em Ilha Barnabé $(H(M2)+H(S2))/(H(K1)+H(O1))$.

Figura 5.1.6.1-1 Nível do mar em Santos no decorrer de 2006 (azul) e nível médio do mar (vermelho), no Terminal de Fertilizantes de Conceiçãozinha.



Fonte: CODESP.



Quadro 5.1.6.1-1 Constantes harmônicas de maré de Ilha das Palmas e Ilha de Barnabé

Nome da Estação :		ILHA DAS PALMAS – SP			
Localização :		Barra do Porto de Santos - no Trapiche do Clube de Pesca			
Organ. Responsável :		DHN / INPH			
Latitude :		24° 00,5' S	Longitude : 46° 19,6' W		
Período Analisado :		28/03/90 a 27/04/90		Nº de Componentes : 24	
Análise Harmônica :		Método Almirante Santos Franco			
Classificação :		Maré de Desigualdades Diurnas			
Estabelecimento do Porto: (HWF&C)		III H 31 min	Nível Médio (Zo):		77 cm acima do NR.
Média das Preamares Superiores (MHHW) :		140 cm acima do NR.	Média das Preamares Inferiores (MLHW) :		130 cm acima do NR.
Média das Baixa-mares Superiores (MHLW) :		29 cm acima do NR.	Média das Baixa-mares Inferiores (MLLW) :		9 cm acima do NR.
CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS					
Componentes	Semi- amplitude (H) cm	Fase (g) - graus (°)	Componentes	Semi- amplitude (H) cm	Fase (g) - graus (°)
Sa	-	-	MU ₂	-	-
Ssa	-	-	N ₂	4,6	149
Mm	-	-	NU ₂	0,9	140
Mf	-	-	M ₂	35,3	081
MTM	-	-	L ₂	-	-
Msf	-	-	T ₂	1,3	076
Q ₁	3,2	033	S ₂	22,9	075
O ₁	9,6	084	K ₂	6,2	075
M ₁	-	-	MO ₃	-	-
P ₁	2,2	104	M ₃	4,5	198
K ₁	6,7	106	MK ₃	3,1	080
J ₁	-	-	MN ₄	-	-
OO ₁	-	-	M ₄	1,7	351
MNS ₂	-	-	SN ₄	-	-
2N ₂	0,6	217	MS ₄	1,6	105
Referências de Nível: RN instalada numa pedra junto à rampa de acesso ao Clube.					

Fonte: Femar (2000).



Nome da Estação :	BARNABÉ – SP				
Localização :	No terminal da CODESP na Ilha de Barnabé				
Organ. Responsável :	DHN / CODESP				
Latitude :	23° 55,7' S		Longitude :	46° 20,2' W	
Período Analisado :	04/09/95 a 04/10/95		Nº de Componentes :	22	
Análise Harmônica :	Método Almirante Santos Franco				
Classificação :	Maré de Desigualdades Diurnas				
Estabelecimento do Porto: (HWF&C)	III H 00 min		Nível Médio (Zo):	87 cm acima do NR.	
Média das Preamares Superiores (MHHW) :	155 cm acima do NR.		Média das Preamares Inferiores (MLHLW) :	141 cm acima do NR	
Média das Baixa-mares Superiores (MHLW) :	40 cm acima do NR.		Média das Baixa-mares Inferiores (MLLW) :	12 cm acima do NR.	
CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS					
Componentes	Semi- amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)	Componentes	Semi- amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)
Sa	-	-	MU ₂	-	-
Ssa	-	-	N ₂	3,7	134
Mm	-	-	NU ₂	0,7	128
Mf	-	-	M ₂	35,8	085
MTM	-	-	L ₂	-	-
Msf	-	-	T ₂	1,5	090
Q ₁	-	-	S ₂	24,9	091
O ₁	9,5	074	K ₂	6,8	091
M ₁	-	-	MO ₃	4,8	016
P ₁	4,2	142	M ₃	6,9	224
K ₁	12,6	147	MK ₃	7,1	237
J ₁	5,7	345	MN ₄	-	-
OO ₁	-	-	M ₄	3,5	357
MNS ₂	-	-	SN ₄	2,9	125
2N ₂	0,5	084	MS ₄	-	-
Referências de Nível:	RN 1 e 2 instaladas no capeamento da cais de atracação do terminal				

Fonte: Femar (2000).

No Quadro 5.1.6.1-2 são fornecidos parâmetros estatísticos do nível do mar, das marés e do nível médio do mar, para os registros de Santos e Cananéia analisados, onde se nota a similaridade entre estas estações, com amplitudes do nível do mar em torno de 2,5 m e desvio padrão de 0,4 m. A maré é a componente mais importante e a variação do nível médio do mar, que é devido principalmente a efeitos meteorológicos, tem contribuição menor no nível do mar.

Quadro 5.1.6.1-2 Estatística básica do nível do mar, maré e nível médio do mar dos registros analisados de Santos e Cananéia, com informações sobre a amplitude (Ampl, considerada como a diferença entre os valores máximo e mínimo) e o desvio padrão (DP).

Registro	Nível do mar		Maré		Nível médio	
	Ampl (m)	DP(m)	Ampl (m)	DP(m)	Ampl (m)	DP(m)
Santos 2006	2.650	0.394	2.436	0.342	1.103	0.180
Cananéia 2007	2.461	0.401	2.026	0.351	1.050	0.175
Cananéia 2008	2.350	0.395	1.900	0.349	0.959	0.169
Cananéia 2009	2.440	0.391	1.814	0.347	0.849	0.159

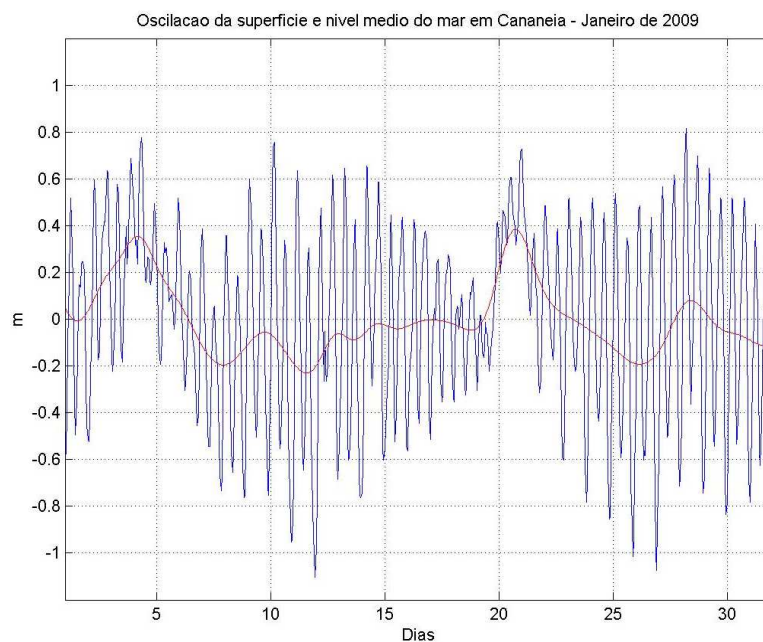
Fonte: CODESP e IOUSP

a) NÍVEL MÉDIO DO MAR EM CANANÉIA, VERÃO E INVERNO DE 2009

Nos processamentos do modelo numérico hidrodinâmico da plataforma e do estuário de Santos, para janeiro e julho de 2009, foram utilizadas medições disponíveis de nível do mar na costa, referentes às estações maregráficas do Instituto Oceanográfico da USP, para a determinação das oscilações do nível médio do mar nos contornos abertos das grades.

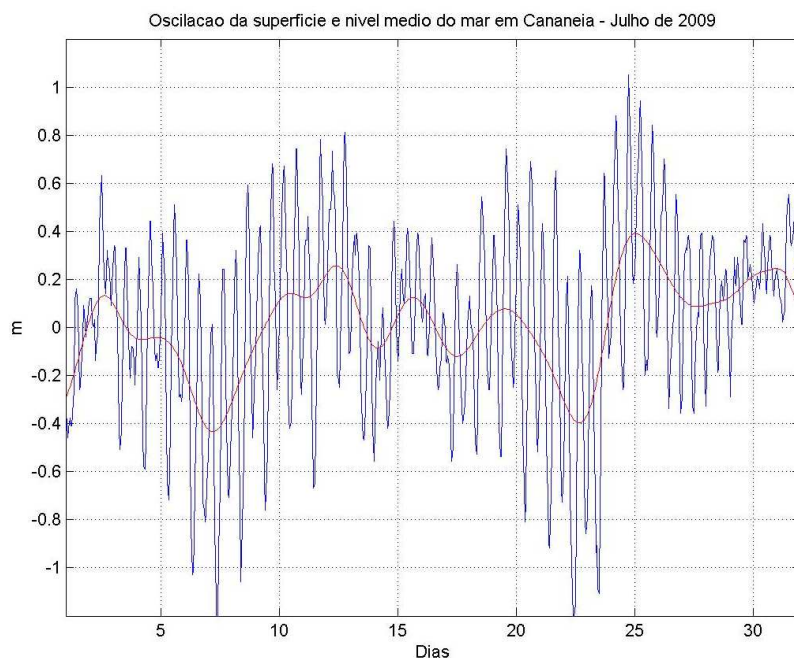
Medições do nível do mar em Cananéia nos meses de janeiro e julho de 2009 são apresentadas nas Figuras 5.1.6.1-2 e 5.1.6.1-3, juntamente com os valores do nível médio do mar, calculados através de filtragem de médias móveis das observações horárias.

Figura 5.1.6.1-2 Oscilações da superfície e do nível médio do mar observadas em Cananéia, em janeiro de 2009.



Fonte: IOUSP

Figura 5.1.6.1-3 Oscilações da superfície e do nível médio do mar observadas em Cananéia, em julho de 2009.



Fonte: IOUSP.

Em janeiro de 2009, o nível do mar em Cananéia variou entre -1,10 m e +0,82 m, com desvio padrão de 0,39 m, enquanto que o nível médio do mar variou entre -0,23 m e +0,38 m, com desvio padrão de 0,15 m. Nesse mês, condições típicas de verão prevalecem e apenas duas frentes frias foram responsáveis por elevações significativas do nível médio do mar em Cananéia, atingindo +0,35 m no início do dia 04 e +0,38 m ao final do dia 20 do mês; foram registrados três períodos de rebaixamento do nível médio do mar, até cerca de -0,20 m, nos dias 07-08, 11 e 25-26 (Figura 5.1.6.1-2).

No mês de julho de 2009, o nível do mar em Cananéia variou entre -1,34 m e +1,05 m, com desvio padrão de 0,40 m, enquanto que o nível médio do mar variou entre -0,43 m e +0,39 m, com desvio padrão de 0,19 m.

Em função dos seis períodos com ventos do quadrante Sul na Baixada Santista, foram observados seis períodos com elevações do nível médio do mar (Figura 5.1.6.1-3): nos dias 01 e 02 (associado ao sistema frontal 0, com o máximo de 0,13 m); nos dias 11 a 13 (devido aos sistemas 2-3, com elevação de +0,26 m); no dia 15 (devido ao sistema 4, com +0,12 m); no dia 19 (por influência do sistema 5, com pequena elevação de +0,08 m); do dia 24 ao 26 (associado ao sistema 7, que provocou a máxima elevação do nível médio do mar, com +0,39 m); e nos dias 29-31 (por influência do sistema 9, que elevou o nível médio a +0,24 m).

É importante notar que os dois períodos com tempo bom em julho de 2009 na região da Baixada Santista (e Estado de São Paulo), com ventos do quadrante Leste, tiveram como consequência uma significativa redução do nível médio do mar em Cananéia, com mínimos de -0,43 m (no dia 7) e -0,40 m (no dia 22). Concluindo a análise das variações do nível do mar em Cananéia, deve-se observar que os extremos (negativo e positivo) do nível médio do mar em julho de 2009 ocorreram em períodos de maré de sizígia, gerando o mínimo e o máximo anual do nível da superfície. Ademais, o máximo do nível médio do dia 25 foi antecedido do mínimo do dia 22, com uma variação de +0,80 m, o que provocou grande transporte de volume em direção à costa neste período.



5.1.6.2 Condições Hidrodinâmicas na Plataforma e no Estuário

A dinâmica do oceano na região da plataforma ao largo de Santos é dominada pelas forçantes de maré e vento, com forte influência batimétrica; as correntes de maré são fracas e rotativas no tempo (no sentido anti-horário), com eixo maior orientado aproximadamente na direção Noroeste – Sudeste (contra a costa), enquanto que as correntes geradas pelos ventos predominantes são persistentes e um pouco mais fortes, para Oeste – Sudoeste (paralelas à costa), tornando-se para Leste – Nordeste (e em geral mais intensas) sob influência de sistemas e ondas frontais (Figuras 5.1.6.2-1 a 5.1.6.2-5). Por outro lado, as marés são as principais responsáveis pelas variações do nível da superfície do mar e, nesse aspecto, a influência dos ventos é menor.

Na região do Estuário, a dinâmica é dominada pela forçante de maré, de modo que o vento possui influência menor; conseqüentemente, tanto as variações de nível do mar como as correntes devidas às marés são mais significativas que as variações do nível do mar e as correntes geradas pelo vento; grande parte das variações de nível da superfície geradas pelo vento são associadas à ação de ventos remotos e, quanto às correntes, são bem menores que as de maré.

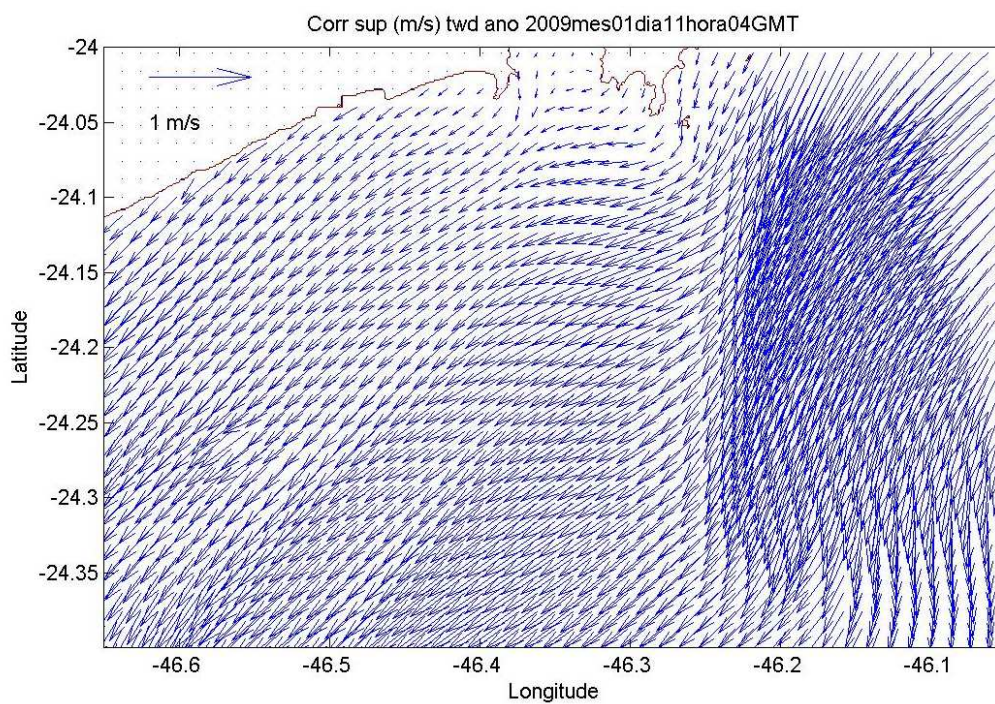
Por outro lado, correntes de densidade não afetam muito o nível da superfície do mar e as correntes associadas têm importância menor que as de maré, embora possam vir a ser muito amplificadas em períodos de grande pluviosidade e significativa vazão fluvial, principalmente em áreas próximas à desembocadura de rios. Evidentemente, a orientação dos canais no estuário, especialmente o Canal do Porto e Canal de São Vicente, é muito importante no alinhamento das correntes (ver Figura 5.1.6.2-2 a 4 e 5.1.6.2-6 a 8).

a) CONDIÇÕES DE VERÃO (JANEIRO DE 2009)

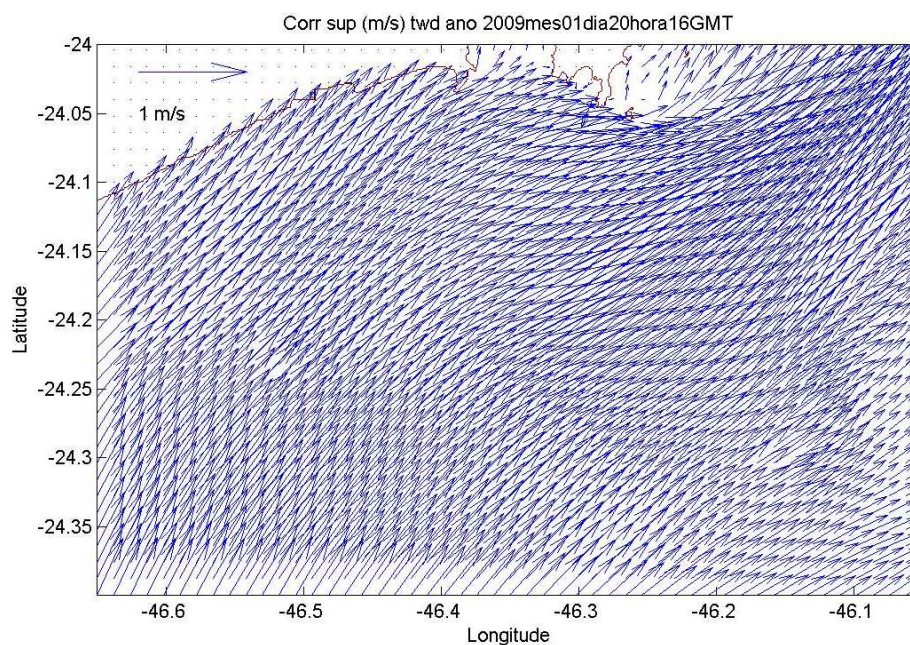
Em janeiro de 2009, o padrão de verão prevalece e são observados na plataforma apenas dois períodos com correntes para Leste – Nordeste intensas, em toda a coluna d'água, nos dias 03-04 e 20-21, por serem os períodos associados às duas frentes frias mais significativas do mês. Por outro lado, neste mês, longos períodos com correntes para Sudoeste são observados na plataforma, em toda a coluna, como no período entre os dias 05 e 20.

A Figura 5.1.6.2-1 apresenta exemplos das correntes instantâneas na superfície na plataforma, nos dias 11 e 20, respectivamente: no dia 11 prevalece o tempo bom e as correntes são para Sudoeste, enquanto que no dia 20 se tem a influência do segundo sistema frontal do mês, gerando correntes para Nordeste (com valores acima de 0,6 m/s).

Figura 5.1.6.2-1 Correntes instantâneas na superfície (m/s) na plataforma de Santos, para 04:00 GMT do dia 11 e 16:00 GMT do dia 20 de janeiro de 2009.



Fonte: Modelo numérico hidrodinâmico de Harari et al (2006).



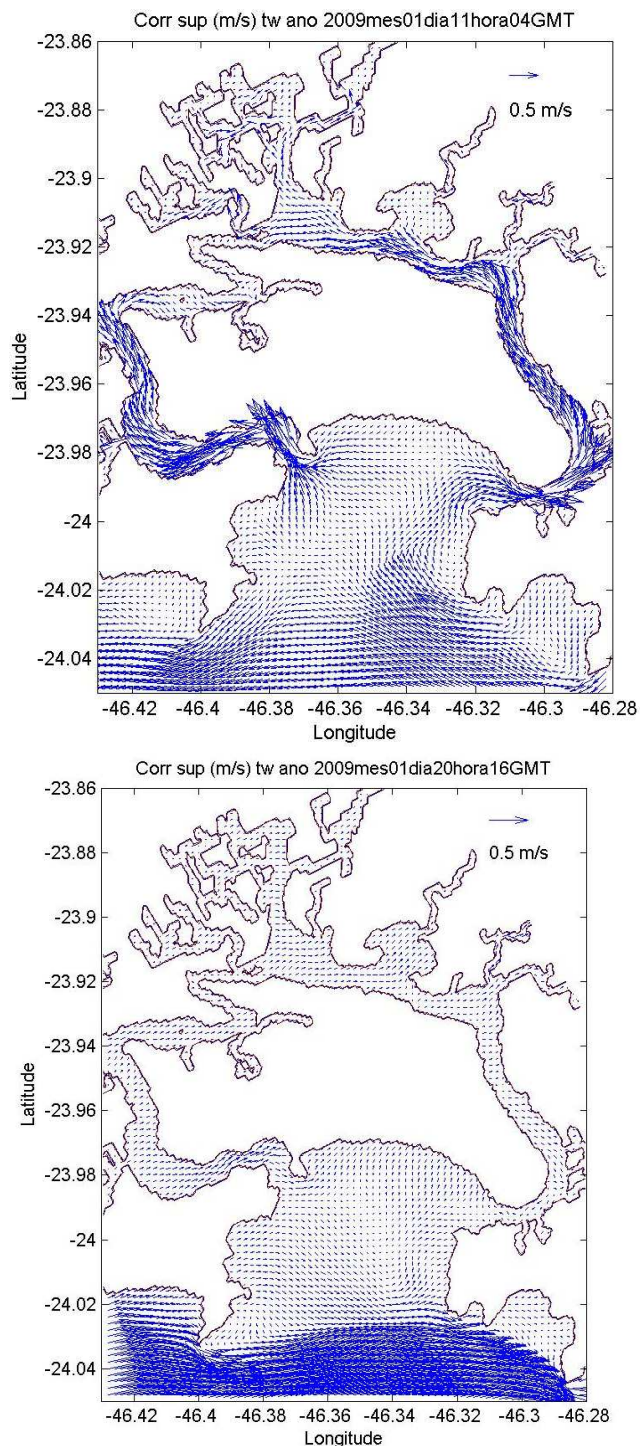
Fonte: Modelo numérico hidrodinâmico de Harari et al (2006).



Saindo da plataforma, serão a seguir apresentados resultados de modelagem hidrodinâmica para o estuário de Santos – São Vicente com as seguintes forçantes: maré e vento; maré, vento e variações de densidade; e, finalmente, maré, vento, variações de densidade e vazões fluviais médias.

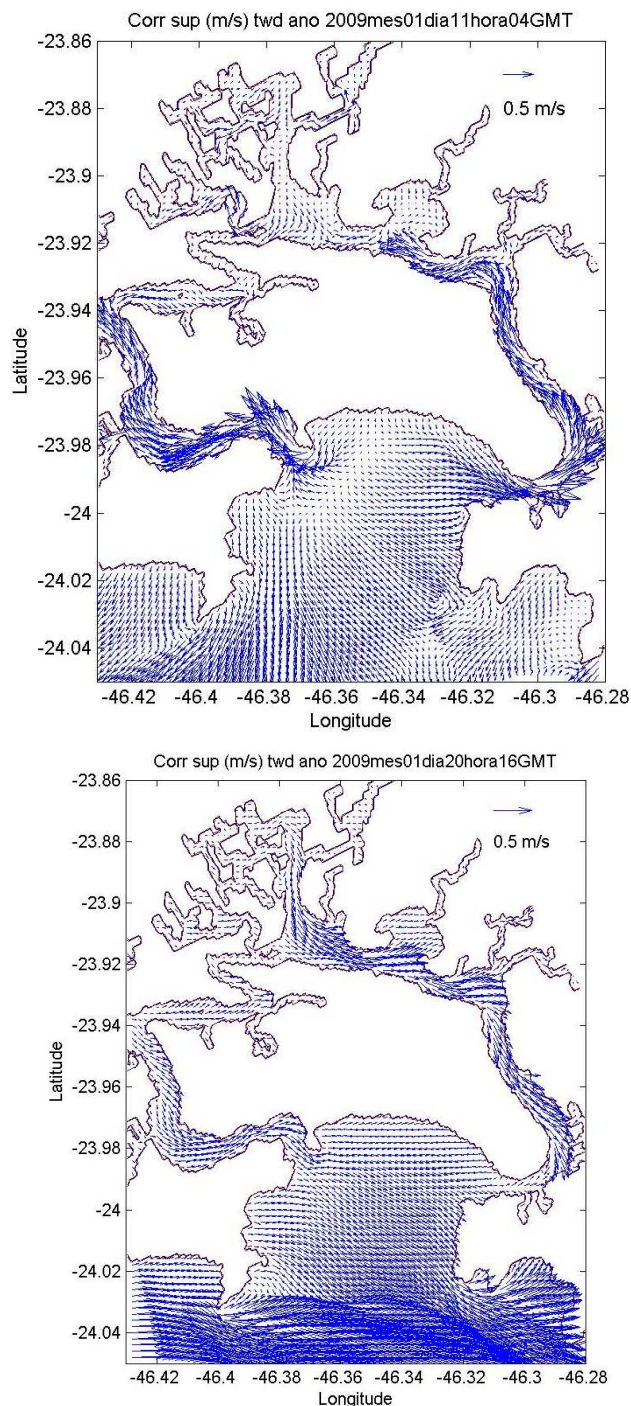
As correntes calculadas pelo modelo para a região estuarina, como as apresentadas nas Figuras 5.1.6.2-2 a 4, referentes aos dias 11 e 20 de janeiro de 2009, demonstram que os efeitos de ventos (e frentes frias) tem influência limitada na dinâmica da Baía de Santos e progressivamente menor para o interior do estuário, sendo que no dia 11 prevalece o tempo bom e no dia 20 se tem a influência do segundo sistema frontal do mês, gerando correntes para Nordeste na plataforma.

Figura 5.1.6.2-2 Correntes instantâneas na superfície (m/s) no estuário de Santos, para 04:00 GMT do dia 11 e 16:00 GMT do dia 20 de janeiro de 2009, forçando o modelo com marés e vento.



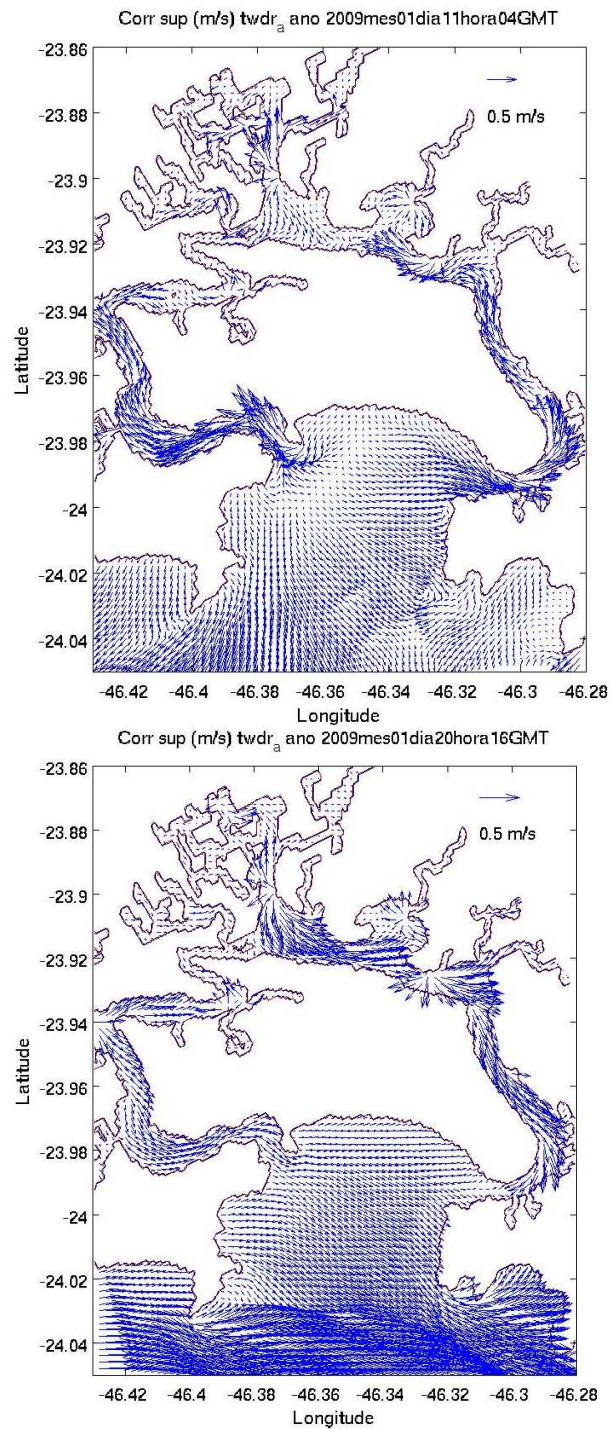
Fonte: Modelo numérico hidrodinâmico de Harari et al (2006).

Figura 5.1.6.2-3 Correntes instantâneas na superfície (m/s) no estuário de Santos, para 04:00 GMT do dia 11 e 16:00 GMT do dia 20 de janeiro de 2009, forçando o modelo com marés, vento e variações de densidade.



Fonte: Modelo numérico hidrodinâmico de Harari et al (2006).

Figura 5.1.6.2-4 Correntes instantâneas na superfície (m/s) no estuário de Santos, para 04:00 GMT do dia 11 e 16:00 GMT do dia 20 de janeiro de 2009, forçando o modelo com marés, vento, variações de densidade e vazões fluviais médias.



Fonte: Modelo numérico hidrodinâmico de Harari et al (2006).



b) CONDIÇÕES DE INVERNO (JULHO DE 2009)

No inverno, as frentes frias são em geral mais frequentes (e mais intensas), gerando na plataforma correntes para Nordeste com maior frequência. Isto pode ser observado no mês de julho de 2009, quando ocorreram seis períodos com sistemas frontais que influenciaram as circulações atmosféricas da Baixada Santista, e provocaram na plataforma correntes com fortes componentes para Norte - Nordeste, nos dias 04, 10-14, 19-20, 24-26 e 29-31. Por outro lado, correntes predominantemente para Sudoeste foram observadas nos dias 05-09 e 21-23 neste mês.

Como ilustração, a Figura 5.1.6.2-5 apresenta correntes instantâneas de superfície na plataforma, nos dias 07 e 24 do mês de julho: no dia 07 prevalece tempo bom e as correntes são para Sudoeste, enquanto que no dia 24 se tem a influência de um sistema frontal, gerando correntes para Nordeste.

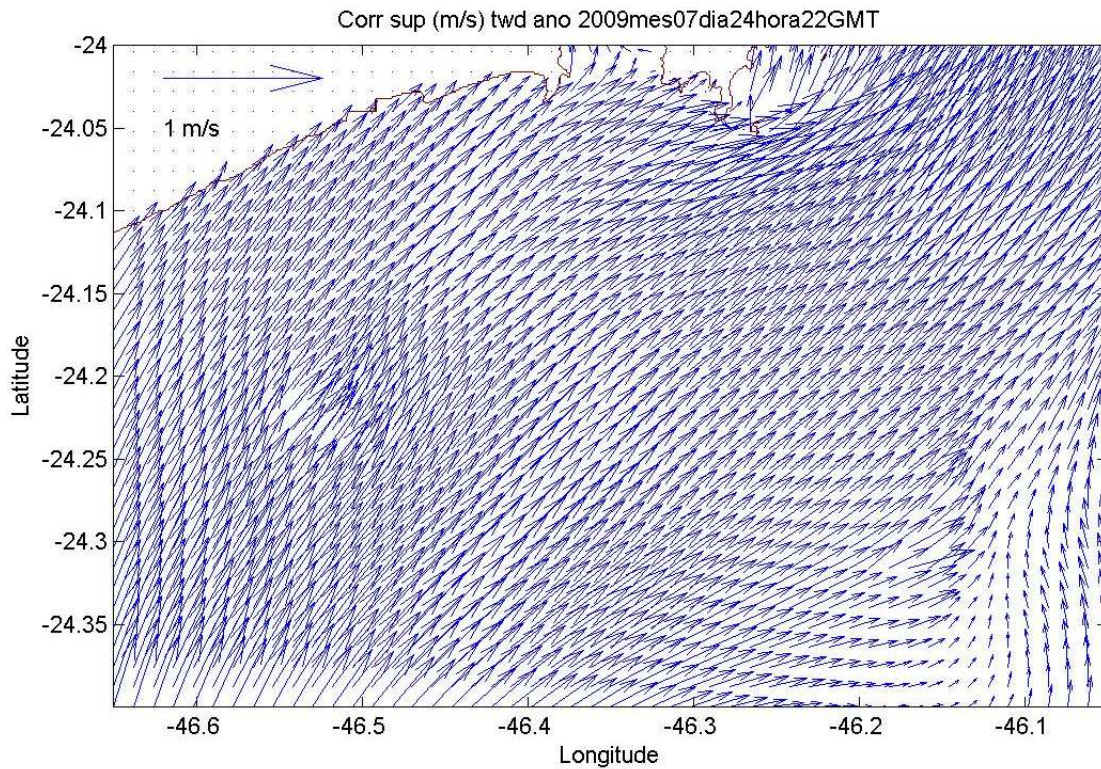
Um ponto importante a salientar é que a dinâmica da plataforma é em geral mais energética no inverno do que no verão, devido à maior frequência e intensidade dos sistemas frontais.

Entretanto, frentes frias também ocorrem no verão e, mesmo com pequena frequência, podem chegar a produzir ventos mais intensos que no inverno, como foi o caso aqui estudado, na comparação de janeiro e julho de 2009.

De forma similar ao verão, também no inverno a dinâmica do estuário de Santos - São Vicente passa a ser mais influenciada pela maré do que os ventos, especialmente adentrando os canais estuarinos interiores, Canal do Porto e Canal de São Vicente; ademais, influências fluviais podem ser significativas, sobretudo em períodos de precipitação elevada.

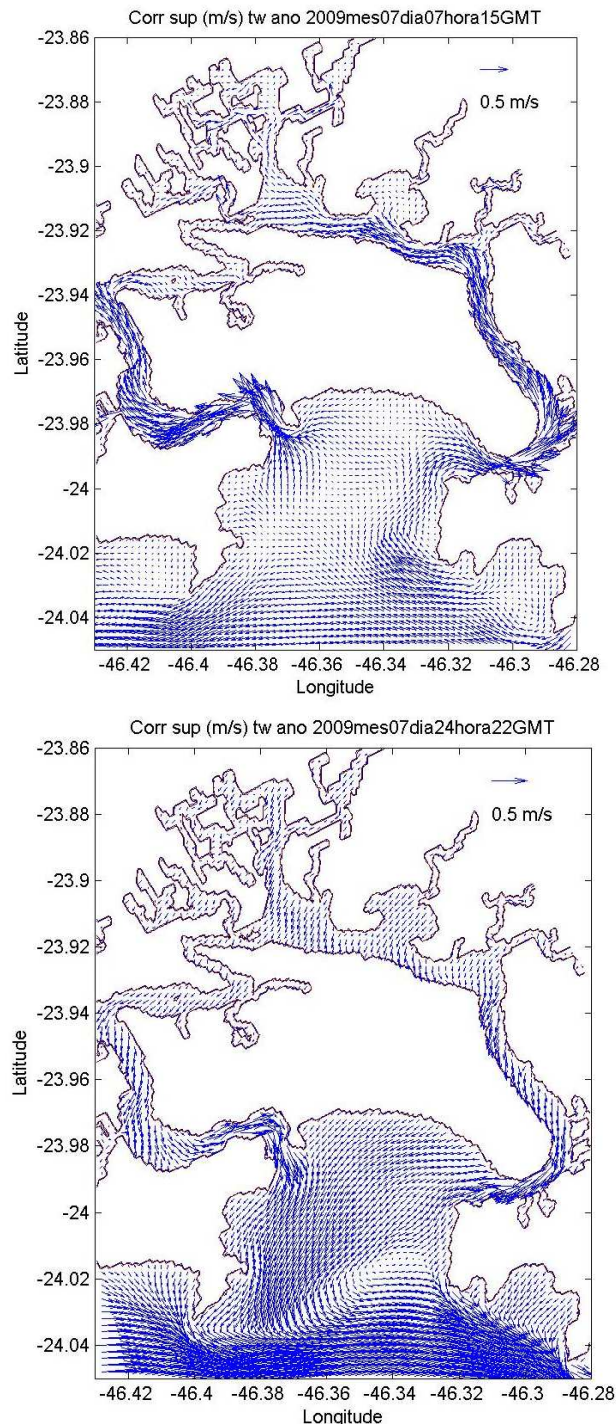
Estas feições são demonstradas nas Figuras 5.1.6.2-6 a 8, com correntes instantâneas no estuário nos dias 07 e 24 de julho de 2009, em períodos de tempo bom e de influência frontal, respectivamente; nessas figuras, de maneira similar à do verão, a modelagem hidrodinâmica para o estuário de Santos - São Vicente foi realizada com as forçantes de maré e vento; maré, vento e variações de densidade; e, finalmente, maré, vento, variações de densidade e vazões fluviais médias.

Figura 5.1.6.2-5 Correntes instantâneas na superfície (m/s) na plataforma de Santos, para 15:00 GMT do dia 07 e 22:00 GMT do dia 24 de julho de 2009.



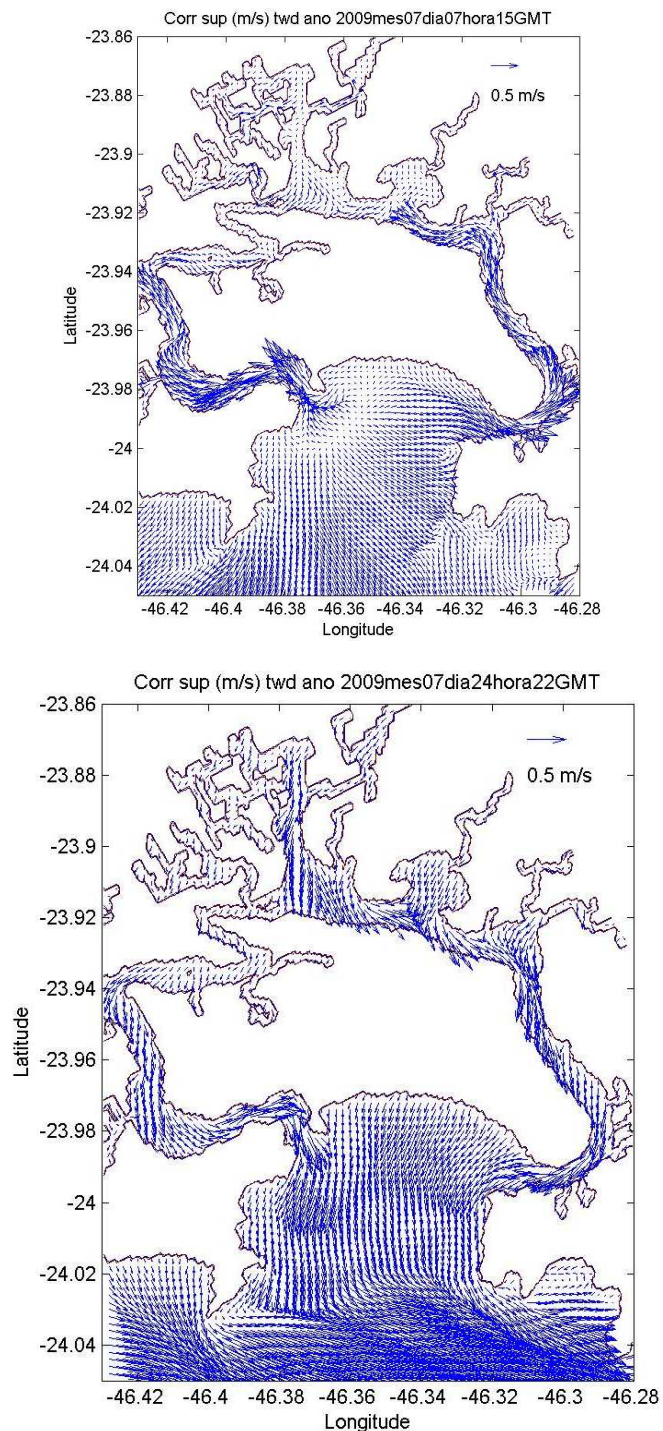
Fonte: Modelo numérico hidrodinâmico de Harari et al (2006).

Figura 5.1.6.2-6 Correntes instantâneas na superfície (m/s) no estuário de Santos, para 15:00 GMT do dia 07 e 22:00 GMT do dia 24 de julho de 2009, forçando o modelo com marés e vento.



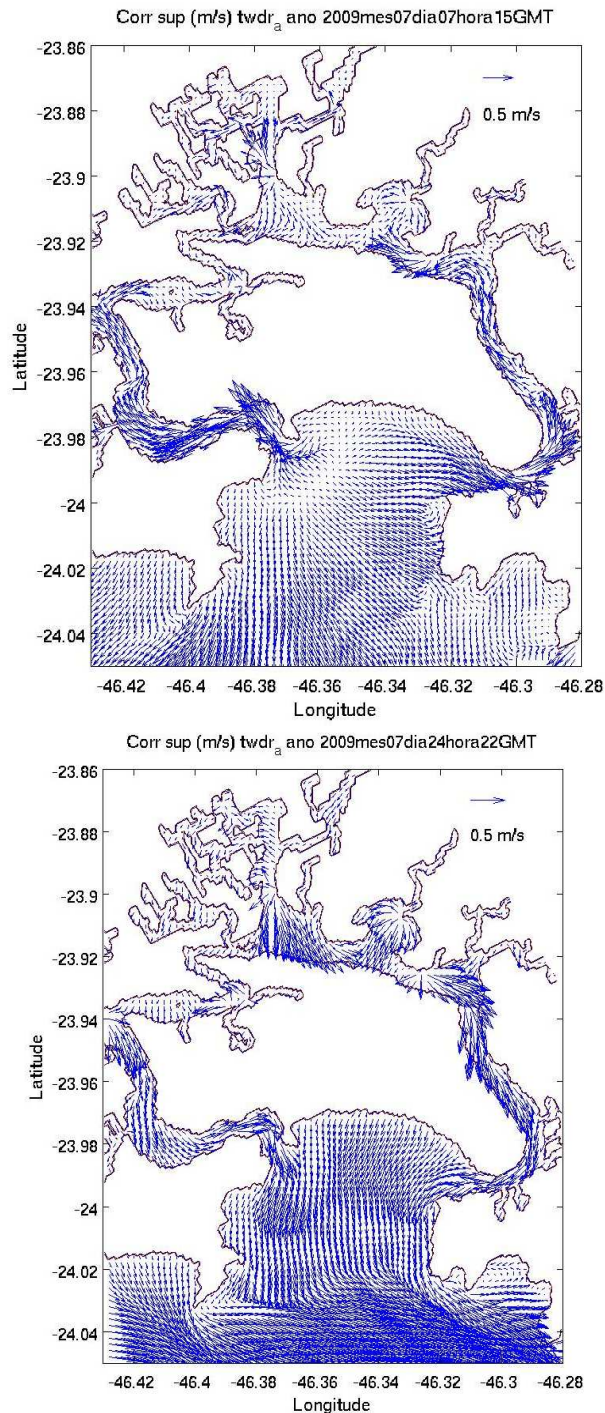
Fonte: Modelo numérico hidrodinâmico de Harari et al (2006).

Figura 5.1.6.2-7 Correntes instantâneas na superfície (m/s) no estuário de Santos, para 15:00 GMT do dia 07 e 22:00 GMT do dia 24 de julho de 2009, forçando o modelo com marés, vento e variações de densidade.



Fonte: Modelo numérico hidrodinâmico de Harari et al (2006).

Figura 5.1.6.2-8 Correntes instantâneas na superfície (m/s) no estuário de Santos, para 15:00 GMT do dia 07 e 22:00 GMT do dia 24 de julho de 2009, forçando o modelo com marés, vento, variações de densidade e vazões fluviais médias.



Fonte: Modelo numérico hidrodinâmico de Harari et al (2006).



5.1.6.3 Análise da Hidrodinâmica na ADA

Séries temporais de resultados do modelo, na ADA projetada, nos 09 pontos de controle, são apresentadas no anexo XI – subitem B, referentes aos meses de janeiro e julho de 2009, nos arquivos stAAAAMMCCCC_PPPP.jpg, onde AAAA é o ano (2009), MM é o mês (01 ou 07, para janeiro ou julho), CCCC é o código do processamento do modelo e PPPP é o ponto selecionado (pz01 a pz09) – ver Quadro 5.1.6-1; o código de processamento do modelo pode ser tw (para processamento com forçantes de maré e vento), twd (forçantes de maré, vento e variações de densidade) e twdr_a (forçantes de maré, vento, variações de densidade e vazões fluviais médias).

As séries temporais são de nível do mar e correntes a 00, 05 e 10 m de profundidade. As intensidades das correntes na superfície, nesses pontos, se encontram nos arquivos do anexo XI – subitem C.

No anexo XI – subitem D são fornecidos os resultados das análises de maré e de correntes de maré na superfície, nos arquivos anamar_nimAAAAMMCCCC_PPPP.dat (para o nível do mar) e anamar_corAAAAMMCCCC_PPPP.dat (para as correntes de superfície).

a) CONDIÇÕES DE VERÃO (JANEIRO DE 2009)

A seguir, serão apresentados resultados de séries temporais de resultados do modelo, referentes ao ponto de controle pz05, no meio da radial em frente ao empreendimento, para janeiro de 2009 (Figuras 5.1.6.3-1 a 3).

Distribuições das correntes instantâneas na região do empreendimento, para dias e instantes de máximas correntes na plataforma e no estuário, são apresentados nas Figuras 5.1.6.3-4 a 6. Tanto as séries temporais como os mapas de distribuições de correntes são referentes a processamentos do modelo com as forçantes de: maré e vento; maré, vento e variações de densidade; e maré, vento, variações de densidade e vazões fluviais médias.

Figura 5.1.6.3-1 Nível do mar e correntes marinhas na superfície (0 m), 5 m e 10 m, calculadas pelo modelo hidrodinâmico forçado por marés e vento, para o mês de janeiro de 2009, no ponto selecionado pz05 (acima) e correspondentes intensidades das correntes na superfície (abaixo).

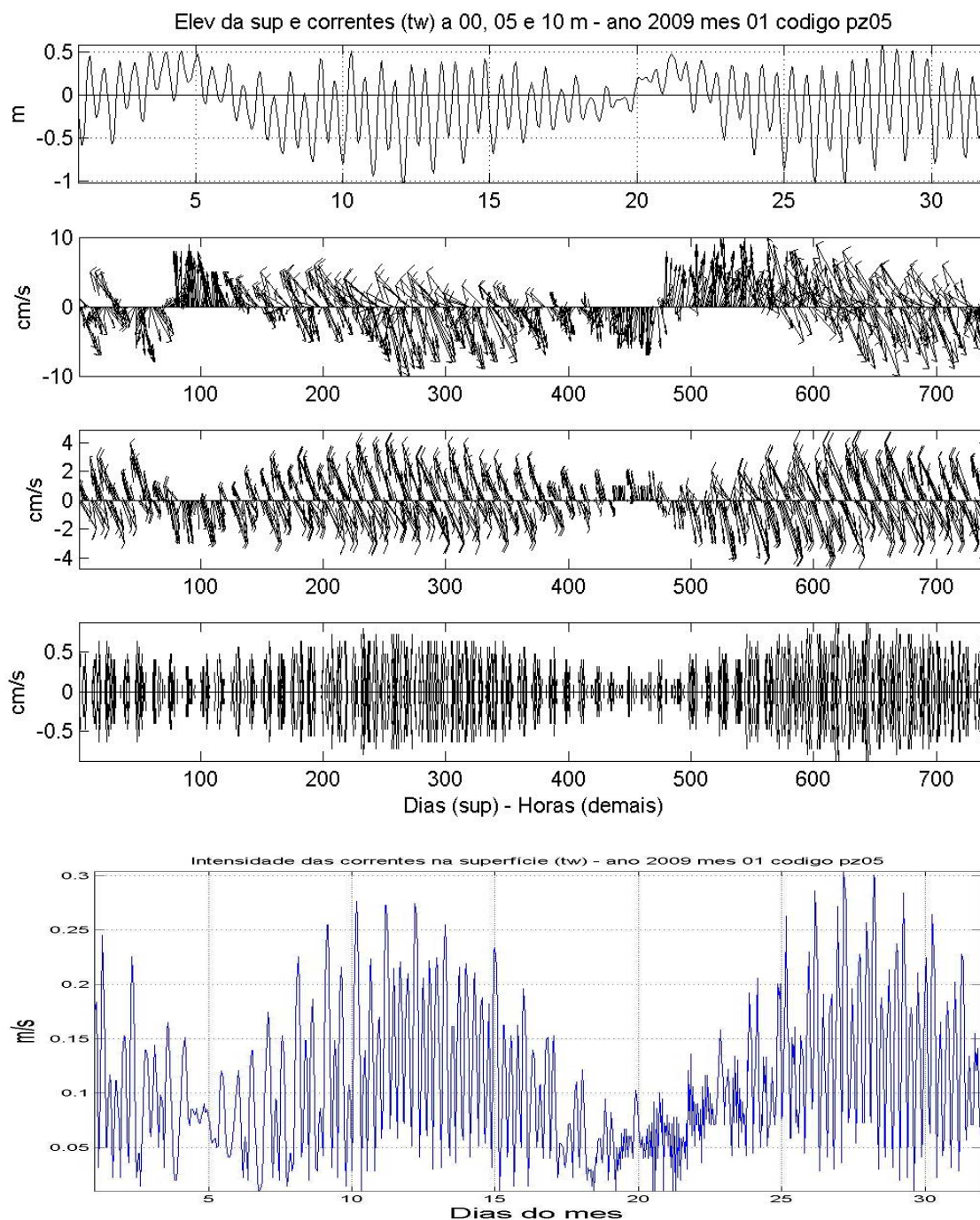


Figura 5.1.6.3-2 Nível do mar e correntes marinhas na superfície (0 m), 5 m e 10 m, calculadas pelo modelo hidrodinâmico forçado por marés, vento e variações de densidade, para o mês de janeiro de 2009, no ponto selecionado pz05 (acima) e correspondentes intensidades das correntes na superfície (abaixo).

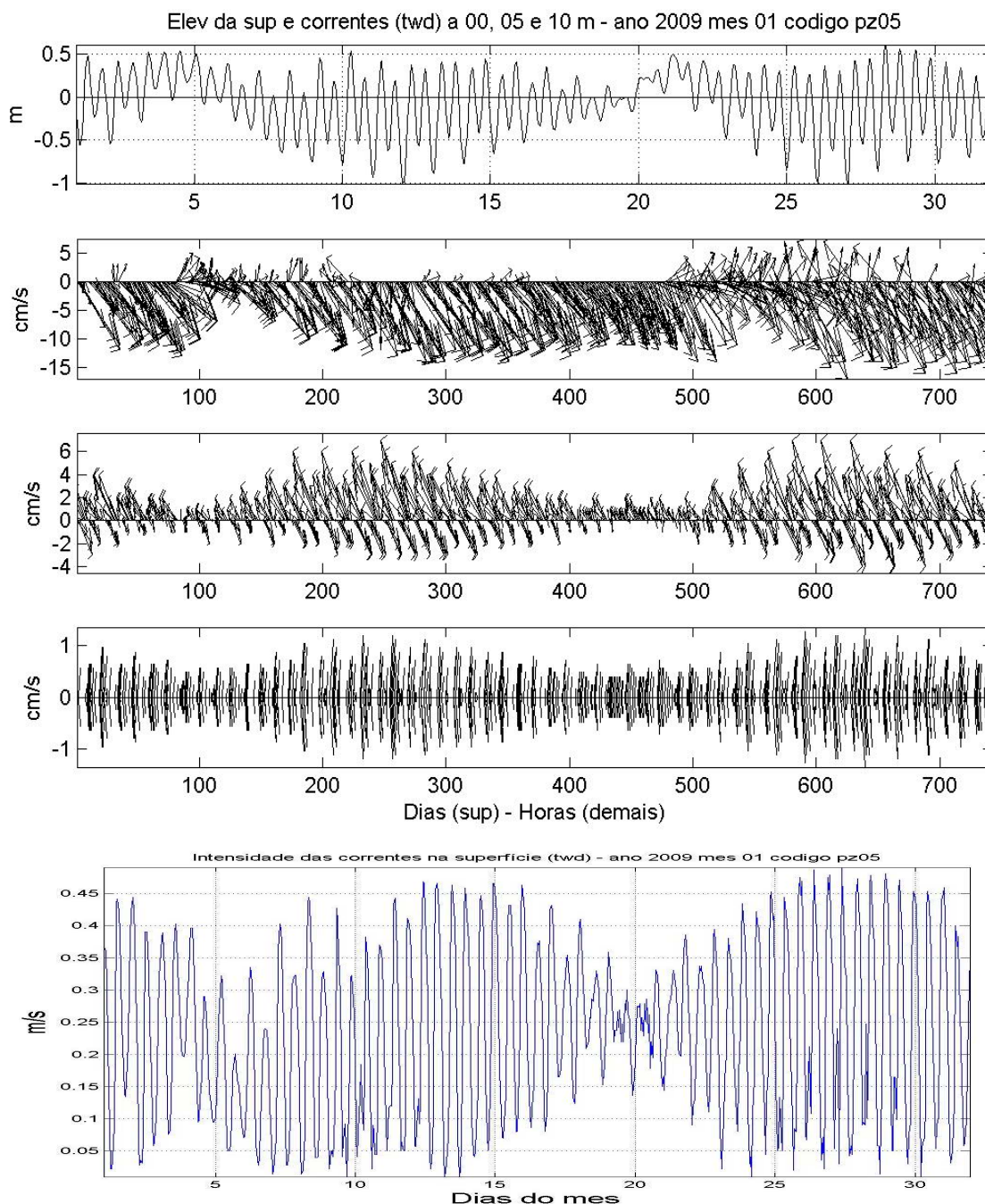


Figura 5.1.6.3-3 Nível do mar e correntes marinhas na superfície (0 m), 5 m e 10 m, calculadas pelo modelo hidrodinâmico forçado por marés, vento, variações de densidade e vazões fluviais médias, para o mês de janeiro de 2009, no ponto selecionado pz05 (acima) e correspondentes intensidades das correntes na superfície (abaixo).

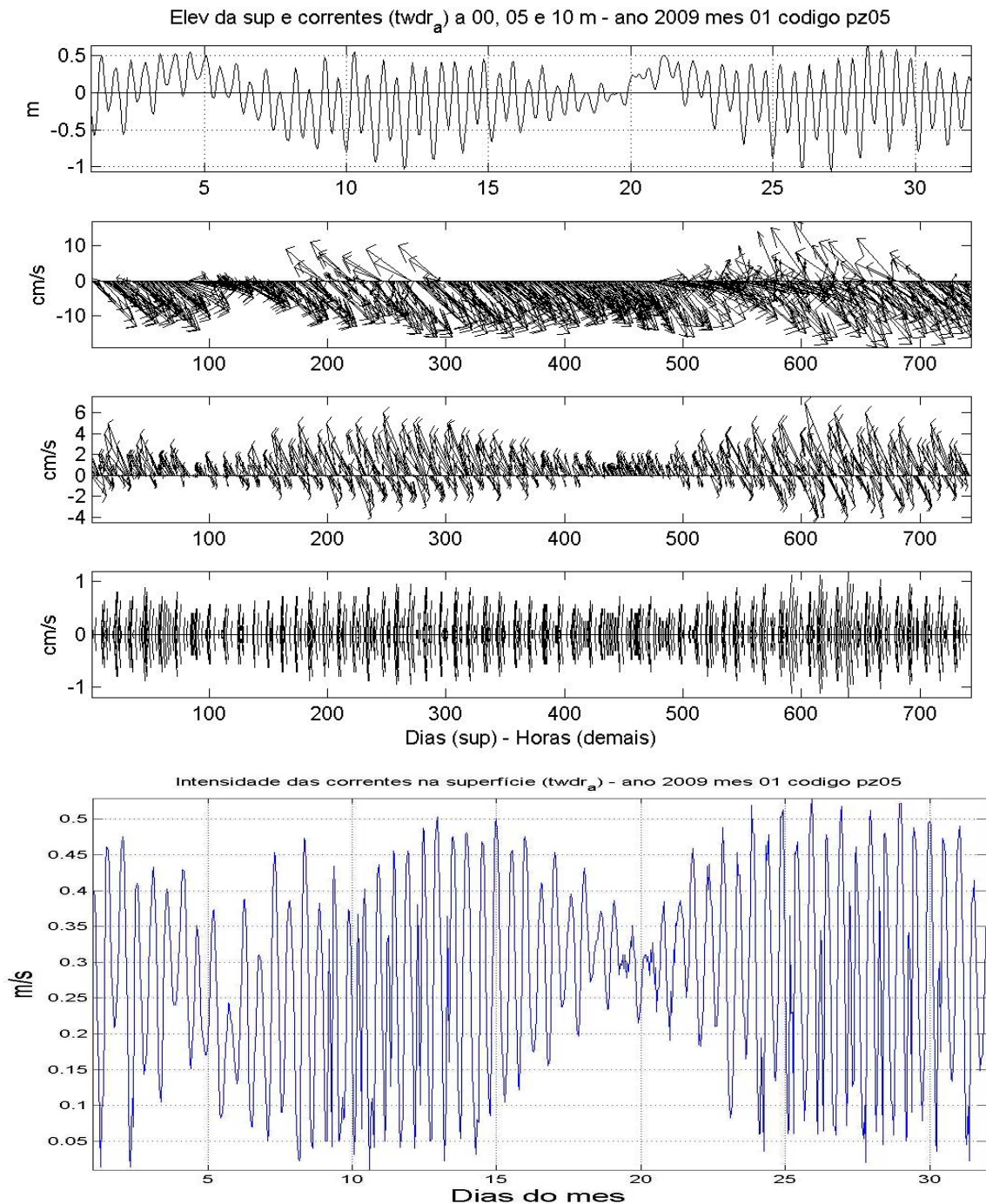


Figura 5.1.6.3-4 Correntes instantâneas na superfície (m/s) na área do terminal portuário projetado da DEICMAR, para 04:00 GMT do dia 11 e 16:00 GMT do dia 20 de janeiro de 2009, forçando o modelo com marés e vento.

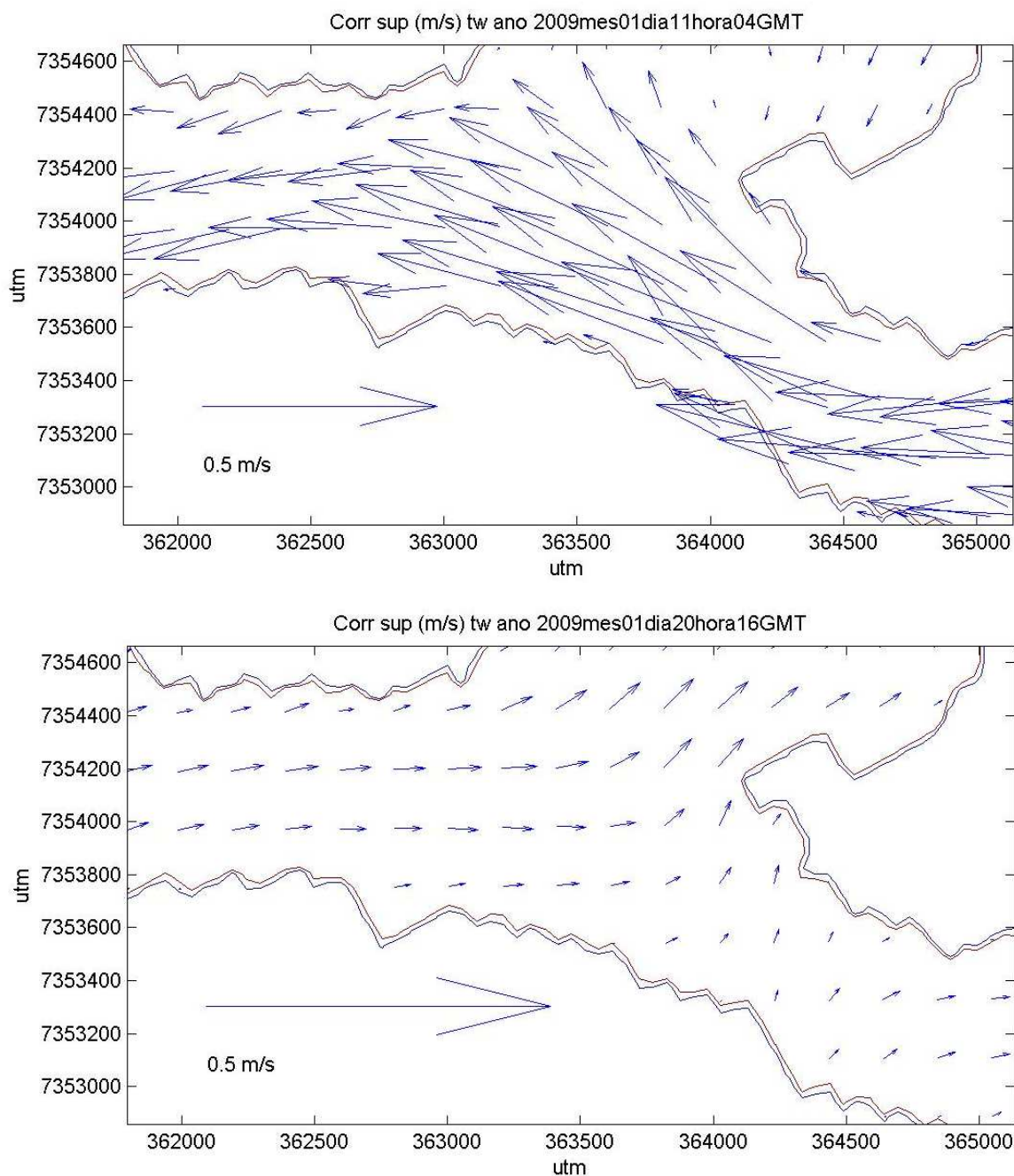


Figura 5.1.6.3-5 Correntes instantâneas na superfície (m/s) na área do terminal portuário projetado da DEICMAR, para 04:00 GMT do dia 11 e 16:00 GMT do dia 20 de janeiro de 2009, forçando o modelo com marés, vento e variações de densidade

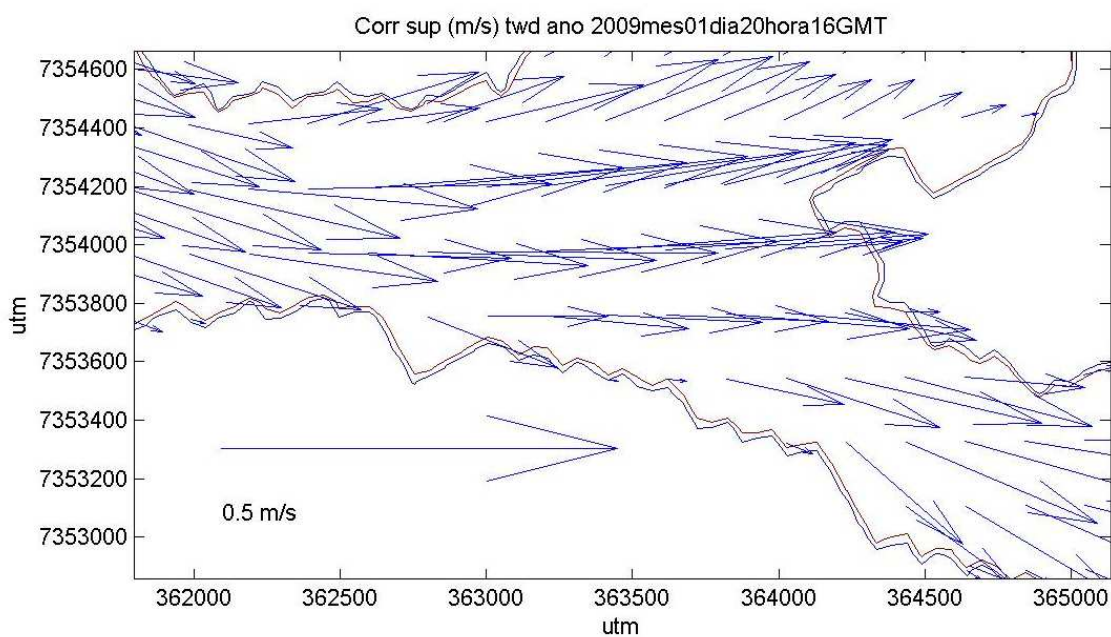
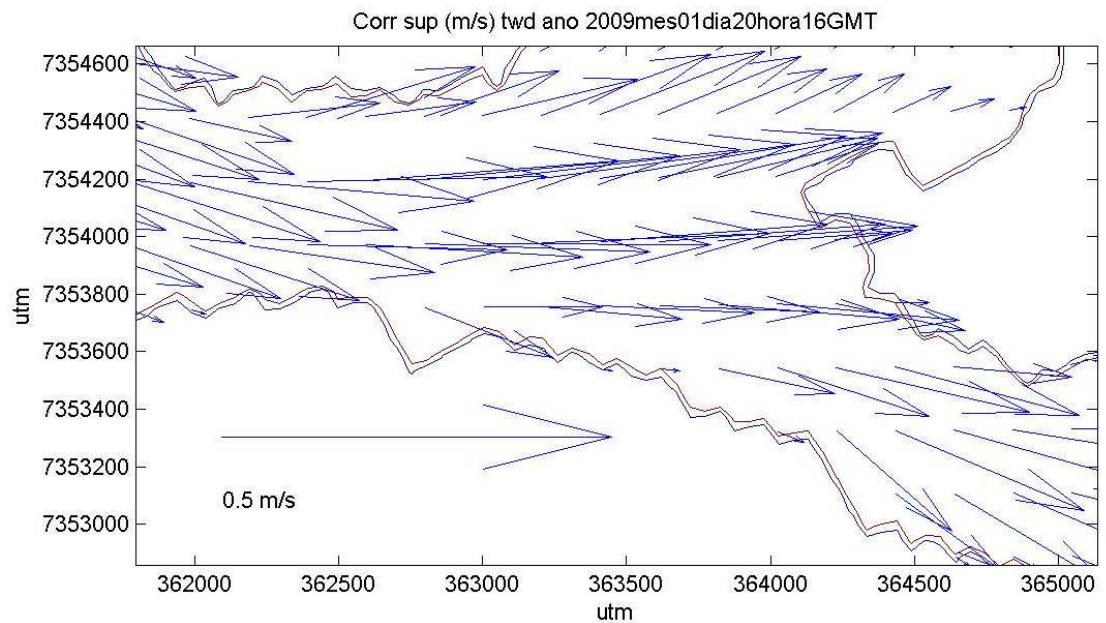
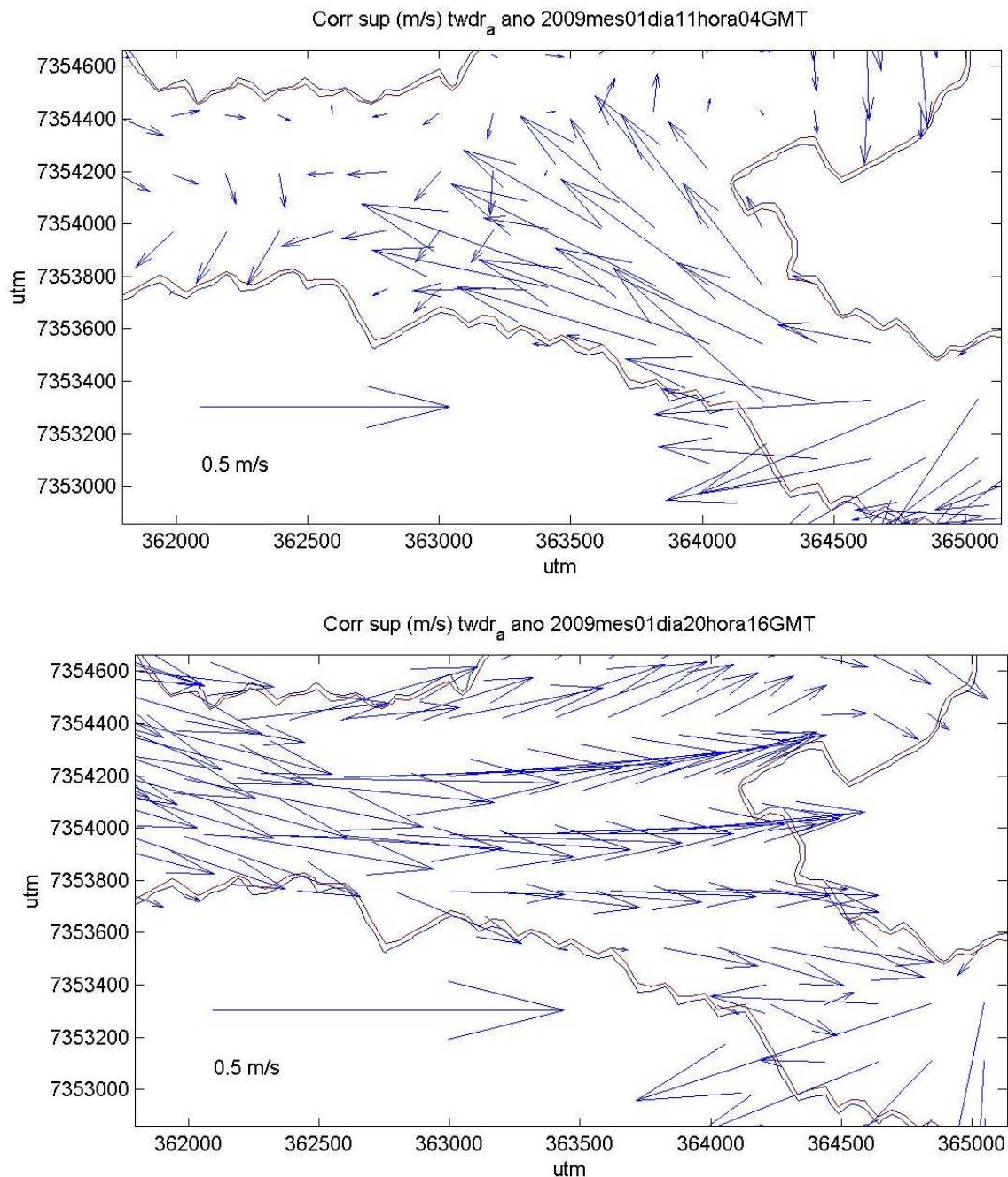


Figura 5.1.6.3-6 Correntes instantâneas na superfície (m/s) na área do terminal portuário projetado da DEICMAR, para 04:00 GMT do dia 11 e 16:00 GMT do dia 20 de janeiro de 2009, forçando o modelo com marés, vento, variações de densidade e vazões fluviais médias.



A comparação dos mapas de correntes na superfície com diferentes forçantes do modelo (Figuras 5.1.6.3-1 a 6) demonstra que as marés e os ventos tendem a produzir condições relativamente uniformes das correntes, segundo as direções de enchentes ou vazantes.

Por outro lado, efeitos de densidade tendem a reforçar as correntes de vazante na superfície e de enchente em profundidade, conforme o padrão típico de estuários.



Entretanto, o efeito que mais produz variações locais das correntes é a descarga fluvial, chegando a gerar divergências significativas dos campos de correntes na superfície (Figuras 5.1.6.3-1 a 6).

O Quadro 5.1.6.3-1 apresenta a estatística básica das séries temporais de elevação e correntes na superfície nos 09 pontos selecionados, para janeiro de 2009, considerando suas componentes de maré, vento, variações de densidade e vazões fluviais (bem como suas combinações).

Quadro 5.1.6.3-1 Estatística básica dos resultados do modelo nos 09 pontos selecionados, com amplitude do nível do mar (ampl. = valores máximos – valores mínimos), seu desvio padrão (DP), máximas correntes de superfície (Máx.) e seu desvio padrão (DP), para os resultados da simulação de janeiro de 2009 e suas componentes de maré, vento, maré+vento, vento+densidade, vento+densidade+rios e total (maré+vento+densidade+rios).

PT O	MARÉ				VENTO				MARÉ + VENTO			
	Ampl. (m)	DP (m)	Máx. (m/s)	DP (m/s)	Ampl. (m)	DP (m)	Máx. (m/s)	DP (m/s)	Ampl. (m)	DP (m)	Máx. (m/s)	DP (m/s)
1	1.48 1	0.30 9	0.21 9	0.05 0	0.54 0	0.14 9	0.03 6	0.00 7	1.60 0	0.34 6	0.23 8	0.05 0
2	1.48 1	0.31 0	0.45 1	0.10 0	0.54 0	0.14 9	0.07 5	0.01 4	1.61 0	0.34 7	0.49 7	0.10 0
3	1.48 1	0.31 0	0.42 5	0.08 9	0.53 9	0.14 9	0.08 6	0.01 7	1.61 0	0.34 7	0.47 5	0.09 0
4	1.50 1	0.31 1	0.19 3	0.04 4	0.53 8	0.14 8	0.05 7	0.01 2	1.61 0	0.34 8	0.20 0	0.04 3
5	1.50 1	0.31 1	0.29 0	0.06 6	0.53 8	0.14 8	0.07 1	0.01 6	1.61 0	0.34 8	0.30 4	0.06 3
6	1.50 0	0.31 1	0.31 7	0.06 6	0.53 8	0.14 8	0.09 2	0.02 0	1.61 0	0.34 8	0.34 2	0.06 7
7	1.50 0	0.31 2	0.15 8	0.03 7	0.53 8	0.14 8	0.02 8	0.00 6	1.61 0	0.34 9	0.16 0	0.03 6
8	1.50 0	0.31 2	0.32 6	0.07 4	0.53 9	0.14 8	0.06 7	0.01 3	1.61 0	0.34 8	0.33 1	0.07 1
9	1.49 9	0.31 2	0.33 2	0.06 6	0.53 9	0.14 8	0.09 3	0.01 9	1.61 0	0.34 8	0.36 2	0.06 7
PT O	VENTO+DENSIDADE				VENTO+DENSIDADE+RIO				MARÉ+VENTO+DENS+RI			
	Ampl. (m)	DP (m)	Máx. (m/s)	DP (m/s)	Ampl. (m)	DP (m)	Máx. (m/s)	DP (m/s)	Ampl. (m)	DP (m)	Máx. (m/s)	DP (m/s)
1	0.54 0	0.14 9	0.09 9	0.01 8	0.53 9	0.14 9	0.09 2	0.02 3	1.66 0	0.35 5	0.29 6	0.06 1
2	0.53 9	0.14 9	0.22 5	0.04 1	0.54 0	0.14 9	0.22 1	0.05 5	1.66 0	0.35 5	0.58 5	0.12 8
3	0.53 9	0.14 9	0.28 4	0.05 0	0.54 0	0.14 9	0.30 5	0.07 1	1.66 0	0.35 5	0.61 6	0.13 6
4	0.53 7	0.14 8	0.21 6	0.02 7	0.53 8	0.14 9	0.24 3	0.03 8	1.68 0	0.35 6	0.40 8	0.09 6
5	0.53 8	0.14 8	0.27 0	0.03 6	0.53 8	0.14 9	0.32 1	0.05 7	1.68 0	0.35 6	0.52 9	0.13 1



6	0.53 7	0.14 8	0.29 5	0.04 3	0.53 9	0.14 9	0.38 4	0.07 2	1.68 0	0.35 6	0.59 1	0.12 9
7	0.53 7	0.14 8	0.12 8	0.01 8	0.53 7	0.14 8	0.15 7	0.01 9	1.68 0	0.35 7	0.25 1	0.05 7
8	0.53 6	0.14 8	0.26 6	0.03 9	0.53 9	0.14 9	0.33 2	0.04 6	1.68 0	0.35 7	0.51 9	0.11 6
9	0.53 6	0.14 8	0.27 4	0.04 6	0.53 9	0.14 9	0.37 5	0.06 0	1.68 0	0.35 7	0.54 2	0.10 8

A tabela da estatística de janeiro de 2009 demonstra que a maré é o fator predominante no nível do mar e nas correntes, com amplitude de maré em torno de 1,5 m e máximas correntes por volta de 0,4 m/s no meio do canal e 0,2 m/s próximo às margens; o vento tem importância menor no nível do mar, com amplitude ao redor de 0,5 m (sendo devido, sobretudo a efeitos remotos do vento) e tem importância também menor nas correntes, não chegando a atingir 0,1 m/s.

Variações de densidade e vazões fluviais tem efeito mínimo no nível do mar, mas podem vir a ser importantes nas correntes, especialmente em períodos de grande pluviosidade e vazão fluvial, principalmente próximo à desembocadura de rios, que é o caso em questão no terminal Portuário Multiuso da DEICMAR; para esta região, foram calculadas correntes com intensidades acima de 0,6 m/s, ao considerar o efeito combinado de marés, vento, variações de densidade e vazões fluviais.

b) CONDIÇÕES DE INVERNO (JULHO DE 2009)

A seguir, serão apresentados resultados de séries temporais de resultados do modelo, referentes ao ponto de controle pz05, no meio da radial em frente ao empreendimento, para julho de 2009 (Figuras 5.1.6.3-7 a 9).

Distribuições das correntes instantâneas na região do empreendimento, para dias e instantes de máximas correntes na plataforma e no estuário, são apresentados nas Figuras 5.1.6.3-10 a 12.

De forma similar ao estudo das condições de verão, também no caso da análise de inverno, tanto as séries temporais como os mapas de distribuições de correntes são referentes a processamentos do modelo com as forçantes de: maré e vento; maré, vento e variações de densidade; e maré, vento, variações de densidade e vazões fluviais médias.

Figura 5.1.6.3-7 Nível do mar e correntes marinhas na superfície (0 m), 5 m e 10 m, calculadas pelo modelo hidrodinâmico forçado por marés e vento, para o mês de julho de 2009, no ponto selecionado pz05 (acima) e correspondentes intensidades das correntes na superfície (abaixo).

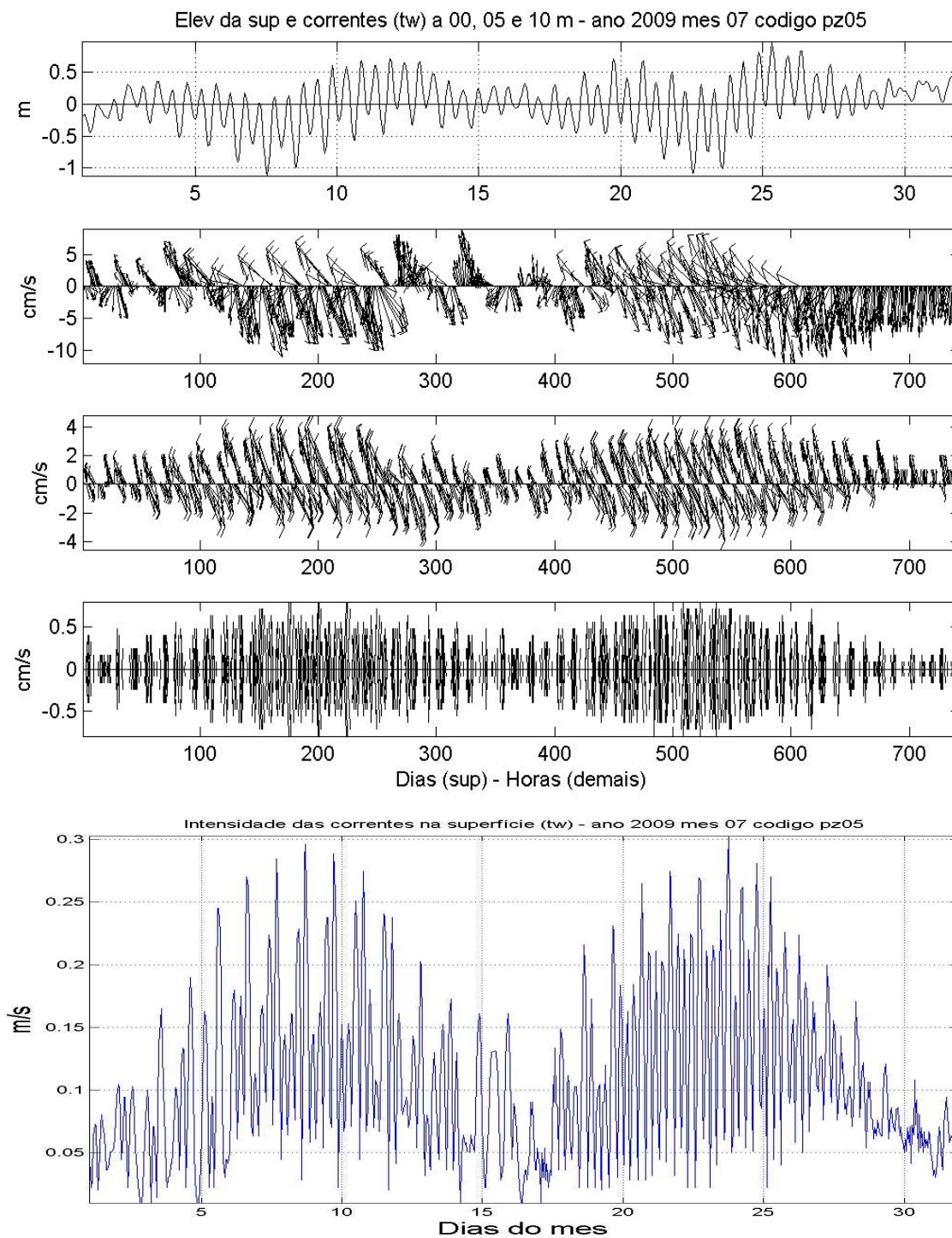


Figura 5.1.6.3-8 Nível do mar e correntes marinhas na superfície (0 m), 5 m e 10 m, calculadas pelo modelo hidrodinâmico forçado por marés, vento e variações de densidade, para o mês de julho de 2009, no ponto selecionado pz05 (acima) e correspondentes intensidades das correntes na superfície (abaixo)

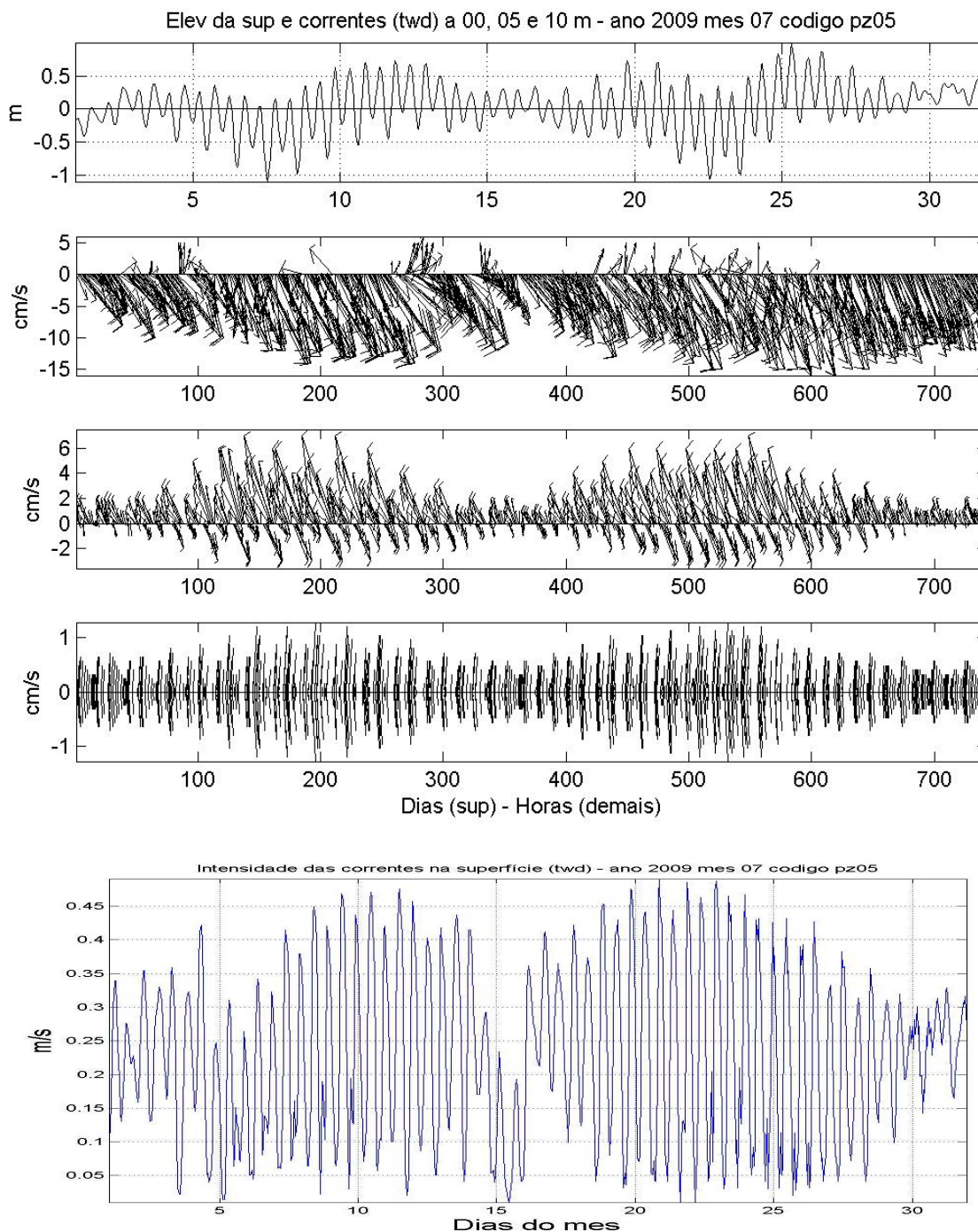


Figura 5.1.6.3-9 Nível do mar e correntes marinhas na superfície (0 m), 5 m e 10 m, calculadas pelo modelo hidrodinâmico forçado por marés, vento, variações de densidade e vazões fluviais médias, para o mês de julho de 2009, no ponto selecionado pz05 (acima) e correspondentes intensidades das correntes na superfície (abaixo).

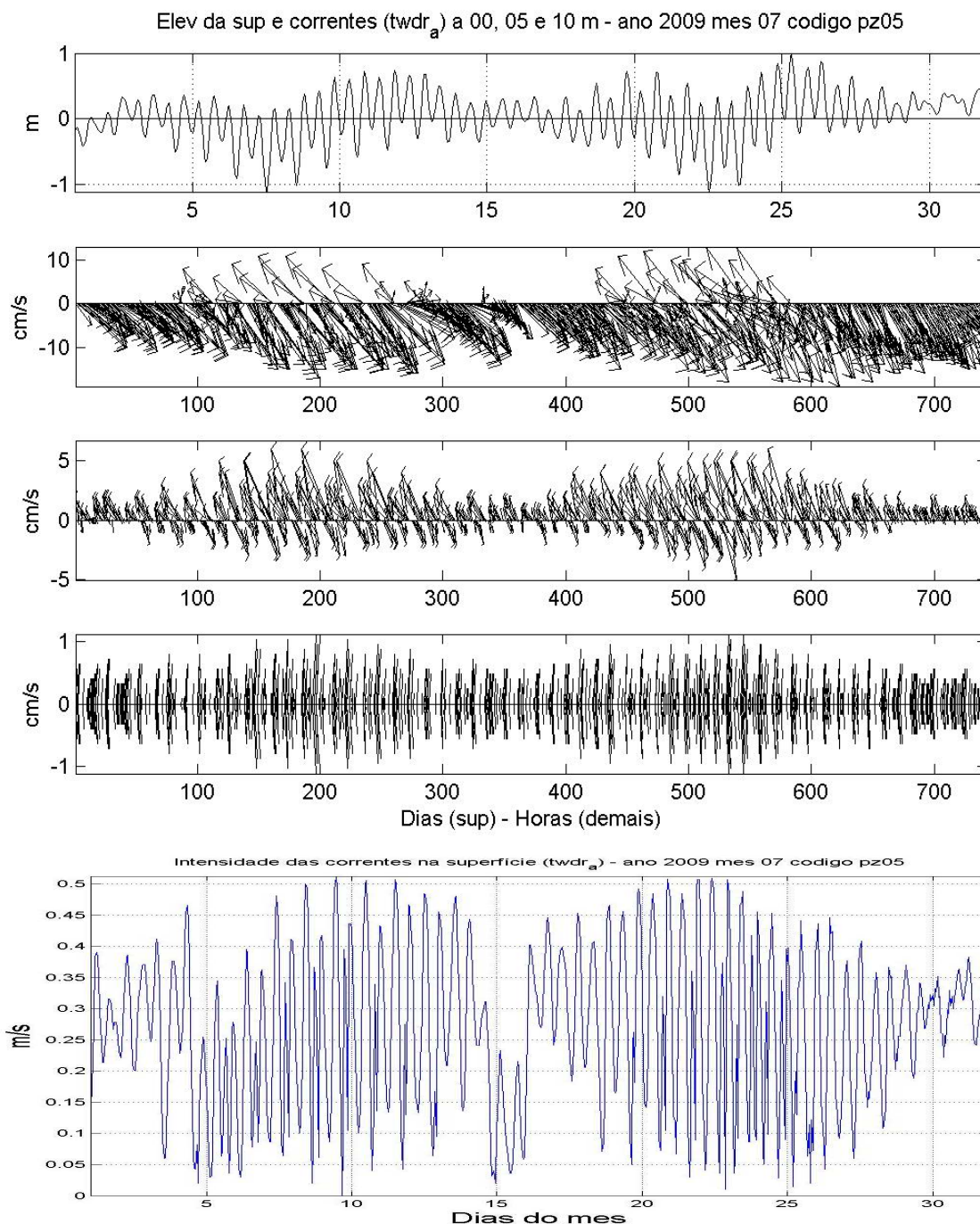


Figura 5.1.6.3-10 Correntes instantâneas na superfície (m/s) na área do terminal portuário projetado da DEICMAR, para 15:00 GMT do dia 07 e 22:00 GMT do dia 24 de julho de 2009, forçando o modelo com marés e vento.

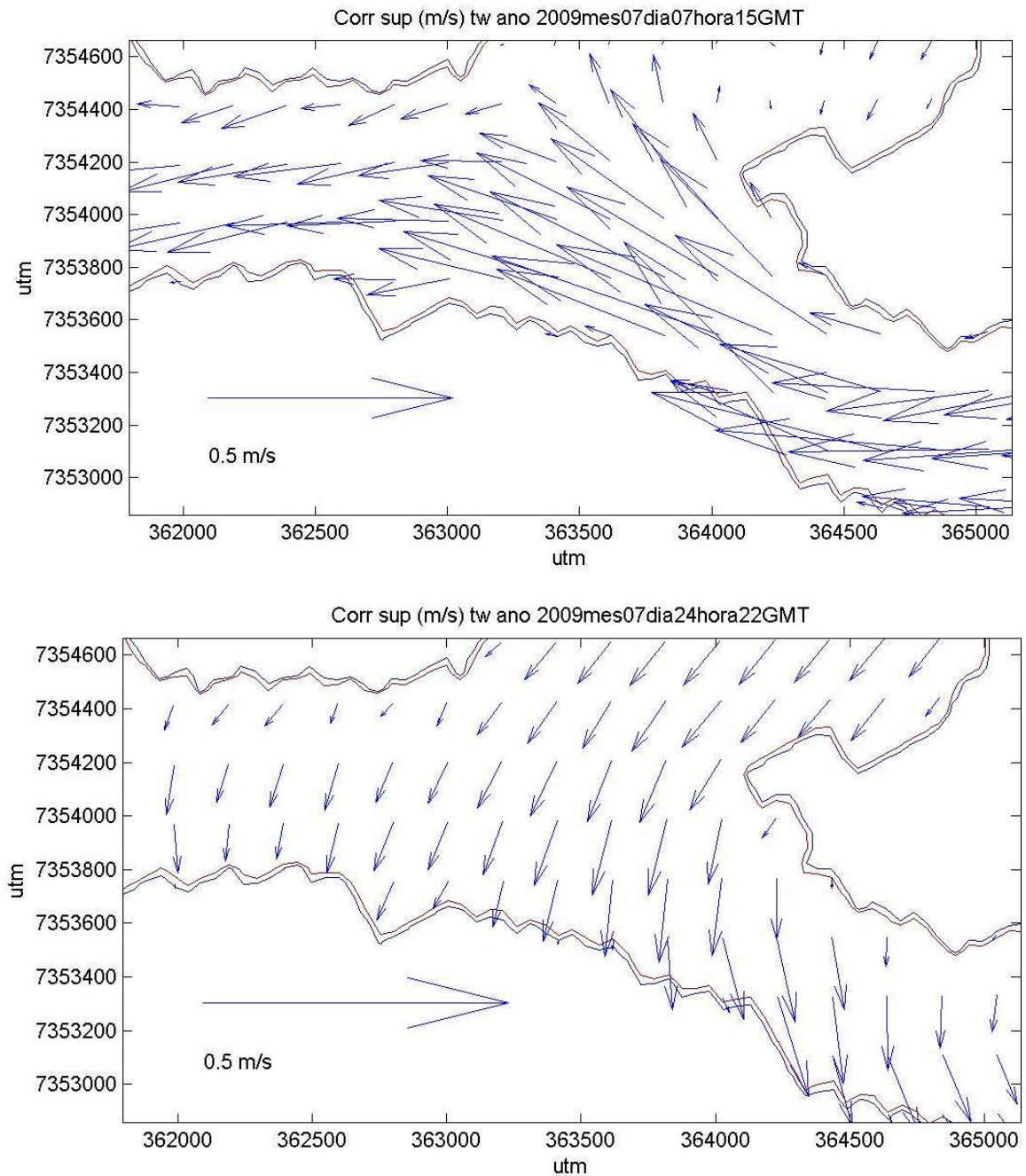


Figura 5.1.6.3-11 Correntes instantâneas na superfície (m/s) na área do terminal portuário projetado da DEICMAR, para 15:00 GMT do dia 07 e 22:00 GMT do dia 24 de julho de 2009, forçando o modelo com marés, vento e variações de densidade

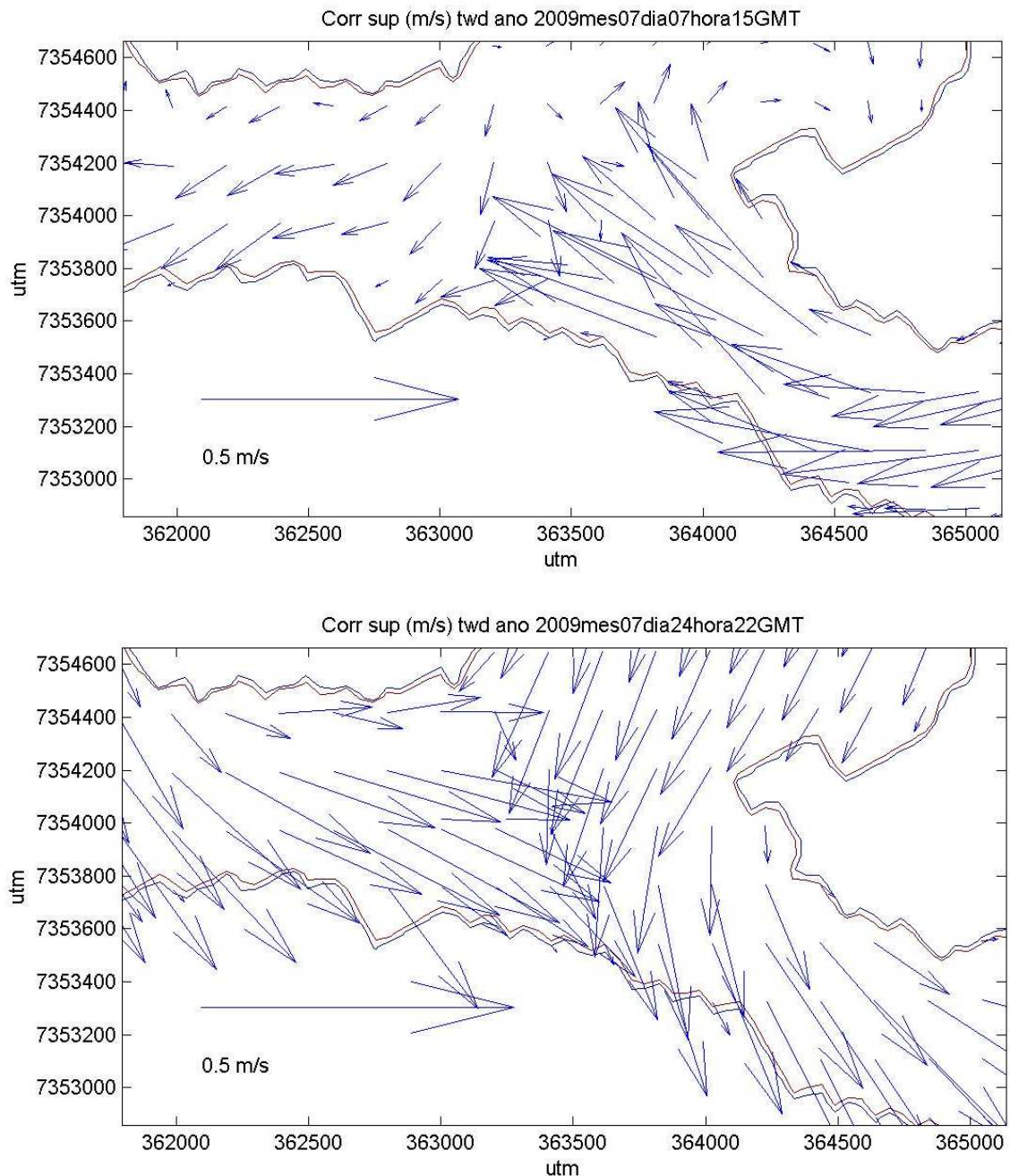
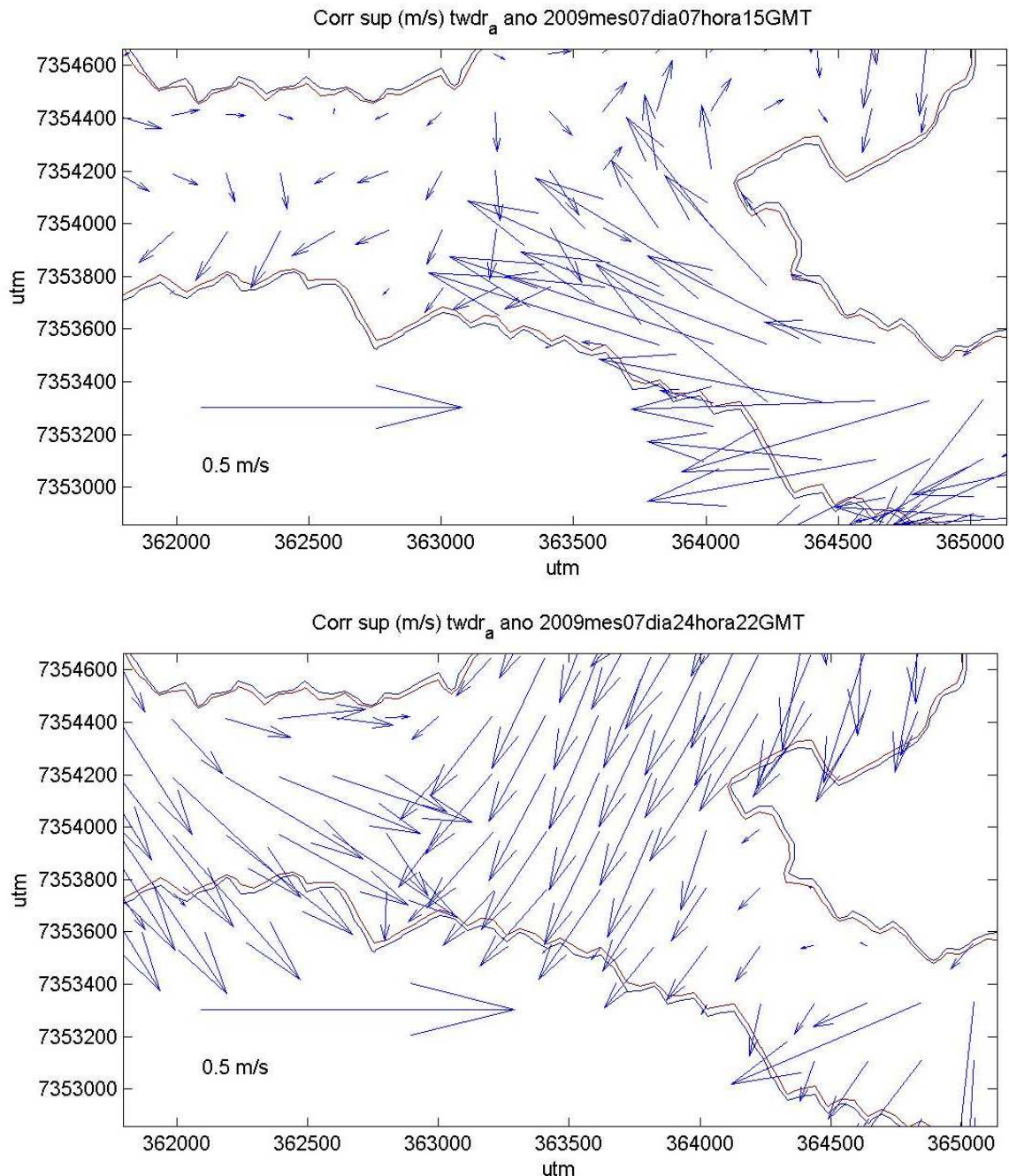


Figura 5.1.6.3-12 Correntes instantâneas na superfície (m/s) na área do terminal portuário projetado da DEICMAR, para 15:00 GMT do dia 07 e 22:00 GMT do dia 24 de julho de 2009, forçando o modelo com marés, vento, variações de densidade e vazões fluviais médias.



A comparação dos mapas de correntes na superfície com diferentes forçantes do modelo (Figuras 5.1.6.3-7 a 12), agora para o inverno, novamente demonstra que as marés e os ventos tendem a produzir condições relativamente uniformes das correntes, segundo as direções de enchentes ou vazantes; efeitos de densidade tendem a reforçar as correntes de vazante na superfície e de enchente em profundidade, conforme o padrão típico de estuários. E o efeito que mais produz variações locais das correntes é a descarga fluvial,



chegando a gerar divergências significativas dos campos de correntes na superfície (Figuras 5.1.6.3-7 a 12).

O Quadro 5.1.6.3-2 apresenta a estatística básica das séries temporais de elevação e correntes na superfície nos 09 pontos selecionados, para julho de 2009, considerando suas componentes de maré, vento, variações de densidade e vazões fluviais (bem como suas combinações).

Quadro 5.1.6.3-2 Estatística básica dos resultados do modelo nos 09 pontos selecionados, com amplitude do nível do mar (ampl. = valores máximos – valores mínimos), seu desvio padrão (DP), máximas correntes de superfície (Máx.) e seu desvio padrão (DP), para os resultados da simulação de julho de 2009 e suas componentes de maré, vento, maré+vento, vento+densidade, vento+densidade+rios e total (maré+vento+densidade+rios).

PTO	MARÉ				VENTO				MARÉ + VENTO			
	Ampl. (m)	DP (m)	Máx. (m/s)	DP (m/s)	Ampl. (m)	DP (m)	Máx. (m/s)	DP (m/s)	Ampl. (m)	DP (m)	Máx. (m/s)	DP (m/s)
1	1.485	0.298	0.210	0.049	0.721	0.183	0.042	0.011	2.090	0.356	0.231	0.048
2	1.486	0.299	0.426	0.099	0.720	0.183	0.087	0.021	2.090	0.356	0.470	0.097
3	1.487	0.299	0.390	0.087	0.721	0.183	0.092	0.020	2.090	0.356	0.434	0.086
4	1.503	0.300	0.189	0.045	0.721	0.182	0.068	0.020	2.090	0.356	0.201	0.044
5	1.503	0.300	0.290	0.066	0.721	0.183	0.078	0.021	2.090	0.357	0.303	0.063
6	1.503	0.300	0.307	0.065	0.721	0.182	0.074	0.018	2.090	0.357	0.328	0.063
7	1.500	0.301	0.156	0.036	0.721	0.183	0.037	0.010	2.090	0.358	0.160	0.035
8	1.499	0.300	0.320	0.074	0.720	0.182	0.078	0.022	2.090	0.357	0.330	0.071
9	1.500	0.300	0.328	0.066	0.720	0.182	0.071	0.019	2.090	0.357	0.360	0.064
PTO	VENTO+DENSIDADE				VENTO+DENSIDADE+RIOS				MARÉ+VENTO+DENS+RIOS			
	Ampl. (m)	DP (m)	Máx. (m/s)	DP (m/s)	Ampl. (m)	DP (m)	Máx. (m/s)	DP (m/s)	Ampl. (m)	DP (m)	Máx. (m/s)	DP (m/s)
1	0.722	0.182	0.101	0.019	0.726	0.183	0.101	0.024	2.100	0.362	0.291	0.056
2	0.723	0.182	0.229	0.041	0.727	0.183	0.230	0.059	2.100	0.363	0.585	0.120
3	0.723	0.182	0.286	0.049	0.726	0.183	0.315	0.075	2.100	0.362	0.582	0.132
4	0.721	0.182	0.219	0.030	0.725	0.182	0.253	0.045	2.110	0.363	0.386	0.094
5	0.721	0.182	0.273	0.039	0.725	0.182	0.327	0.062	2.110	0.363	0.512	0.126
6	0.721	0.182	0.304	0.046	0.725	0.182	0.374	0.075	2.110	0.363	0.561	0.127
7	0.721	0.182	0.128	0.019	0.725	0.182	0.158	0.022	2.110	0.364	0.253	0.054
8	0.721	0.182	0.269	0.041	0.725	0.182	0.339	0.051	2.110	0.363	0.519	0.112
9	0.722	0.182	0.283	0.047	0.725	0.182	0.357	0.059	2.110	0.363	0.522	0.103

De forma similar ao verão, esta tabela demonstra que a maré é o fator predominante no nível do mar e nas correntes, mantendo os mesmos parâmetros estatísticos do verão, qual seja, amplitude de maré em torno de 1,5 m e máximas correntes por volta de 0,4 m/s no meio do canal e 0,2 m/s próximo às margens; o vento tem importância menor no nível do mar, com amplitude ao redor de 0,7 m (sendo devido sobretudo a efeitos remotos do vento) e tem importância também menor nas correntes, não chegando a atingir 0,1 m/s.

Entretanto, o efeito do vento no nível do mar é mais forte no inverno do que no verão, certamente devido à maior influência de sistemas frontais no inverno; variações de densidade e vazões fluviais tem efeito mínimo no nível do mar, mas podem vir a ser importantes nas correntes, especialmente em períodos de grande pluviosidade e vazão fluvial, principalmente próximo à desembocadura de rios.

De maneira similar ao verão, foram calculadas correntes com intensidades maiores ao considerar o efeito combinado de marés, vento, variações de densidade e vazões fluviais,



sendo próximos a 0,6 m/s no presente caso. Não houve grandes variações dos efeitos de densidade e vazões fluviais entre o verão e o inverno, pois embora tenham sido considerados campos de densidade diferentes, foram adotados os mesmos valores de vazão fluvial nas duas simulações.

Por outro lado, é notório o aumento de efeitos remotos no vento no nível do mar no inverno em relação ao verão, e por consequência na amplitude total do nível do mar, que passou de 1,7 m para 2,1 m (Quadros 5.1.6.3-1 e 2).

Como observação final em relação à modelagem hidrodinâmica implementada, deve-se notar que a simulação com todas as forçantes (maré, vento, variações de densidade e vazões fluviais médias) é a mais realística, ou seja, a que mais se aproxima da condição real.

A simulação com as forçantes de maré, vento e variações de densidade representa condições com baixa pluviosidade e, por conseguinte, pequena descarga fluvial; a simulação com as forçantes de maré e vento apenas pode ser considerada como praticamente teórica para a região mais interna do estuário, visto que a diferença de densidade entre esta área e a Baía de Santos é grande, seja qual for a estação do ano ou a condição meteorológica reinante.

O estudo realizado permite concluir que, embora haja variações significativas das condições meteorológicas entre o verão e o inverno, que induzem variações correspondentes nas condições dinâmicas do estuário, os efeitos de sistemas frontais frios são mais importantes e induzem variações hidrodinâmicas maiores, seja qual for a estação do ano.

5.1.6.4 Análise de Ondas e sua Modelagem

Dentre as formas de movimento da água do mar, as ondas de superfície possuem importância primordial, visto que seu conhecimento é muito importante para diversas áreas de aplicação, como por exemplo: no dimensionamento da construção de marinas, portos e diques; na avaliação de processos erosivos e deposicionais em áreas costeiras e praias; na segurança de navegação; no lazer de surfistas, entre outros (Soares, 2003).

As ondas superficiais são geradas pelos ventos na superfície do oceano através de processos complexos, cujos detalhes ainda são objeto de pesquisas. Esta transferência de energia para o mar provoca oscilações da superfície numa gama amplitudes, períodos e direções, na forma de ondas que podem se deslocar por longas distâncias a partir da zona de geração (Melo Filho, 1993).

Os estudos relativos às ondas oceânicas possuem dois grandes enfoques básicos: a física de ondas e a caracterização do clima de ondas de uma região, sendo esses muito requisitados na engenharia oceânica, no gerenciamento costeiro e nas operações marítimas (Webb, 1983; Coli & Matta, 1996).

As maiores ondas observadas no litoral Sudeste brasileiro são geradas nas médias e altas latitudes, por tempestades originadas nos centros de baixa pressão que vêm da Antártica, associados às frentes frias (Candella, 1997).

Essas ondas têm direção que varia entre SW e SE, atingindo toda a costa Sul - Sudeste do país (Siegle & Asp, 2007), como no caso de tempestades entre 35° e 55° S. Ainda sim, também ocorrem ondas de amplitudes significativas vindas do quadrante Nordeste, associadas aos ventos predominantes, gerados pelos ventos associados ao Centro de Alta Pressão do Atlântico Sul (Seixas, 1997).

Modelos numéricos de propagação de ondas são ferramentas úteis para determinar as transformações sofridas pelas ondas quando estas se propagam de águas profundas para zonas costeiras (Melo Filho, 2006, 2006a). Modelos de previsão de ondas vêm sendo



desenvolvidos e utilizados por diversas instituições de pesquisa, em especial na Europa, nos Estados Unidos e no Japão.

A dependência de dados atmosféricos faz com que a maioria dos modelos de ondas sejam operados por agências meteorológicas, como no caso do Brasil, com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e o Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG/USP). Neste último, é rotineiramente utilizado o modelo de propagação de ondas costeiras SWAN a partir de resultados do modelo de ondas global WAVEWATCH III, ou WW3 (Toman, 2002; Branco, 2005, 2007; Zuppardo, 2007).

O estudo aqui realizado consistiu no mesmo método, ou seja, na utilização do modelo de propagação de ondas costeiras SWAN (Booji et al, 1996) a partir dos resultados do WW3 (Tolman, 2002). Para isso foram utilizadas três grades diferentes, num processo de *downscaling* (começando em uma grade maior, fazendo simulações sucessivas aninhadas para grades menores).

A primeira grade engloba todo o litoral sul e sudeste brasileiro, 32°S-22°S 52°W-41°W, sendo denominada Grade A, possuindo 331 pontos em longitude e 301 em latitude, com espaçamentos horizontais de 9435 m e 11068 m, respectivamente; nesta grade foram inseridos os resultados do modelo global nos seus contornos abertos.

A segunda grade, ou Grade B, situa-se no interior da Grade A e abrange todo o litoral do Estado de São Paulo, 26°S-23°S 48°W-45°W, com 91 x 91 pontos, e espaçamentos de 3145 m e 3689 m.

Por fim, a Grade C é formada por 100 pontos em longitude e por 134 em latitude, com espaçamentos de 143 m e 168 m, e cobre a Baía de Santos e os canais de Santos e São Vicente, sendo apresentada na Figura 5.1.6.4-1, com pontos limites fornecidos no Quadro 5.1.6.4-1.

Quadro 5.1.6.4-1 Coordenadas dos pontos delimitadores da Grade C.

Ponto	Latitude	Longitude
1	24° 4' 7.51"S	46° 26' 6"W
2	24° 4' 7.51"S	46° 17' 0.39"W
3	23° 51' 54"S	46° 26' 6"W
4	23° 51' 54"S	46° 17' 0.39"W

Figura 5.1.6.4-1 Grade C delimitada pelos ícones



Fonte: Google Earth, 2011

a) O MODELO

Foi implementado o modelo SWAN (Simulating Waves Nearshore), desenvolvido por Booji et al (1996) para estimar condições de ondas em pequena escala. No SWAN, as ondas são descritas com um espectro de densidade de agitação em duas dimensões, mesmo quando processos não lineares prevalecem, como no caso da zona de arrebentação, pois é possível determinar, com razoável precisão, a distribuição espectral em condições altamente não lineares.

A evolução do espectro de ondas é descrita pela equação do balanço de momento para coordenadas cartesianas, com termos que representam: a taxa local de mudança da densidade de agitação no tempo, a propagação do movimento nos eixos x e y, as influências das correntes, a refração induzida pela profundidade, além dos termos que representam os efeitos da geração, dissipação e interação não linear onda-onda.

O termo dissipação de energia de onda é representado pela somatória de três diferentes contribuições: "whitecapping", fricção com o fundo e quebra induzida pela profundidade. Em águas profundas, as interações não lineares de 4 ondas dominam a evolução do espectro e há transferência de energia de onda do espectro de pico para frequências menores. Já em águas rasas, a interação de três ondas transfere energia de frequências menores para frequências maiores (Branco, 2005).

b) DADOS DE ENTRADA

Para as simulações do SWAN, é preciso fornecer dados de entrada, especificamente a batimetria, correntes e ventos na superfície e condições nos contornos abertos, correspondentes a dados de ondas de modelo de escala maior, no caso, o modelo global WAVEWATCH III (Tolman, 2002).



No modelo implementado no presente estudo, a batimetria provém do banco de dados do ETOPO 2¹, com resolução de 2 minutos de grau em latitude e longitude). Os arquivos de correntes do Atlântico Sudoeste são obtidos pela modelagem numérica operacional do MASTER (Meteorologia Aplicada a Sistemas de Tempo Regionais), do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG/USP)²; e as informações de vento são provenientes do modelo meteorológico global do NCEP/NCAR, projeto associado à NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)³ – (Kalnay et al., 1996).

Por fim, as condições de contorno são extraídas do modelo global WW3, muito utilizado para simular ondas em oceano aberto, mas de uso limitado em áreas costeiras. A NOAA produz simulações em tempo real e escala global de ondas com o modelo WW3, disponibilizando os dados em seu *site*⁴ para *download*.

Com a ajuda de uma rotina escrita em programa MATLAB, estes arquivos foram utilizados para gerar condições de contorno para o SWAN, para as simulações da primeira grade, Grade A. São arquivos com informações de onda, como altura significativa, direção de propagação e período, em intervalos de tempo de 1 hora.

Evidentemente, as ondas nas bordas das grades são propagadas para seu interior, obedecendo às equações de movimento e sofrendo as influências da batimetria, correntes e ventos locais.

c) DADOS DE SAÍDA

O SWAN gera arquivos de saída que funcionam como arquivos de entrada para as simulações sucessivas, seja para um período posterior, utilizando a mesma grade, ou para um mesmo período, só que desta vez para uma grade interna aninhada. São arquivos que representam a grade usada no cálculo da simulação, com informações, em todos os pontos da grade, de: tempo, altura significativa, direção de propagação e período das ondas. A partir desses dados foram geradas figuras representativas dessas informações (distribuições espaciais) e séries temporais relativas a pontos de grade selecionados.

d) RESULTADOS

Foram realizadas simulações para todo o ano de 2009, nas três grades implementadas. As saídas do modelo são: altura significativa, direção de propagação e período das ondas, obtidos em intervalos de 1 hora. Tendo em vista o interesse do estudo na parte costeira, interior ao Canal de Santos, no presente relatório serão apresentados somente os resultados da grade C; nesta grade, foram selecionados alguns pontos representativos do comportamento da região, cujas posições são a seguir fornecidas, no Quadro 5.1.6.4-2 e na Figura 5.1.6.4-2.

¹ <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/image/2minrelief.html>

² <http://www.master.iag.usp.br/>

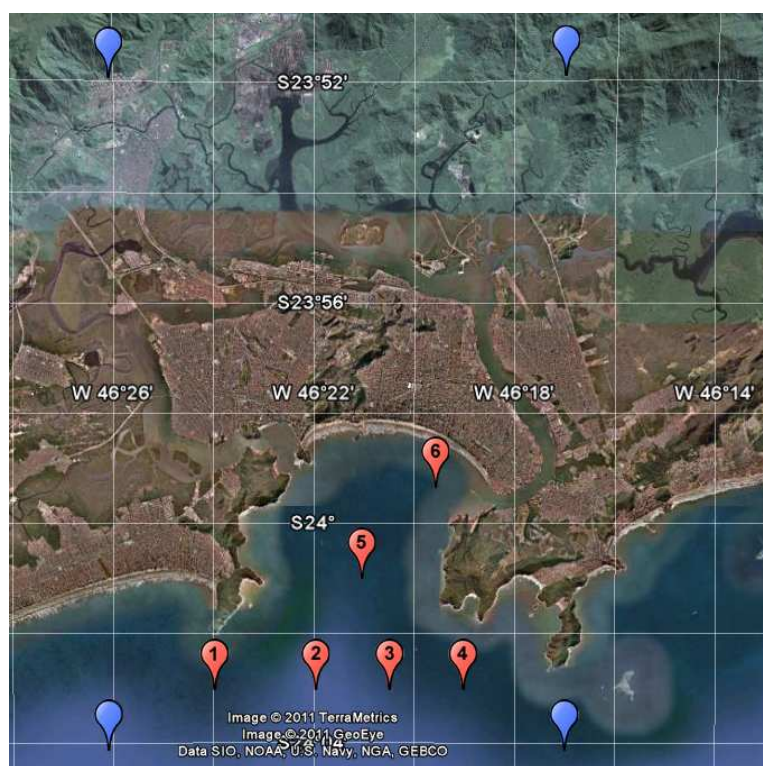
³ <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/reanalysis/reanalysis.shtml>

⁴ <http://polar.ncep.noaa.gov/waves/download.shtml>

Quadro 5.1.6.4-2 Coordenadas dos pontos representativos da Grade C.

Ponto	Latitude	Longitude
C1	24° 3' 1.33" S	46° 23' 59.25" W
C2	24° 3' 1.33" S	46° 21' 58" W
C3	24° 3' 1.33" S	46° 20' 29.82" W
C4	24° 3' 1.33" S	46° 19' 1.64" W
C5	24° 1' S	46° 21' 2.89" W
C6	23° 59' 20.73" S	46° 19' 34.71" W

Figura 5.1.6.4-2 Pontos representativos da Grade C



Fonte: Imagem: Google Earth, 2011

- ESTATÍSTICA MENSAL DAS ONDAS

Para cada série temporal dos pontos enumerados no Quadro 5.1.6.4-2, foi realizada uma análise estatística mensal, para a obtenção das alturas significativas máximas e mínimas, a média e o desvio padrão da média (Quadro 5.1.6.4-3).

- MÁXIMA ANUAL

A partir dos resultados das alturas significativas máximas de todos os pontos representativos da grade C, foram elaborados os mapas de altura significativa e direção de propagação das ondas, nos respectivos instantes de máximas, bem como 6 horas antes e 6 horas depois. Adicionalmente, foi elaborado gráfico com a representação dos períodos de onda no instante da máxima anual, perfazendo um total de 4 gráficos de distribuições espaciais (Figuras 5.1.6.4-3 a 5.1.6.4-6).



Quadro 5.1.6.4-3 Estatística mensal de altura significativa nos 6 pontos selecionados da Grade C (identificação do ponto e do mês, média, desvio padrão, máxima e mínima, com destaque em amarelo para a máxima anual de cada ponto). Unidades em metros.

Pto-Mês	Med	DP	Max	Min	Pto-Mês	Med	DP	Max	Min
C1-01	0.82	0.33	1.61	0.34	C2-01	0.88	0.32	1.63	0.42
C1-02	0.83	0.34	1.84	0.29	C2-02	0.94	0.33	1.97	0.46
C1-03	0.83	0.26	1.65	0.28	C2-03	0.90	0.25	1.63	0.37
C1-04	1.30	0.52	3.01	0.48	C2-04	1.36	0.55	3.41	0.51
C1-05	1.39	0.61	2.71	0.37	C2-05	1.44	0.64	2.95	0.40
C1-06	1.06	0.41	2.19	0.33	C2-06	1.10	0.42	2.31	0.38
C1-07	1.10	0.41	2.47	0.55	C2-07	1.14	0.43	2.69	0.58
C1-08	0.90	0.37	2.33	0.17	C2-08	0.94	0.37	2.50	0.25
C1-09	0.96	0.42	3.11	0.43	C2-09	0.98	0.43	3.52	0.47
C1-10	1.08	0.53	3.56	0.30	C2-10	1.12	0.55	4.16	0.43
C1-11	0.86	0.45	3.11	0.37	C2-11	0.90	0.46	3.57	0.43
C1-12	0.89	0.43	2.85	0.30	C2-12	0.93	0.43	3.15	0.35
C3-01	0.92	0.31	1.64	0.45	C4-01	0.92	0.34	1.74	0.45
C3-02	0.96	0.34	2.05	0.43	C4-02	0.96	0.34	2.05	0.44
C3-03	0.93	0.24	1.67	0.43	C4-03	0.95	0.26	1.74	0.43
C3-04	1.41	0.57	3.52	0.53	C4-04	1.47	0.56	3.59	0.69
C3-05	1.49	0.65	3.03	0.41	C4-05	1.54	0.65	3.13	0.51
C3-06	1.15	0.43	2.39	0.41	C4-06	1.19	0.43	2.40	0.44
C3-07	1.19	0.44	2.76	0.61	C4-07	1.21	0.43	2.78	0.65
C3-08	0.98	0.38	2.57	0.28	C4-08	1.02	0.38	2.57	0.33
C3-09	1.02	0.44	3.70	0.50	C4-09	1.07	0.46	3.78	0.52
C3-10	1.16	0.56	4.40	0.49	C4-10	1.20	0.57	4.39	0.50
C3-11	0.94	0.47	3.75	0.46	C4-11	0.98	0.49	3.81	0.49
C3-12	0.96	0.43	3.26	0.38	C4-12	0.99	0.44	3.35	0.43
C5-01	0.84	0.33	1.68	0.37	C6-01	0.66	0.09	0.97	0.53
C5-02	0.85	0.32	1.91	0.41	C6-02	0.64	0.08	0.93	0.51
C5-03	0.88	0.26	1.73	0.44	C6-03	0.62	0.05	0.77	0.53
C5-04	1.32	0.57	3.65	0.48	C6-04	0.71	0.17	1.28	0.50
C5-05	1.43	0.67	3.06	0.33	C6-05	0.73	0.18	1.20	0.46
C5-06	1.04	0.42	2.27	0.32	C6-06	0.68	0.12	1.09	0.52
C5-07	1.09	0.43	2.63	0.50	C6-07	0.69	0.13	1.17	0.50
C5-08	0.92	0.37	2.44	0.30	C6-08	0.63	0.09	1.09	0.49
C5-09	0.98	0.46	3.90	0.47	C6-09	0.65	0.07	1.04	0.54
C5-10	1.11	0.61	4.54	0.44	C6-10	0.72	0.09	1.06	0.54
C5-11	0.89	0.51	4.00	0.40	C6-11	0.63	0.08	1.08	0.50
C5-12	0.90	0.46	3.45	0.36	C6-12	0.63	0.08	1.02	0.48

Figura 5.1.6.4-3 Gráfico das Alturas Significativas e Direção de Propagação das ondas 6 horas antes do máximo anual.

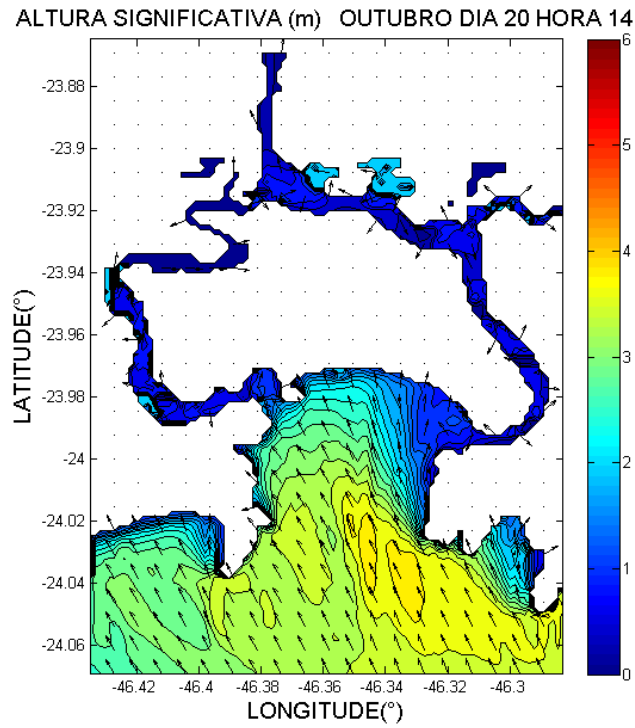


Figura 5.1.6.4-4 Gráfico das Alturas Significativas e Direção de Propagação das ondas durante o máximo anual.

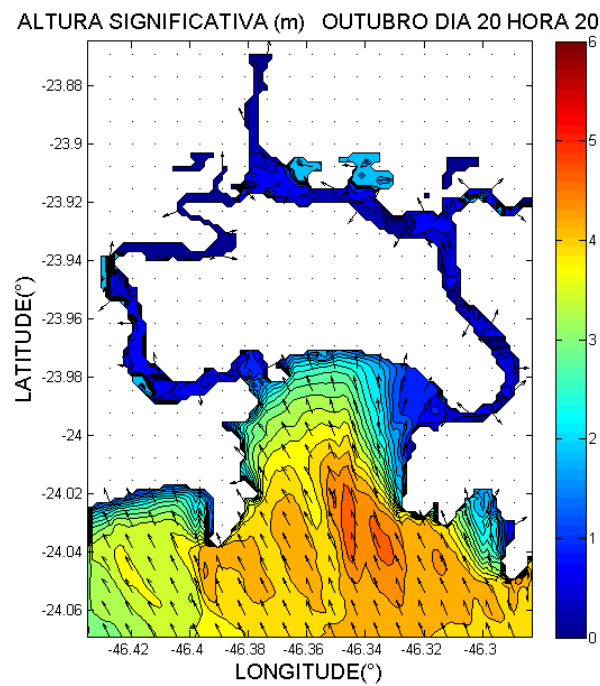


Figura 5.1.6.4-5 Gráfico das Alturas Significativas e Direção de Propagação das ondas 6 horas após o máximo anual.

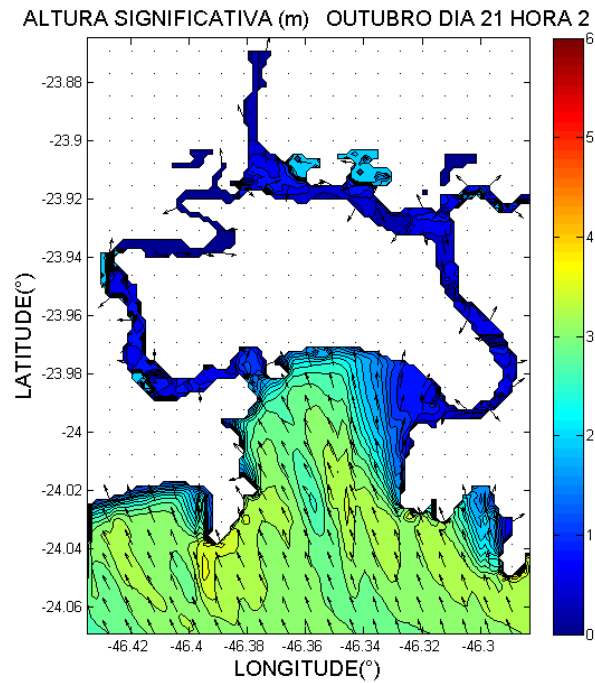
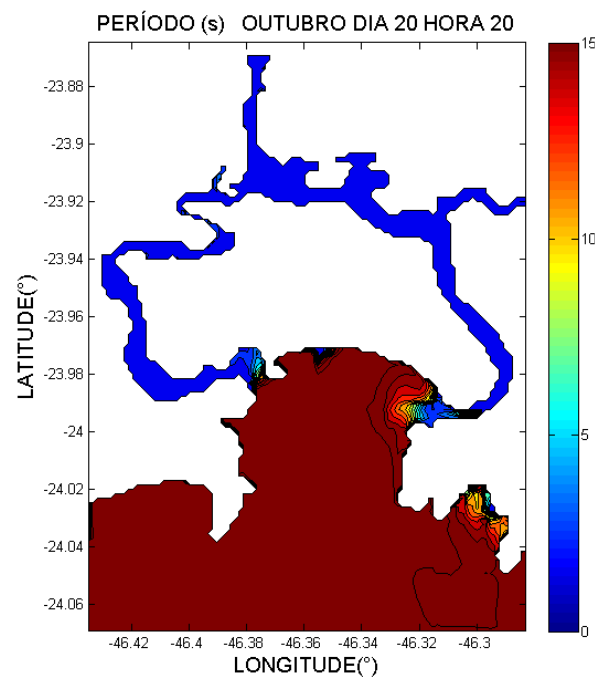


Figura 5.1.6.4-6 Gráfico representativo do período das ondas durante o máximo anual.



- Séries Temporais

Para a grade C foi selecionado o ponto C5, com o intuito de se estudar o comportamento das ondas ao longo dos meses janeiro e julho de 2009; as séries temporais (de altura significativa, direção de propagação e período) relativas a este ponto estão nas Figuras 5.1.6.4-7 a 5.1.6.4-12; as direções de propagação seguem o padrão Náutico, com o zero (0°) apontando para norte e crescendo em sentido horário.

Figura 5.1.6.4-7 Série temporal da altura significativa do ponto C5 da Grade C em janeiro de 2009.

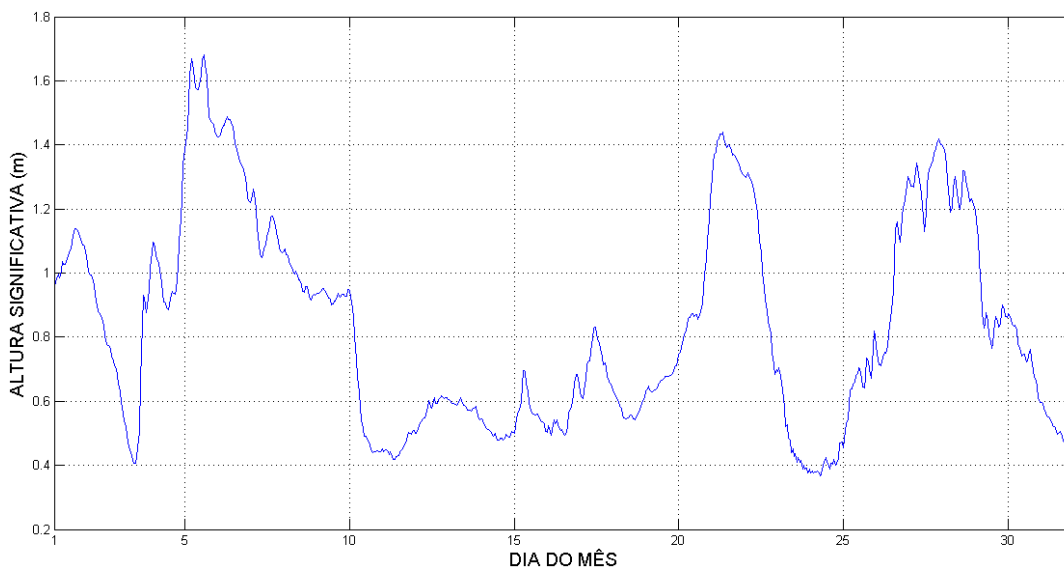


Figura 5.1.6.4-8 Série temporal da direção de propagação da onda no ponto C5 da Grade C em janeiro de 2009.

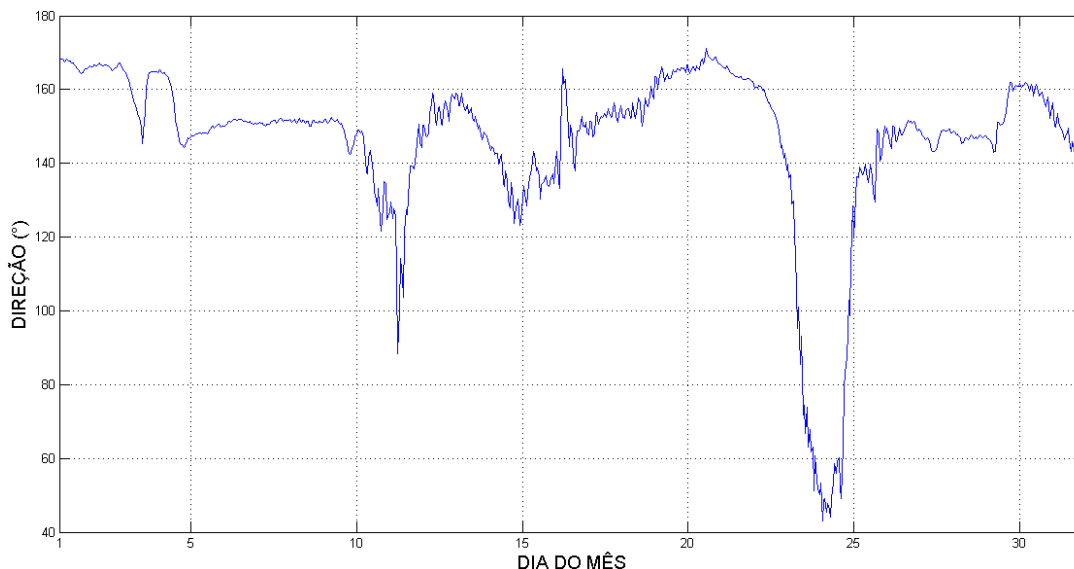


Figura 5.1.6.4-9 Série temporal do período da onda no ponto C5 da Grade C em janeiro de 2009.

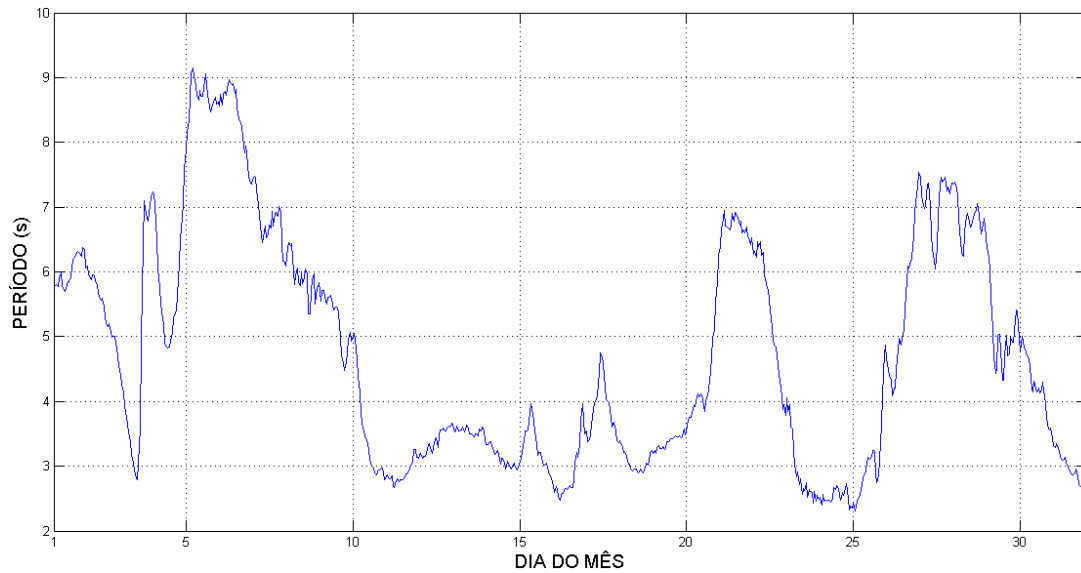


Figura 5.1.6.4-10 Série temporal da altura significativa do ponto C5 da Grade C em julho de 2009.

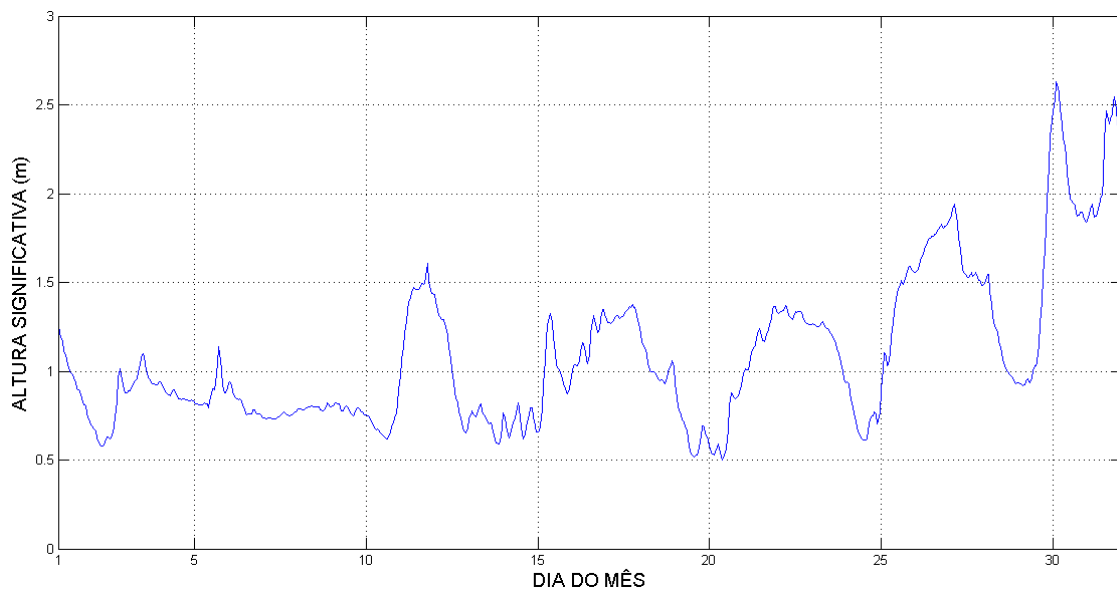


Figura 5.1.6.4-11 Série temporal da direção de propagação da onda no ponto C5 da Grade C em julho de 2009.

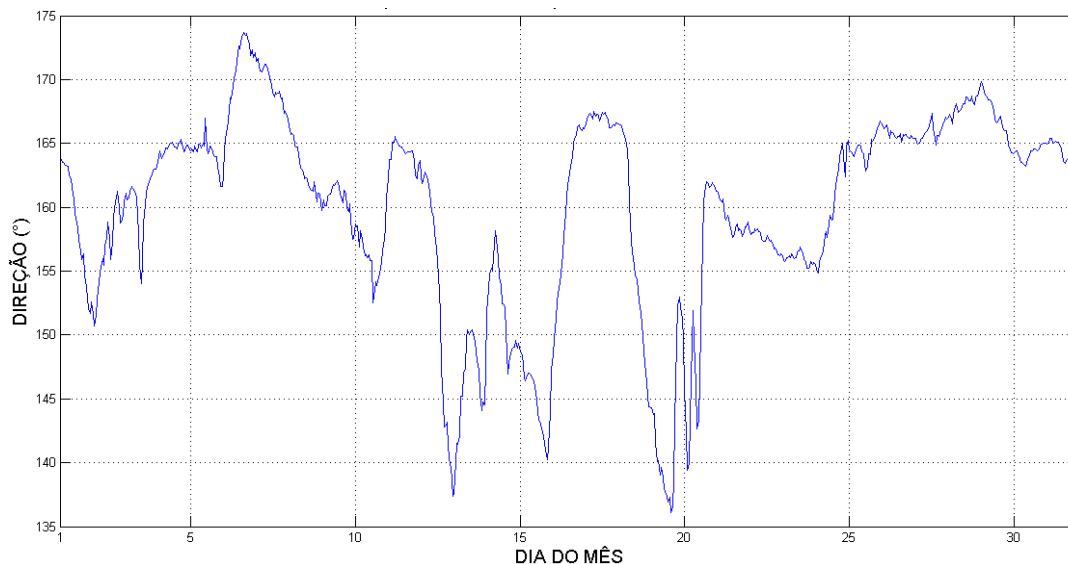
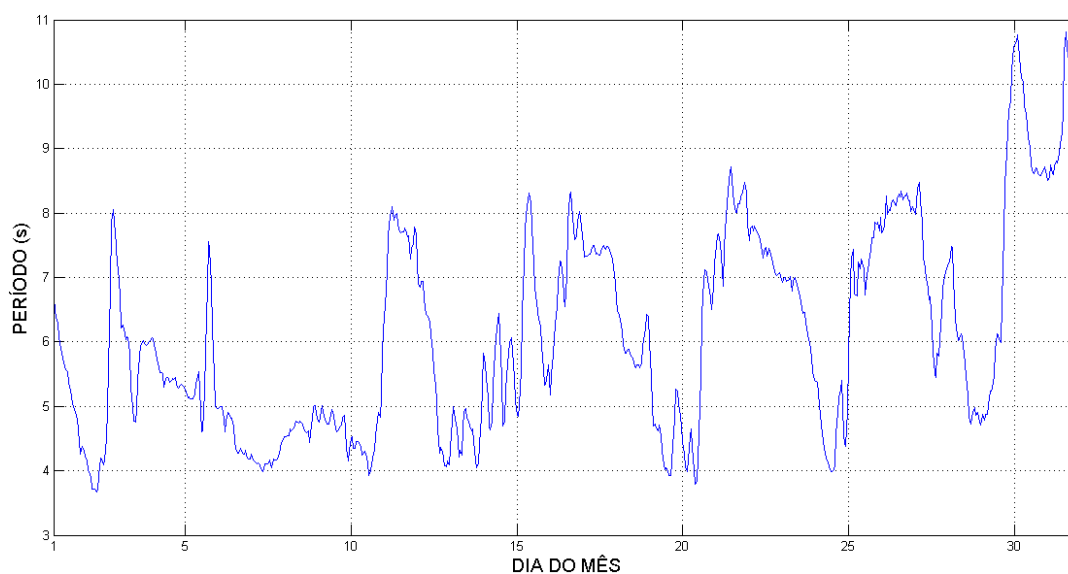


Figura 5.1.6.4-12 Série temporal do período da onda no ponto C5 da Grade C em julho de 2009.



- DIAGRAMAS DE ESPALHAMENTO

Para os pontos seleccionados da grade C (Figura 5.1.6.4-2) foram construídos Diagramas de Espalhamento, para os meses de janeiro e julho de 2009 (Figuras 5.1.6.4-13 a 5.1.6.4-16).

Figura 5.1.6.4-13 Diagrama de espalhamento de Altura/Direção da grade C para o mês de janeiro de 2009.

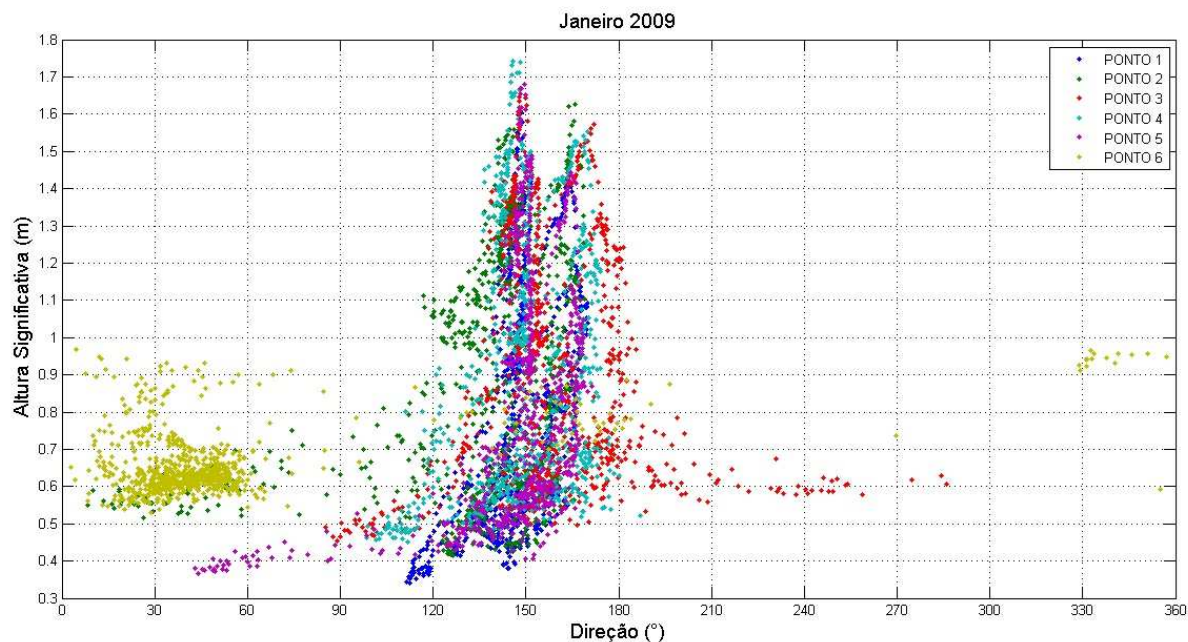


Figura 5.1.6.4-14 Diagrama de espalhamento de Altura/Direção da grade C para o mês de julho de 2009.

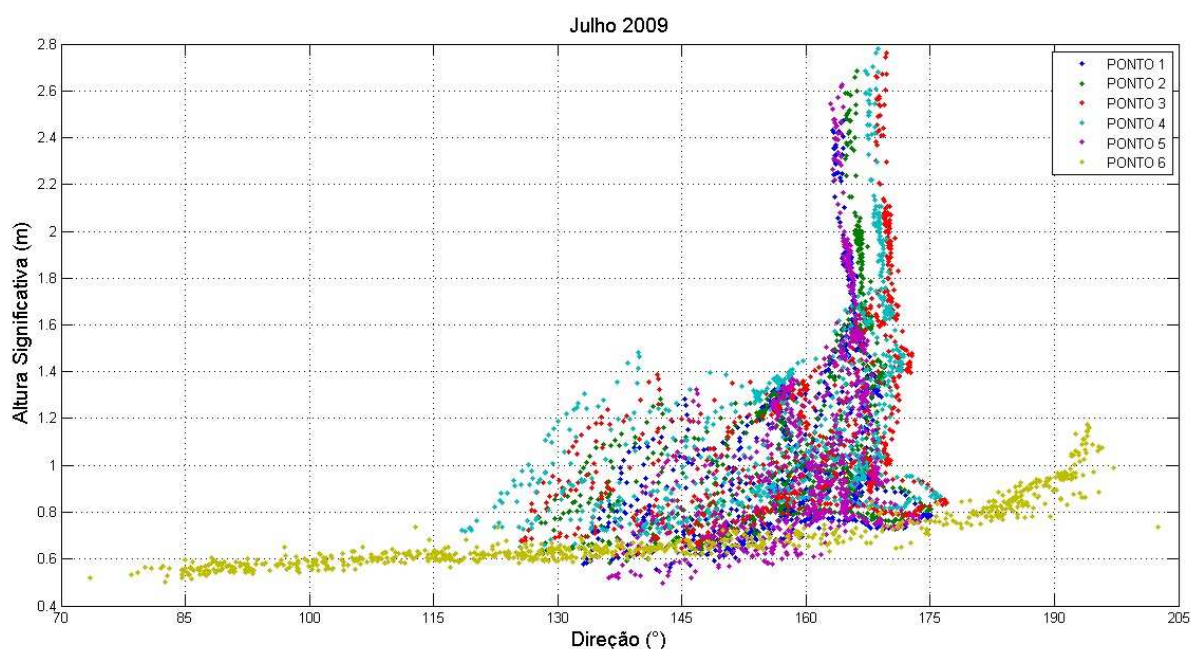


Figura 5.1.6.4-15 Diagrama de espalhamento de Altura/Período da grade C para o mês de janeiro de 2009.

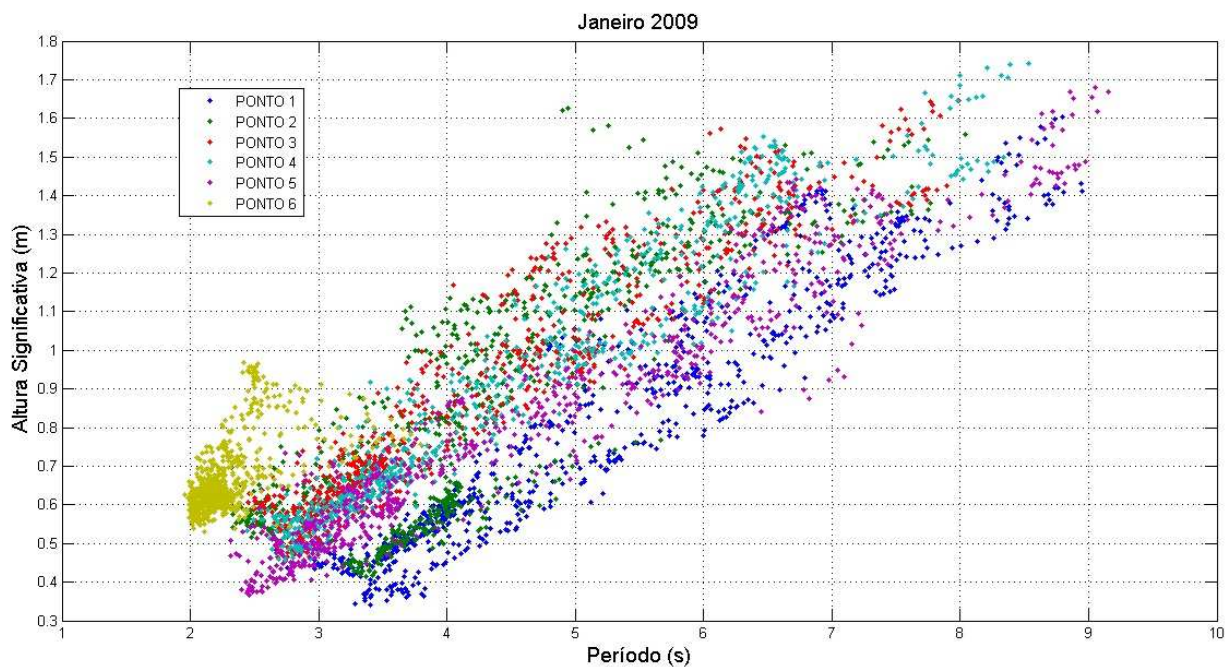
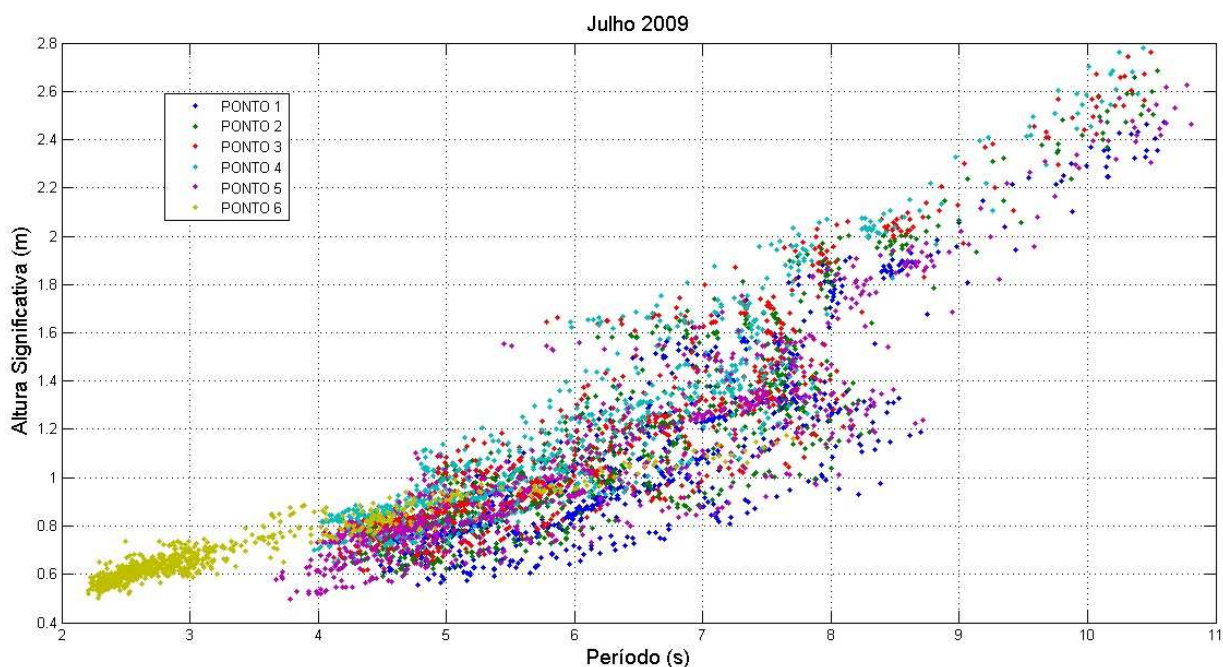


Figura 5.1.6.4-16 Diagrama de espalhamento de Altura/Período da grade C para o mês de julho de 2009.



- ESPECTRO DIRECIONAL DE ENERGIA

A seguir, são representados graficamente os espectros direcionais de energia, para os pontos selecionados da grade C, para janeiro e julho de 2009 (Figuras 5.1.6.4-17 e 5.1.6.4-18).

Figura 5.1.6.4-17 Espectros direcionais de energia dos pontos 1 a 6 da grade C no mês de janeiro de 2009.

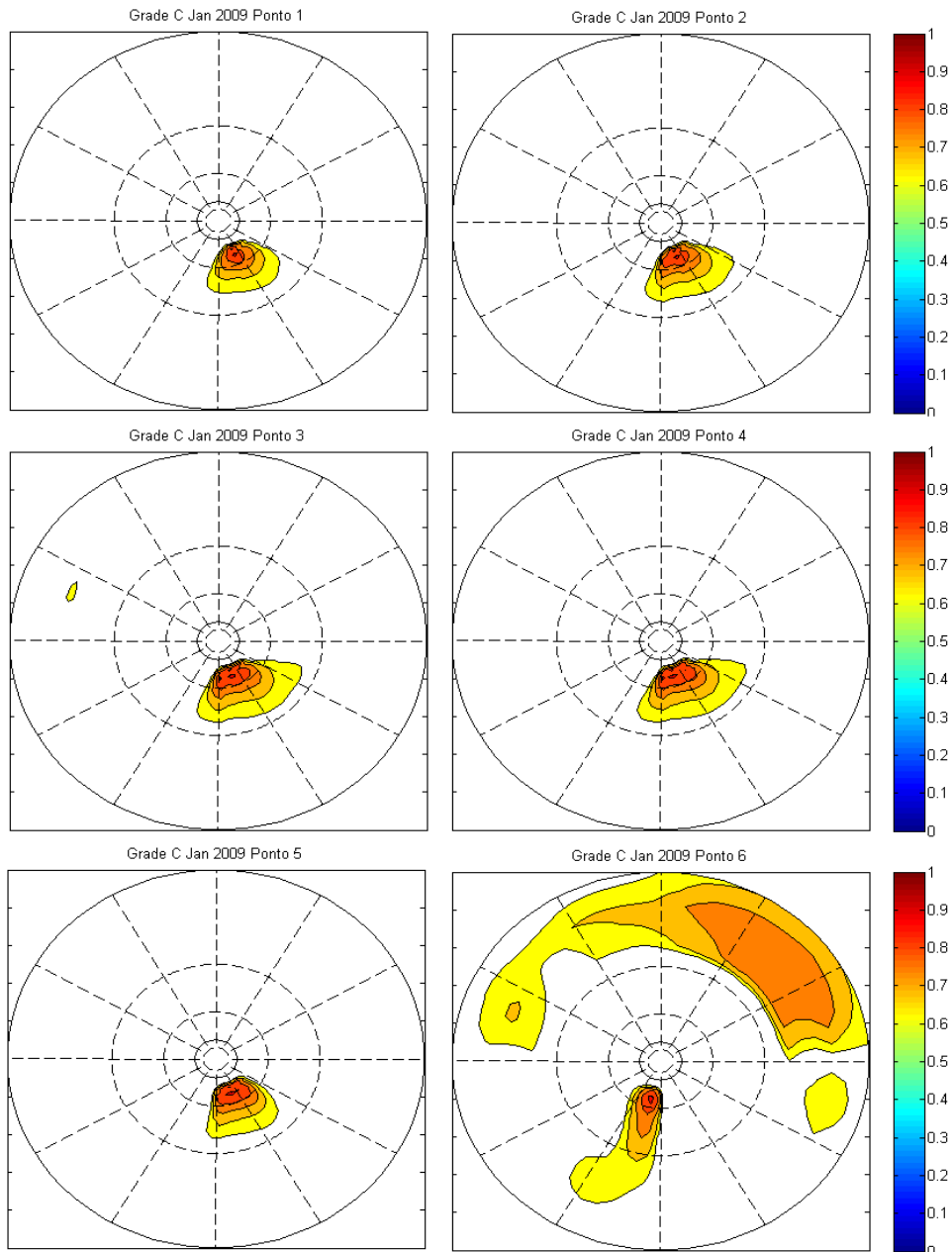
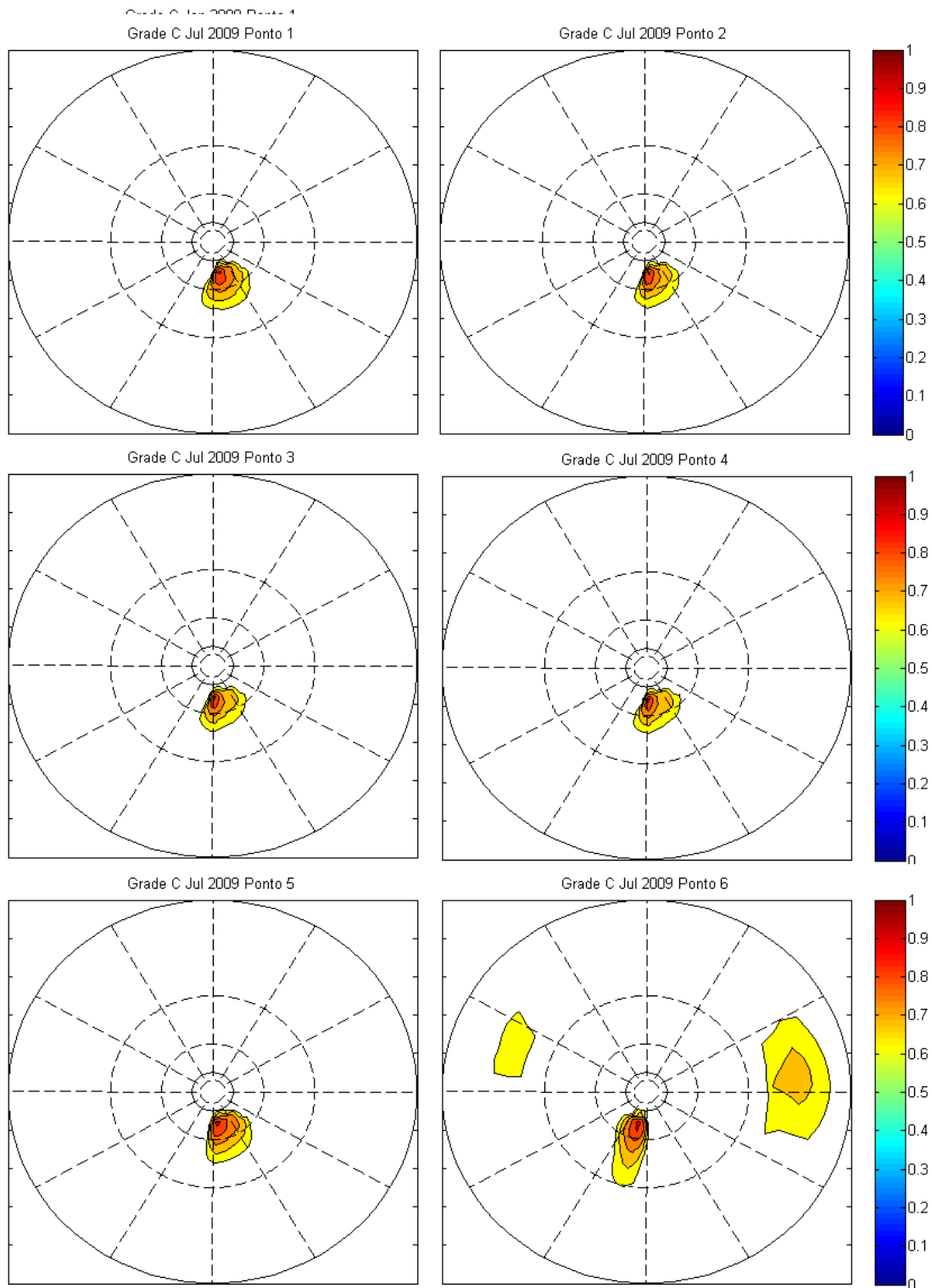


Figura 5.1.6.4-18 Espectros direcionais de energia dos pontos 1 a 6 da grade C no mês de julho de 2009.





e) DISCUSSÃO

Devido ao grande número de pontos na grade, foram escolhidos pontos representativos do comportamento das ondas na região de interesse. Tais pontos foram selecionados de forma que cobrissem a respectiva grade e estivessem bem distribuídos, tendo um espaçamento regular entre os mesmos. Foi também selecionado um ponto de interesse, por estar próximo à região foco do estudo, na entrada do canal do Porto de Santos (Figura 5.1.6.4-2).

As alturas significativas máximas alcançadas na Grade A (Sudeste do Brasil) tem valores que vão de 3,57 m (próximo à costa) a 6,69 m (em áreas mais profundas), em abril de 2009. Pode-se observar o mesmo padrão para a Grade B (litoral do Estado de São Paulo), com máximo anual de 4,17 m, em outubro de 2009. Este máximo, ao se propagar, também é responsável pelo máximo no ponto C5 da Grade C, que é o máximo anual dentre todos os pontos desta grade.

Entretanto, este máximo tem sua energia dissipada ao chegar próximo à entrada do Canal do Porto de Santos (ponto C6 da grade C), quando atinge apenas 1,06 m (Quadro 5.1.6.4-3).

As Figuras 5.1.6.4-3 a 6 demonstram a enorme atenuação das ondas ao se aproximarem da costa, tendo alturas (e períodos) praticamente desprezíveis ao adentrarem os Canais do Porto de Santos e de São Vicente.

Os efeitos das frentes frias em janeiro e julho de 2009 são notórios nos gráficos das séries temporais (Figuras 5.1.6.4-7 a 5.1.6.4-12): em janeiro, ocorreram apenas duas frentes, que passaram pela Baixada Santista nos dias 03-04 e 18-22, com grande intensidade, enquanto que em julho passaram seis frentes, que produziram ventos do quadrante Sul nos dias 01-05, 11-13, 14-15, 18-20, 23-26 e 29-30.

A primeira frente de janeiro chegou a produzir ondas de 1,6 m de altura e 9 s de período, no ponto C5; a última frente de julho gerou ondas com altura acima de 2,5 m e período próximo a 11 s.

Os diagramas de espalhamento são práticos para a análise de ondas: a Figura 5.1.6.4-13 mostra que as ondas no mês de janeiro vêm de uma direção preferencial entre 130° e 180°, enquanto que para o mês de Julho a direção varia de 160° a 175° (Figura 5.1.6.4-16).

O ponto C6 não segue a direção preferencial dos outros pontos da grade C, variando de 0° a 30° no verão e no inverno de 70° a 205°; isso se deve ao fato do ponto estar muito próximo à entrada do canal e da costa, sofrendo influência de ondas refletidas na costa.

O espectro direcional de energia permite determinar a direção de onde vêm as maiores energias das ondas. Devido à orientação da Baía de Santos, a energia das ondas tende a vir de Sul (Figura 5.1.6.4-17 e 18). No entanto, com a proximidade da costa e dos canais estuarinos, as ondas são muito atenuadas e praticamente não se distingue direção predominante.

f) CONCLUSÃO

Os dados apresentados mostraram que as maiores alturas significativas nas três grades aconteceram em períodos de eventos frontais extremos, com ventos intensos, mas não necessariamente no inverno. Confirmando resultados de outros trabalhos (Candella, 1997; Seixas, 1997), as ondas mais significativas vêm predominantemente das direções Sul e Sudeste. As maiores alturas significativas também estão relacionadas com os maiores períodos, como visto nos diagramas de espalhamento.

As alturas significativas máximas mensais das ondas na entrada da Baía de Santos (ponto C5 da Grade C) têm grande variação, entre 1,68 m e 4,54 m, no entanto, esta



variação é muito atenuada para o interior da Baía, de modo que, na entrada do canal do Porto (ponto C6, grade C) as máximas mensais têm valores entre 0,93 m e 1,28 m.

De fato, a modelagem e a análise de ondas não são essenciais para a região do empreendimento da DEICMAR, porém é importante para o processamento do modelo de dispersão de sedimentos do estuário, incluindo a região mais interna.

5.1.6.5 Transporte de Sedimentos

Para acompanhar o crescimento da movimentação de navios mercantes, o aumento do calado destes navios e o crescente aumento do volume de mercadorias que passam pelo porto, são necessárias intervenções antrópicas para a modificação da forma natural dos canais que dão acesso e abrigam o Porto de Santos. Estas intervenções também são verificadas em praticamente todos os portos em operação no mundo (Ponçano, 1985).

Segundo George (1967) *apud* Ponçano (1985), temos:

"Todos os portos modernos são, em escala variável, portos artificiais, desenvolvidos a partir de um sítio natural insuficiente para atender às necessidades de navegação atual".

Atividades de dragagem dos fundos dos canais de acesso e navegação do Porto de Santos e intervenções para construções de novos píers, berços de atracação e retro-portos vem sendo realizadas desde a década de 20 do século XX (Sondotécnica, 1977; IME, 2008).

Com as atividades de extração de material sólido no fundo, o equilíbrio morfológico existente no sistema estuarino se rompe, fazendo com que as taxas de assoreamento se intensifiquem até que a forma dos canais do estuário se aproxime novamente da original (Fúlfaro & Ponçano, 1976), evidenciando uma relação diretamente proporcional entre o aumento artificial do canal aprofundado e o volume de material dragado nas atividades de manutenção.

Devido à grande importância socioeconômica do local em estudo e à necessidade de aprofundamento dos canais do Porto de Santos, desde 1966, diversos trabalhos foram realizados com o objetivo de caracterizar as condições hidrodinâmicas e sedimentológicas encontradas na região.

O presente relatório apresenta um diagnóstico ambiental abrangendo o transporte de sedimentos na região do alto estuário de Santos – São Vicente, incluindo toda a Área Diretamente Afetada (ADA). Foram destacados os principais processos naturais envolvidos e os diferentes padrões de dispersão, erosão e deposição em relação às condições hidrodinâmicas de verão e inverno, marés de sizígia e quadratura, e entradas de frentes frias.

A ferramenta utilizada neste trabalho é a modelagem numérica do transporte de sedimentos que, basicamente, simula a dinâmica sedimentar, a partir de informações sobre o tipo de sedimentos presentes no fundo e quantidades de material sólido que são drenados, além das informações sobre as correntes e ondas na região, apresentadas acima, nos itens de hidrodinâmica e ondas.

a) OBJETIVOS

Este diagnóstico tem o seguinte objetivo geral:

- ✓ Caracterizar a dinâmica do transporte de sedimentos na região do alto estuário do complexo estuarino Santos - São Vicente.
- ✓ Como objetivos específicos deste diagnóstico, têm-se:
- ✓ Levantamento da evolução geomorfológica do alto estuário do complexo estuarino Santos - São Vicente;



- ✓ Apresentação dos processos de transporte de sedimentos ao longo da costa, definindo as regiões potenciais para acreção e erosão costeira;
- ✓ Apresentação do transporte de sedimentos na região para os cenários de marés de sizígia e quadratura em enchente e vazante, período de entrada de frente fria e períodos de inverno e verão onde a descarga fluvial tem comportamento diferenciado entre as temporadas.

b) EVOLUÇÃO GEOMORFOLÓGICA

- LITORAL DO ESTADO DE SÃO PAULO

De maneira geral, a geologia do litoral do Estado de São Paulo foi condicionada principalmente por dois eventos distintos: o processo tectônico Mesozóico-Cenozóico, ligado à reativação do escudo Sul Americano, responsável pelos falhamentos que condicionaram toda a escarpa da Serra do Mar, e a sedimentação decorrente das sucessivas transgressões e regressões marinhas quaternárias, responsáveis pela maior parte da distribuição sedimentar do litoral.

Conforme sugerido por Almeida (1976), a evolução tectônica da área está associada primariamente a possíveis fenômenos termiais de reativação da Plataforma Sul-Americana, que ocorreram a partir do Jurássico Superior, ligados à abertura do Oceano Atlântico. Com a evolução do processo, desenvolveram-se falhamentos a oeste da Bacia de Santos, que são considerados, pelo autor, como os responsáveis pela subsidência da mesma, sendo associado, a este processo, o soerguimento da Serra do Mar, posicionada próxima à Falha de Santos.

O maciço rochoso sofreu então processos erosivos, retrocedendo até a sua posição atual, sendo esses fenômenos os responsáveis pelo suprimento sedimentar para a bacia de Santos que, segundo Miranda (1970), é de idade Cretáceo-Terciária e, em certos trechos, possui espessura sedimentar superior a 8 km.

Tais eventos tectônicos se estenderam até o Terciário (Almeida *et. al*, 1981), expondo antigas áreas cratônicas e cinturões móveis a eventos que acabaram por produzir falhas, basculamentos, flexuras e soerguimentos que acompanharam as antigas linhas de fraqueza estrutural do embasamento, formando fossas, vales de afundamento e muralhas tectônicas, originando a Serra do Mar.

Paralelamente, do Cretáceo Superior ao Paleoceno, uma grande atividade tectônica ocorreu na área, representada por eventos de vulcanismo alcalino atingindo boa parte do litoral, inclusive a Ilha de São Sebastião (Almeida, 1976). Esse vulcanismo é responsável pelo arcabouço mais resistente da ilha (e de outras ilhas próximas) que se comporta como testemunho do retrocesso erosivo da Serra do Mar.

A partir do Terciário Superior e Pleistoceno, a evolução da área associa-se, também, a eventos transgressivo-regressivos. As flutuações do nível do mar associadas às mudanças paleoclimáticas durante o Quaternário foram as principais causas de formação, modelagem e evolução das planícies costeiras do Brasil, com pequenas diferenças, segundo uma sequência válida para o trecho do litoral entre o Rio Grande do Sul e Pernambuco (Suguio & Martin, 1978).

No caso do litoral paulista, há evidências na costa de um processo transgressivo mais antigo datado de, aproximadamente, 120.000 anos AP (Suguio & Martin, 1987), relacionado ao interglacial "Sangamoniano". Tal evento é denominado de "Transgressão Cananéia" e seus registros foram observados apenas na região costeira emersa.

Subsequente à transgressão citada ocorreu um processo de regressão marinha, correspondente ao período glacial "Wisconsiniano", e que teve seu máximo regressivo há, aproximadamente, 18.000 anos AP, com subsequente máximo transgressivo há 5.100



anos AP, no qual o nível do mar chegou a 5 m acima do nível atual. Esta transgressão foi denominada, para a costa de São Paulo, de "Transgressão Santos" (Petri & Suguio, 1973; Suguio & Martin, 1978).

Neste processo há evidências erosivas descritas tanto em regiões emersas quanto na plataforma continental: feições como vales submersos assoreados, indicando drenagens subaéreas pretéritas; terraços submersos e escarpas, que se relacionam a períodos antigos de estabilização do nível do mar; e paleo-linhas de costa afogadas (Furtado *et al.*, 1992).

Uma destas feições, segundo os autores, é representada pela escarpa existente ao sul da Ilha de São Sebastião, entre as profundidades de 35 e 70 m, que se estende lateralmente para nordeste, além da Ilha Vitória, localizada a leste da Ilha de São Sebastião.

Associado a essa escarpa ocorre um vale a sudoeste da Ilha de São Sebastião, que inflete para dentro do Canal de São Sebastião. Este vale apresenta uma continuidade para áreas mais profundas. A escarpa constituir-se-ia, durante a Transgressão Santos, em obstáculo ao avanço do mar no local.

Há, a sudeste, um paleocanal que, segundo Furtado *et al.* (1996), seria, então, a rota preferencial ao avanço do mar durante a transgressão e, constituir-se-ia, atualmente, na rota para ingresso da águas frias de fundo como a ACAS (Água Central do Atlântico Sul).

- SISTEMA ESTUARINO DE SANTOS-SÃO VICENTE

O Porto de Santos está inserido no Sistema Estuarino de Santos-São Vicente, uma região que apresenta intensa influência antrópica resultante das atividades portuárias, do Pólo Industrial de Cubatão e da urbanização.

Os múltiplos usos da região resultaram na introdução de diversos contaminantes no ambiente que, uma vez no sistema aquático, tendem a permanecer um curto período na coluna d'água, precipitando e se acumulando no sedimento. Além disso, o processo de assoreamento no estuário é existente, levando à necessidade de contínuas dragagens no canal de navegação do porto.

Enquanto nos trechos mais à montante prevalecem planícies, terraços mais estreitos, canal principal do rio mais entalhado e perfil longitudinal de declividade pouco mais acentuada, nos trechos à jusante, as planícies são mais largas, originadas predominantemente a partir de vales afogados pela sedimentação marinha, com muito baixo gradiente topográfico e, conseqüentemente, as águas encontram maiores dificuldades para escoar na direção do mar.

A área de estudo está situada na região que compreende a Serra de Paranapiacaba-Cubatão, que integra o conjunto de relevos da Serra do Mar e os interflúvios das bacias dos rios Cubatão e Moji.

É cortada pela Zona de Falhamento de Cubatão (Sadowski, 1974), que se prolonga pelo alinhamento dos vales dos rios Moji e Cubatão (Figura 5.1.6.5-1), dividindo-se em dois blocos estrutural e litologicamente distintos: o Bloco Norte, constituído por ectinitos e migmatitos essencialmente estromatíticos, e o Bloco Sul, composto por migmatitos essencialmente ofalmíticos e de paleossoma de composição gnáissica.

Densos núcleos habitacionais, conhecidos por "Bairros Cotas", estão localizados nas vertentes da bacia do Rio Cubatão, sobre depósitos de encosta e em áreas do Parque Estadual da Serra do Mar.

Figura 5.1.6.5-1 Região da Zona de Falhamento de Cubatão (Sadowski, 1974), que se prolonga pelo alinhamento dos vales dos rios Moji e Cubatão.



Fonte: Extraído de Ribeiro (2006).

A planície costeira no interior do Estuário Santista é formada por sedimentos marinhos correlatos à Formação Cananéia (Transgressão-Regressão Cananéia, pleistocênica) e à Formação Ilha Comprida (Transgressão-Regressão Santos, holocênica), englobando sedimentos lagunares e fluviais holocênicos e atuais (Suguió & Martin, 1978). Em Cubatão predominam sedimentos lagunares fluviais e mistos, com a maior parte da área urbana assentada nesta planície.

Verifica-se forte atuação da poluição nas vertentes situadas na Serra de Paranapiacaba-Cubatão frontal à planície costeira/estuário e no baixo curso do Rio Moji. Kerret *et al.* (2001) destacam que as escarpas da Serra de Paranapiacaba-Cubatão são diretamente afetadas pela emissão de aerossóis, vapor d'água e diversos poluentes provenientes do Pólo Industrial de Cubatão. Tal fato tem provocado a contaminação dos solos e a degradação da Mata Atlântica, aumentando a deflagração de processos erosivos.

Outros fatores predisponentes ao aumento das evidências de processos erosivos são a variabilidade litológica existente neste trecho, a frequência de facetas triangulares e a ocorrência de geração de família de facetas.

Como outras possíveis causas de deflagração de evidências de processos erosivos na área de estudo, Fúlfaro *et al.* (1974) sugerem que o soerguimento da Serra do Mar em São Paulo pode provocar mudanças naturais na inclinação das encostas, resultando no aparecimento de fenômenos de instabilidade. Hasui *et al.* (1994) sugerem que as estruturas NE e NW são as que se destacam como os maiores problemas geotécnicos da Serra do Mar na região adjacente ao Estuário Santista.

Na implantação dos túneis na segunda pista da Rodovia dos Imigrantes (ECOVIAS, 2001), as zonas geomecânicas consideradas mais críticas são aquelas associadas às estruturas de direção NW.

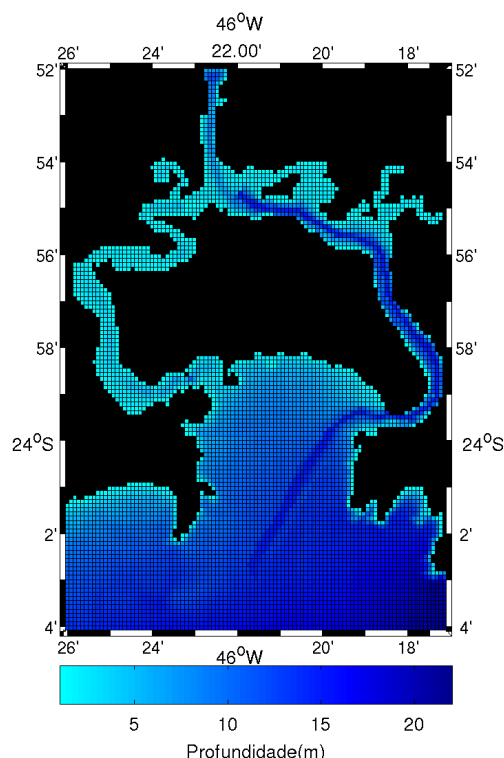
Souza (2003) alerta que os processos naturais (elevação atual do nível do mar) e os processos resultantes de intervenção antrópica têm provocado um desequilíbrio no balanço sedimentar do Estuário Santista. Como uma das consequências, o sistema

naturalmente tende a repor os seus sedimentos e materiais removidos, acelerando os processos erosivos à montante das bacias de drenagem.

c) METODOLOGIA

Para a caracterização sedimentológica da região estudada, foram realizadas simulações numéricas de transporte de sedimentos na região do Complexo Estuarino Santos - São Vicente e Baía de Santos (Figura 5.1.6.5-2).

Figura 5.1.6.5-2 Representação da grade utilizada no modelo numérico para a região dos canais estuarinos Santos - São Vicente e Baía de Santos.



As simulações numéricas foram realizadas utilizando o modelo numérico ROMS, sigla em inglês para Sistema de Modelagem Oceânica Regional (*Regional Ocean Modeling System*), a partir de dados de entrada hidrodinâmicos fornecidos pelas simulações do modelo numérico POM, sigla em inglês para Modelo Numérico de Princeton (*Princeton Ocean Model*) – descritos no item 5.1.6.3, e dados sobre a composição do fundo oceânico e de aporte de sedimentos do canal do Porto de Santos obtidas em IME (2008).

Informações sobre ondas (*i.e.* altura significativa, direção, período e comprimento) obtidas a partir dos resultados da modelagem numérica de ondas na região do modelo numérico SWAN/WWIII – descritos no item 5.1.6.4 – foram utilizadas na modelagem do transporte de sedimentos. Porém, como o alto estuário de Santos – São Vicente não sofre qualquer tipo de ação de ondas vindas do oceano, pelo fato de ser uma área muito abrigada, não serão apresentados resultados relativos a diferentes cenários de ondas incidentes na região.

- MODELO NUMÉRICO - REGIONAL OCEAN MODELING SYSTEM ROMS

O *Regional Ocean Modeling System (ROMS)* é um modelo hidrostático, de equações primitivas e superfície livre, que utiliza coordenadas horizontais ortogonais curvilíneas e coordenada vertical *S* (*terrain-following*), baseada no Rutgers University Model (SCRUM), descrita por Song & Haidvogel (1994). A coordenada *S* é uma generalização da



coordenada sigma, que permite resolução variável principalmente nas regiões de camada de Ekman de fundo e superfície, acomodando de forma aceitável a geometria da linha de costa e a topografia do fundo.

O ROMS representa um significativo avanço em termos de solução do problema de erros no gradiente de pressão que podem ocorrer quando da aplicação da coordenada sigma tradicional (Shchepetkin & McWilliams, 2003). O modelo tem sido constantemente retrabalhado de forma a incluir, por exemplo, esquemas de advecção de altas ordens, algoritmos de maior acurácia e determinação de parametrizações de escala *subgrid* (Shchepetkin & McWilliams, 2004).

O ROMS resolve as equações primitivas hidrodinâmicas e termodinâmicas no sistema de coordenadas horizontais "*Earth-centered rotated Cartesian*"; considera a variação meridional do parâmetro de Coriolis (aproximação do plano β); assume aproximações de águas rasas e de Boussinesq, restringindo o efeito da perturbação de densidade à componente vertical da equação do momento.

As equações utilizadas, bem como suas condições de contorno, são resolvidas por diferenças finitas, segundo um esquema baseado na grade C de Arakawa. As equações a diferenças finitas conservam energia, massa e quantidade de movimento.

Similar a outros modelos oceânicos (ex. POM, MICOM, POP e SCRUM), o ROMS utiliza esquema explícito, com um passo de tempo pequeno para resolver elevação de superfície e momento barotrópico. Considera um passo de tempo maior para resolver temperatura, salinidade e momento baroclínico.

Diferentemente dos outros modelos, o ROMS tem dois procedimentos no cálculo da média temporal para o modo barotrópico, que satisfaz a equação tridimensional da continuidade num modelo finito e passo de tempo finito. Este algoritmo possibilita o aumento do passo de tempo (Shchepetkin & McWilliams, 2003), fazendo com que esse modelo tenha um ganho de tempo computacional significativo.

Incorpora um esquema e fechamento turbulento para obtenção de uma parametrização realista dos processos de mistura vertical. Por meio de submodelos, os coeficientes de difusão vertical de momento e de calor são obtidos das equações para a energia cinética turbulenta e macro escala turbulenta. O fechamento turbulento assume que várias escalas de turbulência se fazem presentes. Estas se relacionam entre si, e todas elas com a macro-escala turbulenta.

Para a quantidade de movimento e para conservação de sal e calor, coeficientes de mistura horizontal são usados para parametrizar todos os processos que não são resolvidos na grade numérica. Esses coeficientes de mistura são escolhidos de modo a prover mínimo alisamento, sem excessiva atenuação dos processos físicos reais. Uma vez que a grade numérica pode ser não uniforme, os coeficientes de mistura devem variar proporcionalmente, de modo a manter o número de Reynolds constante.

O ROMS representa o sedimento utilizando categorias separadas de sedimentos coesivos e não-coesivos, cada um com ilimitado número de classes de materiais, que caracterizam o diâmetro do grão, sua densidade, velocidade de deposição, tensão de cisalhamento crítica para erosão e parâmetro empírico de erosão (Warner *et al.*, 2008). Essas propriedades são utilizadas pelo modelo para determinar a característica de cada camada ativa de sedimento e assim calcular sua capacidade de erosão/ressuspensão e deposição em função das condições hidrodinâmicas do local.

As condições de contorno para o ROMS são apropriadas para topografia e linha de costa irregular, para a superfície livre do mar e contornos oceânicos abertos. Inclui ainda quaisquer forçantes, como vento, fluxo de calor, aporte fluvial, rugosidade de fundo, entre outras.

- SEDIMENTO DE FUNDO

O sedimento de fundo é representado por variáveis tridimensionais com um número fixo de camadas abaixo de célula horizontal do modelo. Cada célula de cada camada no fundo é inicializada com dados de altura da camada, distribuição de cada classe de sedimento, porosidade e idade do sedimento. A massa de cada classe de sedimento em cada célula pode ser determinada através destes valores mais a densidade do grão.

A formulação de sedimento de fundo também inclui duas variáveis bidimensionais que descrevem outras propriedades do fundo marinho, como diâmetro médio dos grãos, densidade média, velocidade de decantação, entre outras.

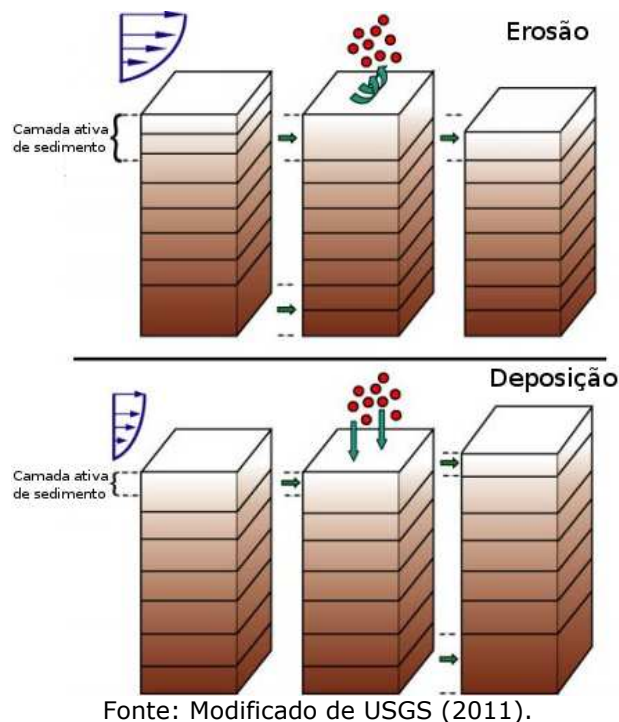
A massa de cada classe de sedimento disponível para transporte é limitada na camada mais superficial do sedimento de fundo. Ademais, o sedimento em suspensão que deposita é adicionado apenas na camada mais superficial do sedimento de fundo.

- DISPERSÃO DE SEDIMENTO EM SUSPENSÃO

O sedimento suspenso na coluna d'água é transportado como um traçador conservativo, como temperatura e salinidade, sendo considerada sua deposição no fundo e a sua disponibilização para a coluna d'água através do processo de erosão/deposição.

A Figura 5.1.6.5-3 apresenta o esquema do processo de erosão e deposição utilizado pelo ROMS.

Figura 5.1.6.5-3 Esquema dos processos de erosão e deposição da camada ativa do sedimento de fundo utilizado pelo modelo numérico ROMS.



- PROCESSO DE EROSÃO

O modelo numérico ROMS implementa dois diferentes métodos de modelar o processo de erosão: 1) Formulação do fluxo unidirecional de Meyer-Peter Müller (1948); e 2) Fórmula de Soulsby e Damgaard (2005) que contabiliza os efeitos combinados de correntes e de ondas.



A formulação depende de características de classes individuais de sedimentos, incluindo diâmetro médio do sedimento (D_{50}), densidade do grão (ρ_s), densidade específica na água ($s = \rho_s / \rho$) e tensão crítica de erosão (τ_e). Taxas de transporte adimensionais Φ são calculadas para cada classe de sedimento e convertidas para taxas de transporte de erosão (q_{bl}) por:

$$q_{bl} = \Phi \sqrt{(s - 1) g} D_{50}^3 \rho_s$$

Estas, por sua vez, são quantidades vetoriais horizontais com direções que correspondem à combinação vetorial da erosão de fundo.

- DADOS DE ENTRADA DE SEDIMENTOS

Dados de composição do fundo do canal do Porto de Santos, como granulometria, concentrações de cada fração de sedimento, densidade dos grãos e dados de velocidade de decantação das partículas, foram utilizados para compor as condições de fundo para a região e como condições iniciais sedimentológicas necessárias para a alimentação inicial do modelo numérico.

A caracterização do sedimento quanto às frações de areia e materiais finos (*i.e.* silte com diâmetro médio de 0,016 mm e argila com diâmetro médio de 0,004 mm), presentes no fundo, foi obtida a partir dos dados de granulometria dos sedimentos de superfície na região disponíveis em IME (2008).

As Figuras 5.1.6.5-4, 5.1.6.5-5 e 5.1.6.5-6 apresentam os mapas para a região estuarina e a Baía de Santos das frações no fundo de argila, silte e areia muito fina (diâmetro médio de 0.0935 mm), respectivamente, utilizados como informações iniciais sedimentológicas do fundo marinho da região.

Figura 5.1.6.5-4 Mapas de distribuição de argila no fundo, para a região estuarina e a Baía de Santos, com a representação da grade do modelo numérico utilizado.

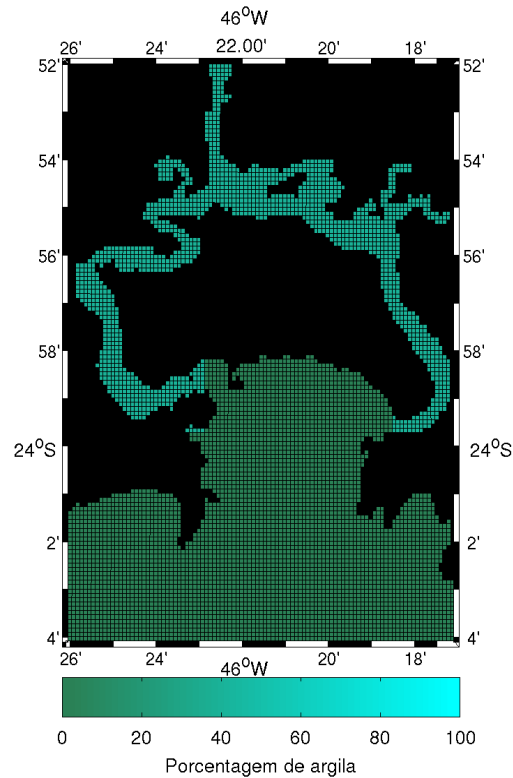


Figura 5.1.6.5-5 Mapas de distribuição de silte no fundo, para a região estuarina e a Baía de Santos, com a representação da grade do modelo numérico utilizado.

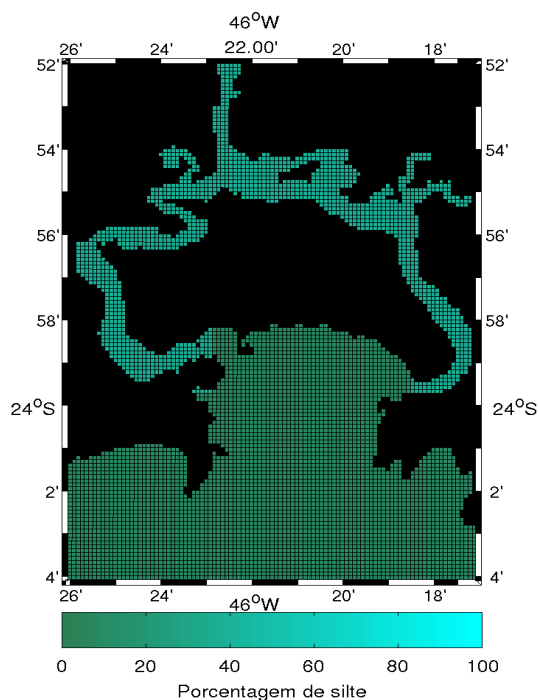
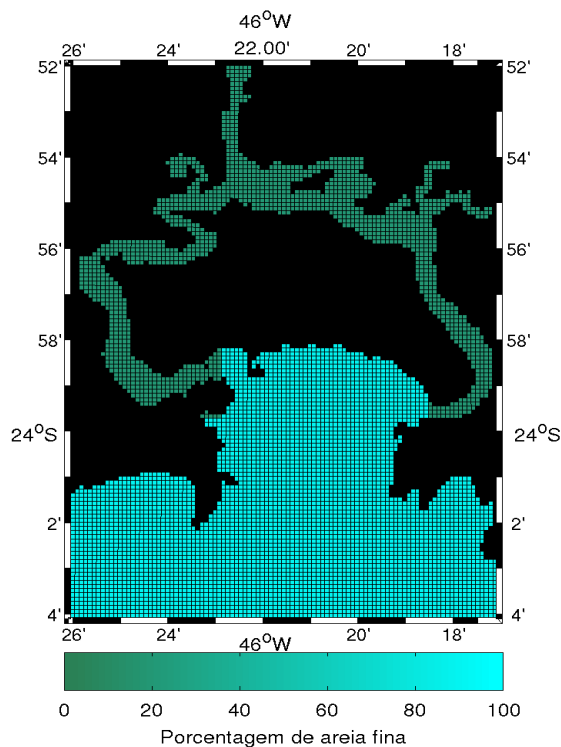


Figura 5.1.6.5-6 Mapa de distribuição de areia fina no fundo para a região estuarina e a Baía de Santos, com a representação da grade do modelo numérico utilizado.



Os dados de aporte de materiais sólidos na região também foram computados nas simulações a partir dos dados de vazão de rios na região, de acordo com o Quadro 5.1.6.5-1, apresentados originalmente em IME (2008).

Quadro 5.1.6.5-1 Relação das vazões mínimas, médias e máximas e de vazões sólidas para os rios/córregos inseridos no modelo numérico.

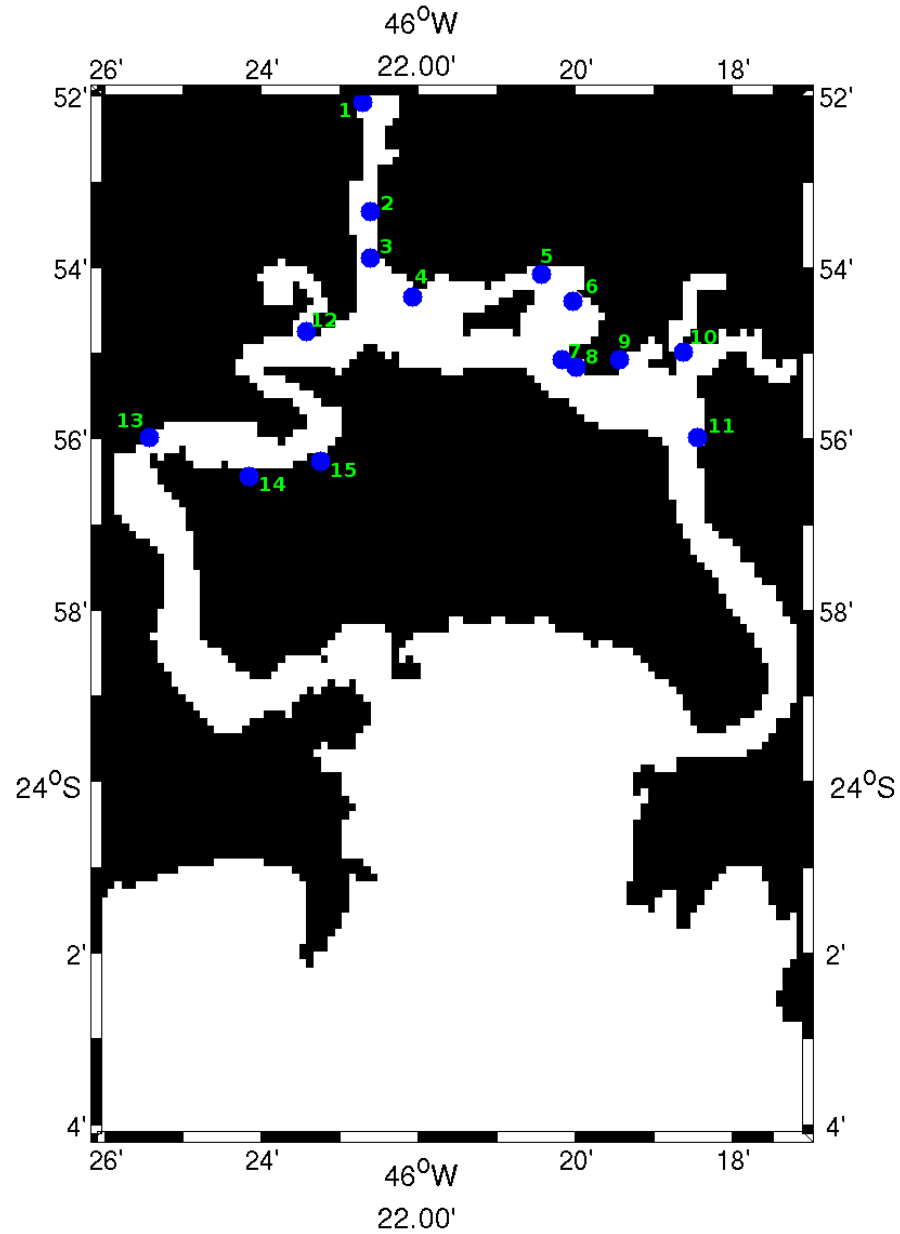
Rio/Córrego	E	N	Mínima (m3/s)	Média (m3/s)	máxima (m3/s)	Vazão Sólida (m3/ano)
Córrego das Neves	363.957	7357.061	0.021	0.084	12.47	2715.93
Rio Agari	368.613	7352.603	0.097	0.396	37.02	66920.38
Rio Cacheta	357.108	7351.822	0.042	0.172	47.61	32255.65
Rio Cubatão	356.090	7359.034	1.256	5.142	214.23	737694.35
Rio dos Bagres	358.931	7352.240	0.093	0.382	45.73	63478.36
Rio Jurubatuba	366.098	7358.075	0.98	4.012	90.32	56208.01
Rio Pereque	356.125	7359.100	0.535	2.191	98.82	35932.92
Rio 9	351.602	7353.506	0.016	0.065	11.99	14129.78
Rio 10	354.061	7356.380	0.009	0.038	7	4967.3
Rio 15	362.953	7358.473	0.013	0.054	7.45	1769.91
Rio 16	363.108	7355.889	0.009	0.037	5.14	795.89
Rio 17	362.202	7356.815	0.008	0.034	4.85	670.36
Rio 18	362.245	7358.263	0.021	0.084	10.59	13631.26
Rio 19	365.318	7358.240	0.016	0.067	8.47	14819.33
Rio 20	365.469	7357.375	0.007	0.029	3.67	4263.64
Rio 21	366.112	7357.999	0.011	0.045	5.29	506.45
Rio 22	365.940	7355.938	0.004	0.016	2.11	2071.92
Rio 23	368.704	7357.461	0.104	0.426	31.51	4873.36
Rio 24	368.889	7356.854	0.022	0.088	10.04	849.27
Rio 28	351.264	7355.296	0.004	0.016	3.56	666.68
Rio 29	357.555	7359.963	0.01	0.042	7.03	8030.33
Rio 31	357.192	7358.926	0.002	0.009	1.73	197.54
Rio 34	362.072	7356.816	0.002	0.007	1.49	136.38

Fonte: Adaptado de IME (2008).

Utilizando os dados descritos no Quadro 5.1.6.5-1, no decorrer de cada simulação de 31 dias que será descrita a seguir, foram inseridos 5 períodos de doze horas cada um em condições de vazão máxima para o mês de janeiro e 3 períodos de doze horas cada um em condições de vazão máxima para o mês de julho. O objetivo é reproduzir a ação de chuvas na região, as quais aumentam significativamente a vazão de água e materiais sólidos dos afluentes que chegam ao estuário, transformando afluentes de pequena vazão em afluentes caudalosos e torrenciais, transportando grandes quantidades de água e materiais sólidos em pequenos períodos de tempo (EPUSPI-DAEE, 1966).

Devido ao grande número de afluentes na região, foram inseridas 15 fontes de água e sedimentos representativos da vazão somada de afluentes próximos à região. A Figura 5.1.6.5-7 apresenta a localização das fontes de água e sedimento inseridas no modelo.

Figura 5.1.6.5-7 Mapa com a localização dos pontos de aporte de água e sedimentos (pontos em azul) utilizados como dados de entrada do modelo.





O Quadro 5.1.6.5-2 apresenta a localização geográfica dos pontos de aporte de água e sedimentos inseridos no modelo numérico.

Quadro 5.1.6.5-2 Localização geográfica dos pontos de água e sedimentos inseridos no modelo numérico. Sistema de coordenada de referência WGS84.

Pontos de aporte de água e sedimentos	E	N
1	359.603	7.359.219
2	360.200	7.356.659
3	360.279	7.355.854
4	361.170	7.355.155
5	363.701	7.355.714
6	364.420	7.355.317
7	364.163	7.354.047
8	364.381	7.353.656
9	365.454	7.353.752
10	366.631	7.354.178
11	366.919	7.352.147
12	358.531	7.354.233
13	354.248	7.351.901
14	357.124	7.351.691
15	358.919	7.352.099

- TEMPO DE SIMULAÇÃO

Para a região estudada, foram realizadas simulações de transporte de sedimentos com condições hidrodinâmicas e de ondas representativas aos períodos de Janeiro e Julho de 2009, com o objetivo de se caracterizar o transporte de sedimentos para condições típicas de verão e inverno.

d) RESULTADOS

Abaixo seguem os resultados das simulações numéricas do transporte de sedimentos para a região dos canais do alto Estuário de Santos - São Vicente, para os cenários de marés de sizígia e quadratura em enchente e vazante, período de entrada de frente fria e períodos de inverno e verão, onde a descarga fluvial tem comportamento diferenciado entre as temporadas.

- SEDIMENTO EM SUSPENSÃO

- ✓ MARÉ DE SIZÍGIA

As Figuras 5.1.6.5-8 a 5.1.6.5-43 apresentam os mapas de concentração média na coluna d'água de areia muito fina (0,0935 mm), silte (0,016 mm) e argila (0,004 mm) em 10 de Janeiro de 2009, das 04:00 h até 15:00 h, referente ao período de um ciclo de maré de sizígia.

A Figura 5.1.6.5-44 apresenta a evolução do nível médio do mar na região do alto estuário para o período apresentado acima.

- ✓ MARÉ DE QUADRATURA

As Figuras 5.1.6.5-45 a 5.1.6.5-80 apresentam os mapas de concentração média na coluna d'água de areia muito fina (0,0935 mm), silte (0,016 mm) e argila (0,004 mm) de



19 de Janeiro de 2009 às 21:00 h até 20 de Janeiro de 2009 às 09:00 h, referente ao período de um ciclo de maré de quadratura.

A Figura 5.1.6.5-81 apresenta a evolução do nível médio do mar na região do alto estuário para o período apresentado acima.

✓ ENTRADA DE FRENTE FRIA

As Figuras 5.1.6.5-84 a 5.1.6.5-86 e 5.1.6.5-87 a 5.1.6.5-89 (mapas do domínio inteiro simulado e mapas do alto estuário, respectivamente), apresentam os mapas de concentração média na coluna d'água de argila (0,004 mm), silte (0,016 mm) e areia muito fina (0,0935 mm), em 24 de Julho de 2009 às 11:00, referente ao período de passagem de uma frente fria na região.

✓ PERÍODO DE VERÃO - MÁXIMA DESCARGA FLUVIAL

As Figuras 5.1.6.5-90 a 5.1.6.5-92 apresentam os mapas de concentração média na coluna d'água de areia muito fina (0,0935 mm), silte (0,016 mm) e argila (0,004 mm) em 08 de Janeiro de 2009 às 01:00 h, referente ao período de máxima descarga fluvial.

✓ PERÍODO DE INVERNO - MÍNIMA DESCARGA FLUVIAL

As Figuras 5.1.6.5-93 a 5.1.6.5-95 apresentam os mapas de concentração média na coluna d'água de areia muito fina (0,0935 mm), silte (0,016 mm) e argila (0,004 mm) em 04 de Julho de 2009 às 17:00 h, referente ao período de mínima descarga fluvial.

✓ SEDIMENTO DE FUNDO

A Figura 5.1.6.5-96 e o Quadro 5.1.6.5-3 apresentam o mapa com os pontos selecionados onde foram extraídos perfis de evolução temporal da batimetria e a localização geográfica dos mesmos, respectivamente.

As Figuras 5.1.6.5-97 e 5.1.6.5-98 apresentam os gráficos de evolução da batimetria dos pontos selecionados para as simulações de Janeiro de 2009 e Julho de 2009, respectivamente.

Figura 5.1.6.5-8 Mapa de concentração média na coluna d'água de argila para o dia 10 de Janeiro de 2009 às 04:00 h.

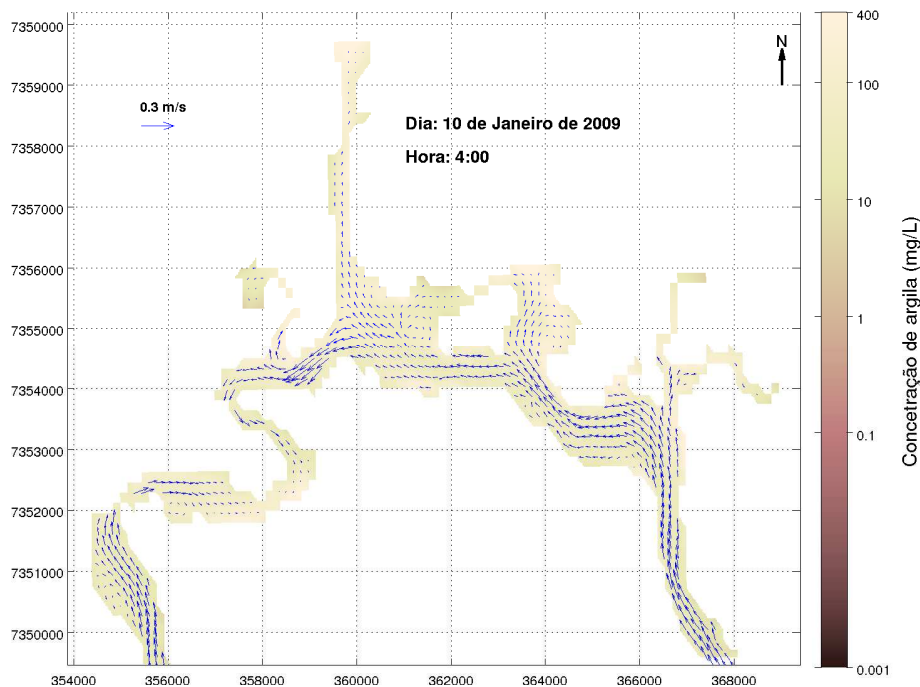


Figura 5.1.6.5-9 Mapa de concentração média na coluna d'água de argila para o dia 10 de Janeiro de 2009 às 05:00 h.

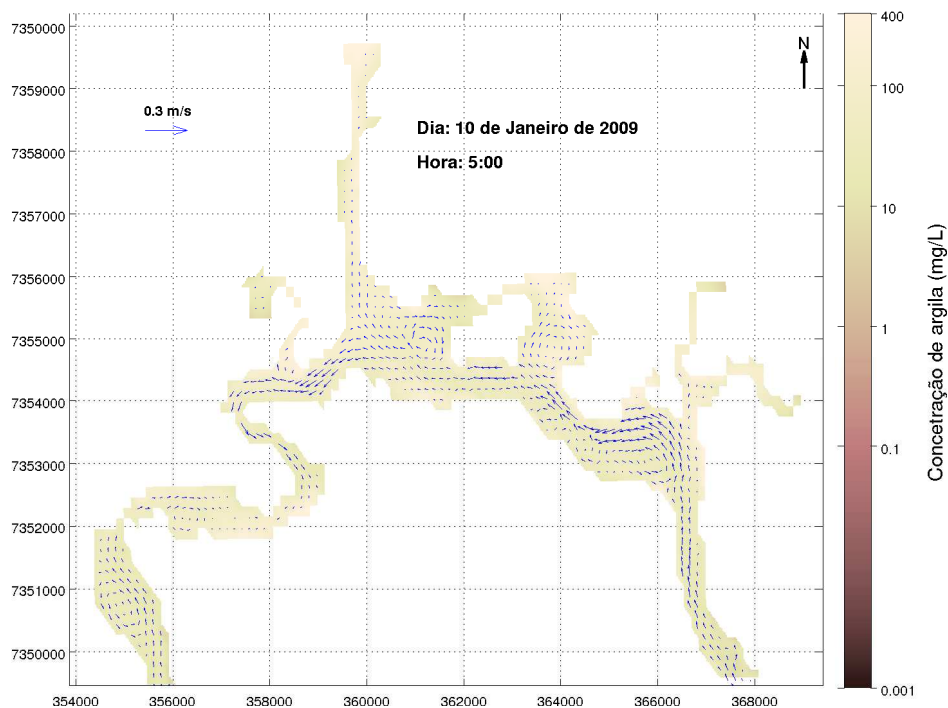


Figura 5.1.6.5-10 Mapa de concentração média na coluna d'água de argila para o dia 10 de Janeiro de 2009 às 06:00 h.

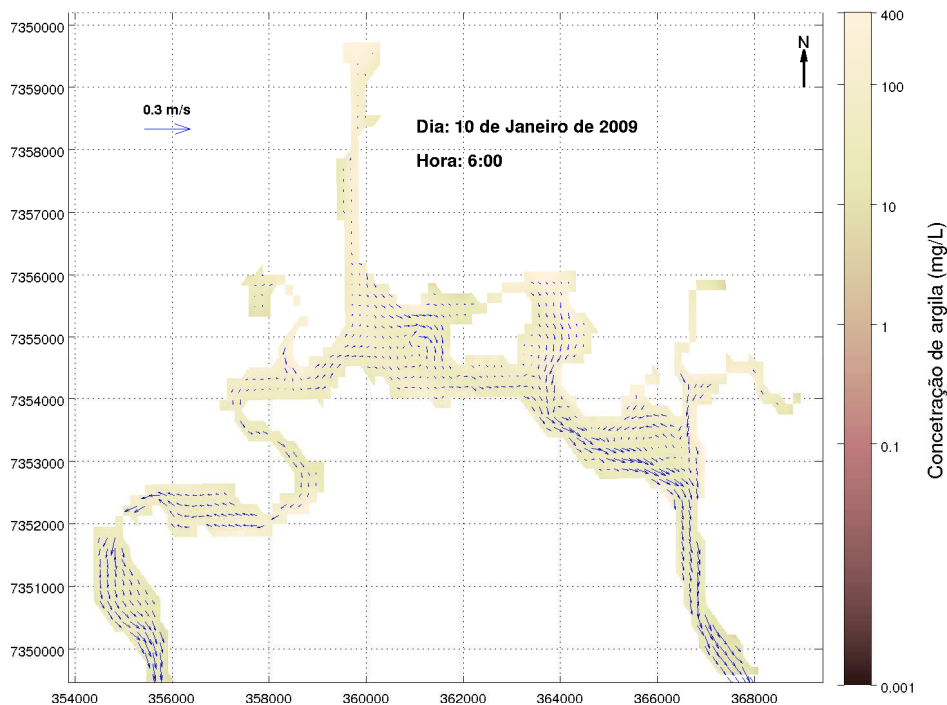


Figura 5.1.6.5-11 Mapa de concentração média na coluna d'água de argila para o dia 10 de Janeiro de 2009 às 07:00 h.

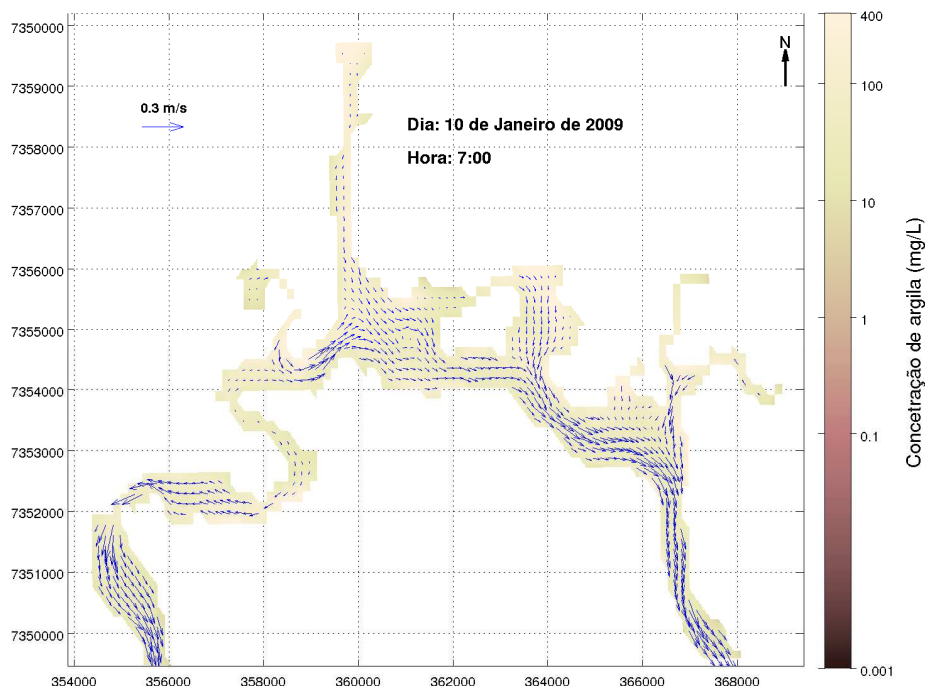


Figura 5.1.6.5-12 Mapa de concentração média na coluna d'água de argila para o dia 10 de Janeiro de 2009 às 08:00 h.

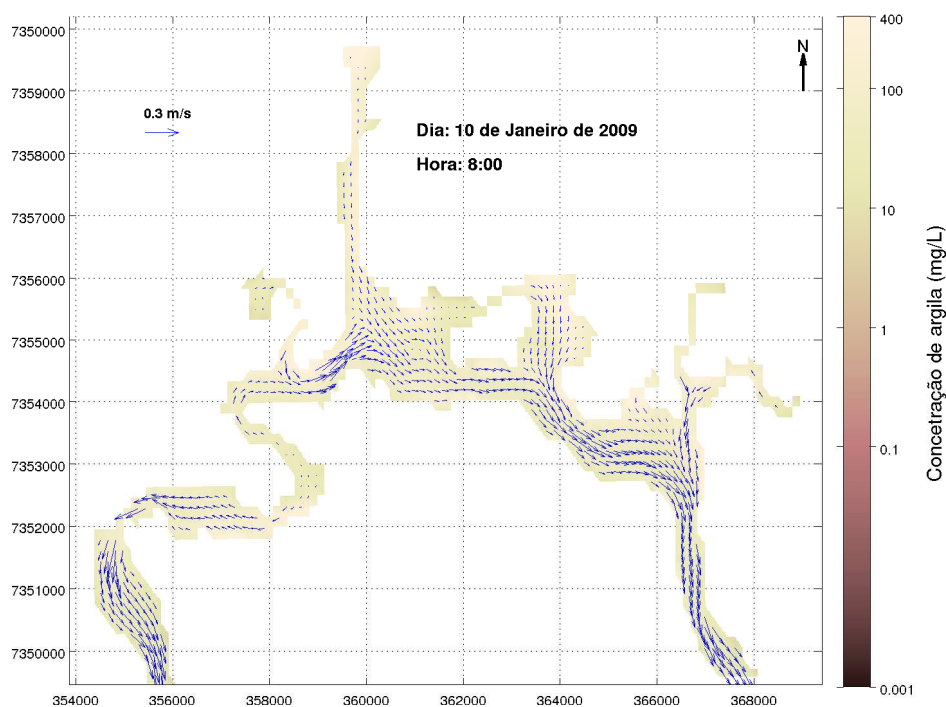


Figura 5.1.6.5-13 Mapa de concentração média na coluna d'água de argila para o dia 10 de Janeiro de 2009 às 09:00 h.

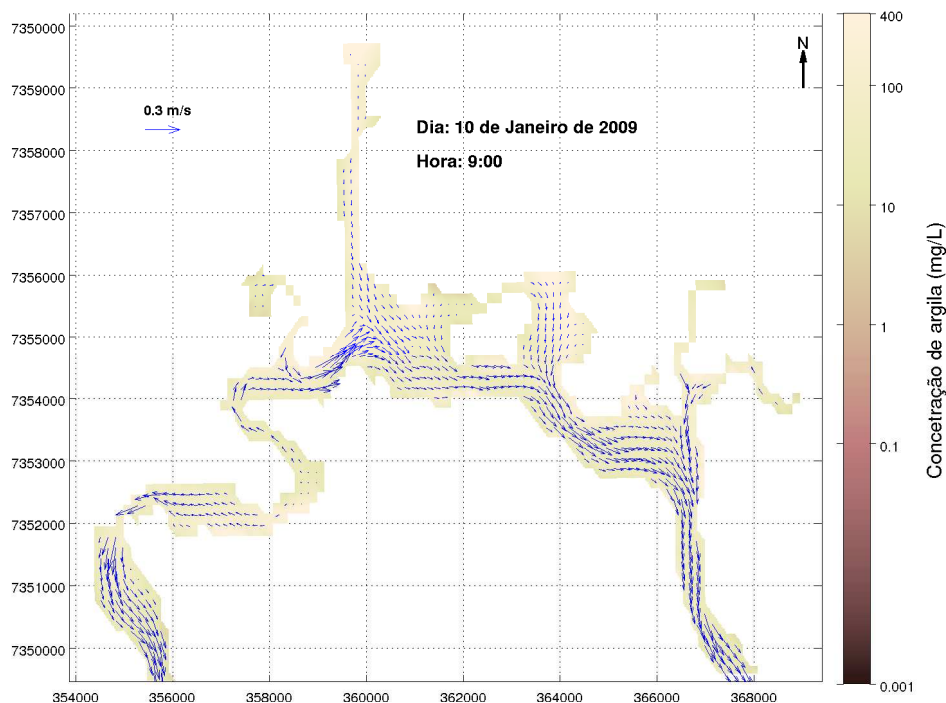


Figura 5.1.6.5-14 Mapa de concentração média na coluna d'água de argila para o dia 10 de Janeiro de 2009 às 10:00 h.

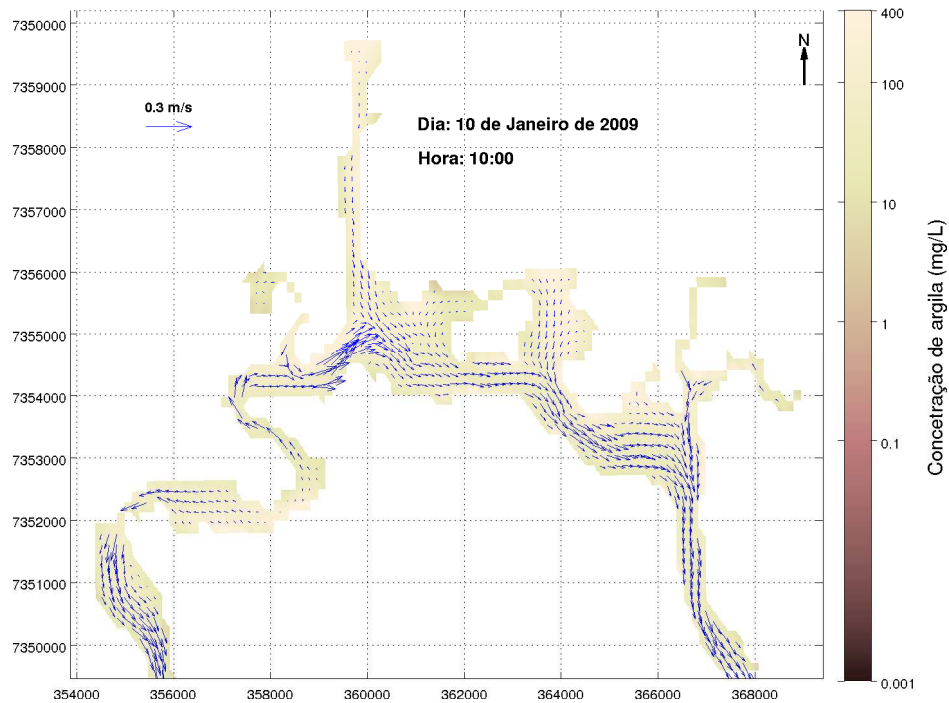


Figura 5.1.6.5-15 Mapa de concentração média na coluna d'água de argila para o dia 10 de Janeiro de 2009 às 11:00 h.

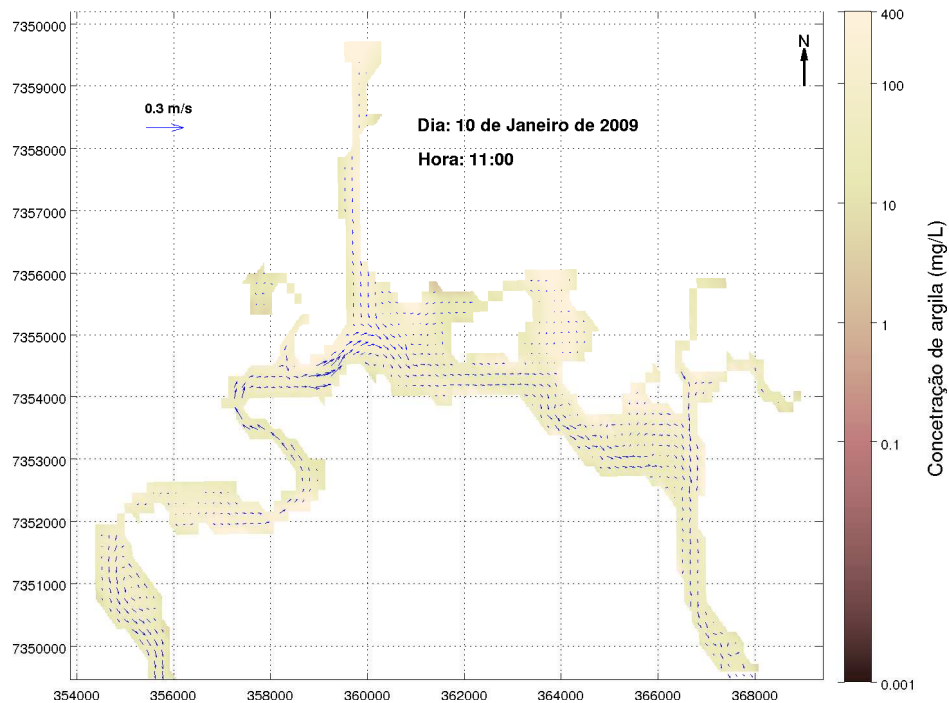


Figura 5.1.6.5-16 Mapa de concentração média na coluna d'água de argila para o dia 10 de Janeiro de 2009 às 12:00 h.

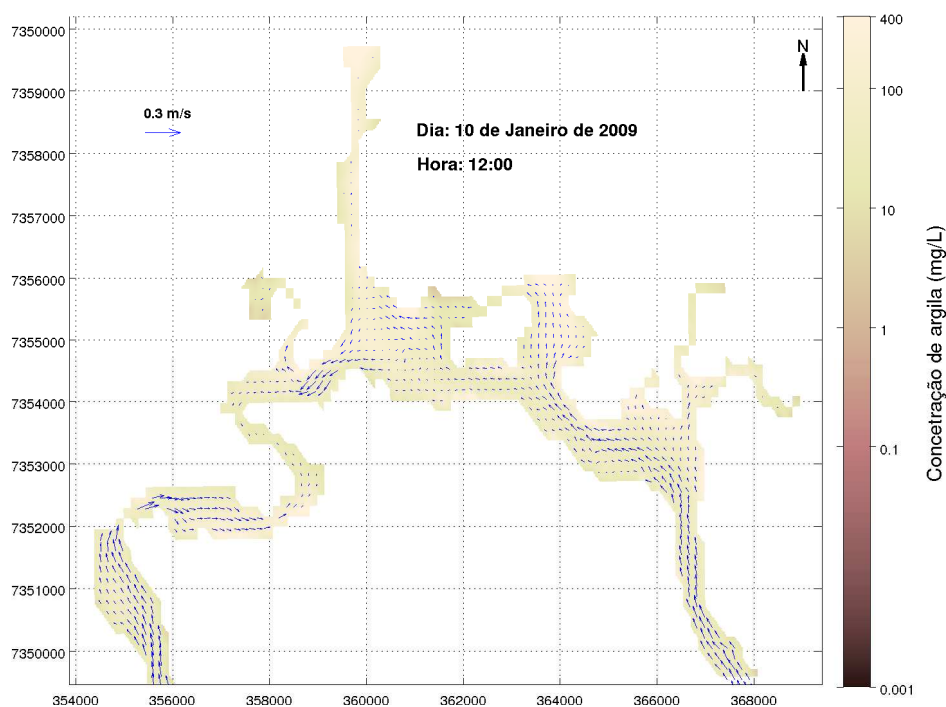


Figura 5.1.6.5-17 Mapa de concentração média na coluna d'água de argila para o dia 10 de Janeiro de 2009 às 13:00 h.

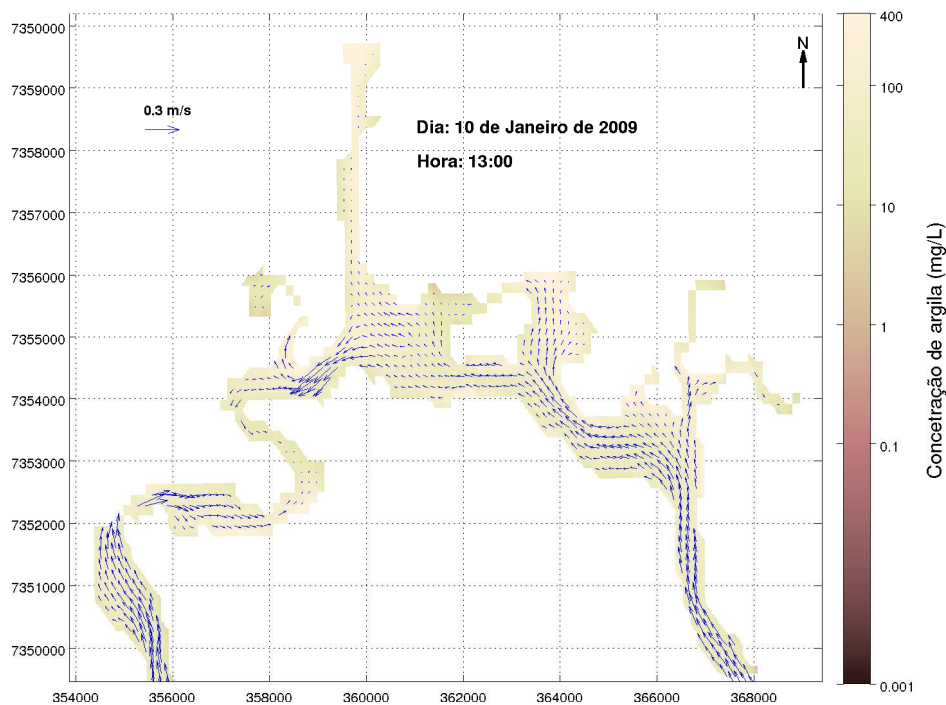


Figura 5.1.6.5-18 Mapa de concentração média na coluna d'água de argila para o dia 10 de Janeiro de 2009 às 14:00 h.

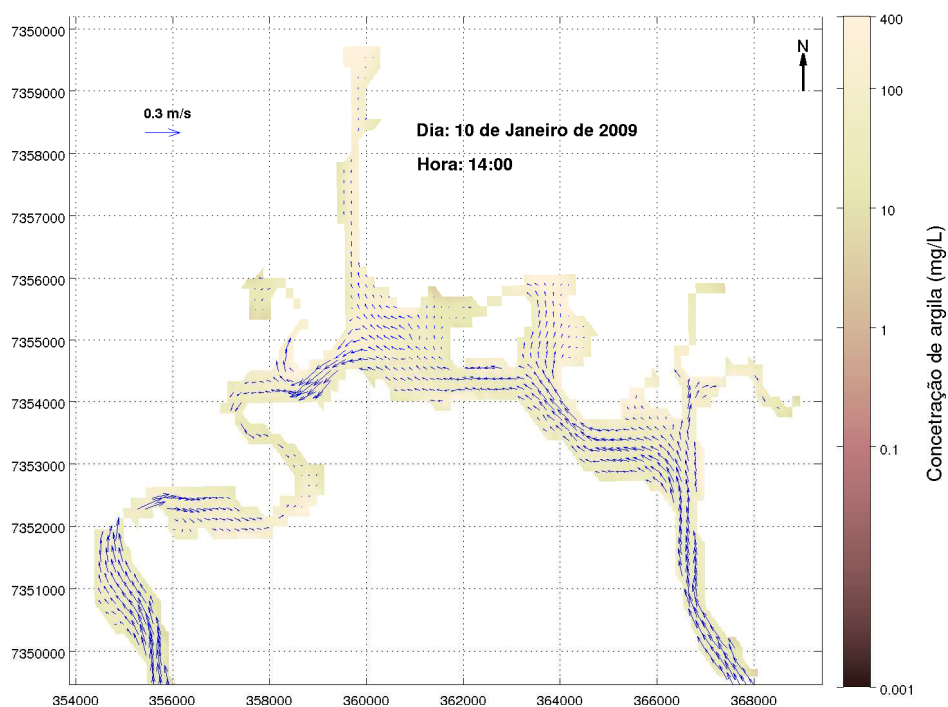


Figura 5.1.6.5-19 Mapa de concentração média na coluna d'água de argila para o dia 10 de Janeiro de 2009 às 15:00 h.

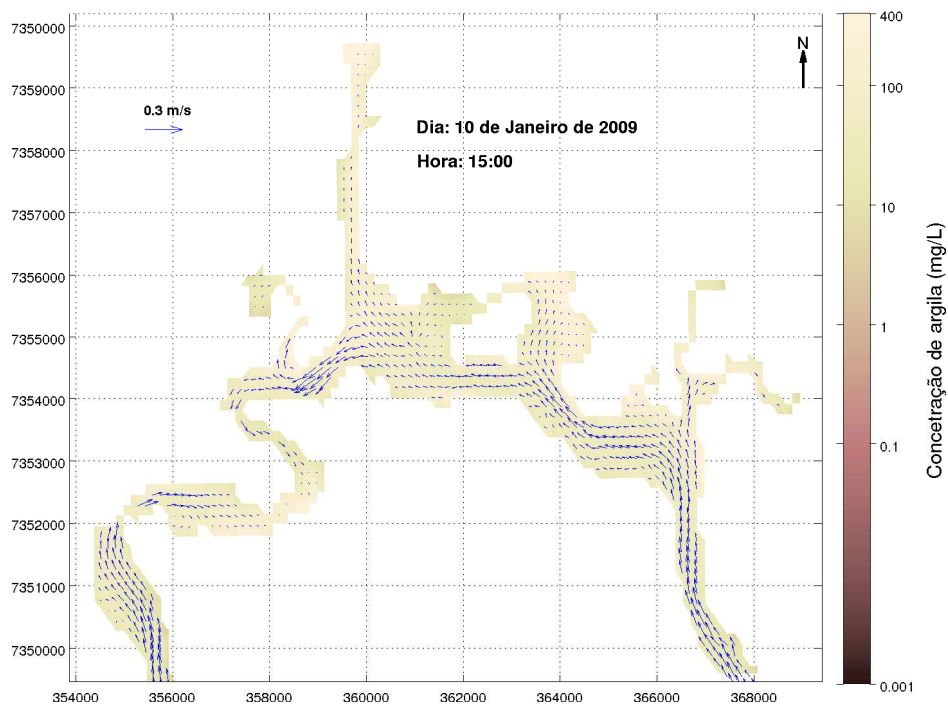


Figura 5.1.6.5-20 Mapa de concentração média na coluna d'água de silte para o dia 10 de Janeiro de 2009 às 04:00 h.

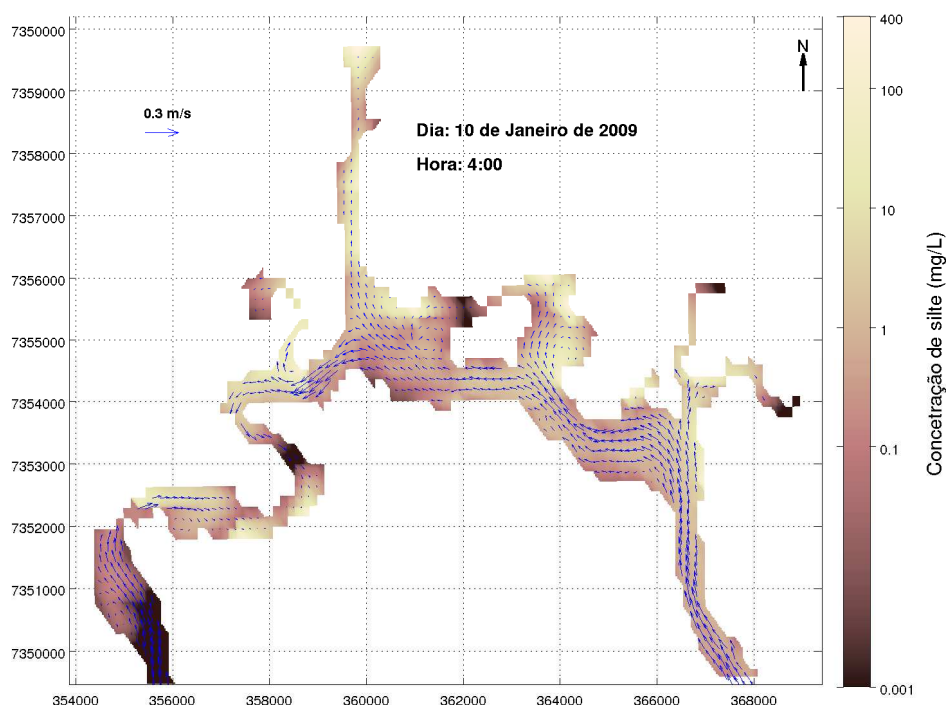


Figura 5.1.6.5-21 Mapa de concentração média na coluna d'água de silte para o dia 10 de Janeiro de 2009 às 5:00 h.

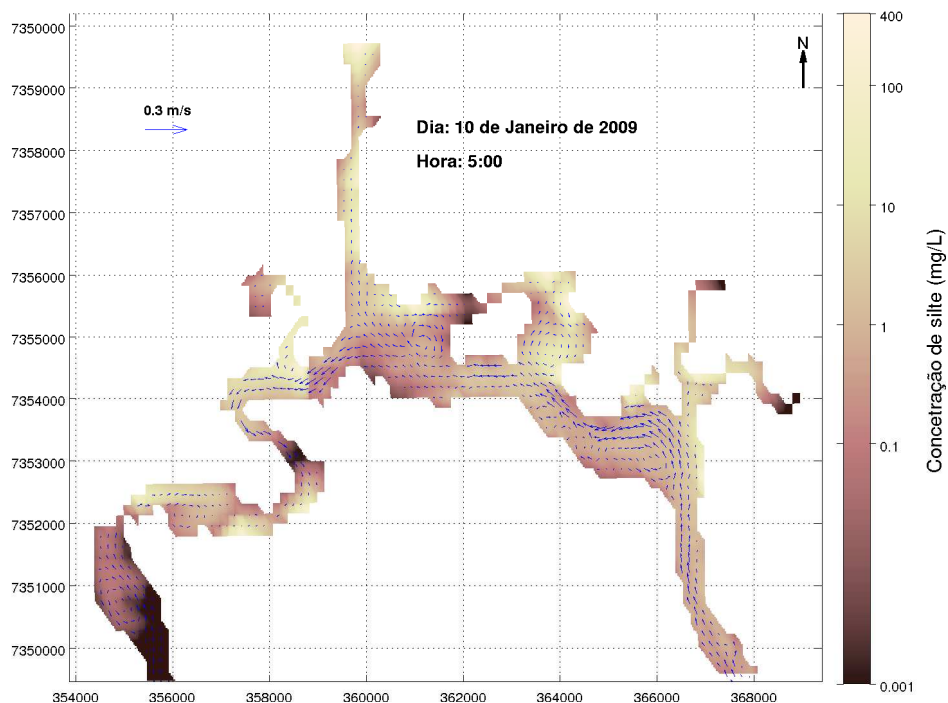


Figura 5.1.6.5-22 Mapa de concentração média na coluna d'água de silte para o dia 10 de Janeiro de 2009 às 6:00 h.

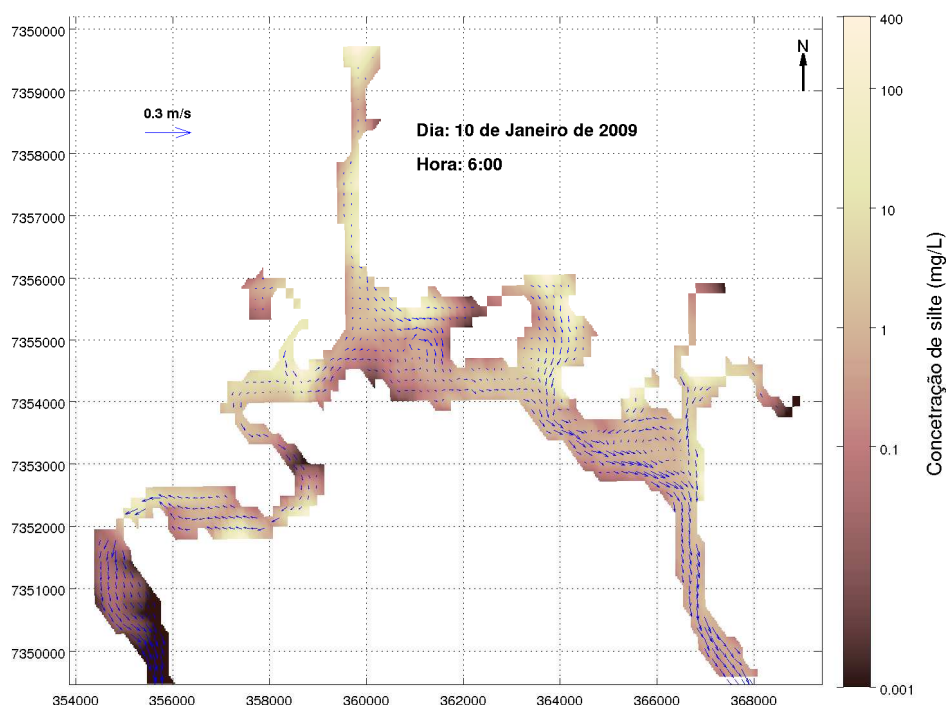


Figura 5.1.6.5-23 Mapa de concentração média na coluna d'água de silte para o dia 10 de Janeiro de 2009 às 7:00 h.

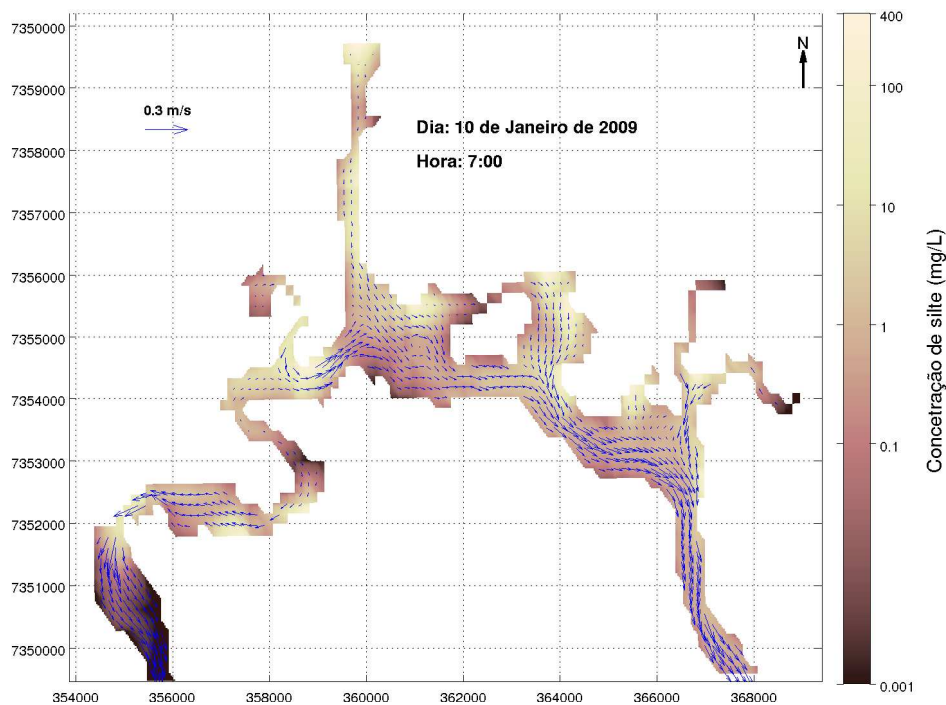


Figura 5.1.6.5-24 Mapa de concentração média na coluna d'água de silte para o dia 10 de Janeiro de 2009 às 8:00 h.

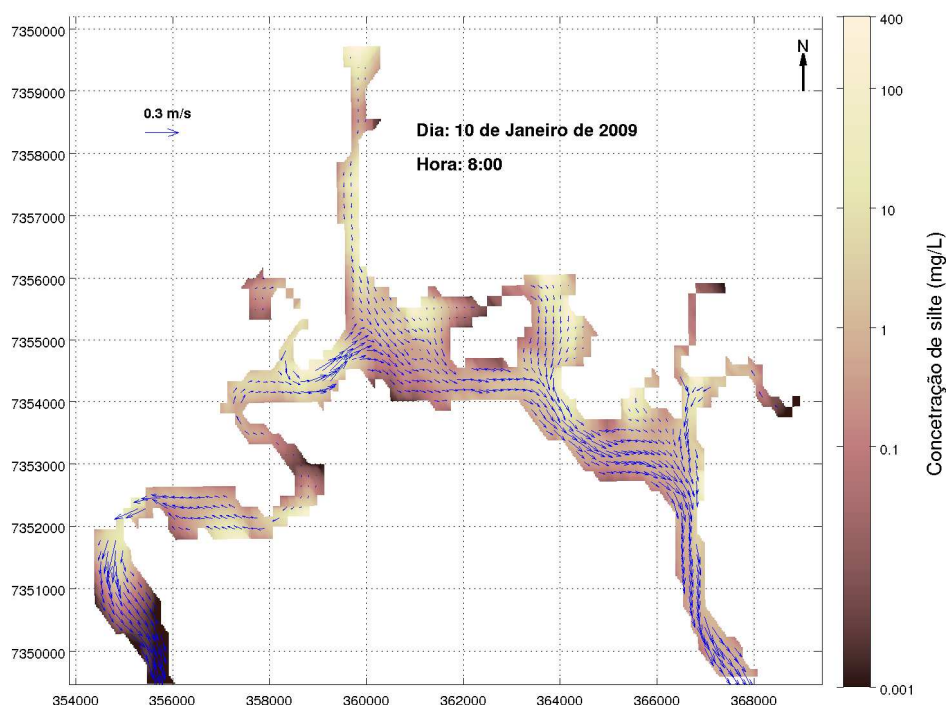


Figura 5.1.6.5-25 Mapa de concentração média na coluna d'água de silte para o dia 10 de Janeiro de 2009 às 9:00 h.

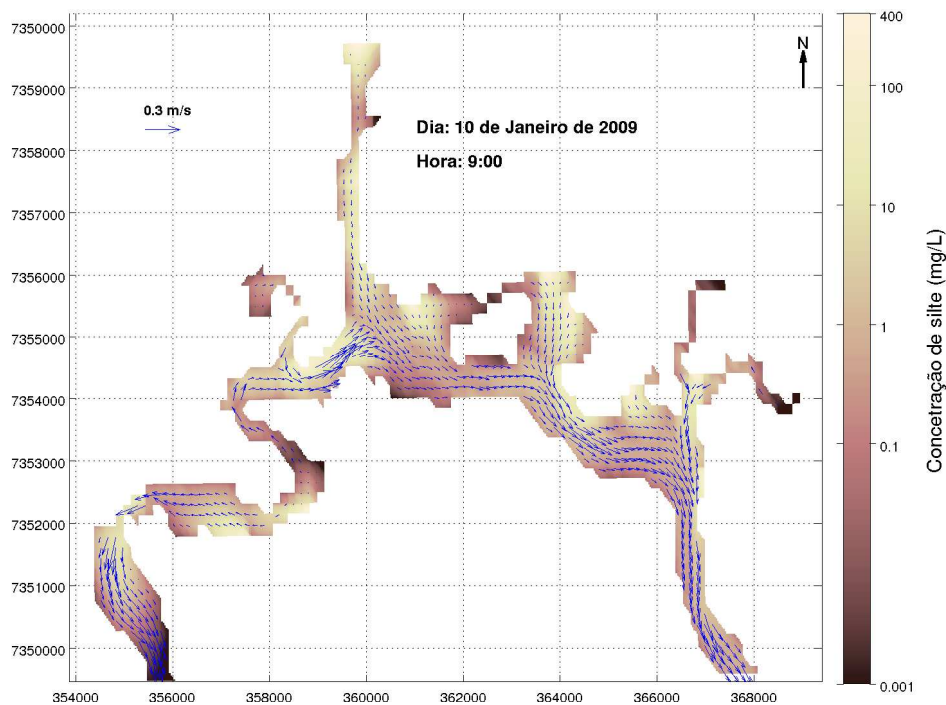


Figura 5.1.6.5-26 Mapa de concentração média na coluna d'água de silte para o dia 10 de Janeiro de 2009 às 10:00 h.

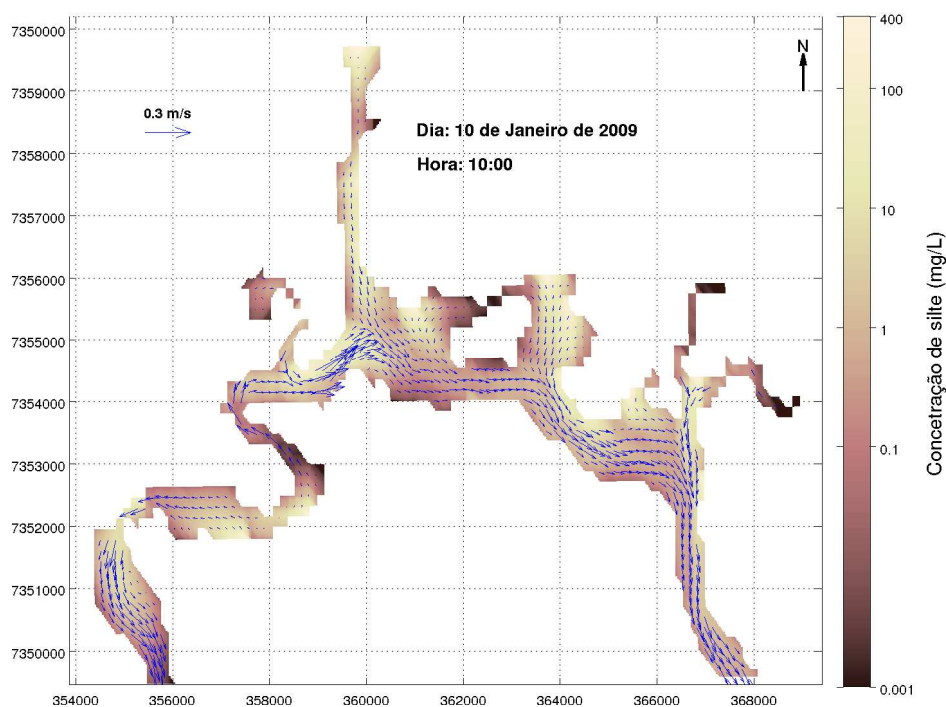


Figura 5.1.6.5-27 Mapa de concentração média na coluna d'água de silte para o dia 10 de Janeiro de 2009 às 11:00 h.

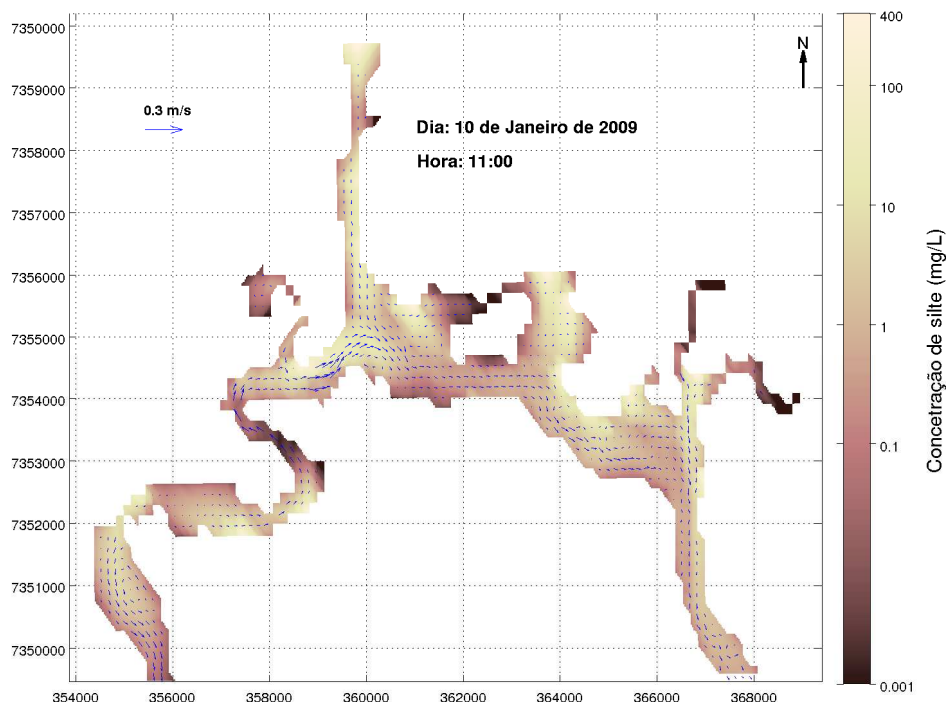


Figura 5.1.6.5-28 Mapa de concentração média na coluna d'água de silte para o dia 10 de Janeiro de 2009 às 12:00 h.

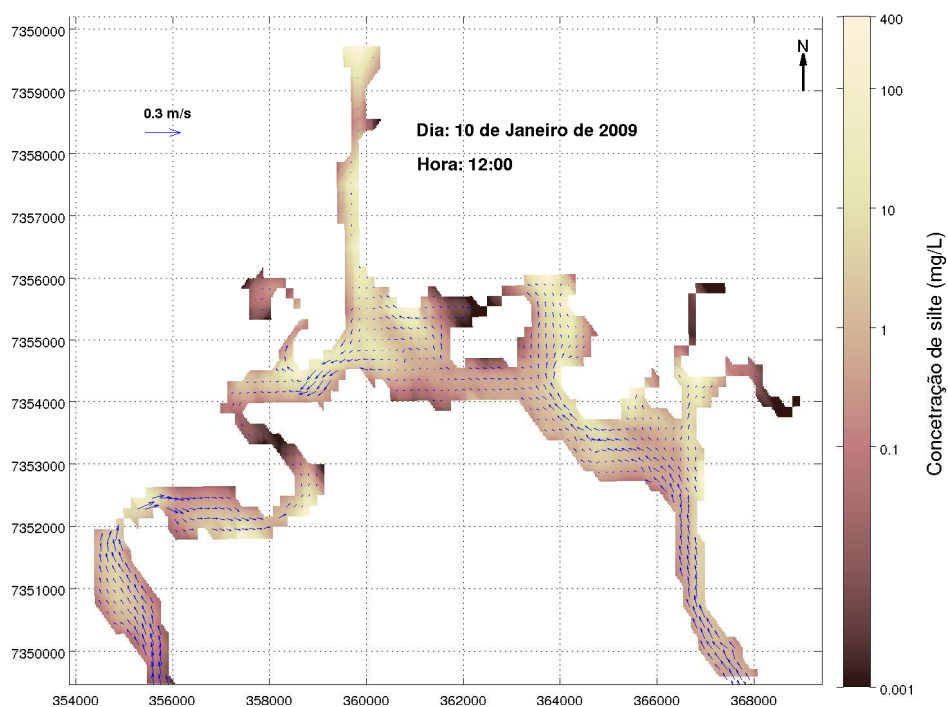


Figura 5.1.6.5-29 Mapa de concentração média na coluna d'água de silte para o dia 10 de Janeiro de 2009 às 13:00 h.

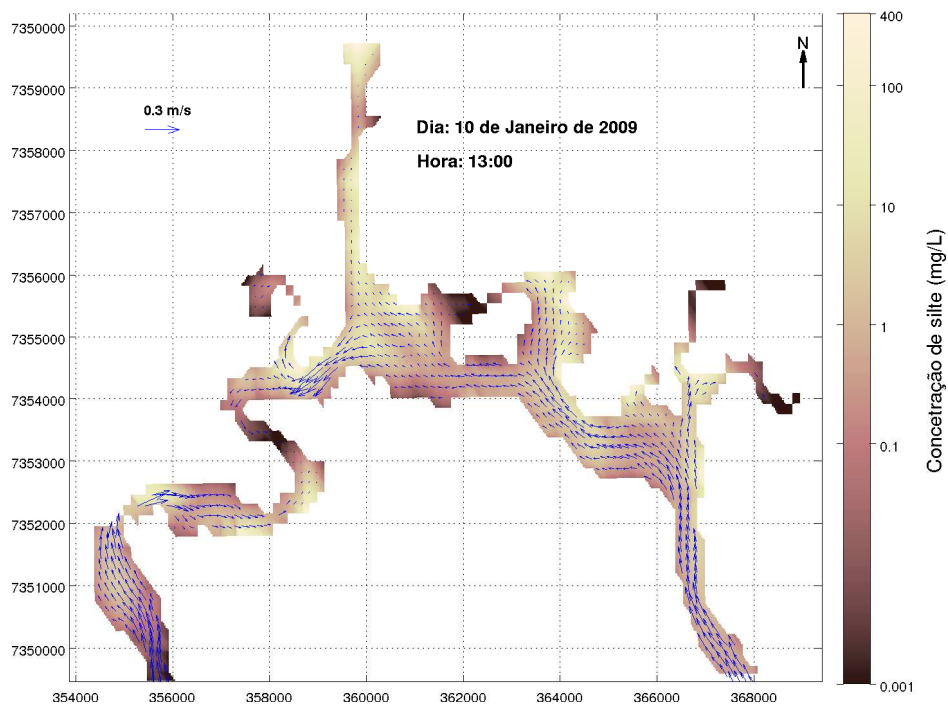


Figura 5.1.6.5-30 Mapa de concentração média na coluna d'água de silte para o dia 10 de Janeiro de 2009 às 14:00 h.

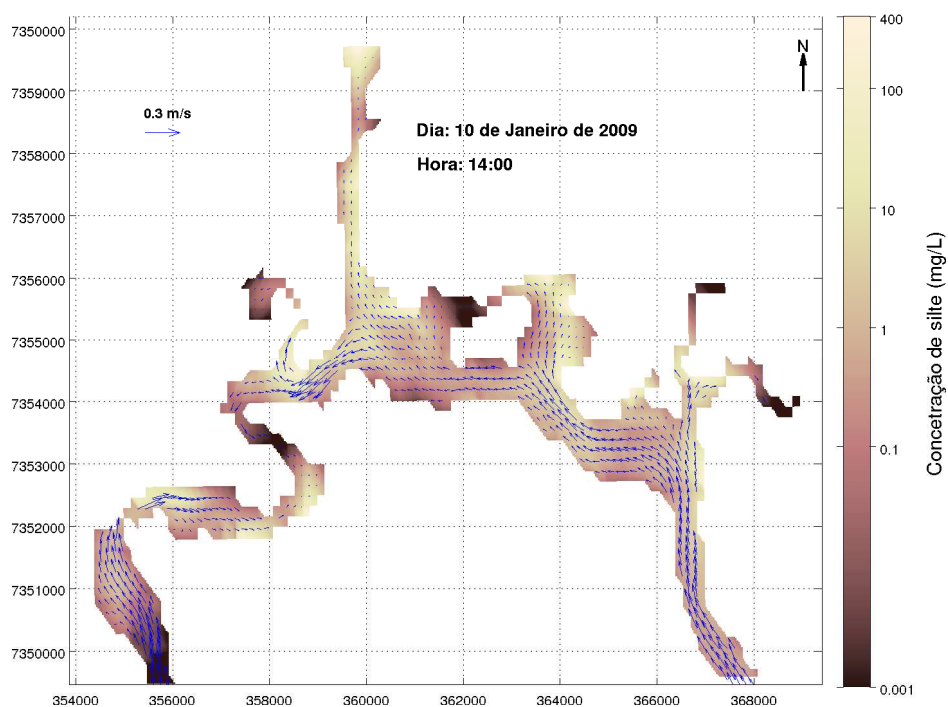


Figura 5.1.6.5-31 Mapa de concentração média na coluna d'água de silte para o dia 10 de Janeiro de 2009 às 15:00 h.

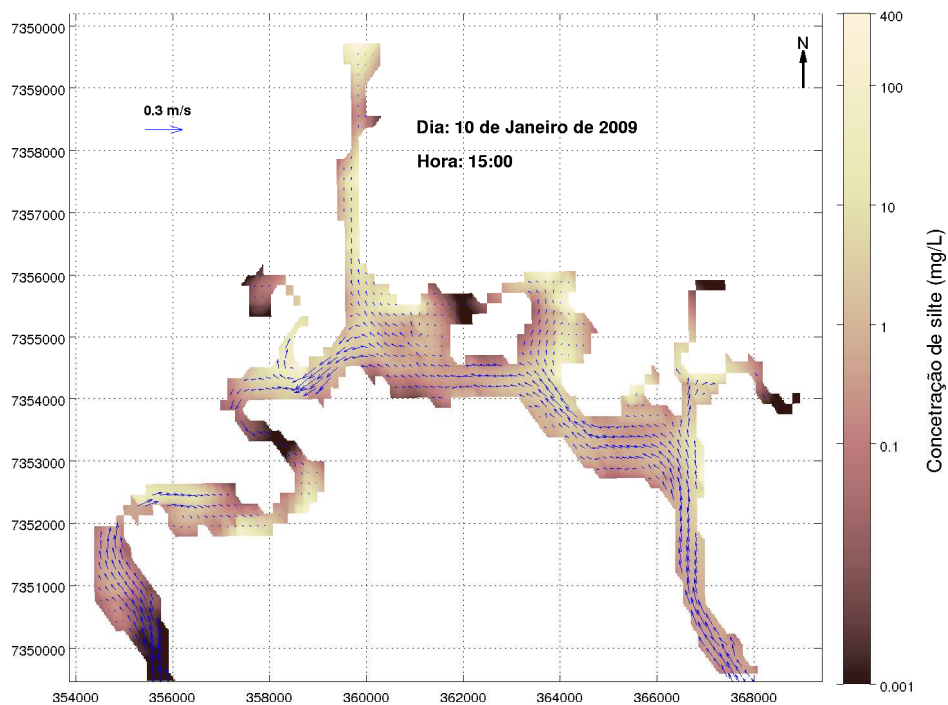


Figura 5.1.6.5-32 Mapa de concentração média na coluna d'água de areia muito fina para o dia 10 de Janeiro de 2009 às 4:00 h.

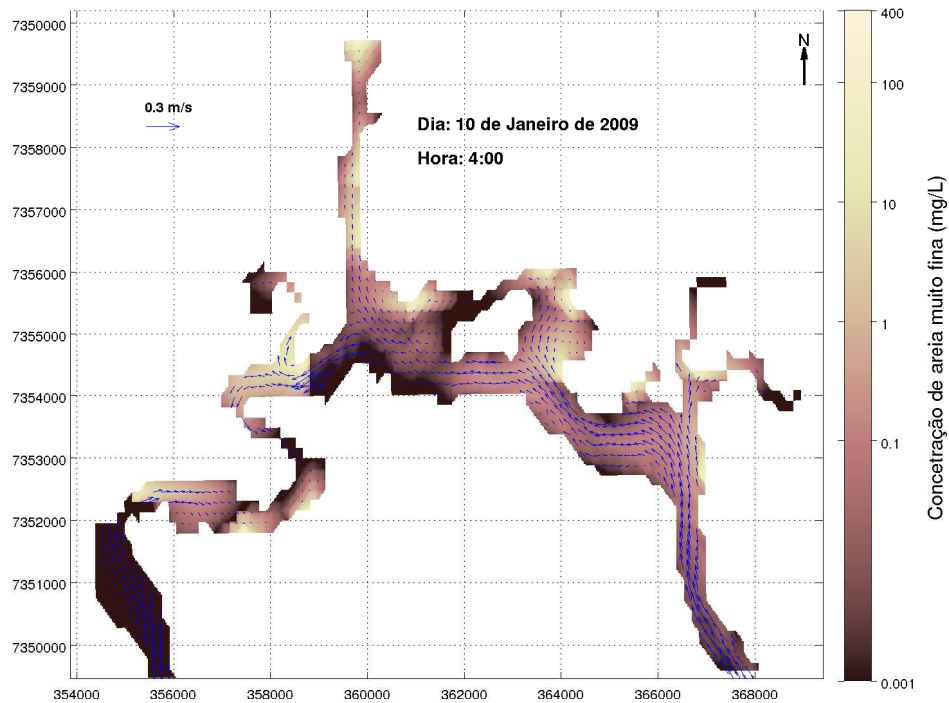


Figura 5.1.6.5-33 Mapa de concentração média na coluna d'água de areia muito fina para o dia 10 de Janeiro de 2009 às 5:00 h.

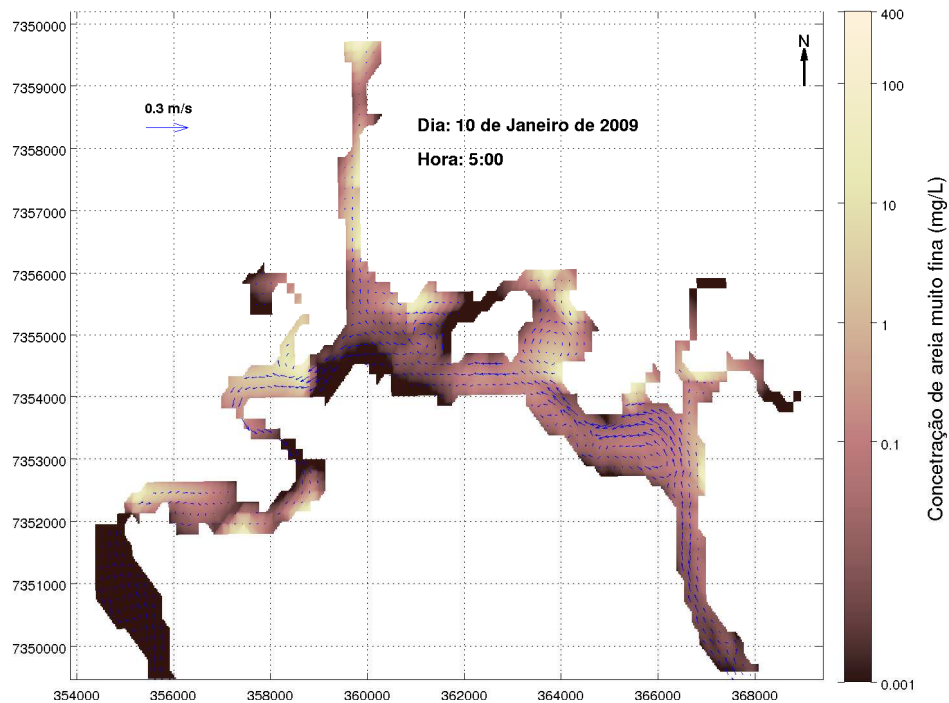


Figura 5.1.6.5-34 Mapa de concentração média na coluna d'água de areia muito fina para o dia 10 de Janeiro de 2009 às 6:00 h.

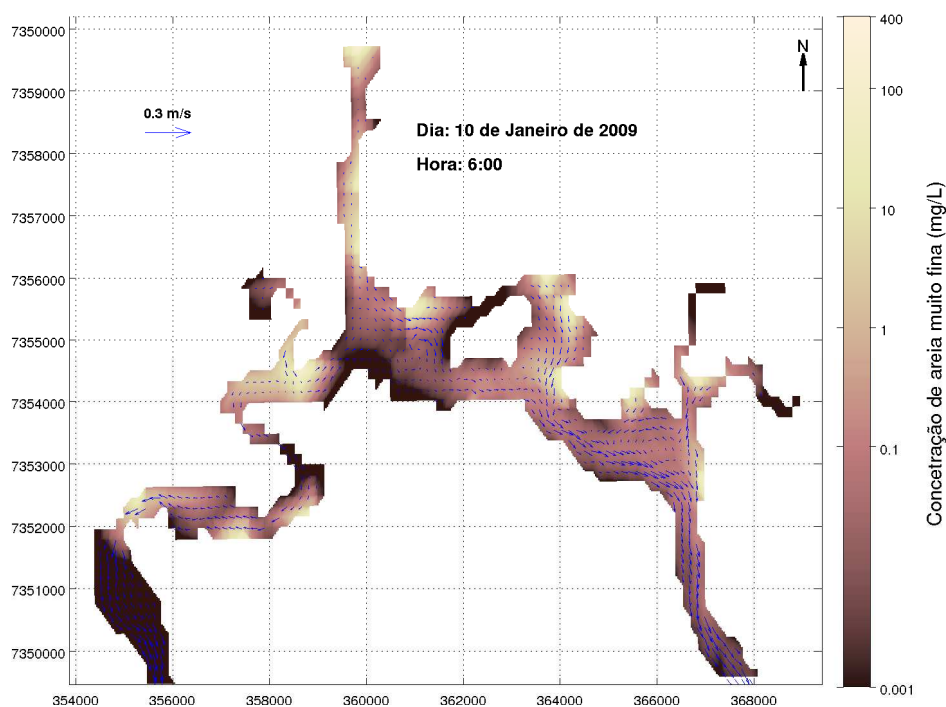


Figura 5.1.6.5-35 Mapa de concentração média na coluna d'água de areia muito fina para o dia 10 de Janeiro de 2009 às 7:00 h.

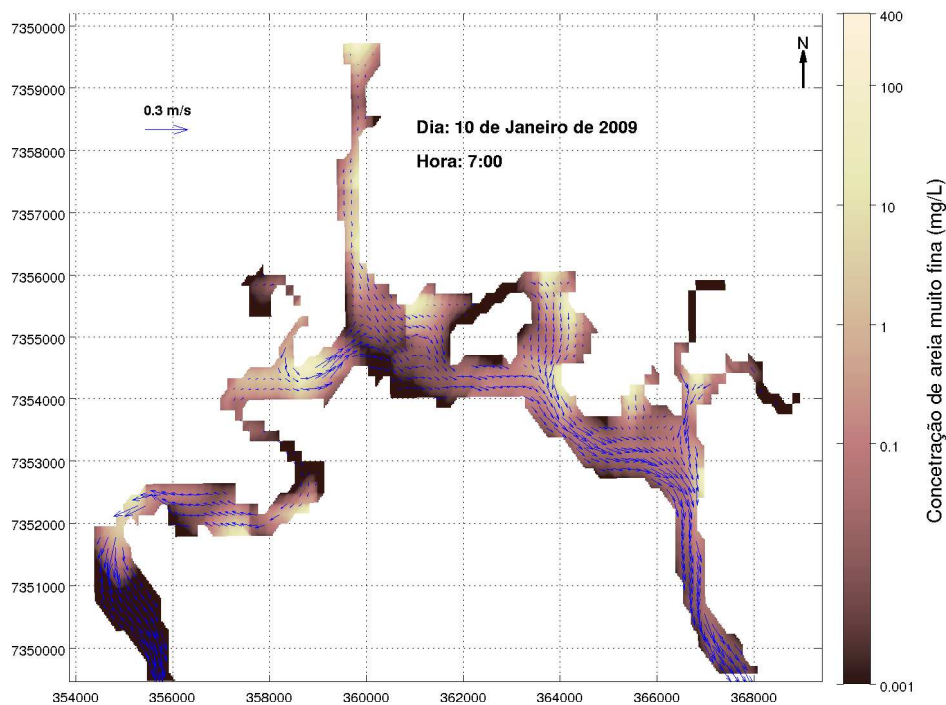


Figura 5.1.6.5-36 Mapa de concentração média na coluna d'água de areia muito fina para o dia 10 de Janeiro de 2009 às 8:00 h.

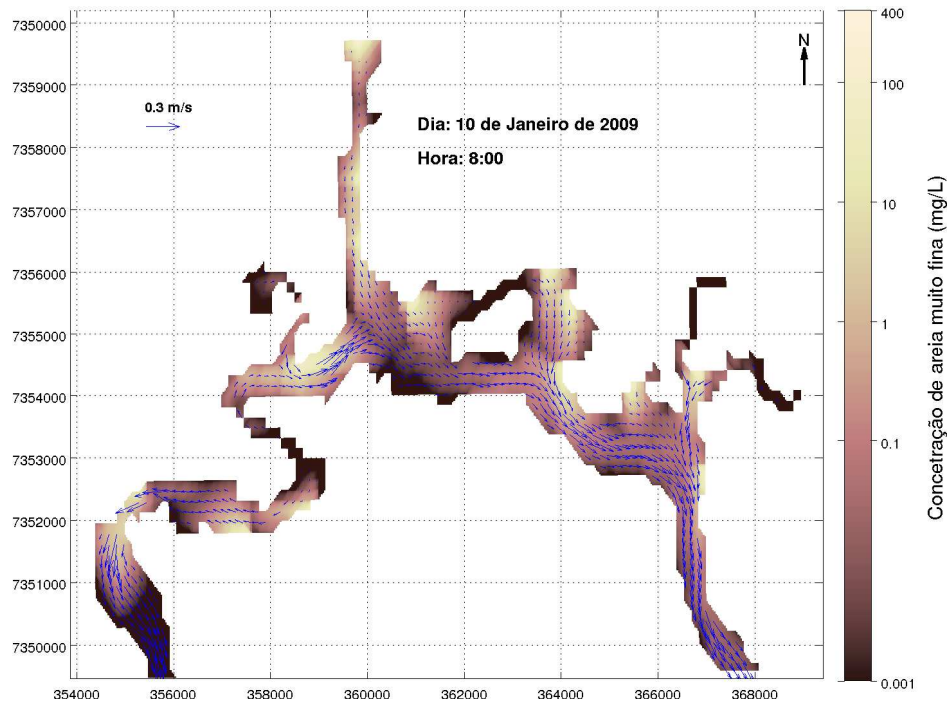


Figura 5.1.6.5-37 Mapa de concentração média na coluna d'água de areia muito fina para o dia 10 de Janeiro de 2009 às 9:00 h.

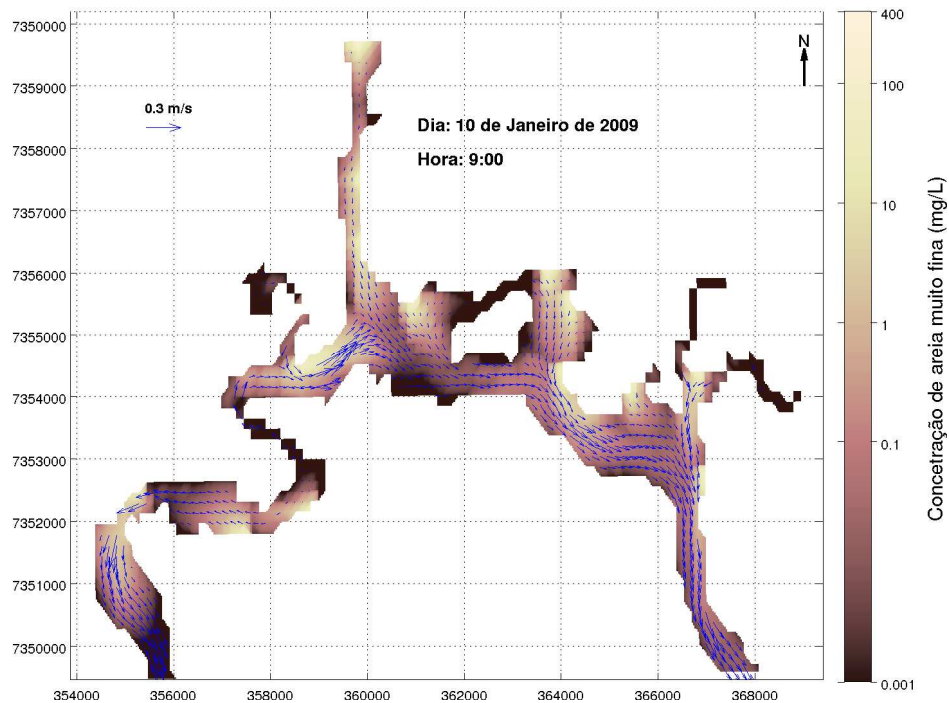


Figura 5.1.6.5-38 Mapa de concentração média na coluna d'água de areia muito fina para o dia 10 de Janeiro de 2009 às 10:00 h.

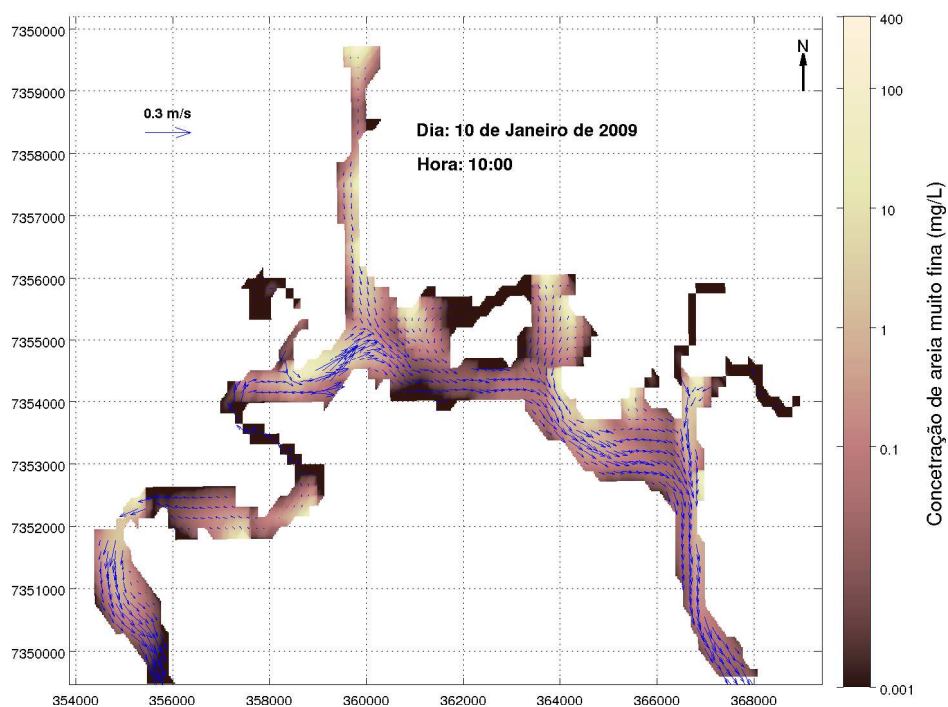


Figura 5.1.6.5-39 Mapa de concentração média na coluna d'água de areia muito fina para o dia 10 de Janeiro de 2009 às 11:00 h.

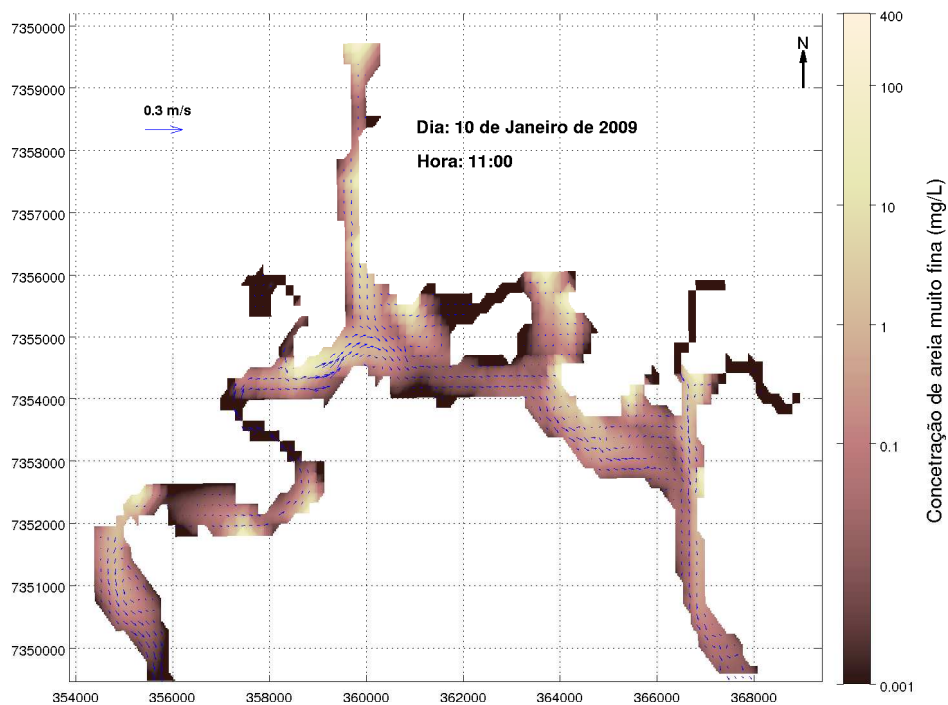


Figura 5.1.6.5-40 Mapa de concentração média na coluna d'água de areia muito fina para o dia 10 de Janeiro de 2009 às 12:00 h.

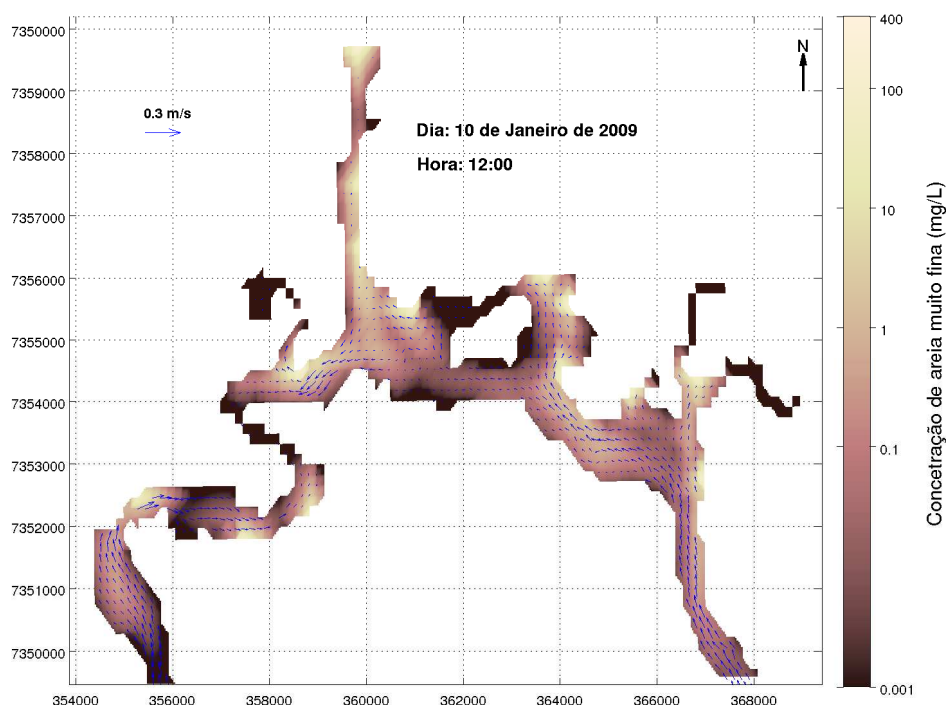


Figura 5.1.6.5-41 Mapa de concentração média na coluna d'água de areia muito fina para o dia 10 de Janeiro de 2009 às 13:00 h.

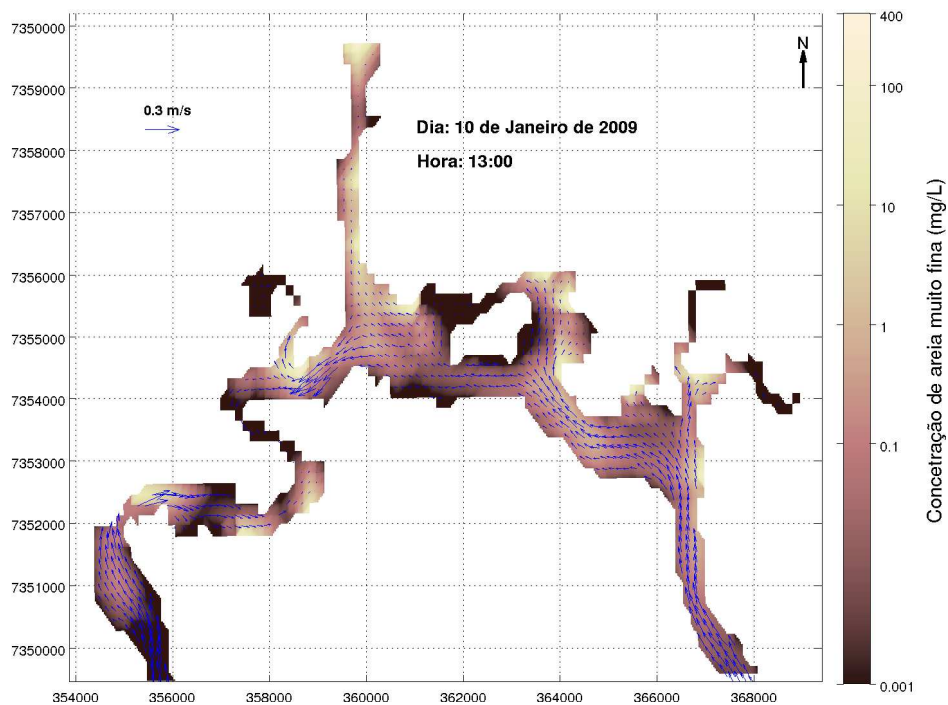


Figura 5.1.6.5-42 Mapa de concentração média na coluna d'água de areia muito fina para o dia 10 de Janeiro de 2009 às 14:00 h.

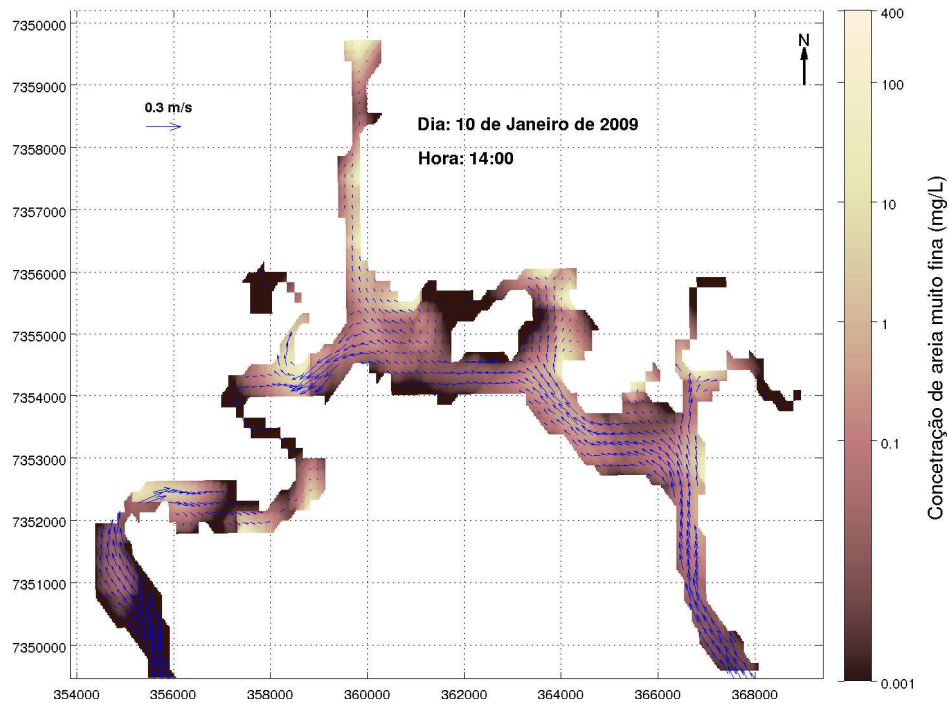


Figura 5.1.6.5-43 Mapa de concentração média na coluna d'água de areia muito fina para o dia 10 de Janeiro de 2009 às 15:00 h.

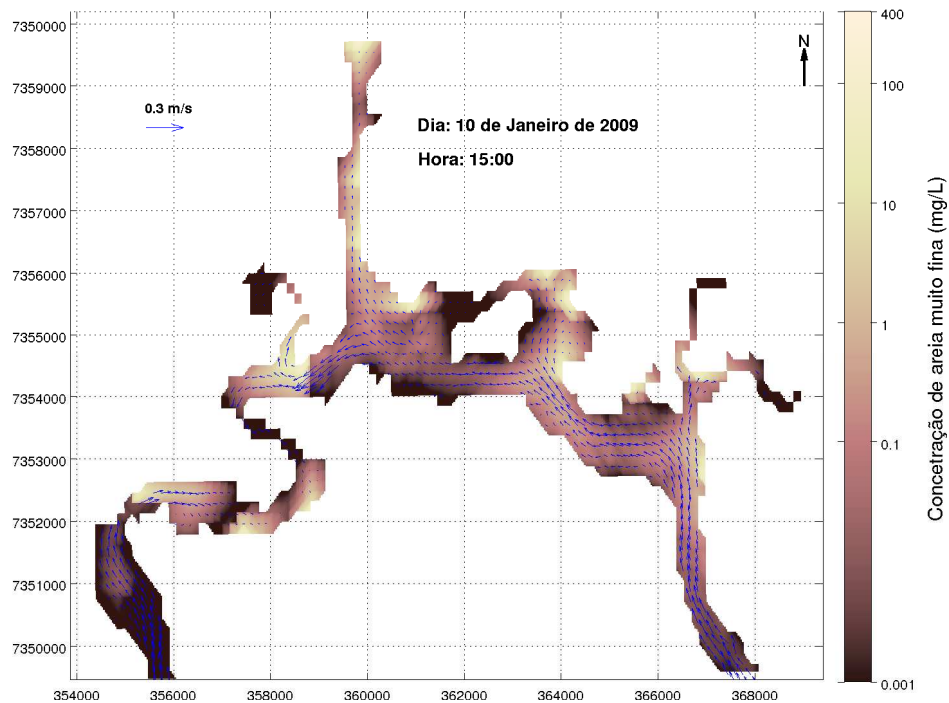




Figura 5.1.6.5-44 Evolução do nível médio do mar no dia 10 de Janeiro de 2009 das 04:00 h até 15:00 h.

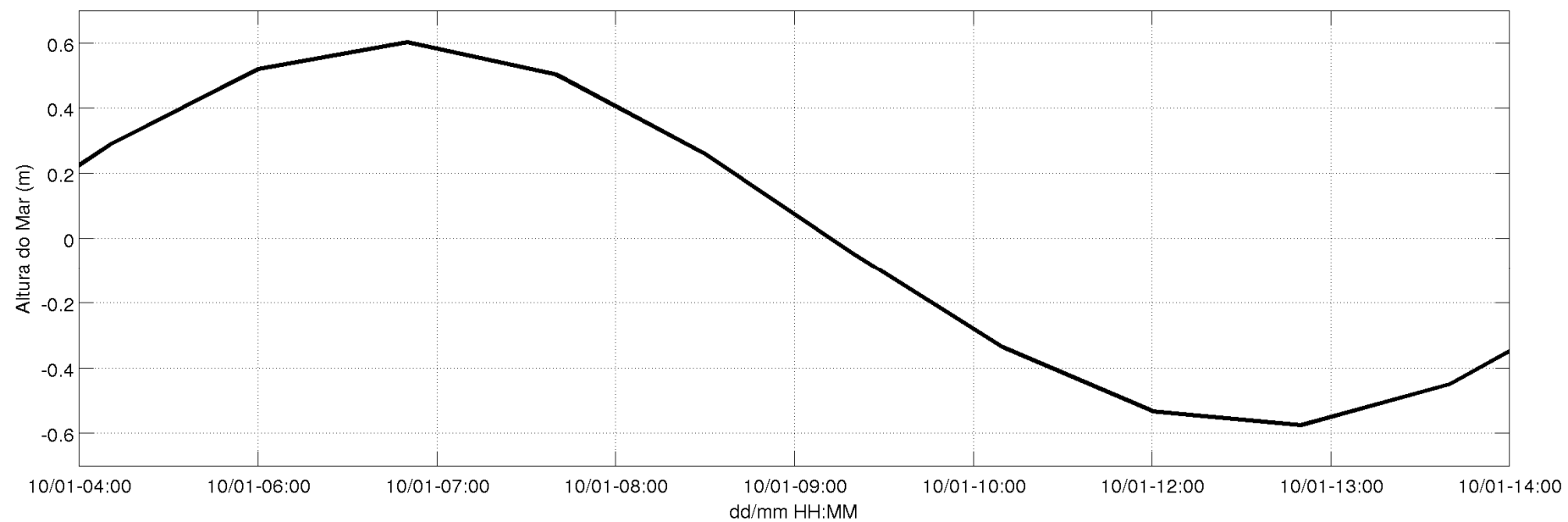


Figura 5.1.6.5-45 Mapa de concentração média na coluna d'água de argila para o dia 19 de Janeiro de 2009 às 21:00 h.

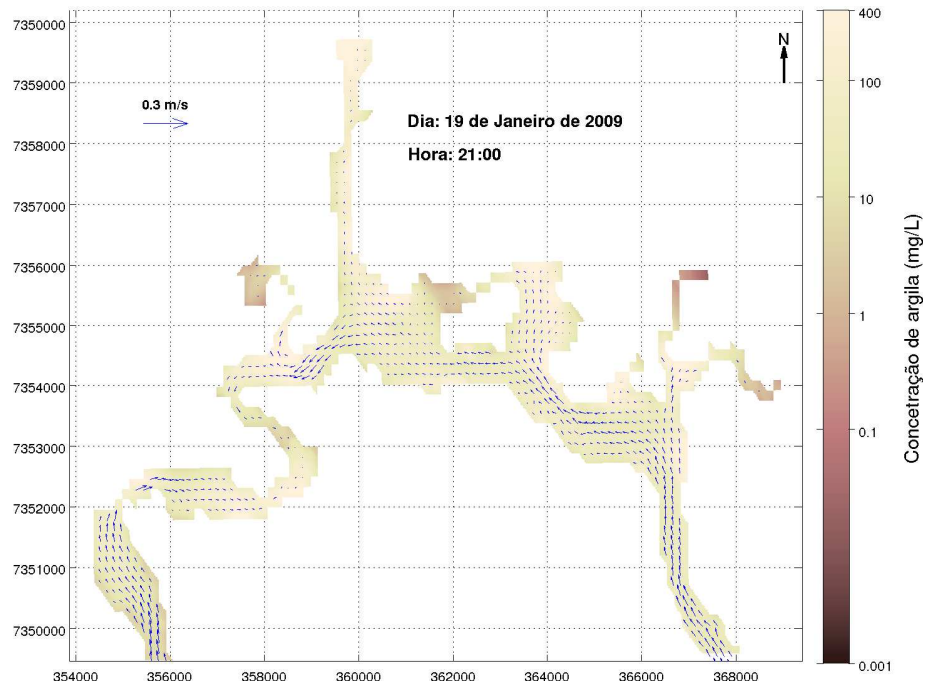


Figura 5.1.6.5-46 Mapa de concentração média na coluna d'água de argila para o dia 19 de Janeiro de 2009 às 22:00 h.

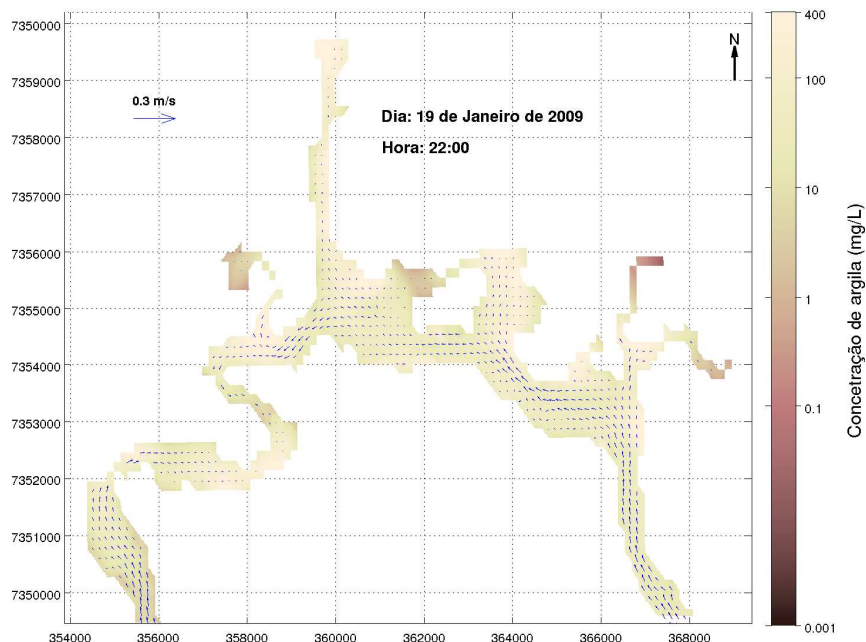


Figura 5.1.6.5-47 Mapa de concentração média na coluna d'água de argila para o dia 19 de Janeiro de 2009 às 23:00 h.

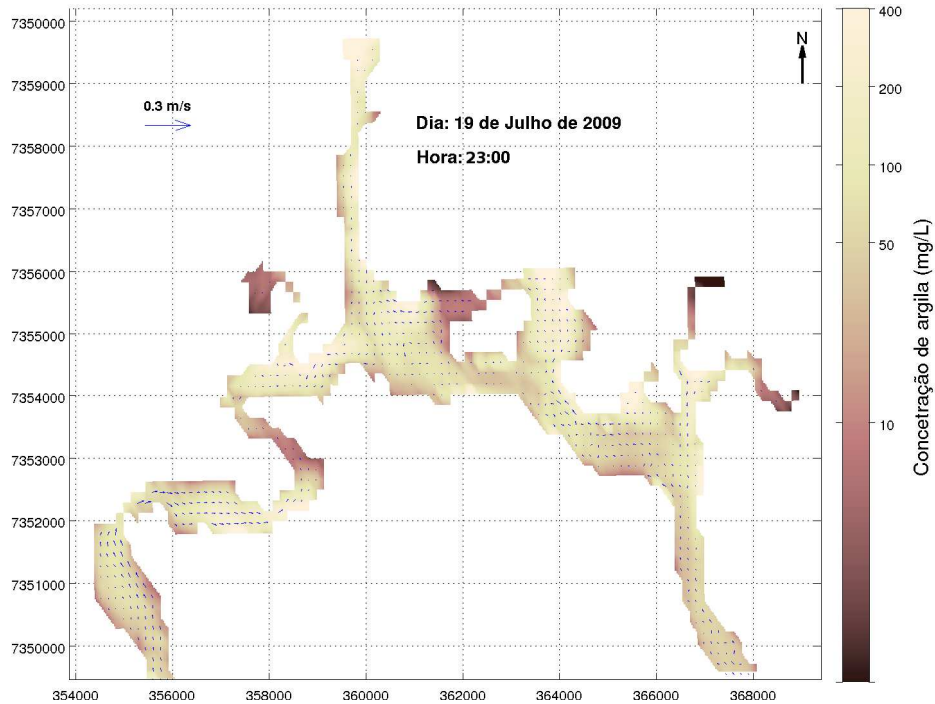


Figura 5.1.6.5-48 Mapa de concentração média na coluna d'água de argila para o dia 20 de Janeiro de 2009 às 00:00 h.

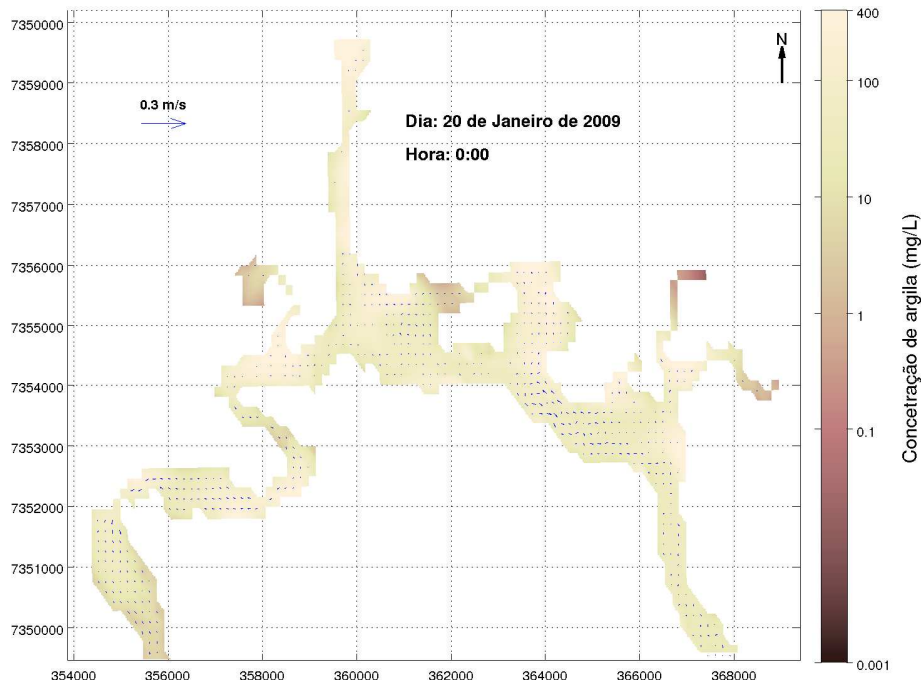


Figura 5.1.6.5-49 Mapa de concentração média na coluna d'água de argila para o dia 20 de Janeiro de 2009 às 01:00 h.

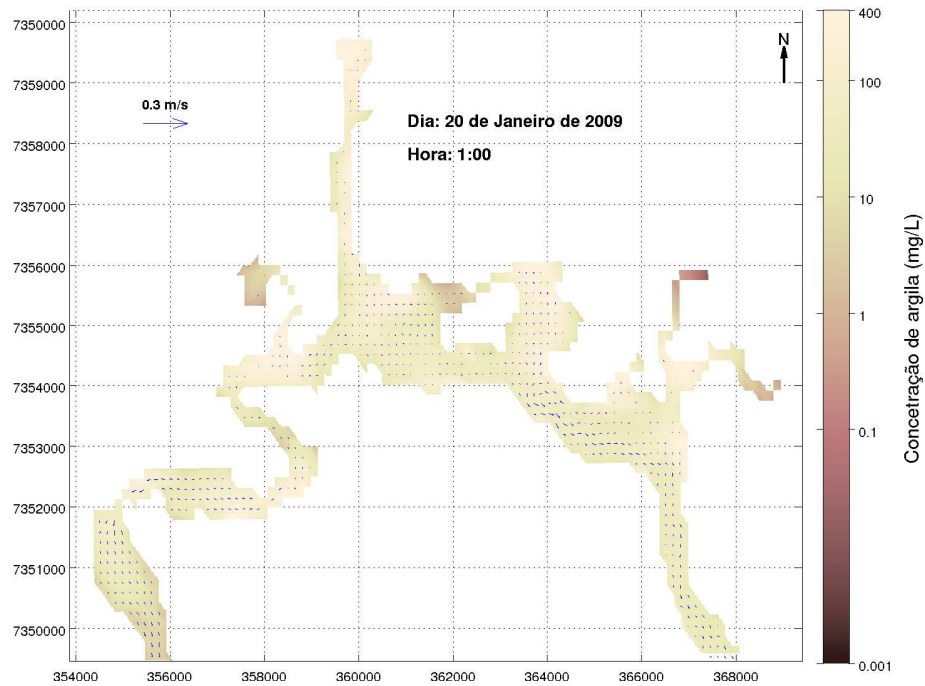


Figura 5.1.6.5-50 Mapa de concentração média na coluna d'água de argila para o dia 20 de Janeiro de 2009 às 02:00 h.

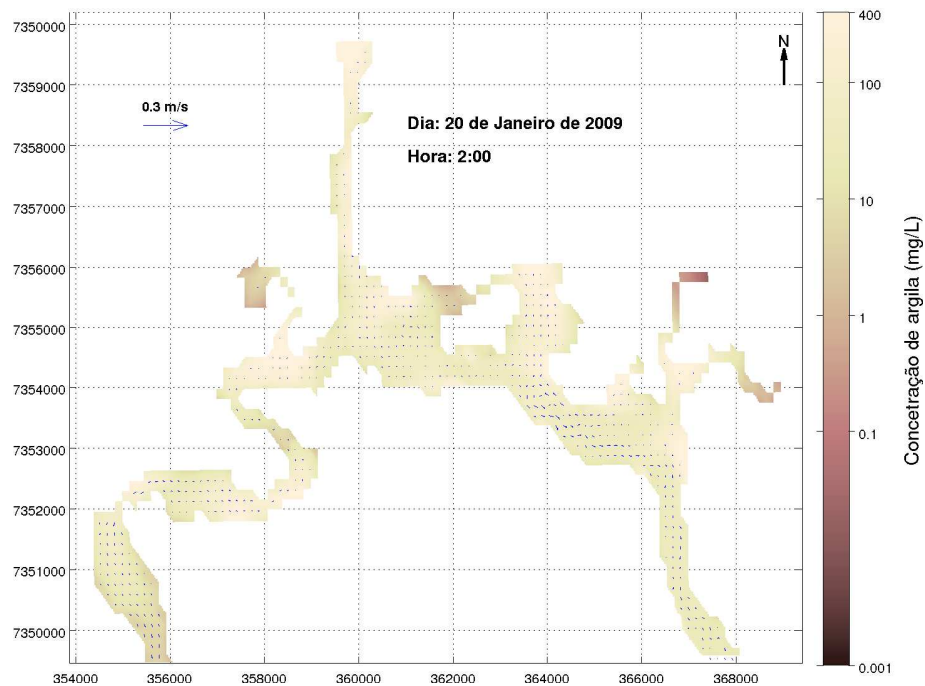


Figura 5.1.6.5-51 Mapa de concentração média na coluna d'água de argila para o dia 20 de Janeiro de 2009 às 03:00 h.

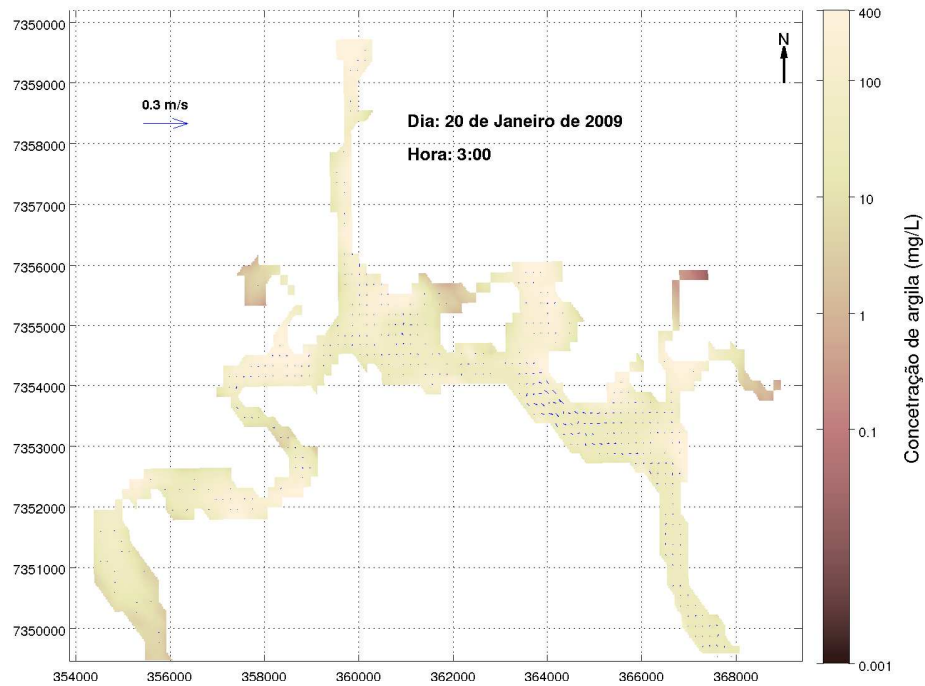


Figura 5.1.6.5-52 Mapa de concentração média na coluna d'água de argila para o dia 20 de Janeiro de 2009 às 04:00 h.

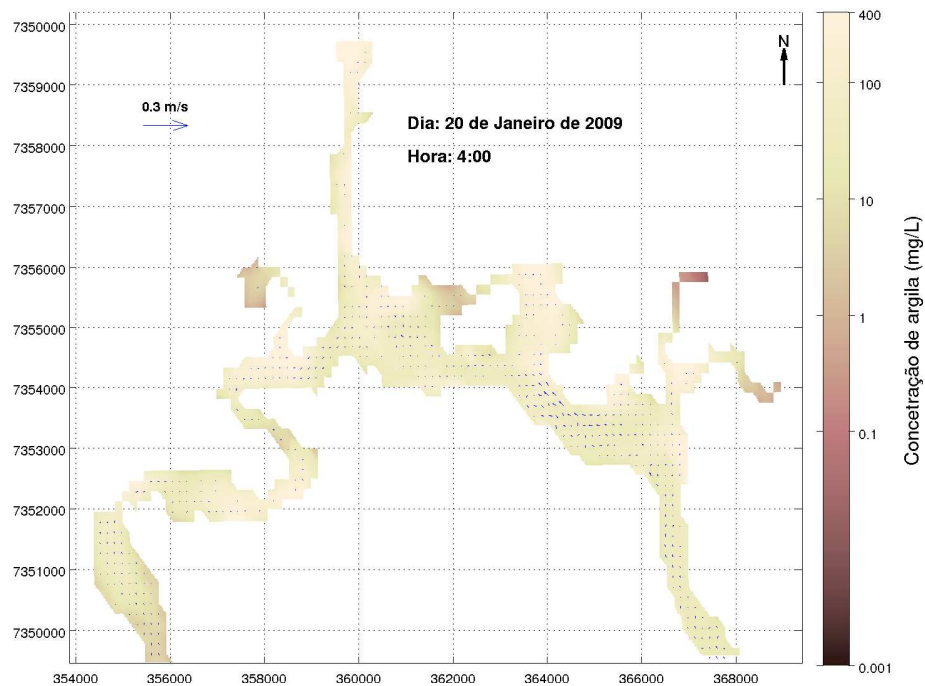


Figura 5.1.6.5-53 Mapa de concentração média na coluna d'água de argila para o dia 20 de Janeiro de 2009 às 05:00 h.

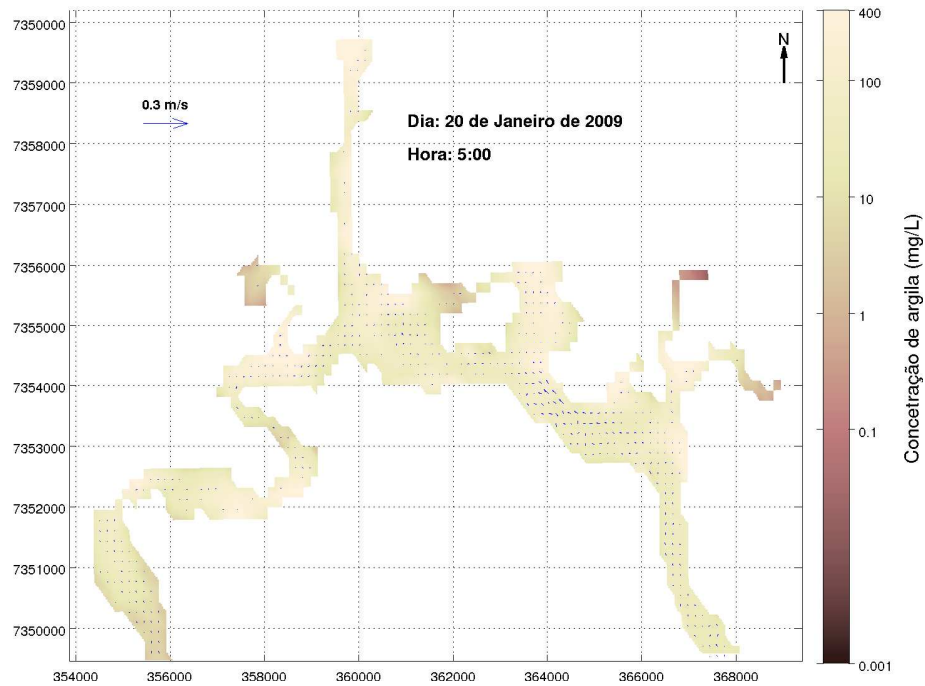


Figura 5.1.6.5-54 Mapa de concentração média na coluna d'água de argila para o dia 20 de Janeiro de 2009 às 06:00 h.

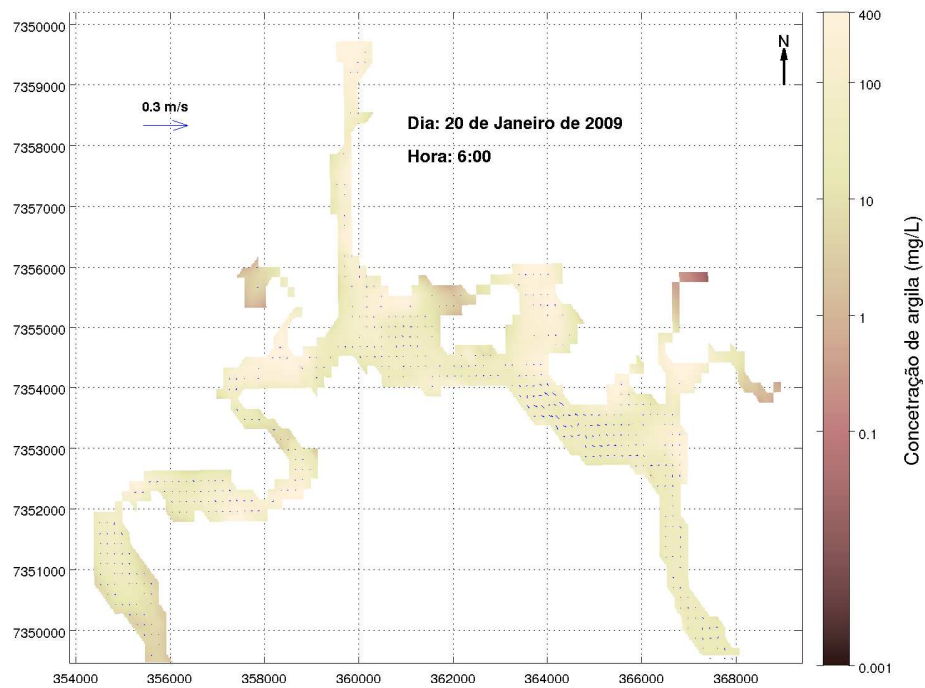


Figura 5.1.6.5-55 Mapa de concentração média na coluna d'água de argila para o dia 20 de Janeiro de 2009 às 07:00 h.

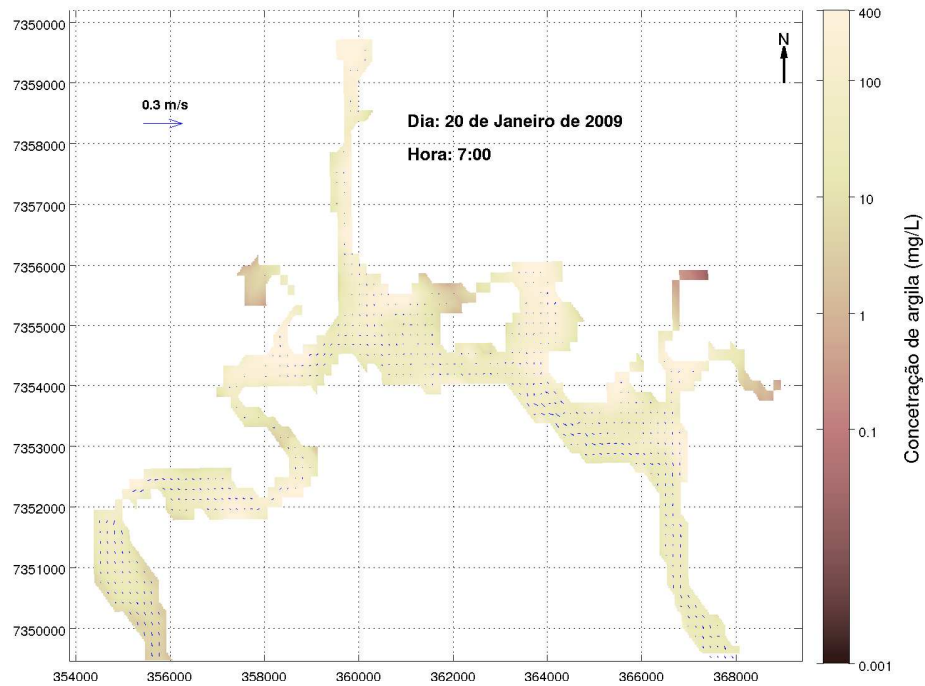


Figura 5.1.6.5-56 Mapa de concentração média na coluna d'água de argila para o dia 20 de Janeiro de 2009 às 08:00 h.

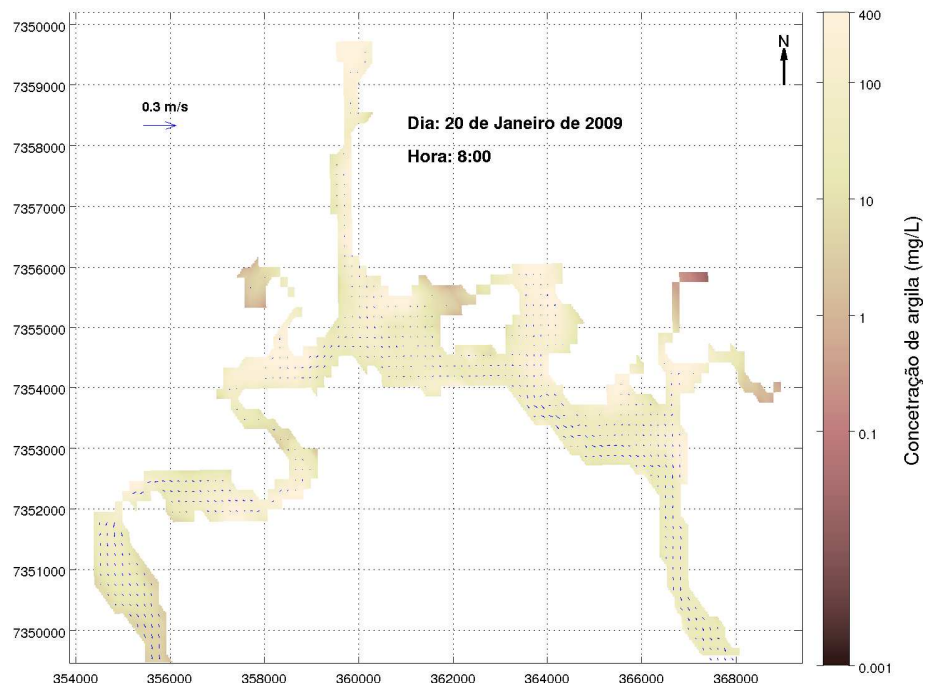


Figura 5.1.6.5-57 Mapa de concentração média na coluna d'água de argila para o dia 20 de Janeiro de 2009 às 09:00 h.

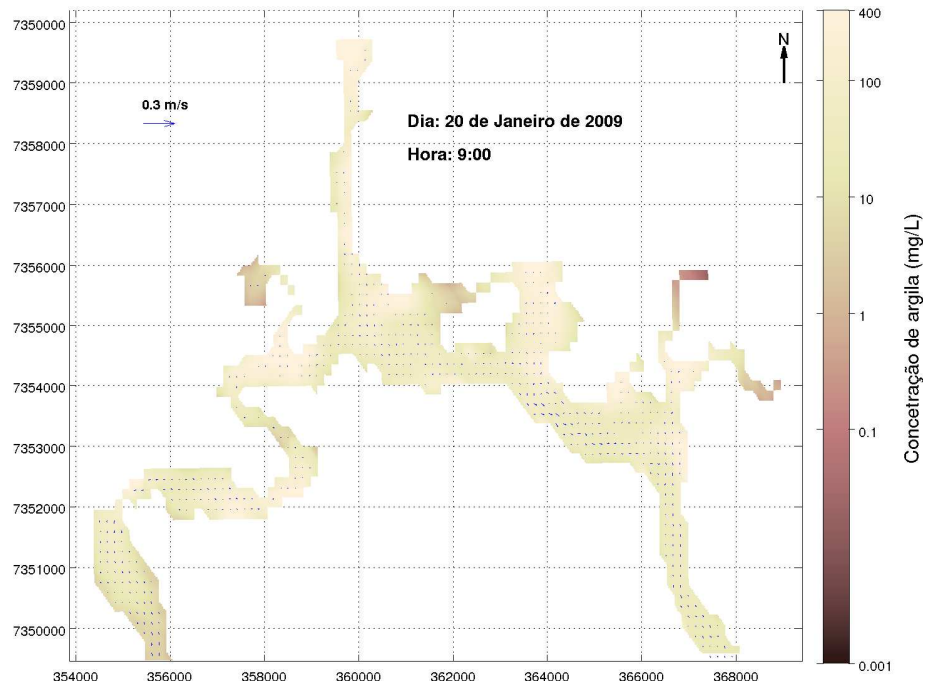


Figura 5.1.6.5-58 Mapa de concentração média na coluna d'água de silte para o dia 19 de Janeiro de 2009 às 21:00 h.

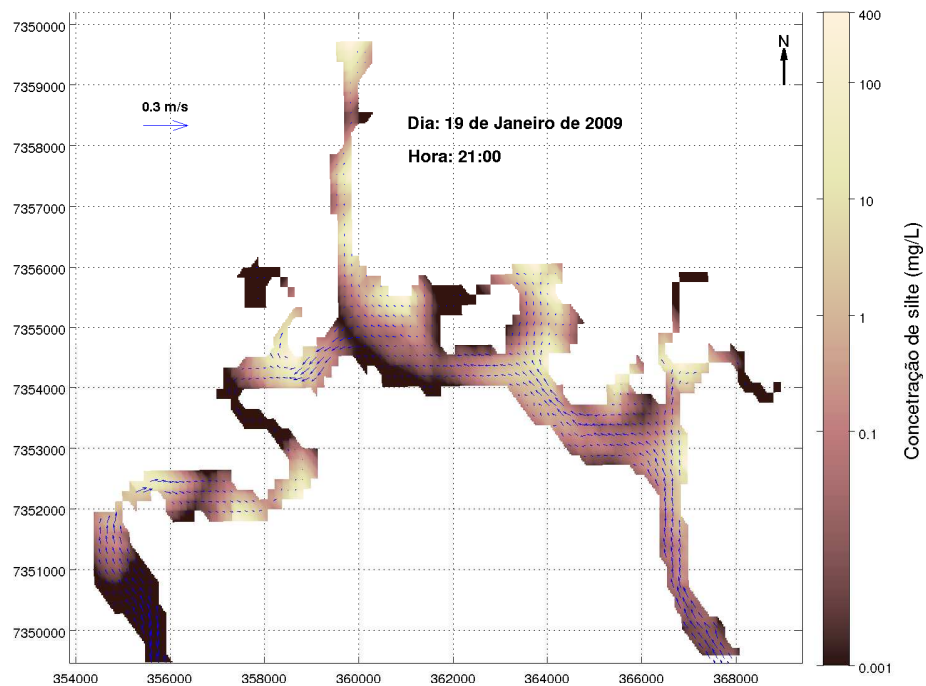


Figura 5.1.6.5-59 Mapa de concentração média na coluna d'água de silte para o dia 19 de Janeiro de 2009 às 22:00 h.

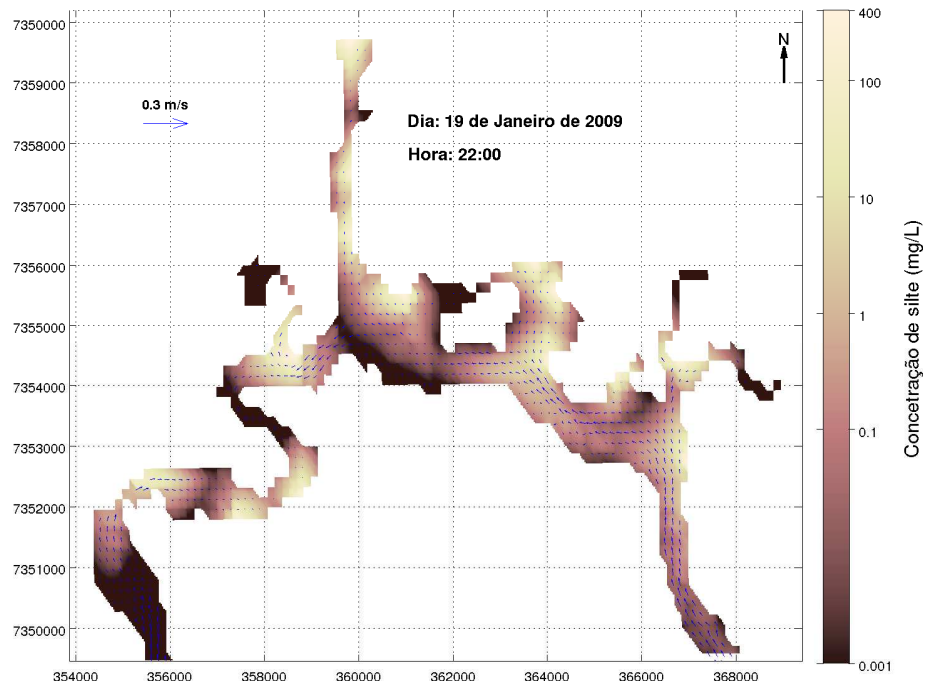


Figura 5.1.6.5-60 Mapa de concentração média na coluna d'água de silte para o dia 19 de Janeiro de 2009 às 23:00 h.

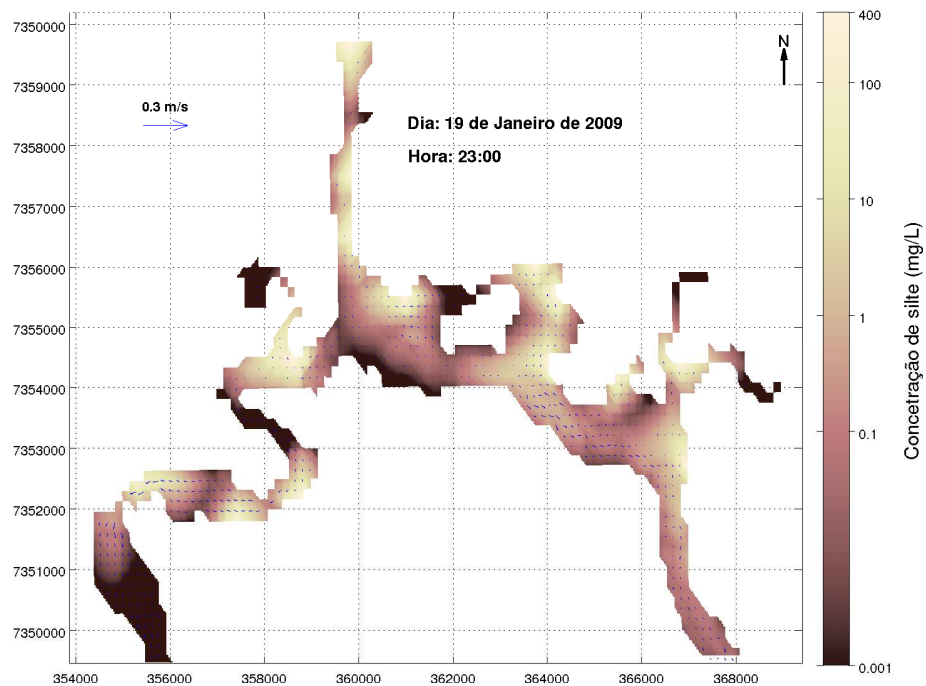


Figura 5.1.6.5-61 Mapa de concentração média na coluna d'água de silte para o dia 20 de Janeiro de 2009 às 00:00 h.

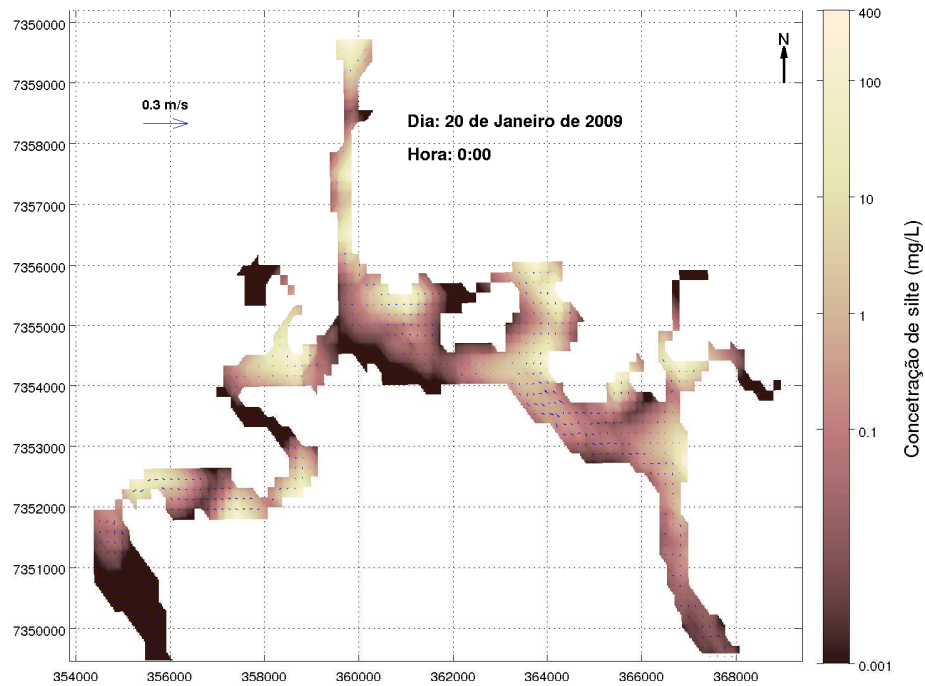


Figura 5.1.6.5-62 Mapa de concentração média na coluna d'água de silte para o dia 20 de Janeiro de 2009 às 01:00 h.

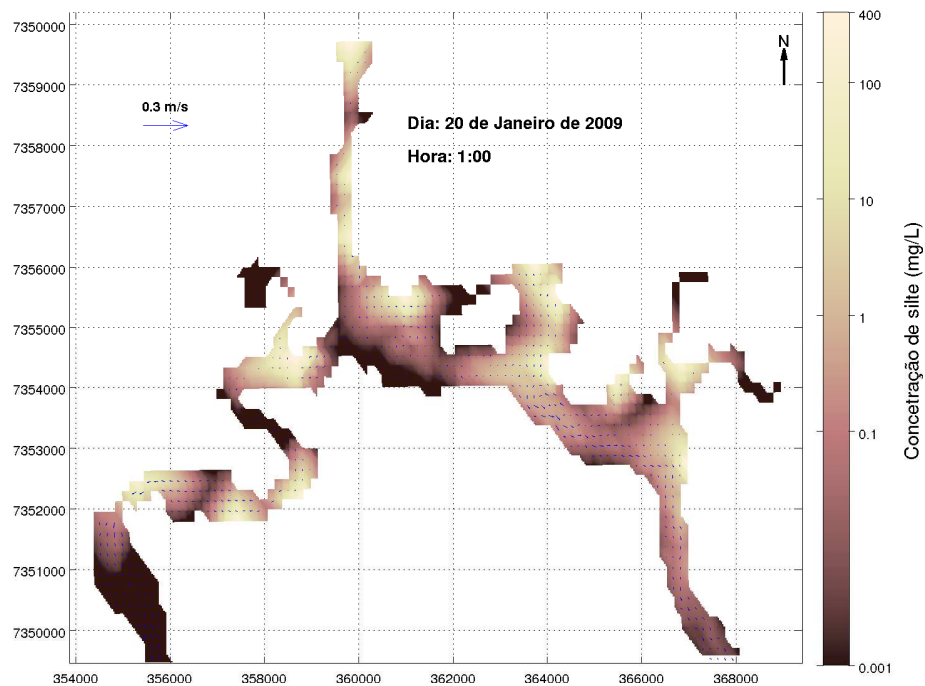


Figura 5.1.6.5-63 Mapa de concentração média na coluna d'água de silte para o dia 20 de Janeiro de 2009 às 02:00 h.

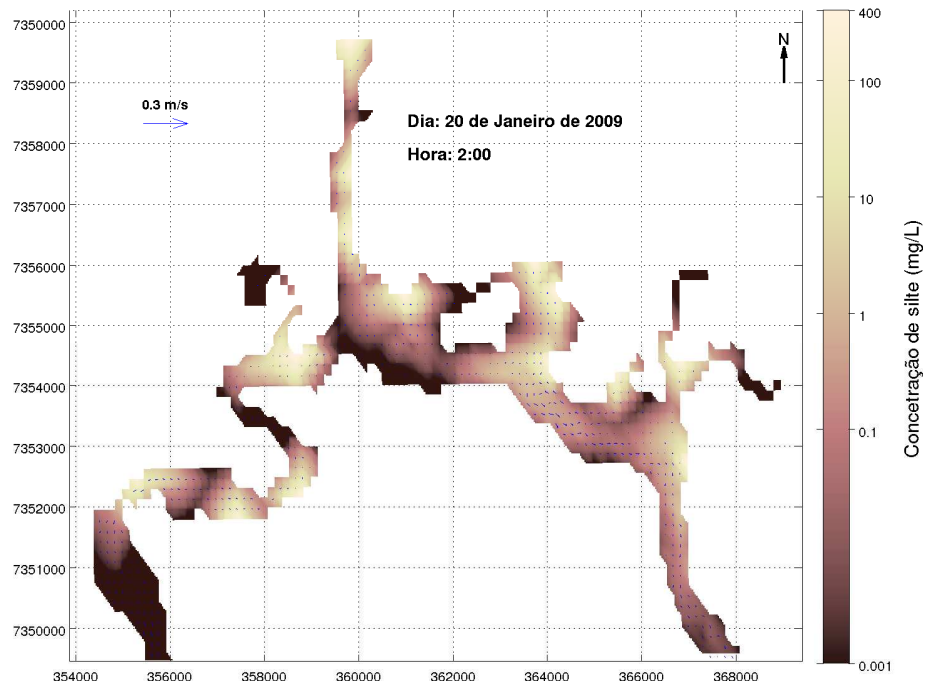


Figura 5.1.6.5-64 Mapa de concentração média na coluna d'água de silte para o dia 20 de Janeiro de 2009 às 03:00 h.

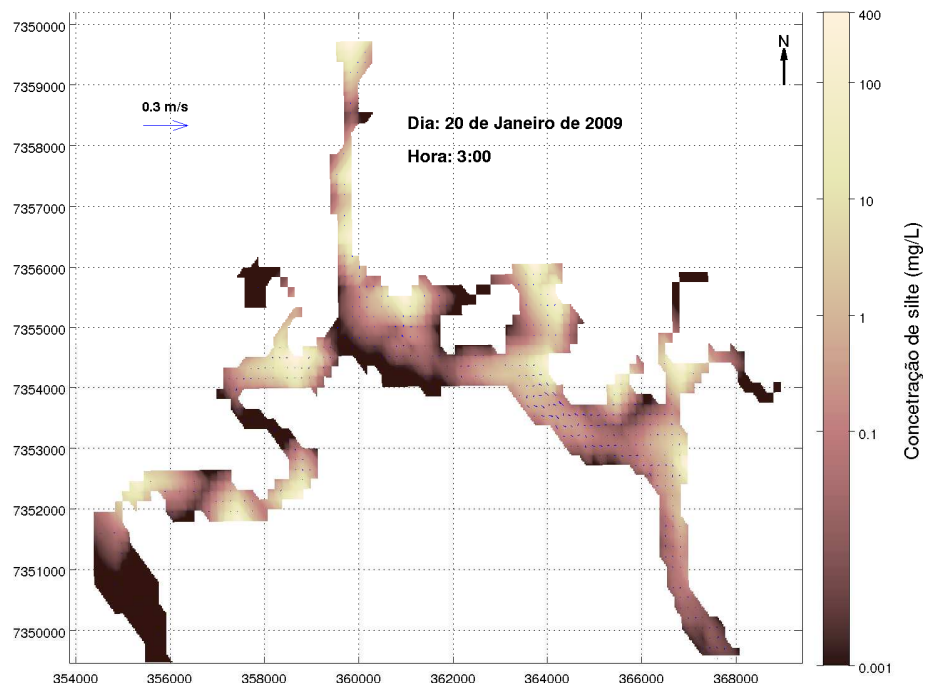


Figura 5.1.6.5-65 Mapa de concentração média na coluna d'água de silte para o dia 20 de Janeiro de 2009 às 04:00 h.

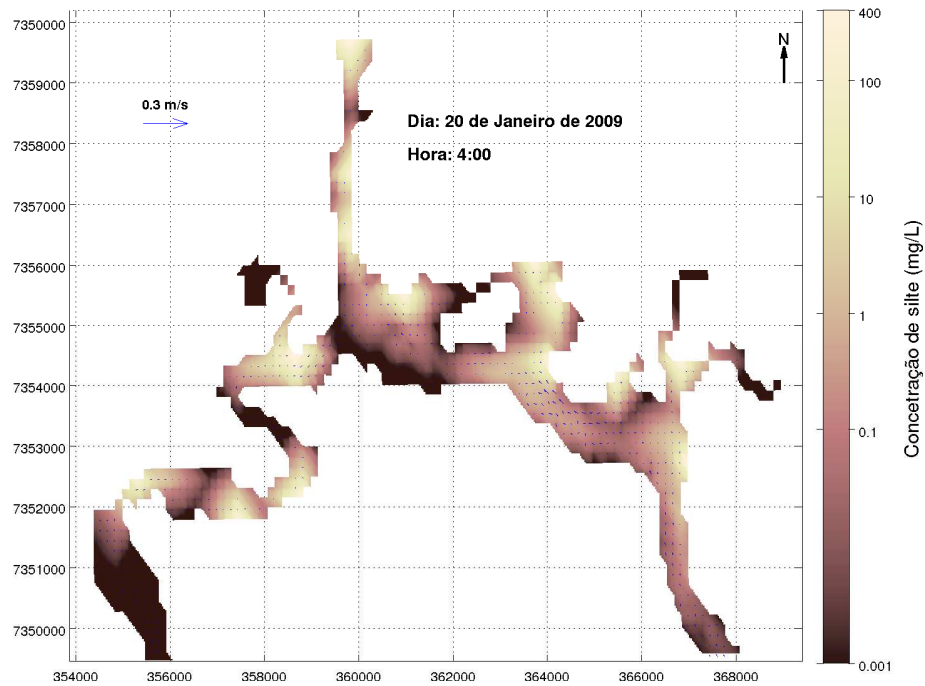


Figura 5.1.6.5-66 Mapa de concentração média na coluna d'água de silte para o dia 20 de Janeiro de 2009 às 06:00 h.

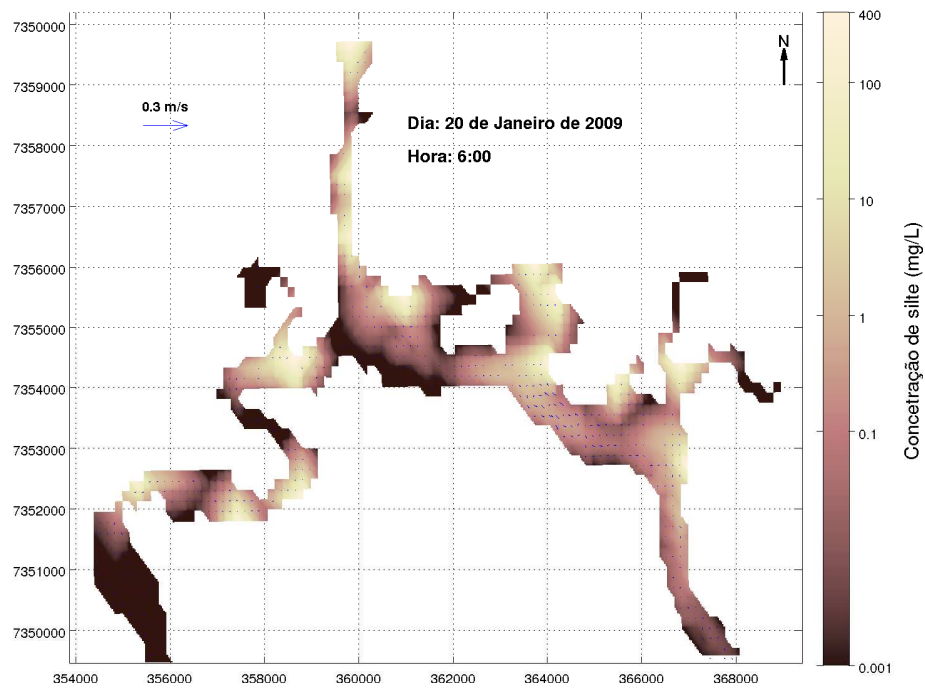


Figura 5.1.6.5-67 Mapa de concentração média na coluna d'água de silte para o dia 20 de Janeiro de 2009 às 07:00 h.

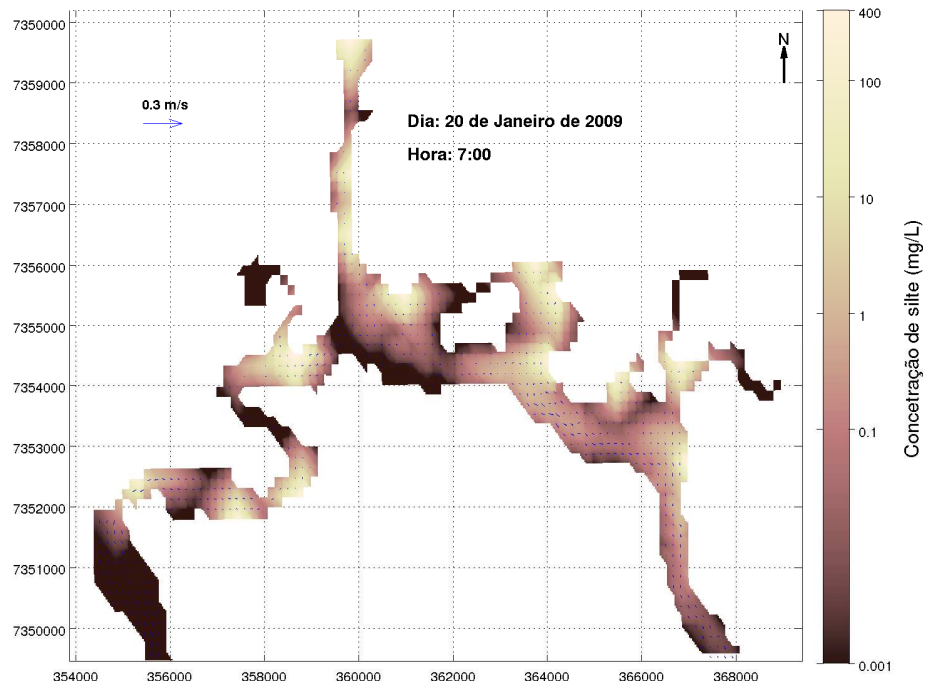


Figura 5.1.6.5-68 Mapa de concentração média na coluna d'água de silte para o dia 20 de Janeiro de 2009 às 08:00 h.

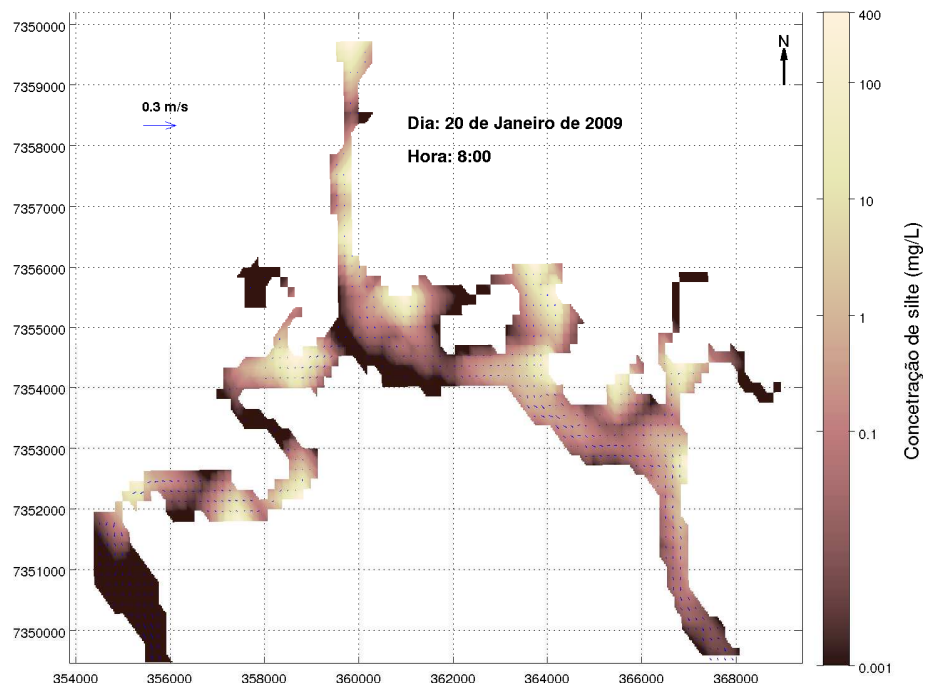


Figura 5.1.6.5-69 Mapa de concentração média na coluna d'água de silte para o dia 20 de Janeiro de 2009 às 09:00 h.

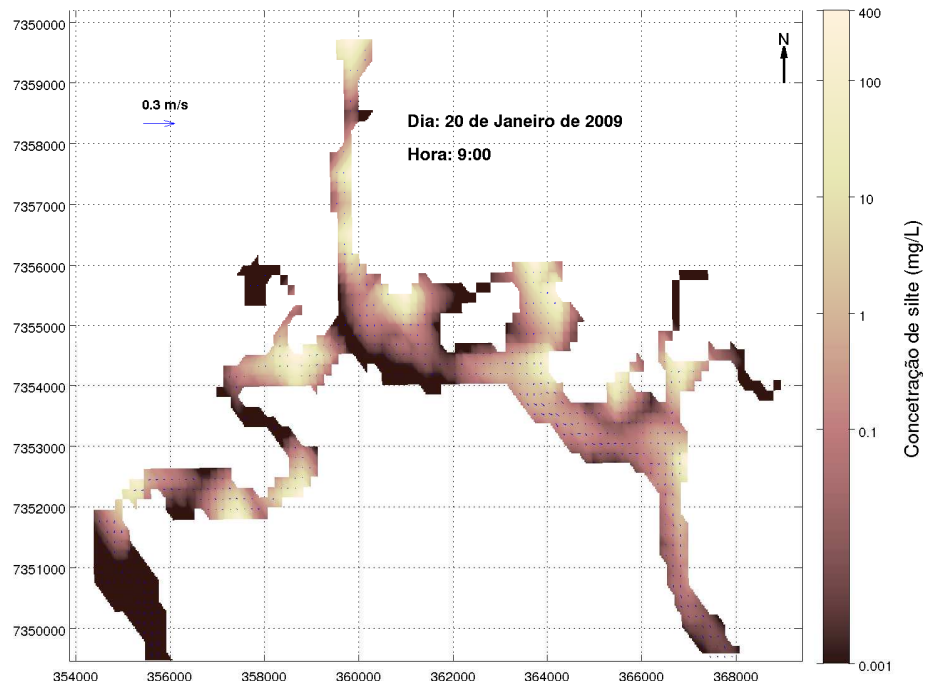


Figura 5.1.6.5-70 Mapa de concentração média na coluna d'água de areia muito fina para o dia 19 de Janeiro de 2009 às 21:00 h.

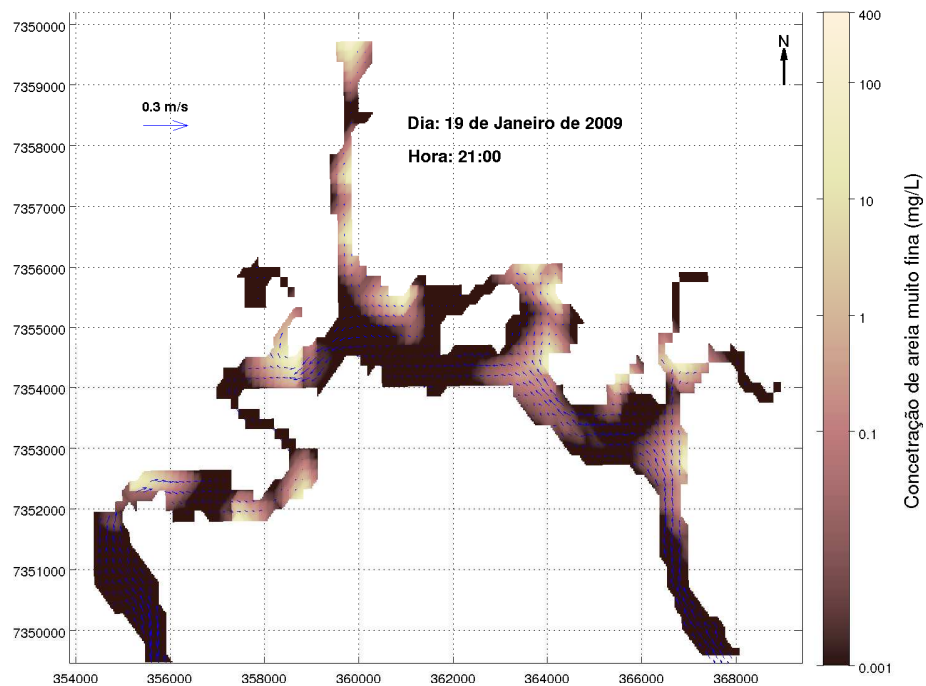


Figura 5.1.6.5-71 Mapa de concentração média na coluna d'água de areia muito fina para o dia 19 de Janeiro de 2009 às 22:00 h.

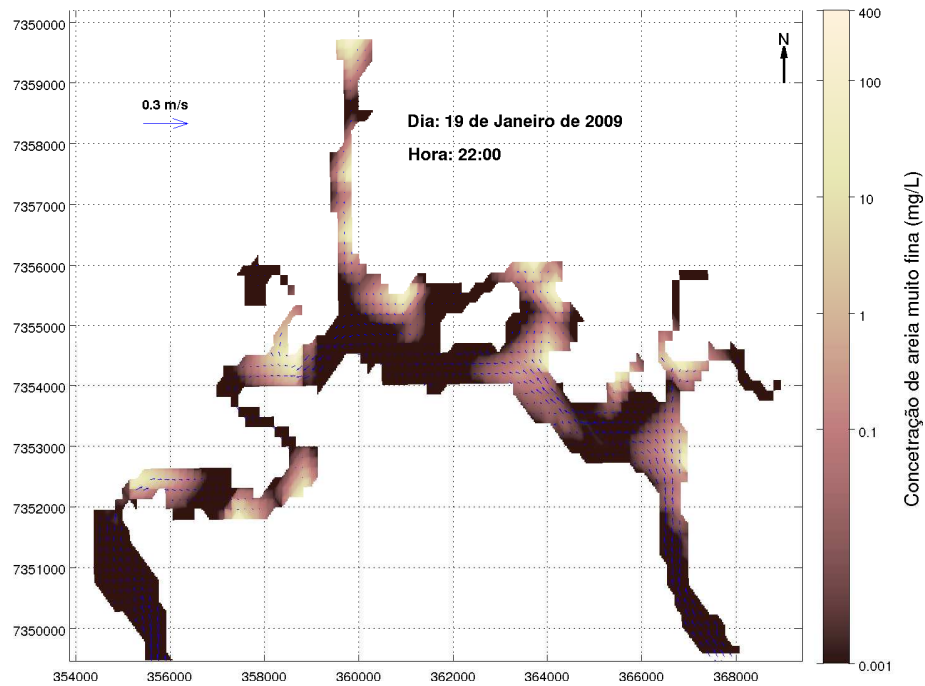


Figura 5.1.6.5-72 Mapa de concentração média na coluna d'água de areia muito fina para o dia 19 de Janeiro de 2009 às 23:00 h.

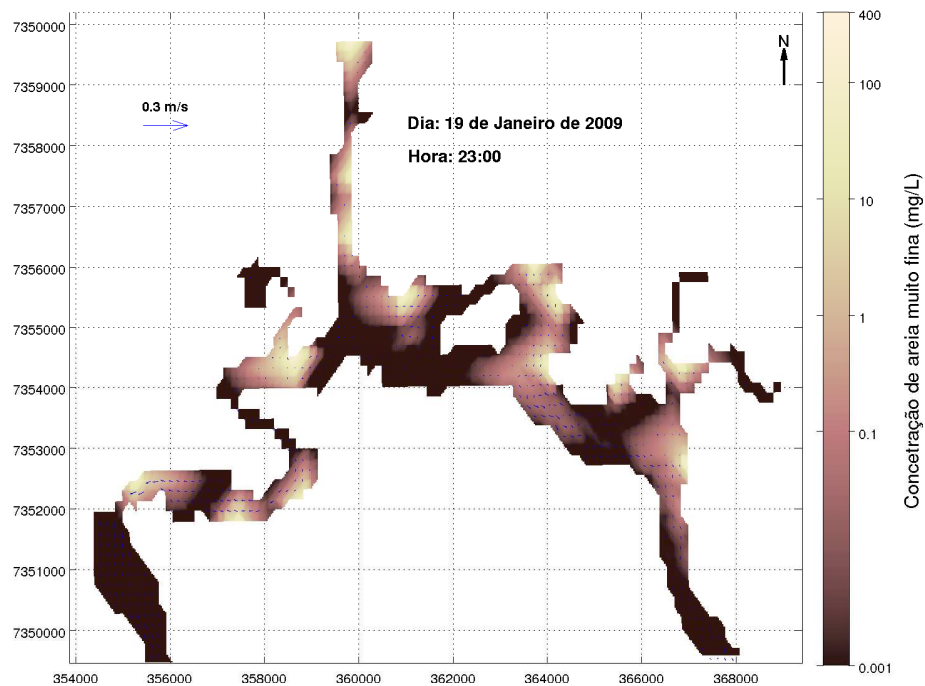


Figura 5.1.6.5-73 Mapa de concentração média na coluna d'água de areia muito fina para o dia 20 de Janeiro de 2009 às 00:00 h.

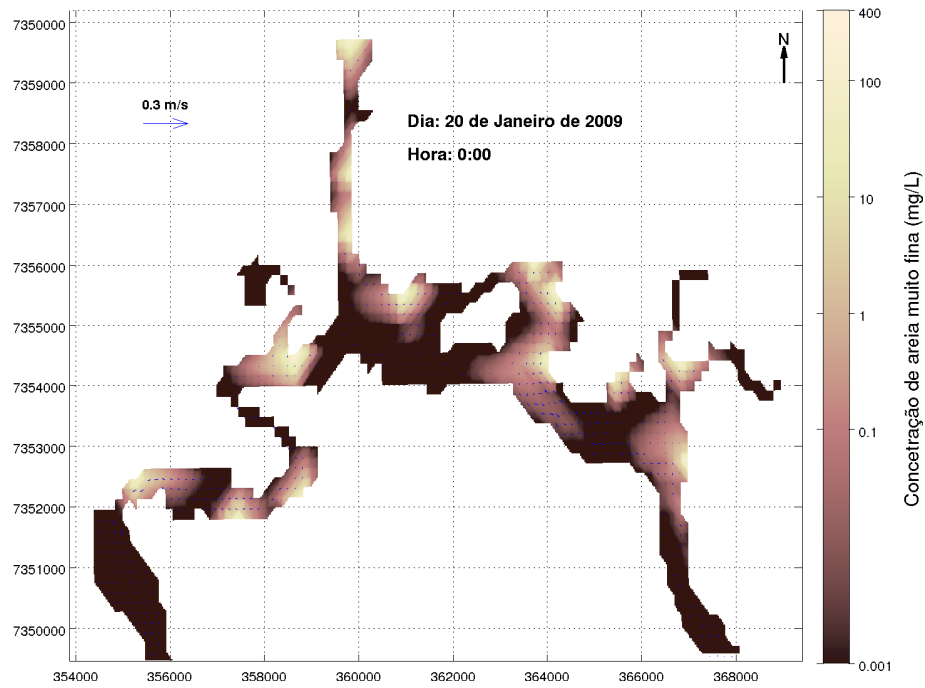


Figura 5.1.6.5-74 Mapa de concentração média na coluna d'água de areia muito fina para o dia 20 de Janeiro de 2009 às 01:00 h.

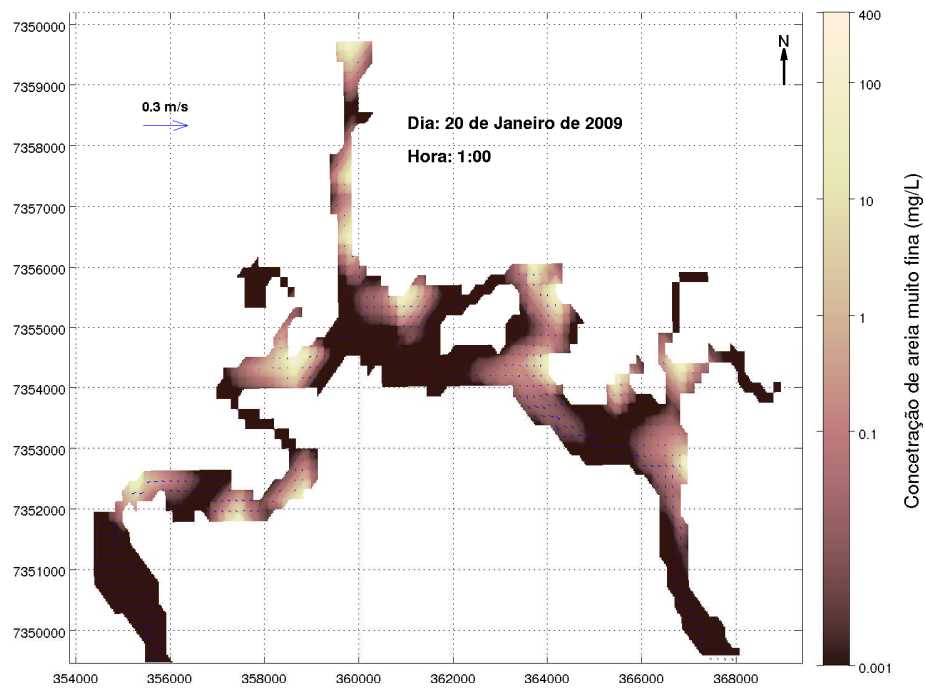


Figura 5.1.6.5-75 Mapa de concentração média na coluna d'água de areia muito fina para o dia 20 de Janeiro de 2009 às 02:00 h.

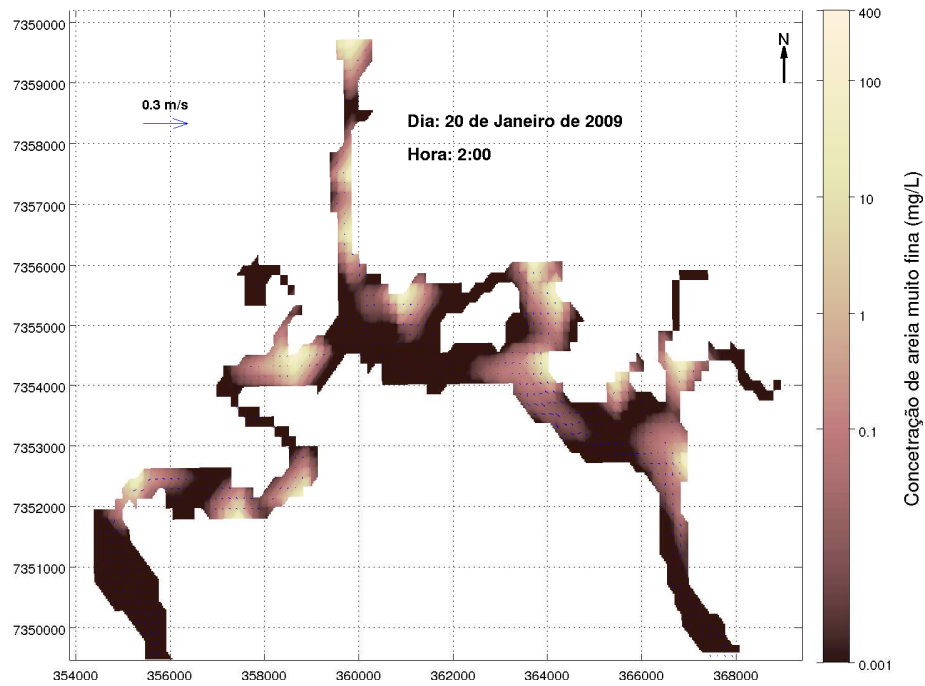


Figura 5.1.6.5-76 Mapa de concentração média na coluna d'água de areia muito fina para o dia 20 de Janeiro de 2009 às 03:00 h.

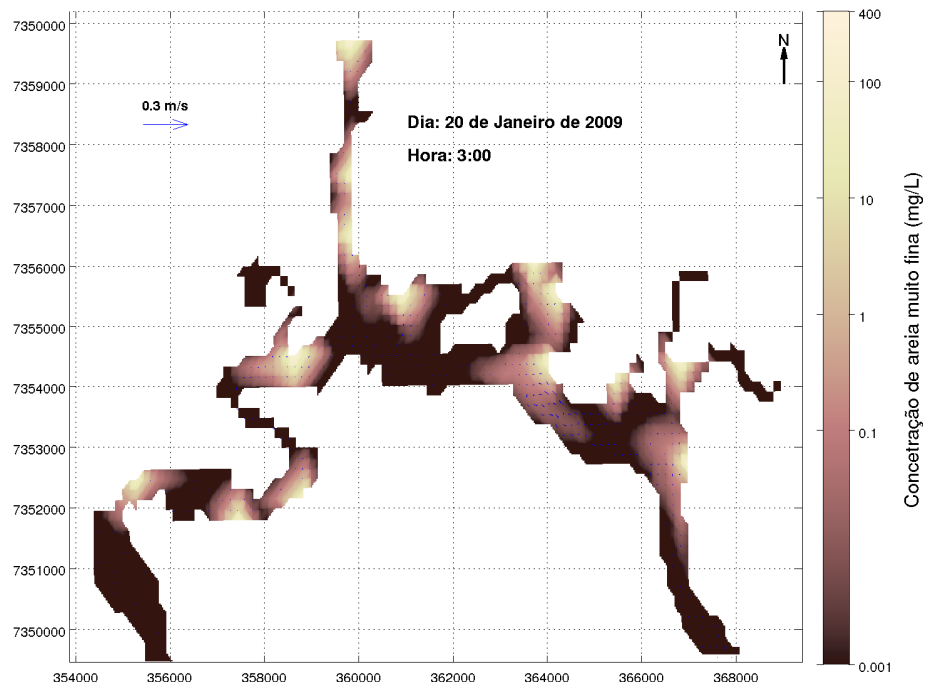


Figura 5.1.6.5-77 Mapa de concentração média na coluna d'água de areia muito fina para o dia 20 de Janeiro de 2009 às 04:00 h.

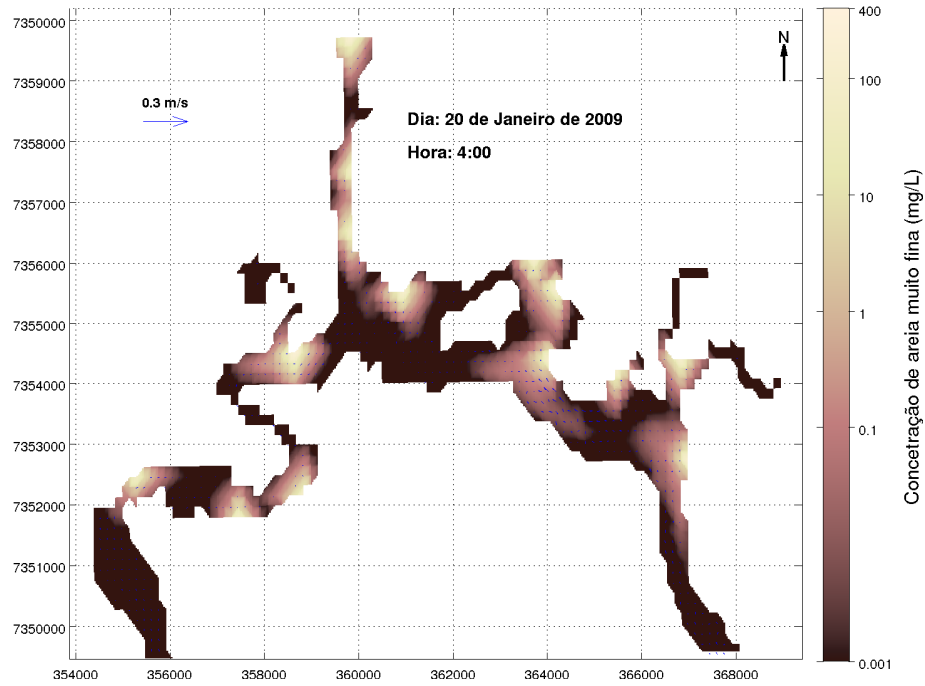


Figura 5.1.6.5-78 Mapa de concentração média na coluna d'água de areia muito fina para o dia 20 de Janeiro de 2009 às 05:00 h.

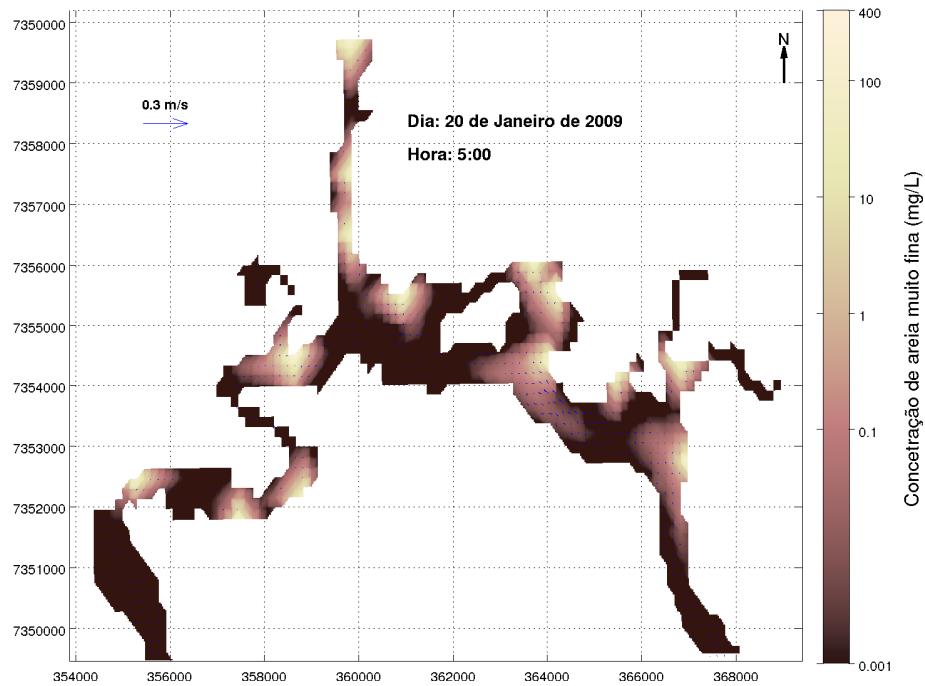


Figura 5.1.6.5-79 Mapa de concentração média na coluna d'água de areia muito fina para o dia 20 de Janeiro de 2009 às 06:00 h.

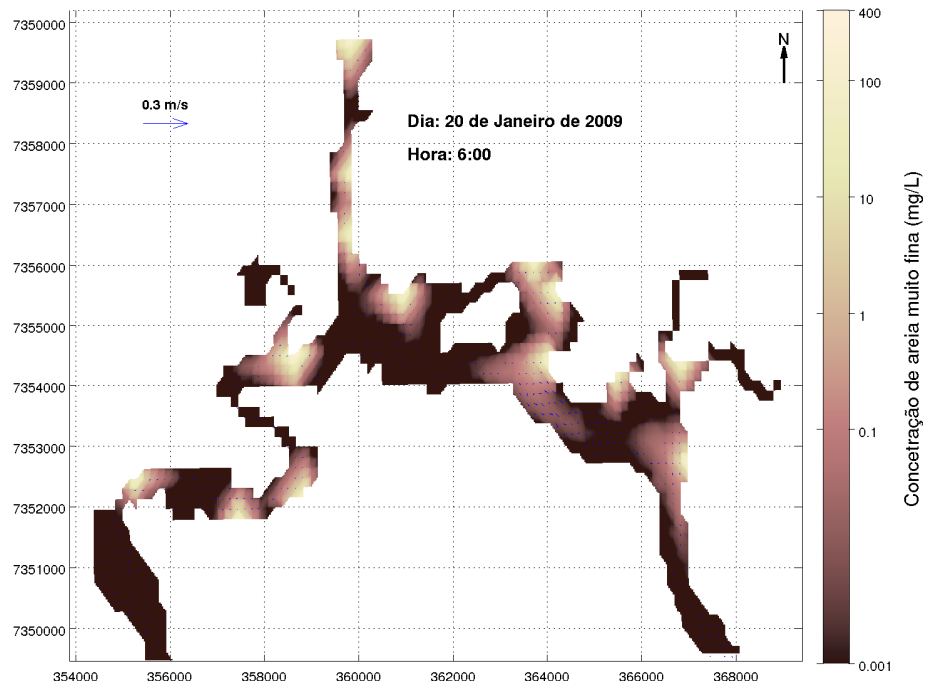


Figura 5.1.6.5-80 Mapa de concentração média na coluna d'água de areia muito fina para o dia 20 de Janeiro de 2009 às 07:00 h.

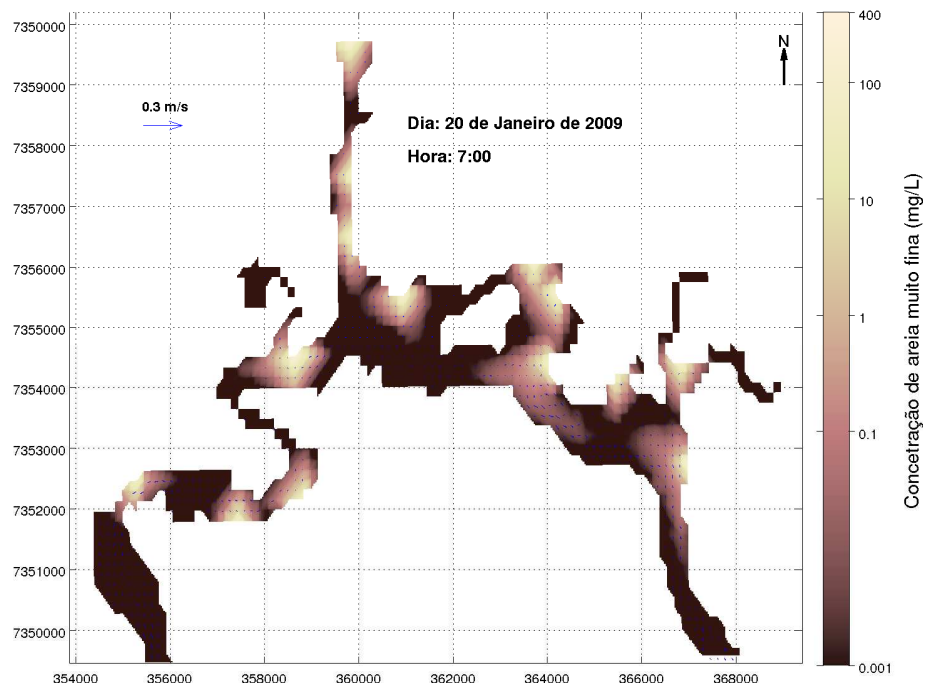


Figura 5.1.6.5-81 Mapa de concentração média na coluna d'água de areia muito fina para o dia 20 de Janeiro de 2009 às 08:00 h.

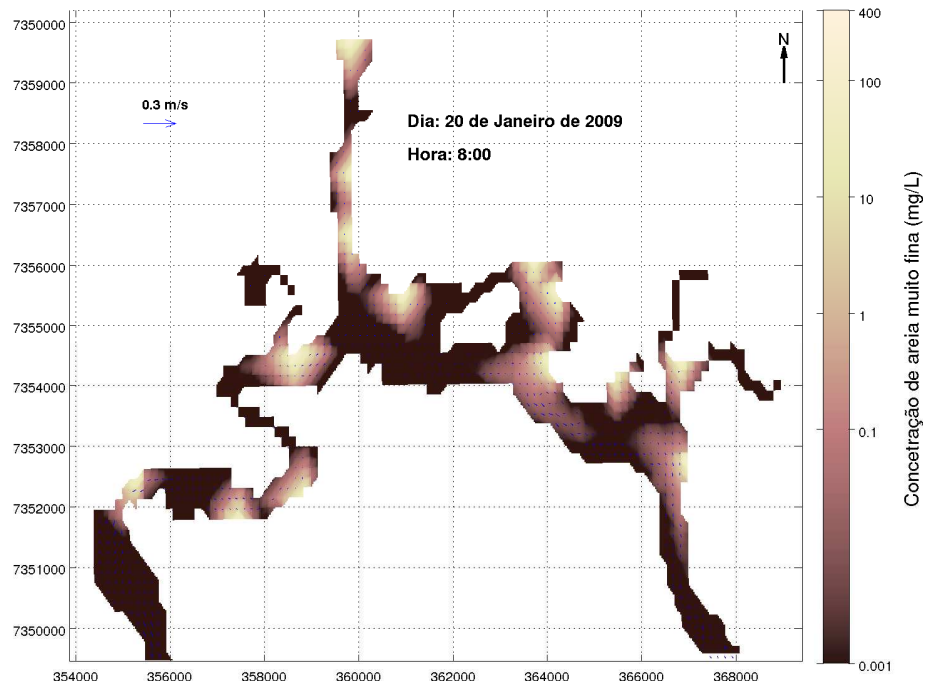


Figura 5.1.6.5-82 Mapa de concentração média na coluna d'água de areia muito fina para o dia 20 de Janeiro de 2009 às 09:00 h.

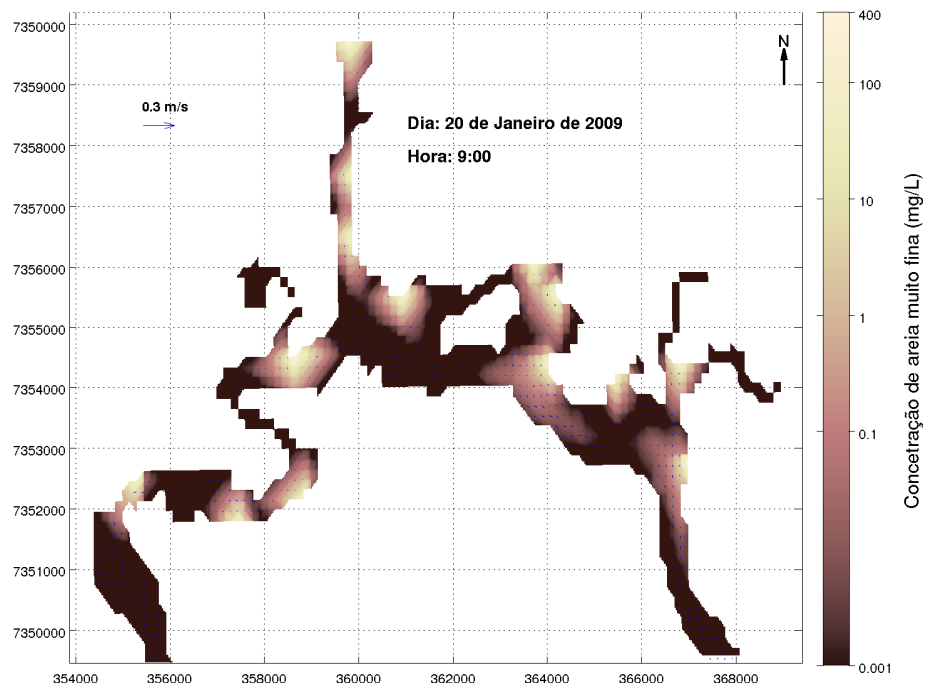




Figura 5.1.6.5-83 Evolução do nível médio do mar no período do dia 19 de Janeiro de 2009 às 21:00 h até o dia 20 de Janeiro de 2009 às 08:00 h.

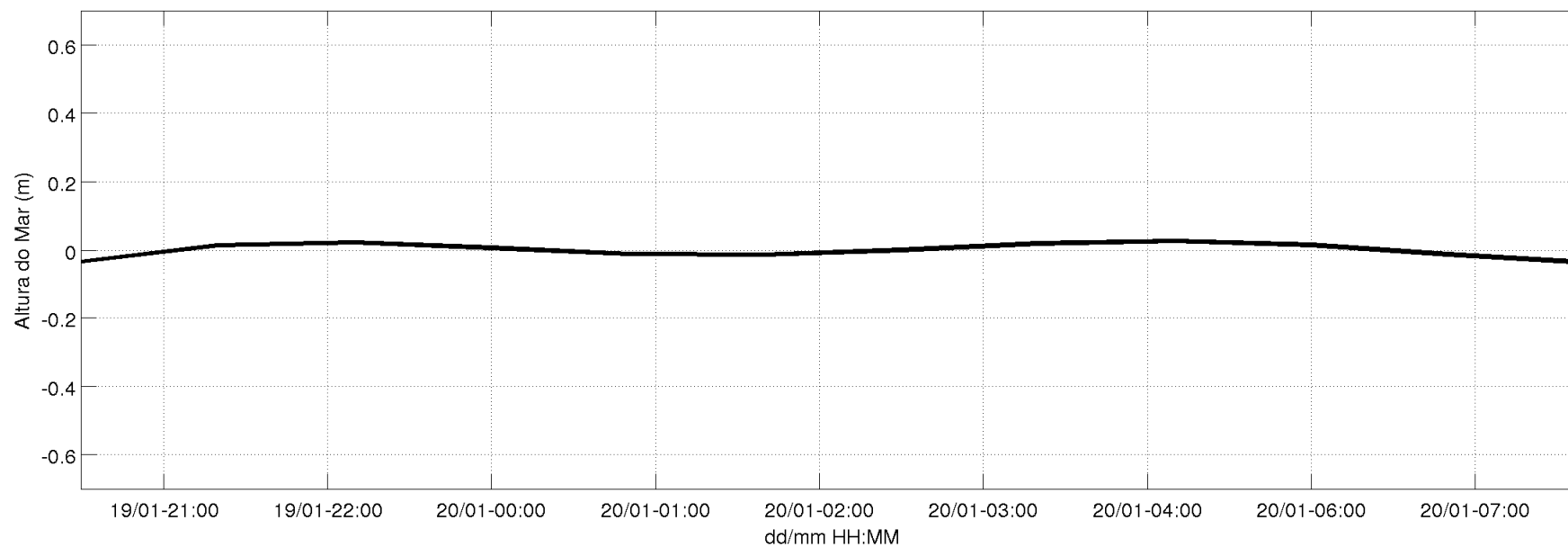


Figura 5.1.6.5-84 Mapa de concentração média na coluna d'água de argila para o dia 24 de Julho de 2009 às 11:00 h durante a passagem de uma frente fria na região.

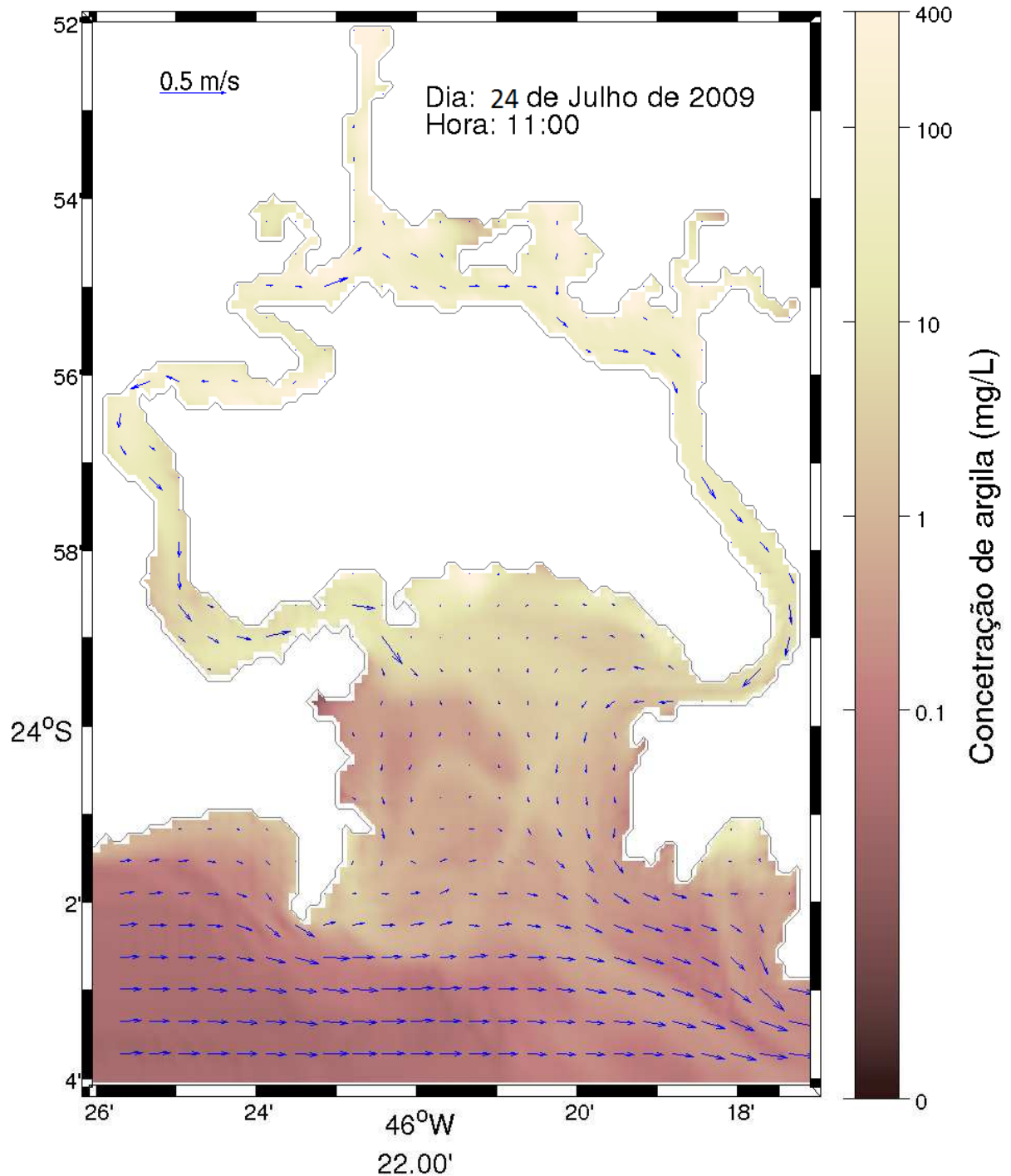


Figura 5.1.6.5-85 Mapa de concentração média na coluna d'água de silte para o dia 24 de Julho de 2009 às 11:00 h durante a passagem de uma frente fria na região.

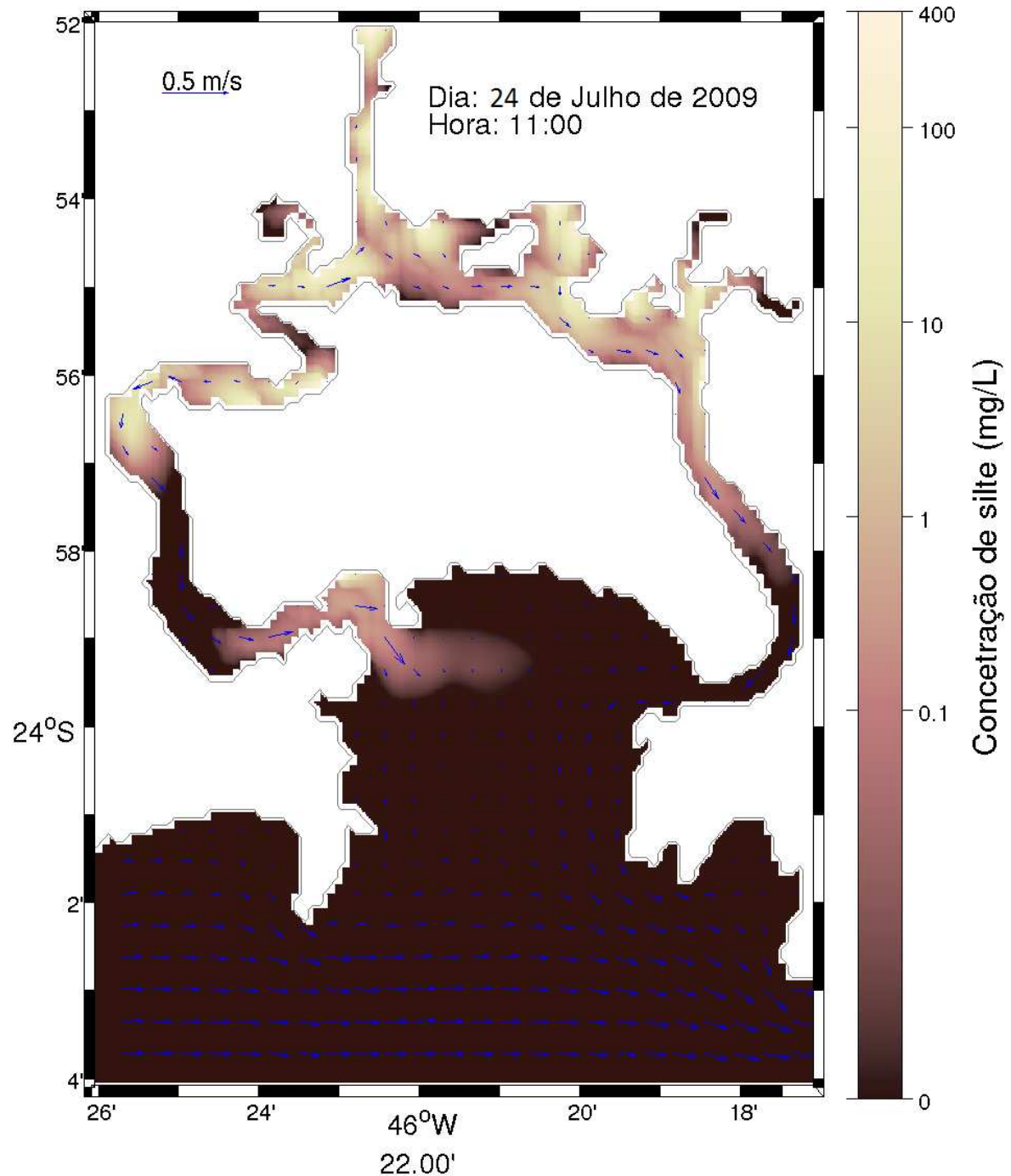


Figura 5.1.6.5-86 Mapa de concentração média na coluna d'água de areia muito fina para o dia 24 de Julho de 2009 às 11:00 h durante a passagem de uma frente fria na região.

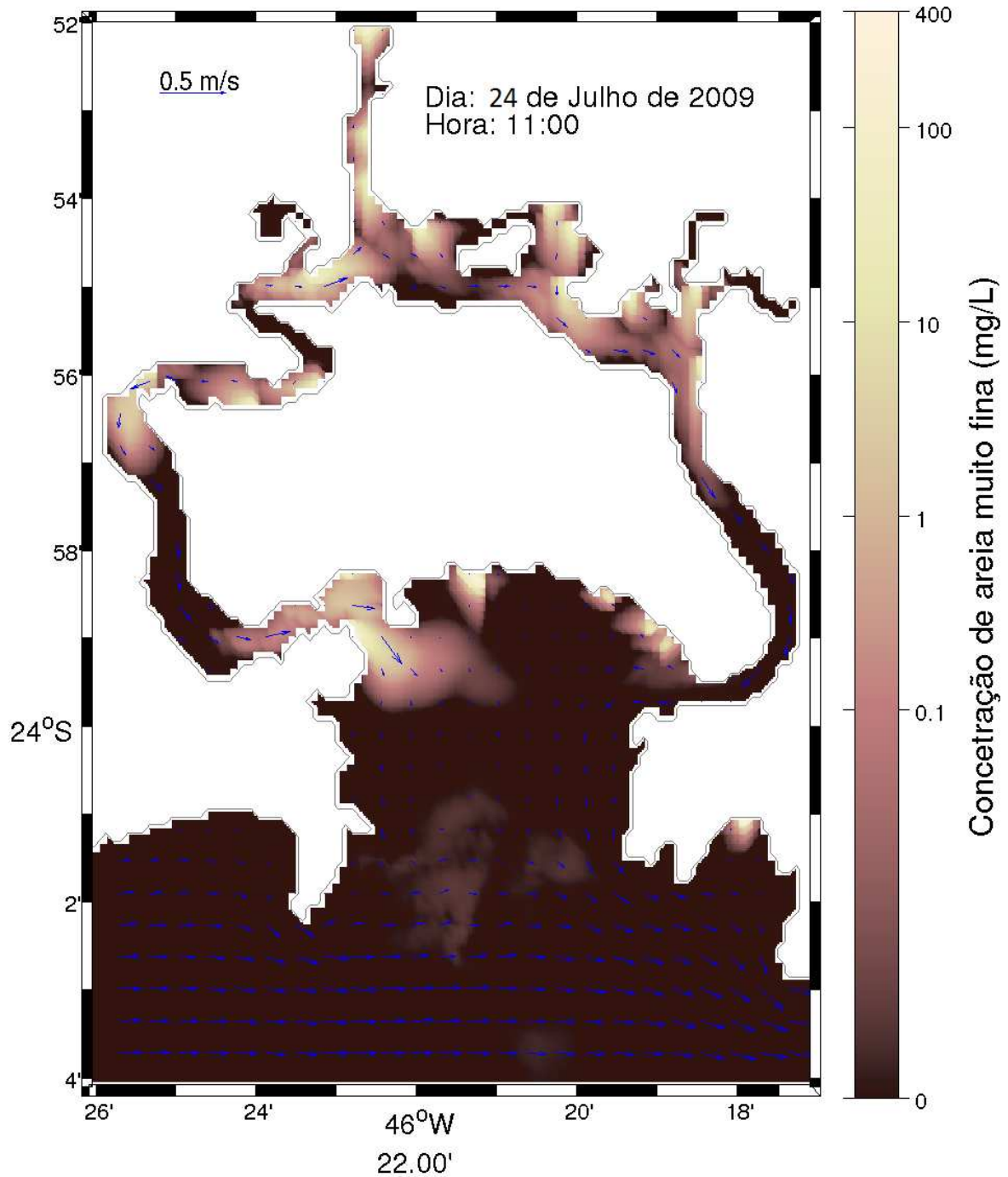


Figura 5.1.6.5-87 Mapa de concentração média na coluna d'água de argila para o dia 24 de Julho de 2009 às 11:00 h durante a passagem de uma frente fria na região.

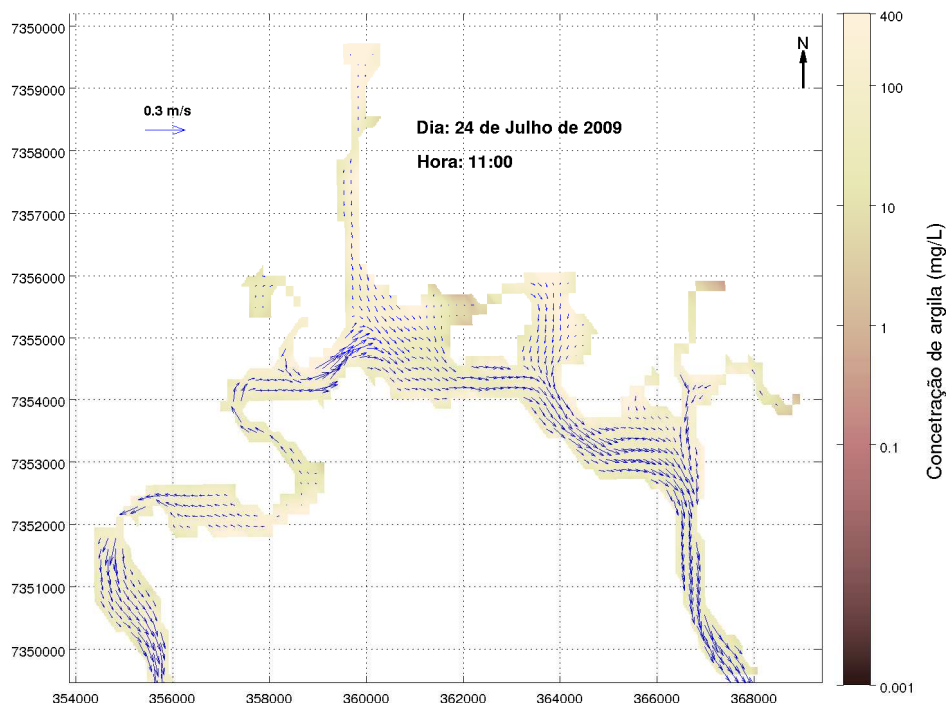


Figura 5.1.6.5-88 Mapa de concentração média na coluna d'água de silte para o dia 24 de Julho de 2009 às 11:00 h durante a passagem de uma frente fria na região.

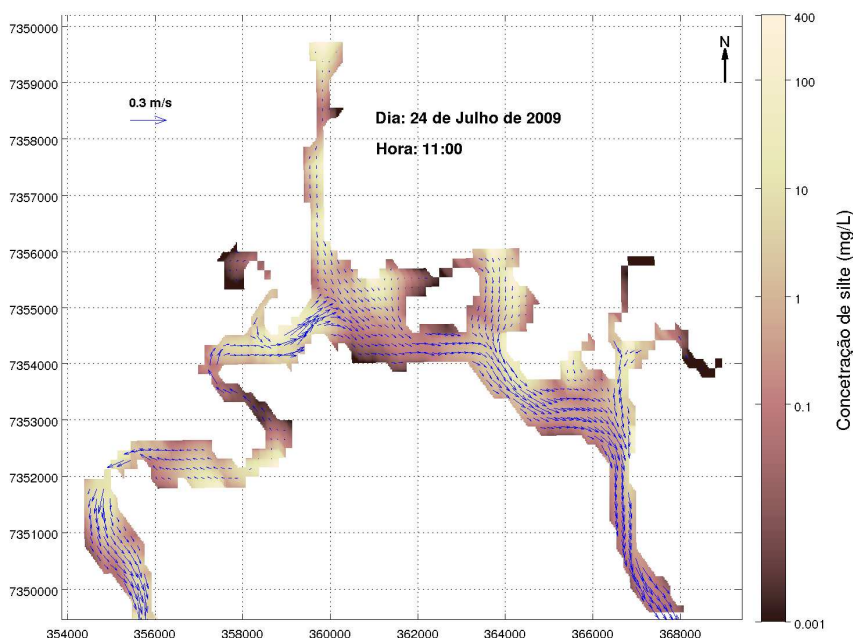


Figura 5.1.6.5-89 Mapa de concentração média na coluna d'água de areia muito fina para o dia 24 de Julho de 2009 às 11:00 h durante a passagem de uma frente fria na região.

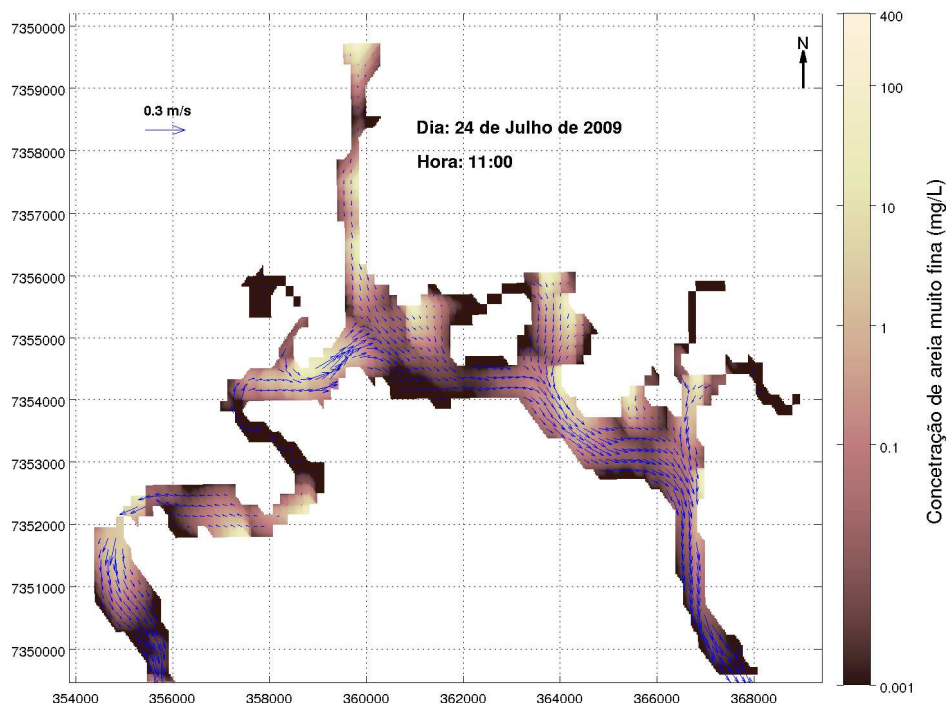


Figura 5.1.6.5-90 Mapa de concentração média na coluna d'água de argila para o dia 08 de Janeiro de 2009 às 01:00 h durante o período de máxima descarga fluvial.

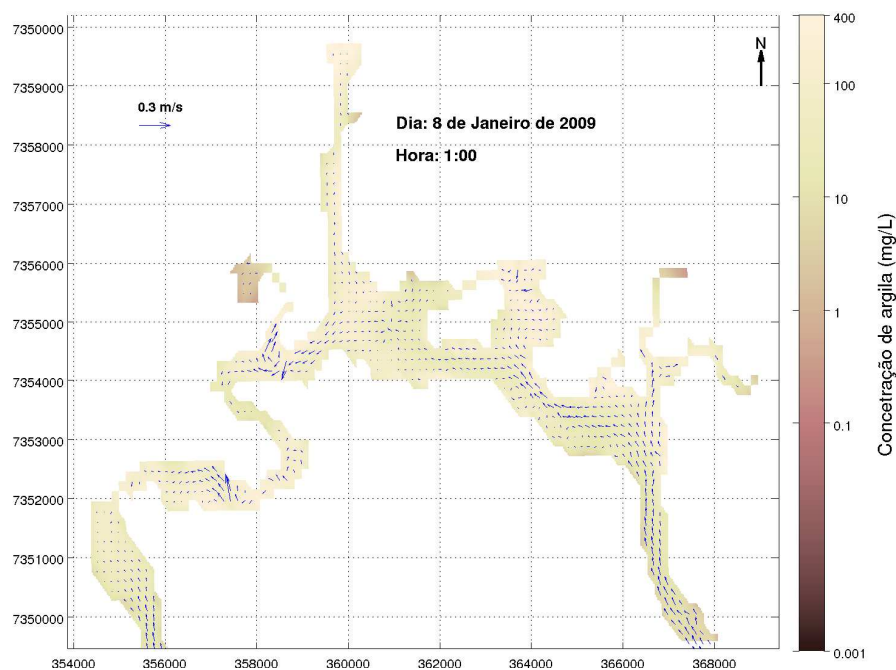


Figura 5.1.6.5-91 Mapa de concentração média na coluna d'água de silte para o dia 08 de Janeiro de 2009 às 01:00 h durante o período de máxima descarga fluvial.

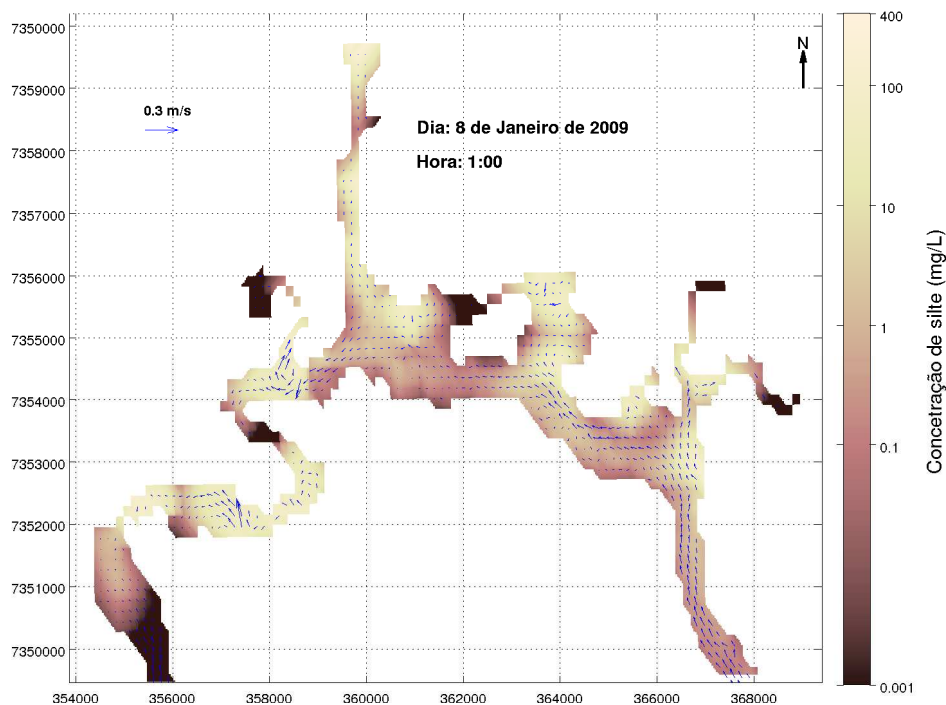


Figura 5.1.6.5-92 Mapa de concentração média na coluna d'água de areia muito fina para o dia 08 de Janeiro de 2009 às 01:00 h durante o período de máxima descarga fluvial.

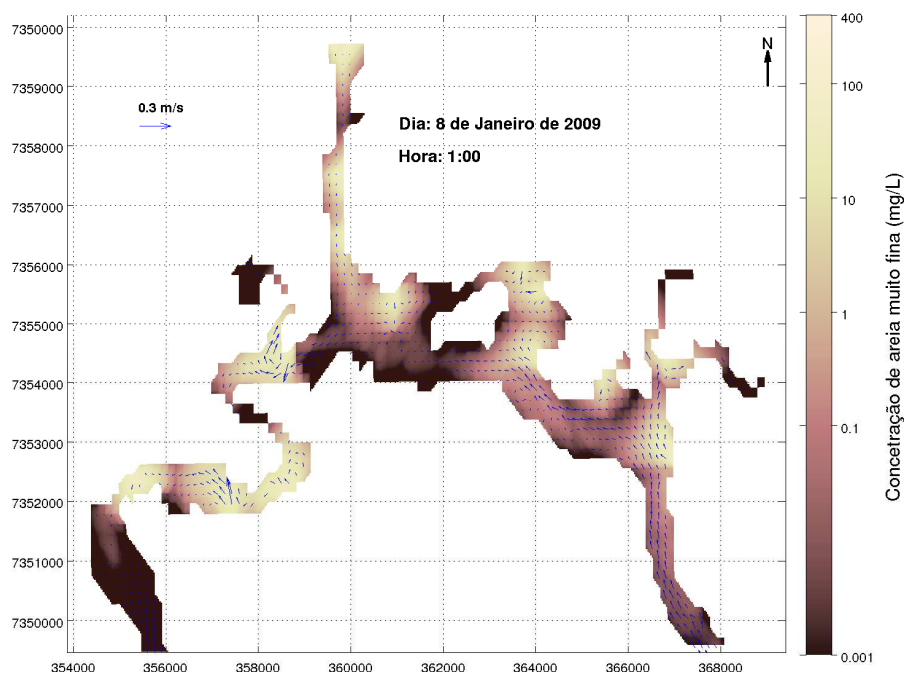


Figura 5.1.6.5-93 Mapa de concentração média na coluna d'água de argila para o dia 04 de Julho de 2009 às 17:00 h durante o período de mínima descarga fluvial.

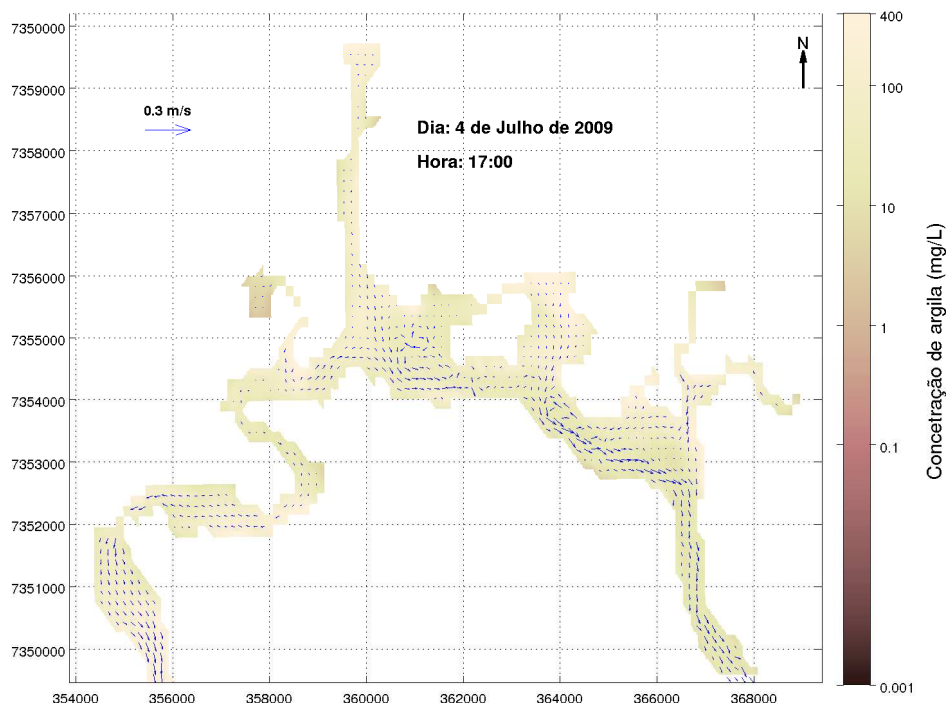


Figura 5.1.6.5-94 Mapa de concentração média na coluna d'água de silte para o dia 04 de Julho de 2009 às 17:00 h durante o período de mínima descarga fluvial.

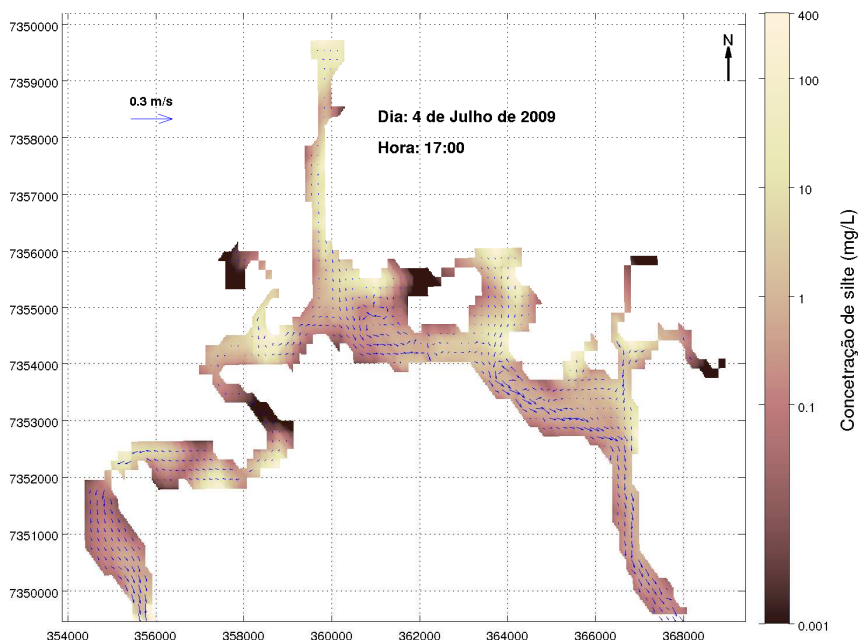


Figura 5.1.6.5-95 Mapa de concentração média na coluna d'água de areia muito fina para o dia 04 de Julho de 2009 às 17:00 h durante o período de mínima descarga fluvial.

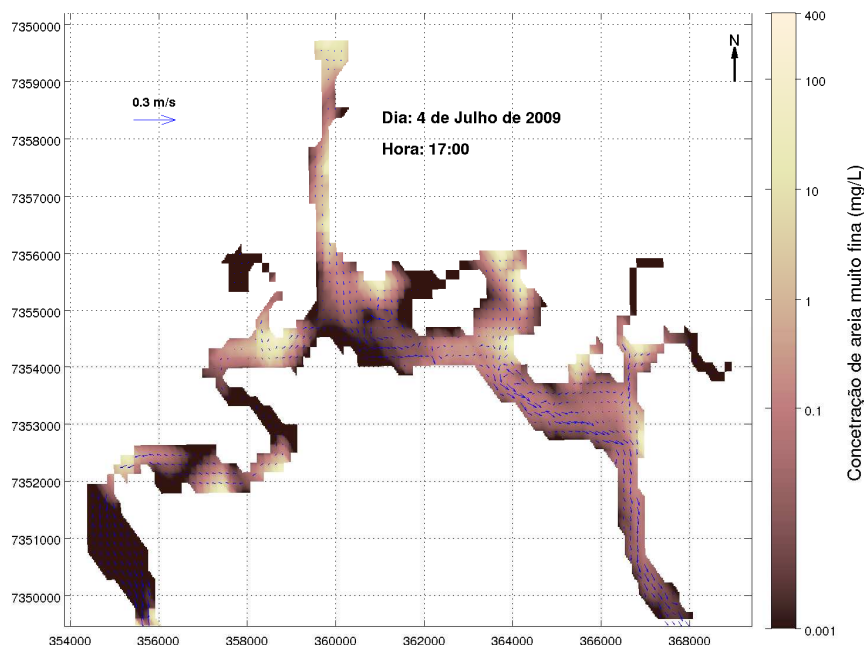
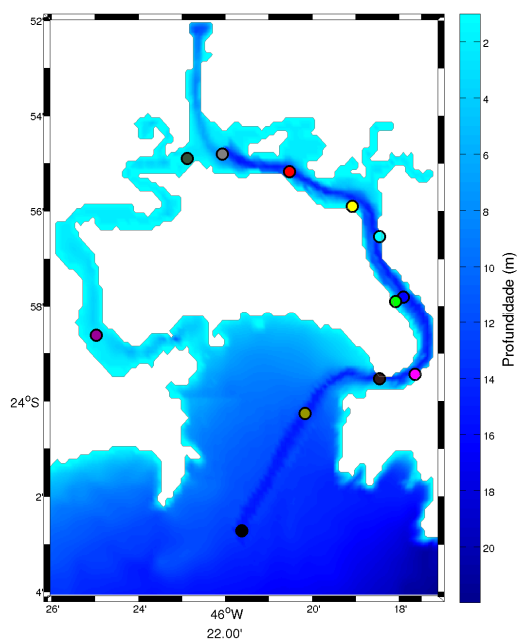


Figura 5.1.6.5-96 Mapa da região modelada com os pontos, representados pelos círculos coloridos, onde foram extraídos os perfis temporais da batimetria para as simulações dos meses de Janeiro de 2009 e Julho de 2009.



Quadro 5.1.6.5-3 Localização geográfica dos pontos apresentados na Figura 5.1.6.5-96 Sistema de coordenada de referência WGS84.

Identificação do ponto	E	N
	359603	7359219
	360200	7356659
	360279	7355854
	361170	7355155
	363701	7355714
	364420	7355317
	364163	7354047
	364381	7353656
	365454	7353752
	366631	7354178
	366919	7352147
	358531	7354233

Figura 5.1.6.5-97 Evolução da profundidade para diversos pontos do domínio simulado para o mês de Janeiro de 2009. Valores negativos indicam que o local sofreu assoreamento enquanto que valores positivos indicam que o local sofreu erosão. Cada linha tem uma cor correspondente ao local representado por um círculo com esta mesma cor, no mapa da Figura 5.1.6.6-96.

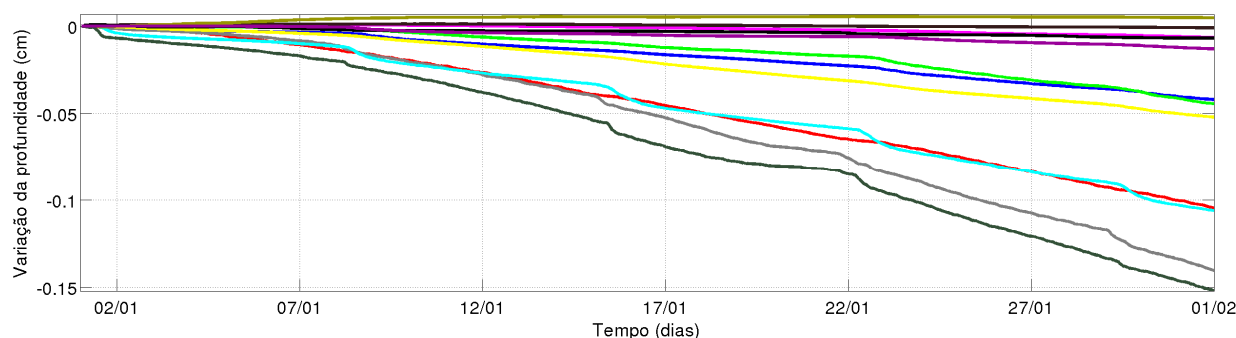
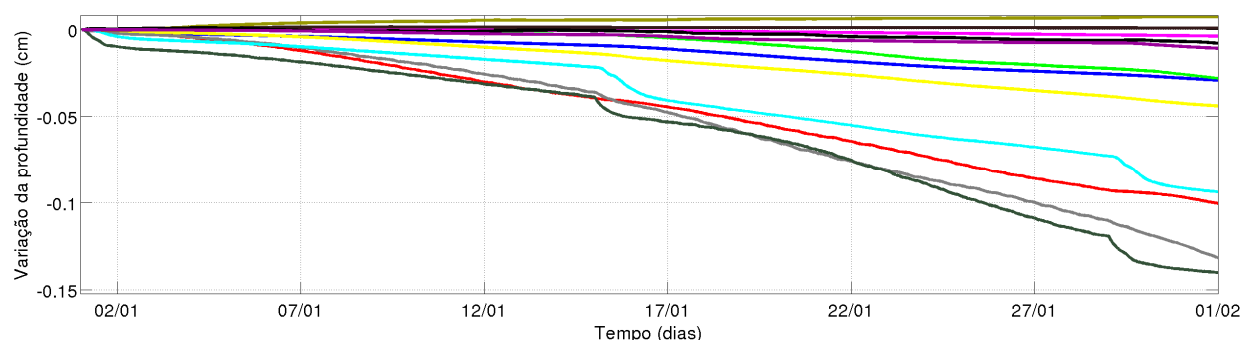


Figura 5.1.6.5-98 Evolução da profundidade para diversos pontos do domínio simulado para o mês de Julho de 2009. Valores negativos indicam que o local sofreu assoreamento enquanto que valores positivos indicam que o local sofreu erosão. Cada linha tem uma cor correspondente ao local representado por um círculo com esta mesma cor, no mapa da Figura 5.1.6.6-96.



e) DISCUSSÃO

Os mapas de concentração média de sedimentos na coluna d'água apresentados nas Figuras 5.1.6.5-8 a 5.1.6.5-95 mostram que os resultados para materiais finos (*i.e.* silte e argila) registraram maiores valores em toda a região do alto estuário, enquanto que, para o sedimento areia muito fina, foram apresentadas concentrações mais significativas próximo aos pontos de vazão de água doce (*i.e.* pontos de aporte de água e materiais sedimentares vindos do continente).

Essa grande quantidade de materiais em suspensão no alto do estuário se deve à proximidade das áreas fonte de sedimentos provenientes da drenagem continental, porém estes materiais - principalmente areia muito fina - já iniciam o processo de deposição na região, diminuindo a concentração de sedimentos suspensos em direção à desembocadura do estuário.

A característica mais marcante no padrão de transporte de sedimentos no interior do complexo estuarino Santos-São Vicente é o domínio do transporte pela ação das marés, mostrando uma quase simetria no transporte das partículas na direção preferencial das correntes geradas pela variação do nível da água na região.

Os resultados de concentrações de sedimentos na coluna d'água para os períodos de maré de sizígia e quadratura, Figuras 5.1.6.5-8 a 5.1.6.5-43 e 5.1.6.5-45 a 5.1.6.5-80, respectivamente, mostram uma relação entre o aumento do transporte de sedimentos na região e o aumento na intensidade das correntes provocadas pela variação do nível do mar no estuário.

Os primeiros trabalhos que realizaram um levantamento sobre comportamento dos sedimentos neste estuário, como por exemplo, a pesquisa realizada por EPUSPI-DAEE (1966), já haviam observado esta característica predominante no transporte destes materiais.

Durante os períodos simulados, a região do alto estuário apresentou concentrações médias na coluna d'água de sedimentos da ordem de 10 a 100 mg/L, atingindo valores acima de 100 mg/L, predominantemente, durante os períodos de maior vazão dos rios, como apresentado nas Figuras 5.1.6.5-90 a 5.1.6.5-92. Isto se deve ao fato que, quando as vazões dos rios aumentam, conseqüentemente, ocorre um aumento do aporte de sedimentos para a região dos canais estuarinos, permitindo maiores concentrações de sedimentos em suspensão no local.

Durante a passagem de uma frente fria na região, Figuras 5.1.6.5-84 a 5.1.6.5-89, o transporte no interior do estuário apresentou um aumento pouco significativo, causado pela intensificação das correntes na região.

A partir dos perfis de evolução da profundidade de algumas regiões do estuário (Figuras 5.1.6.5-97 e 5.1.6.5-98), pode-se notar que, todo interior do estuário apresenta-se como, predominantemente, deposicional, não havendo processos erosivos significativos, evidenciando uma baixa competência de transporte de sedimento do complexo estuarino em questão. Isto se deve a fatores relacionados à baixa intensidade das correntes na região (Ponçano, 1985), aliado à coesividade do sedimento de fundo (EPUSPI-DAEE, 1966).

Vale salientar que, para a região, o processo de deposição devido à baixa intensidade das correntes é mais importante do que a deposição por floculação dos materiais finos (Fúlfaro *et al.*, 1976).

A partir dos resultados das simulações numéricas para evolução do fundo durante os meses de janeiro e julho (Figuras 5.1.6.5-97 e 5.1.6.5-98), é possível observar que os perfis que apresentaram maiores taxas de assoreamento localizam-se na região do alto estuário. Este comportamento já era esperado para esta região, devido à sua baixa



competência hidrodinâmica para transportar todo o sedimento em suspensão ao longo de todo o estuário, depositando-se então a maior parte deste sedimento logo nas áreas fonte de material continental, que ficam localizadas no alto do estuário.

A variação da taxa de assoreamento para a região do alto estuário ficou entre, aproximadamente, 1,30 cm/ano e 1,80 cm/ano. Estes dados corroboram com os apresentados por Fukumoto (2007) que registrou variações médias de profundidade de $(1,58 \pm 0,15)$ cm/ano para a região do Largo de Santa Rita e $(1,34 \pm 0,13)$ cm/ano para a região do Largo do Canéu para o período considerado, de 1964 a 2002.

A região mais a jusante do alto estuário (*i.e.* os canais de São Vicente e de navegação do Porto Organizado de Santos) apresentou um acentuado equilíbrio morfodinâmico, variando sua taxa de sedimentação entre, aproximadamente, 0,6 cm/ano e 1,30 cm/ano, evidenciando mais uma vez a retenção da maior parte dos sedimentos que chegam ao estuário já na região dos largos.

O monitoramento realizado por EPUSPI-DAEE (1966) mostrou que, na região do cais do Barnabé, ocorreu um assoreamento de, aproximadamente, 1 (um) metro de espessura nos primeiros 150 metros da muralha de atracação, em um período de aproximadamente 45 dias após a dragagem do local.

Um importante processo de assoreamento dos canais de acesso e navegação do Porto Organizado de Santos é o desbarrancamento do talude lateral dos canais após a dragagem dos mesmos, devido à maior instabilidade deste talude gerada pela alteração/aprofundamento do canal. O assoreamento daquela magnitude não está relacionado a sedimentos vindos da drenagem continental, que chegam ao estuário e se depositam neste local, mas sim, a este processo de desmoronamento da borda do canal.

Possíveis instabilidades decorrentes do grau de inclinação acentuado destes taludes podem gerar um processo de acomodação do sedimento na borda, em sentido ao centro dos canais. Este processo de acomodação do sedimento causado pela alteração da inclinação do talude dos canais não pode ser simulado pelo modelo numérico.

f) CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nas simulações realizadas, os materiais finos, principalmente da classe argila, permanecem em altas concentrações na coluna d'água enquanto que o sedimento areia muito fina apresenta maior deposição nas regiões mais próximas às áreas fontes, com menores valores de concentração na coluna d'água.

A região do complexo estuarino mostrou forte relação entre a concentração de sedimento em suspensão, o transporte do mesmo e a intensidade das correntes, como mostraram os resultados relativos aos períodos de maré de sizígia e passagem de frente fria.

A variação de aporte de água doce também resultou em alterações significativas no transporte de sedimentos originários do continente e, conseqüentemente, na quantidade de materiais em suspensão no alto estuário, indicando que a região sofre grande influência de períodos chuvosos típicos da região.

A taxa de deposição é da ordem de 0,5 cm/ano a 2 cm/ano para todo interior do estuário, sem apresentar nenhuma área de erosão, indicando uma região com regime altamente deposicional.

Desta forma, o alto estuário comporta-se como uma região em acentuado equilíbrio morfodinâmico, com baixa competência para transportar o sedimento em direção à desembocadura do estuário.

O presente estudo é baseado na aplicação de um modelo numérico que representa o estado da arte em simulações de processos oceanográficos regionais. A modelagem



numérica e as simulações realizadas permitem a melhor compreensão dos processos responsáveis pelo transporte de sedimento na região de interesse.

No entanto, em função da inexistência de dados medidos do transporte de sedimentos e taxas de sedimentação/erosão, o modelo não pôde ser validado em relação a medidas *in situ*.

O diagnóstico hidrodinâmico e sedimentológico realizado indicam que, em primeira análise, as obras de implantação do terminal portuário multiuso constituem intervenções de pequena escala espacial, de modo que não chegam a interferir no comportamento dinâmico das águas e dos sedimentos no estuário como um todo.

Apenas efeitos locais de escala pequena podem vir a ser significativos, dentro dos limites da área do empreendimento, os quais podem ser estimados a partir de estudos específicos da área a ser utilizada como terminal portuário. Em termos de interferência nos padrões hidrodinâmicos e sedimentológicos de todo o complexo estuarino, o impacto do empreendimento pode ser considerado como mínimo.

Dessa forma, quanto aos impactos na circulação estuarina, não há necessidade de considerar medidas mitigadoras e compensatórias.