

## SIMULAÇÃO DA HIDRODINÂMICA E DISPERSÃO DE POLUENTES COM MONITORAMENTO VIRTUAL NO RIO MATAPI - AP

Alan C. Cunha<sup>1</sup>, Luis A.R. Pinheiro<sup>2</sup>, Helenilza F.A. Cunha<sup>3</sup>, Harry E. Schulz<sup>4</sup>, Antônio C.P. Brasil Jr.<sup>5</sup> e Everaldo B. Souza<sup>6</sup>

**Resumo.** No presente trabalho foram realizadas simulações numéricas, para um ciclo de maré semidiurna, do escoamento de um trecho do rio Matapi, afluente do rio Amazonas, próximo às cidades de Santana e Macapá. O objetivo geral foi avaliar o comportamento espacial e temporal do escoamento e de potenciais fontes poluentes na foz do rio Matapi e confluência com o rio Amazonas. O trecho em questão envolve o Distrito Industrial de Santana, região de potencial ocorrência de derrames de compostos poluentes. Foram simuladas as condições dos escoamentos naturais causadas por movimentos de marés e que influenciam fortemente o comportamento dos constituintes passivos da água. Os resultados são apresentados na forma de campos hidrodinâmicos em regime transiente e campos de concentração de poluentes associados aos primeiros. As informações são úteis para observar a permanência de poluentes no trecho e devem servir de base para o planejamento de disposição de águas residuárias industriais nessa região, o que envolve as áreas de engenharia sanitária, engenharia ambiental e saúde pública. A compreensão da permanência dos poluentes permite estabelecer áreas críticas da zona estuarina já poluídas ou sob risco de poluição.

**Palavras-chaves:** Simulação numérica. Escoamento em rios. Elementos finitos. Poluição em rios. Rio Matapi. Rio Amazonas. Estuários.

### 1 Introdução

Os sistemas fluviais amazônicos têm demandado um melhor nível de entendimento acerca dos processos de assimilação e dispersão de resíduos e efluentes lançados nos corpos de água naturais, demanda decorrente da inerente complexidade desses sistemas. Adicionalmente, verifica-se a necessidade de procedimentos de gestão e de monitoramentos mais sistemáticos, voltados especificamente para esses sistemas fluviais. A razão principal é a falta de infraestrutura de saneamento básico e os impactos ambientais decorrentes desta falta sobre os recursos hídricos próximos de áreas urbanas, periurbanas e industriais, como é o caso do rio Matapi (CUNHA et al., 2004), objeto do presente estudo.

Os efluentes urbanos e industriais lançados em rios do estuário amazônico estão sujeitos aos efeitos das marés, justificando a necessidade de se construir sistemas de controle, monitoramento e fiscalização, uma vez que se multiplicam nessas áreas os riscos de contaminação ambiental. Um exemplo é o Distrito Industrial de Santana, que é abordado neste texto. Esses sistemas de controle manteriam e fiscalizariam os níveis e padrões da qualidade da água preestabelecidos para classes de corpos de água e determinados pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA).

Sabe-se que o tratamento dos esgotos urbanos e dos resíduos industriais é um fator fundamental para a conservação dos corpos de água naturais. Este fato não é desconhecido pelos profissionais da área

1 E-mail: alan.cunha@iepa.ap.gov.br; alancunha@unifap.br

2 E-mail: aramisrp@gmail.com

3 E-mail: helenilzacunha@unifap.br

4 E-mail: heschulz@sc.usp.br; harrieschulz@gmail.com  
Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Núcleo de Ciências Térmicas e Engenharia. Departamento de Hidráulica e Saneamento. Av. do Trabalhador São-carlense, 400, CEP 13566-590. São Carlos, S.P.

5 E-mail: brasiljr@unb.br

6 E-mail: everaldo@ufpa.br

que atuam na Amazônia, sendo apontado como um problema sério a ser ainda resolvido. Entretanto, ao mesmo tempo são desconhecidas quase que totalmente as características autodepurativas dos corpos de água na região e pouco se tem estudado os tipos de resíduos poluentes lançados nesses mesmos corpos de água. Assim, a urbanização e a industrialização exigem a adoção de práticas mitigadoras dos impactos, porém inserida em uma realidade da qual pouco se conhecem as reações do ambiente às ações antrópicas. Ferramentas inteligentes devem ser utilizadas nas avaliações previsivas, considerando ainda que os sistemas fluviais amazônicos e os efeitos combinados da carência de infraestrutura de saneamento só podem ser bem entendidos havendo a presença ativa do pesquisador na própria área de estudo, ou seja, o estudo “à distância” é inócuo. O presente trabalho apresenta resultados da busca da conciliação entre a observação local (na extremidade mais “real” do problema) e a previsão com ferramentas numéricas (na extremidade mais “virtual” do problema) no esforço de permitir a tomada de decisões mais objetiva para os problemas que são vivenciados nessa região.

Do ponto de vista teórico e do gerenciamento e controle de poluição clássicos dos recursos hídricos, em condições de abundância e uso pouco intensivo da água são desnecessários maiores cuidados com o seu controle, tanto em termos de quantidade quanto de qualidade. Em princípio, essas seriam as condições vigentes no rio Matapi, na área costeira de Macapá e Santana. Entretanto, os estudos realizados por Cunha, Cunha, e Siqueira (2001) e Cunha et al. (2004) mostram uma significativa alteração da qualidade da água em rios próximos desta área, principalmente quando se adentra a montante, em áreas urbanas e periurbanas. Alguns detalhes são ainda descritos em Cunha e Couto (2002), sugerindo urgência e aprofundamento dos estudos.

O presente estudo concentra-se na hidrodinâmica e na dispersão de poluentes no rio Matapi, em especial na zona de influência que limita o Distrito Industrial de Santana, desde sua foz até aproximadamente 7 km acima (Porto do Céu), indicada pela Figura 1. Conforme mencionado, na “extremidade mais real do trabalho” foram utilizados dados e informações previamente coletados em campo, tais como a descarga líquida (vazão)

ao longo de um ciclo de maré semidiurna e parâmetros da qualidade da água em uma seção de estudo adequadamente escolhida. Por outro lado, “na extremidade mais virtual do trabalho” fez-se uso da simulação computacional, gerando informações numéricas sobre os processos físicos da hidrodinâmica e da dispersão de poluentes no escoamento (nesse caso, um passivo ou escalar acoplado ao escoamento) e efetuando um monitoramento virtual das concentrações de poluente observável, avaliadas em quatro seções de medidas (considerando observadores fixos). As seções foram escolhidas estrategicamente, de forma a possibilitar a posterior análise espacial-temporal das respostas e dos picos de concentração na dinâmica do escoamento das marés semidiurnas.

A meta ou objetivo geral deste trabalho foi viabilizar a aplicação de um *software* numérico na simulação do escoamento em um rio inserido na realidade amazônica, buscando adequá-lo como ferramenta no auxílio à gestão e tomada de decisões, tendo como base o seu potencial previsivo. As metas específicas foram:

- Simular as principais características do escoamento do rio Matapi, adotado para estudo de caso, aplicando o “modelo de turbulência híbrido denominado de SST (Tensor Shear Stress/ CFX-Ansys)”, para obter previsões do seu comportamento hidrodinâmico e da dispersão de plumas de poluentes em seu seio, reproduzindo o regime transiente natural das correntes de marés;
- Analisar o comportamento das descargas líquidas e das plumas de poluentes ao longo de um ciclo de maré semidiurna (12,40 horas aproximadamente) submetidas a duas fontes contínuas de descarga de poluentes no centro do canal e em posições localizadas aproximadamente a 1/3 e 2/3 de distância da foz do rio, sendo o trecho considerado neste estudo de cerca de 7 km de extensão;
- Analisar o comportamento espacial-temporal dos picos de concentração dos poluentes, devido à disposição das duas fontes de emissão contínua de poluentes, nas quatro estações de monitoramento, estrategicamente escolhidas ao longo do trecho estudado, visando subsidiar estratégias de gestão de recursos hídricos.

## 2 Descrição das características físicas da área no entorno da foz do rio Matapi - AP

O domínio espacial escolhido para o estudo foi o trecho de aproximadamente 7 km de extensão a partir da foz do rio Matapi até Porto do Céu, em direção a montante, mostrado na Figura 1. Esse trecho sofre influência da presença do Distrito Industrial de Santana, criado em 1982 e localizado no Município de Santana, a 6 km do Porto de Santana e a 14 km da Capital do Estado, Macapá. Esse distrito contribui para o desenvolvimento do Estado e possui uma área de 1.300 ha, dentro da qual está situado o Loteamento Industrial, com área aproximada de 400 ha, distribuída em 11 quadras, subdivididas em 96 lotes. Os lotes têm dimensões de 20.000 m<sup>2</sup>, 10.000 m<sup>2</sup> e 5.000 m<sup>2</sup>. Como limite do distrito tem-se: ao norte a linha do Equador, ao sul o rio Amazonas, a leste a rodovia Macapá/Mazagão e a oeste o rio Matapi (conforme mostra a Figura 1).

A região pode ser caracterizada como de ambientes costeiros de transição, encontrando-se áreas da bacia hidrográfica inundada pela maré e influenciada por diferentes regimes energéticos, como as descargas de água da própria bacia de drenagem do rio Amazonas. O trecho estudado do rio Matapi pode ser considerado como bastante influenciado pelo regime da descarga líquida, pelos efeitos de marés e das precipitações pluviométricas sazonais, de acordo com algumas definições de estuários feitas por Miranda, Castro e Kjerfve. (2002). A Figura 1 mostra também a retirada da cobertura vegetal junto ao rio, que tem influências imediatas no transporte de sedimentos ao rio. O aspecto de erosão e hidrossedimentologia é relevante, porém não é abordado no presente estudo. Alguns princípios básicos sobre o tema são encontrados em Silva, Schulz e Camargo (2007).

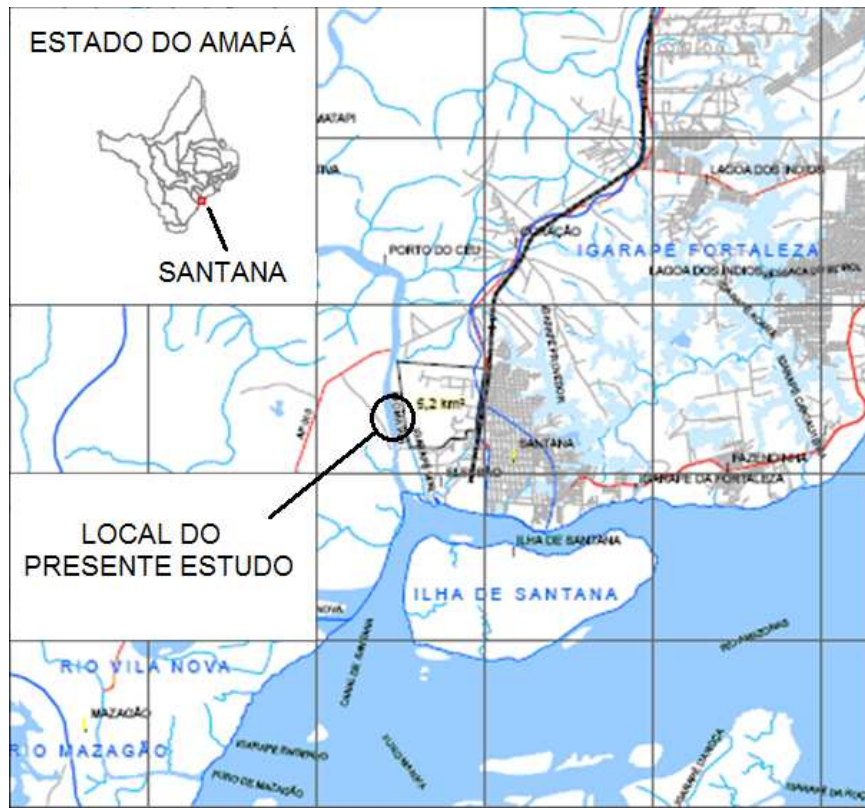
Estuários como o Amazônico são típicos de regiões de planície costeira, que se formaram durante a transgressão do mar no Holoceno. Esses estuários são relativamente rasos, raramente excedendo 30 m de profundidade. A área de seção transversal em geral aumenta a jusante no estuário, às vezes de forma exponencial e a configuração geométrica tem a forma de "V", em que a razão entre a largura e a profundidade, em geral, é grande (LUNG, 1993, MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002).

Entende-se que as capacidades de dispersão, diluição e de autodepuração de cada corpo de água são características particulares e, em seu próprio contexto, variáveis. Daí decorre a dificuldade de se estudar características generalizadoras desses fenômenos ou processos. Velz (1984) afirma que o caráter dos recursos hídricos é dinâmico e complexo (por exemplo, ressaltam-se as regiões estuarinas, com suas variações espaciais e temporais), e que o equilíbrio estável no ambiente hidrológico é estabelecido pelas interações complexas entre a água, o canal de escoamento e a cobertura de vegetação, os quais são relativamente variáveis no tempo (ver também VICTORIA, 2003; CUNHA; CUNHA; SIQUEIRA, 2000; CUNHA, 2001, 2008).

De acordo com Miranda, Castro e Kjerfve (2002), os fenômenos ou processos que afetam a distribuição e a variabilidade de propriedades físicas, a concentração de substâncias naturais (salinidade, nutrientes dissolvidos e sedimentos em suspensão) e dos organismos biológicos, bem como a concentração de poluentes, devem ser abordados de forma interdisciplinar, uma vez que envolvem princípios básicos oriundos de diferentes áreas do conhecimento humano. Alguns componentes desses fenômenos ou processos podem ser assim descritos: a) circulação, transporte e mistura entre as águas estuarinas e salgadas (no caso dos rios Matapi e Amazonas, esses fenômenos ocorrem entre águas doces com características visivelmente diferenciadas), b) efeitos ambientais sobre a flora e a fauna estuarina e c) transporte, erosão e deposição de sedimentos (ver, por exemplo, SILVA; SCHULZ; CAMARGO, 2007). Reforça-se que a dependência entre esses componentes é significativa em quase todos os fenômenos ou processos que ocorrem em estuários. Além disso, a natureza dos sistemas de drenagem é radicalmente influenciada pela fisiografia (em uma bacia estável, os fatores determinantes como o clima, precipitação, temperatura, velocidade do vento, pressão de vapor, radiação solar, são variáveis no tempo e no espaço) que induz a variações no escoamento e na capacidade de assimilação de resíduos. Isto influencia as características dos canais, os quais têm um papel maior sobre a dispersão, diluição ou autodepuração dos corpos de água. Diferentes autores como Velz (1984), Lung (1993), Silva e Kosuth (2001), Siqueira e Cunha (2001) e Cunha (2008) têm se

ocupado com a visão integrada dos componentes mencionados, representando

uma leitura adequada para o contexto deste trabalho.



(a)



(b)

**Figura 1 - a) Área da zona estuarina próxima de Macapá e Santana (ECOTUMUCUMAQUE, 2008); b) Distrito Industrial de Santana, às margens do rio Matapi. Ao fundo observa-se a foz do rio Matapi, desaguando no canal do Norte (rio Amazonas) (CUNHA; CUNHA; SIQUEIRA, 2000)**

### 3 Metodologia

#### 3.1 Dados de Campo

Os processos físicos comuns aos sistemas estuarinos são os movimentos cíclicos e a mistura entre massas de água de origens contrastantes (água doce e salgada), que ocasionam a não homogeneidade nos corpos de água, fazendo com que diferentes propriedades variem significativamente espacial e temporalmente, o que pode ser potencializado se associado, por exemplo, às forçantes climáticas. Na presente pesquisa as descargas líquidas variaram entre +1000 e -1800 m<sup>3</sup>/s e velocidades médias variaram de 0,5 a 1,7 m/s, aproximadamente (Figura 2). A largura média do trecho estudado do rio Matapi oscilou entre 200 e 300 m, dependendo primariamente da distância da seção considerada em relação à foz. A profundidade média, avaliada a partir do conhecimento da geometria do rio, foi de aproximadamente 10 m. As profundidades da água em um ciclo de maré foram medidas e as médias foram obtidas dessas medidas. O comprimento total considerado para a

posterior simulação foi de 7,0 km de distância (CUNHA; BRASIL; COELHO, 2006, CUNHA, 2008). Na Figura 2 ainda se observam os valores experimentais de descarga líquida obtidas com o equipamento de medição de velocidade ADCP. A metodologia Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) compõe-se de uma sonda com transdutores e um computador com programa específico para coordenação do sistema, recebimento de dados e disponibilização em vários formatos (tabelas, gráficos etc.). O princípio de funcionamento é a emissão de som em frequência conhecida, que é refletido por partículas em movimento, gerando um eco com frequência alterada (efeito Doppler). O equipamento ADCP mede estas variações, fornecendo a velocidade do escoamento. A linha cheia na Figura 2 é um ajuste polinomial efetuado para as simulações posteriores. Em 2001 e 2006 foram realizados levantamentos pontuais com o ADCP, obtendo dados sobre o comportamento hidrodinâmico e a descarga líquida (vazão) do canal do Norte no rio Amazonas e do próprio rio Matapi.

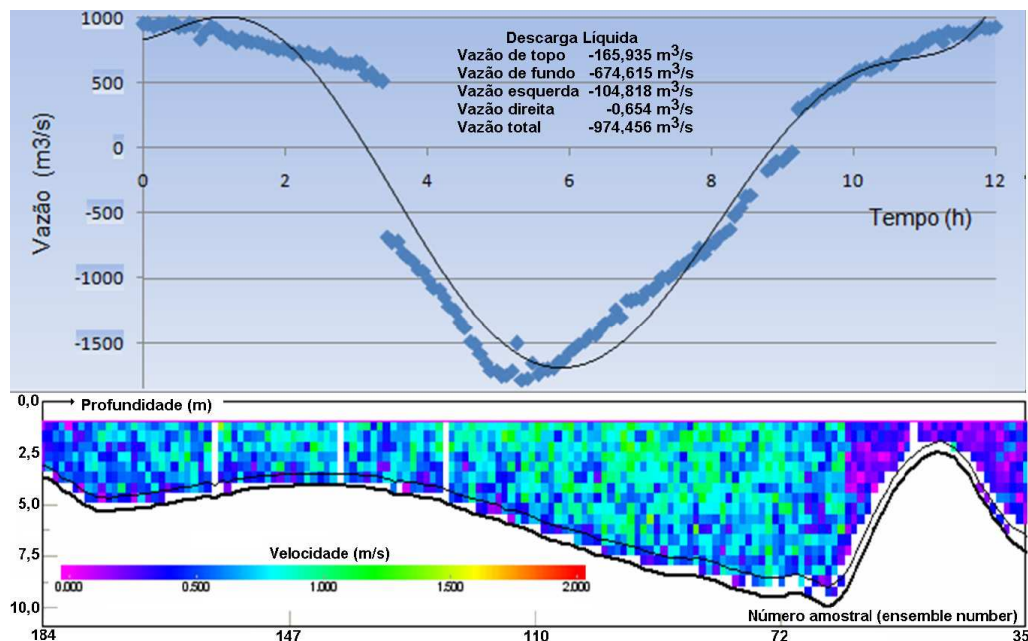


Figura 2 - Descargas líquidas numa série de 170 em um ciclo de maré semidiurna, usando ADCP (600 Hz) numa seção do rio Matapi, em 6 de abril de 2006. O sinal negativo indica maré enchente

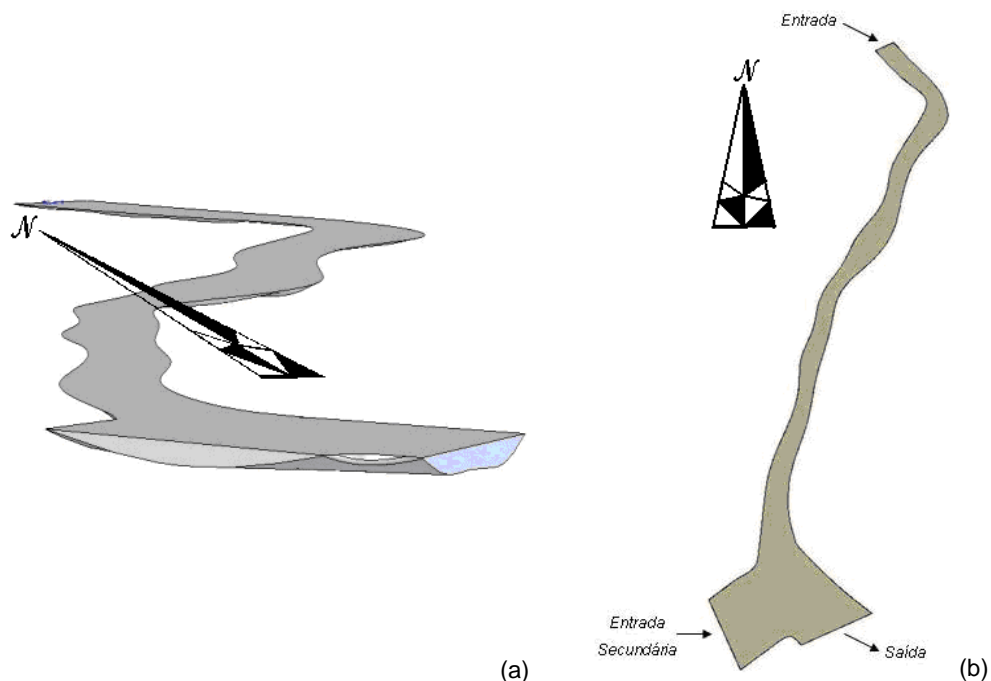
#### 3.2 Procedimentos computacionais: digitalização do domínio computacional

Por se tratar de uma região estuarina dinâmica, foi considerado um escoamento transiente de superfície livre 3D

(tridimensional). Simulações de escoamentos sujeitos a condições de contorno reais geralmente apresentam um elevado grau de dificuldade na geração da malha computacional que represente o domínio real, ou, em outras palavras, uma malha

adaptada ao contorno natural do rio, como o indicado na Figura 4. No presente estudo a discretização foi feita por elementos finitos, adaptando-a a toda a geometria do rio. Adicionalmente surgem dificuldades na conversão de arquivos de diferentes fontes, como ArcView<sup>®</sup> ou ArcGIS<sup>®</sup> para arquivos compatíveis com o *software* de escoamento utilizado, neste caso o *solidworks*, e o gerador de malha denominado de *Workbench* (CFX). Essa foi uma limitação também aqui encontrada, verificando-se que o gerador de malha utilizado não estava

habilitado para a conversão de dados ArcView ou ArcGIS em extensão “.eps”. Isto é, não foi possível gerar uma curva primitiva capaz de ser interpretada automaticamente pelo CFX. Efetuou-se então uma geração aproximada do contorno real da batimetria do rio Matapi, utilizando-se o formato do fundo pela aplicação sucessiva da seção reta da Figura 2 ao longo do trecho de estudo, obtida a partir das medições reais de descarga. O resultado desse procedimento de adaptação sucessiva é mostrado nas Figuras 3a e 3b.

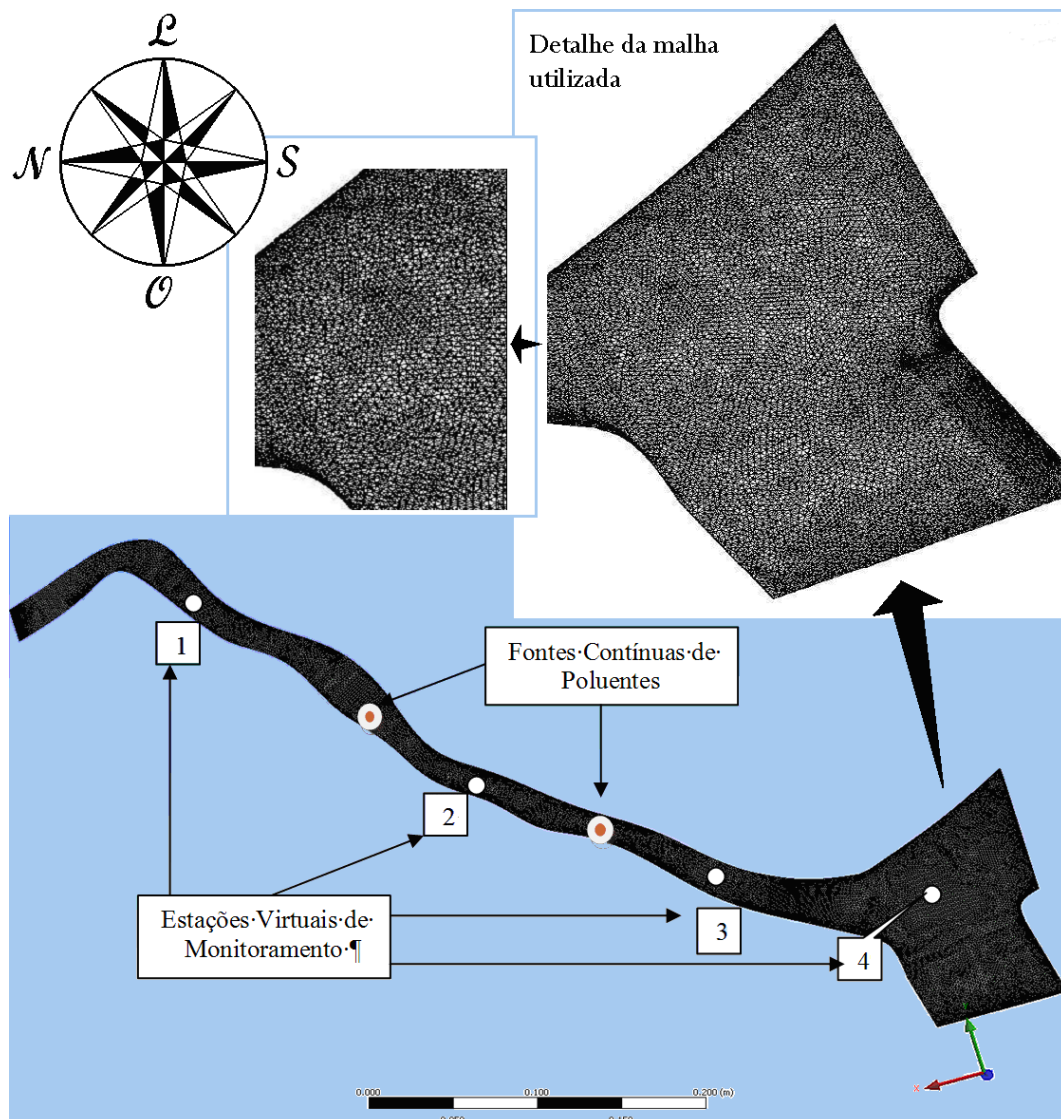


**Figura 3 - a) Adaptação sucessiva da geometria do fundo do rio Matapi desaguando no canal do Norte (rio Amazonas) em 3D, indicando a interseção do canal secundário e a saída em frente da Ilha de Santana, utilizado na simulação computacional; b) seções de entrada e saída da simulação. A Figura 5 apresenta o mesmo trecho com uma escala que permite avaliar seu comprimento.**

### 3.3 Geração da malha computacional 3D e condições de contorno

O fundo do rio foi reproduzido a partir de seções características e interpolações. Tal providência foi necessária para estabelecer a forma de fundo para o domínio numérico, ou seja, o contorno desse domínio, no qual foi simulado o escoamento. O passo seguinte, a geração da malha computacional foi executada no próprio pré-processador do CFX 11.0, resultando em 164.979 nós e 820.854 elementos tetraédricos. A Figura 4 permite assimilar a densidade da malha utilizada (embora os detalhes só sejam visíveis utilizando

dimensões maiores para a figura, a ampliação fornecida mostra essa densidade com maior clareza). No tocante às simulações que foram efetuadas com esta malha, o código CFX permite o acoplamento de escalares ao escoamento (cálculo da concentração de poluentes, por exemplo). Assim, na Figura 4 estão indicados círculos maiores com centro vermelho, que localizam as duas fontes contínuas de poluentes inseridas neste domínio numérico do escoamento para simular a dispersão de poluentes passivos (intensidade entre 1 kg/s e 5 kg/s, respectivamente, da esquerda para a direita).



**Figura 4 - Malha 3D (CFX) – Pré-processamento do canal na foz do rio Matapi, com dois pontos de emissão de poluentes (círculos com centros vermelhos) e quatro seções de monitoramento (pontos brancos). (Giro de 90° em relação à Figura 3b). Malha não estruturada.**

A Figura 4 também localiza no domínio computacional, com círculos menores brancos, as quatro seções estrategicamente selecionadas para monitoramento (virtual) do poluente. O objetivo foi observar as principais variações espaciais e temporais dos picos de concentração dos poluentes e analisar o comportamento geral das curvas de concentração.

Uma vez que foi construída uma malha densa, adaptada à geometria do rio em todo o trecho estudado, a metodologia adotada possibilitou analisar os efeitos da complexidade do escoamento turbulento

transiente, da localização das fontes emissoras de poluentes potenciais (podendo esta localização ser aleatória, como ocorre em situações reais), da geometria complexa (como nos ambientes dos rios do Amapá no baixo estuário amazônico), e as complicações inerentes à simples escolha do local de monitoramento da qualidade da água nesses ambientes, que mostram comportamentos expressivamente diferentes para as concentrações, como resultado da ação conjunta dos fatores mencionados. Os resultados que permitem apresentar tais afirmações estão apresentados nos itens subsequentes deste estudo.

### 3.4 Características do modelo numérico utilizado

Quando se simula turbulência e os transportes de grandezas físicas associadas, sempre surge a questão de qual modelo de turbulência usar. Entre os mais utilizados encontramos os modelos  $k-\epsilon$  e  $k-\omega$ , que tratam das grandezas estatísticas que surgem nos modelos de turbulência utilizando a energia cinética turbulenta ( $k$ ), a sua taxa de dissipação ( $\epsilon$ ) e a frequência característica da turbulência ( $\omega$ ), que no modelo SST também é denominada de taxa de dissipação específica da energia cinética turbulenta. Neste estudo utilizou-se o modelo híbrido denominado SST (Shear Stress Transport), uma vez que o histórico de uso preliminar apontou para a sua adequabilidade ao tipo de problema abordado. Sua formulação é simples, na região do escoamento distante dos contornos usa-se a formulação  $k-\epsilon$ , enquanto que na região próxima aos contornos usa-se a formulação  $k-\omega$ . O modelo é suficientemente robusto para solucionar de forma adequada o problema de escoamento complexo em questão, com uma hidrodinâmica influenciada pelas marés e por contornos irregulares. Como mencionado no item 3.2, o modelo permite o acoplamento do transporte de escalares, ou seja, de

poluentes no presente estudo, e a discretização foi feita por elementos finitos.

Menter (1994), citado por Moura (2003), propôs este arranjo SST de duas equações para melhorar o comportamento dos modelos  $k-\epsilon$  e  $k-\omega$ . A motivação inicial para o desenvolvimento desse modelo foi a necessidade de resultados mais acurados para os escoamentos aeronáuticos, que têm gradientes de pressão acentuados e descolamento da camada limite. O modelo  $k-\epsilon$  é um modelo muito robusto, porém, não consegue capturar descolamentos da camada limite em casos turbulentos. Nesse ponto, o modelo  $k-\omega$  é mais realista, isto é, obtém melhores resultados perto da parede. Porém, em escoamentos livres, a equação de  $\omega$  é muito sensível a perturbações, inviabilizando a troca definitiva do modelo do  $k-\epsilon$  pelo  $k-\omega$  (MENTER, 2003). Matematicamente, tem-se o modelo  $k-\epsilon$  multiplicado por uma função de mistura e adicionado ao modelo  $k-\omega$  também multiplicado por uma função peso que envolve essa função de mistura. Impõe-se que a função mencionada tenha valor unitário na região logarítmica e gradativamente torne-se nula fora da mesma. Conforme Martins, Padilla e Neto (2007), o modelo SST é descrito tendo duas equações de transporte, sendo uma a equação da energia cinética turbulenta ( $k$ ), dada pela equação 1,

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial u_i k}{\partial x_i} = \frac{\tilde{P}_k}{\rho} - \beta^* \omega k + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (1)$$

Onde  $u_i$  são as componentes de velocidade,  $\rho$  é a massa específica,  $\mu$  é a viscosidade de natureza molecular e  $\mu_t$  é a viscosidade turbulenta. O termo  $\tilde{P}_k$  é dado

pela equação 2 e a equação da taxa de dissipação de energia cinética turbulenta é dada, no modelo SST, pela equação 3.

$$\tilde{P}_k = \min(P_k, 10\epsilon), \quad \text{onde } P_k = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad \text{e} \quad \epsilon = \beta^* \rho \omega k \quad (2)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u_i \omega}{\partial x_i} = \alpha_2 S^2 - \beta^* \omega^2 + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + 2(1-F_1) \sigma_\omega \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (3)$$

Nesse caso, tem-se:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad \text{e} \quad S = (S_{ij} S_{ij}) \quad (3a)$$



$S_{ij}$  é o tensor deformação e  $S$  é uma medida invariante da taxa de deformação.  $F_1$ , por sua vez, é definido pela equação 4,

$$F_1 = \tanh \left\{ \left[ \min \left( \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}; \frac{500 v}{\omega y^2} \right); \frac{4 \rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega y^2}} \right) \right]^4 \right\} \quad (4)$$

Onde

$$CD_{k\omega} = \max \left( 2 \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}; 10^{-10} \right) \quad (4a)$$

$$\mu_t = \frac{\rho \alpha_1 k}{\max \left( \alpha_1 \omega; \left( S_{ij} S_{ij} \right)^{1/2} F_2 \right)}, \text{ onde } F_2 = \tanh \left\{ \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}; \frac{500 v}{\omega y^2} \right) \right]^2 \right\} \quad (5)$$

As outras constantes são todas oriundas dos modelos  $k-\varepsilon$  e  $k-\omega$ , com alguns ajustes, tendo os valores:  $\alpha_1=5/9$ ,  $\alpha_2=0,44$ ,  $\beta^*=0,09$ ,  $\sigma_{k1}=0,85$ ,  $\sigma_{\omega 1}=0,5$  e  $\sigma_{\omega 2}=0,856$  (MENTER, 2003). Observa-se que de fato há duas assim denominadas “funções de mistura”,  $F_1$  e  $F_2$ , que delimitam as zonas de atuação de cada modelo. Através do valor encontrado para essas funções, o modelo muda a formulação nas equações de transporte. A função de mistura  $F_2$  é responsável pela troca dos modelos de viscosidade turbulenta, enquanto que a função de mistura  $F_1$  (Equação 4) é responsável pela determinação das respectivas constantes e pela troca de modelos na equação de transporte de  $\omega$  (NOLETO, 2006).  $F_1$  é igual a 1 para grandes distâncias da parede (utiliza-se, neste caso,  $k-\varepsilon$ ) e é igual a zero para pequenas distâncias da parede (nesse caso, utiliza-se  $k-\omega$ ). Textos acerca de modelos turbulentos podem ser encontrados em Schulz (2001, 2003), Souza et al. (2010), Schulz, Simões e Janzen (2011) e Schulz, Simões e Lobosco (2011).

## 4 Resultados da Simulação Numérica e Discussão

### 4.1 Campos de velocidade

As Figuras 5(i) a 5(iv) mostram etapas significativas dos campos de velocidades, com as respectivas escalas, em quatro momentos do ciclo da maré

na qual  $y$  é a distância até a parede (não deslizando). A viscosidade turbulenta é calculada através da equação 5.

semidiurna (vazante, início da baixa mar, enchente e início da preamar). Durante as medidas de vazão (Figura 2, um ciclo de maré semidiurna), alguns parâmetros hidráulicos puderam ser determinados *in loco* e utilizados para estimar as condições iniciais e de contorno necessárias à modelagem do escoamento e à simulação da dispersão de plumas de poluentes na água. Nas Figuras 5(i) e (ii) apresenta-se parte do movimento de vazante (direção à foz) no tempo  $t = 30$  min com uma reversão do escoamento no tempo  $t = 6$ h. Na mesma sequência, as Figuras 5(iii) e (iv) mostram, após meio ciclo de maré, um movimento de enchente (direção contrária à foz) no tempo  $t = 10$ h, com uma nova reversão do escoamento no tempo  $t = 12$ h. O tempo total aproximou-se de 12 horas, para envolver um ciclo completo de maré.

Como condição de contorno foi utilizada uma aproximação senoidal para a vazão, que satisfaz as quantificações físicas reais, como aquelas mostradas na Figura 2, além de terem sido especificadas faixas de variação de velocidade em uma seção do escoamento. Verificou-se que a simulação produz bons resultados gerais, mostrando-se como uma ferramenta interessante para estudos dessa natureza. Considerando a ausência de trabalhos similares nessa região, o resultado é muito animador e fundamentará trabalhos posteriores com o mesmo nível de complexidade. Mas alguns detalhes ainda devem ser aprimorados, como por exemplo, a limitação em não considerar a variação do nível da água no

ciclo de maré, o que provavelmente induziu a valores maiores de velocidades superficiais do escoamento do que as medidas com o

ADCP. Adicionalmente, pode-se estender o estudo para contemplar as diferenças entre as marés de quadratura e de sizígia.

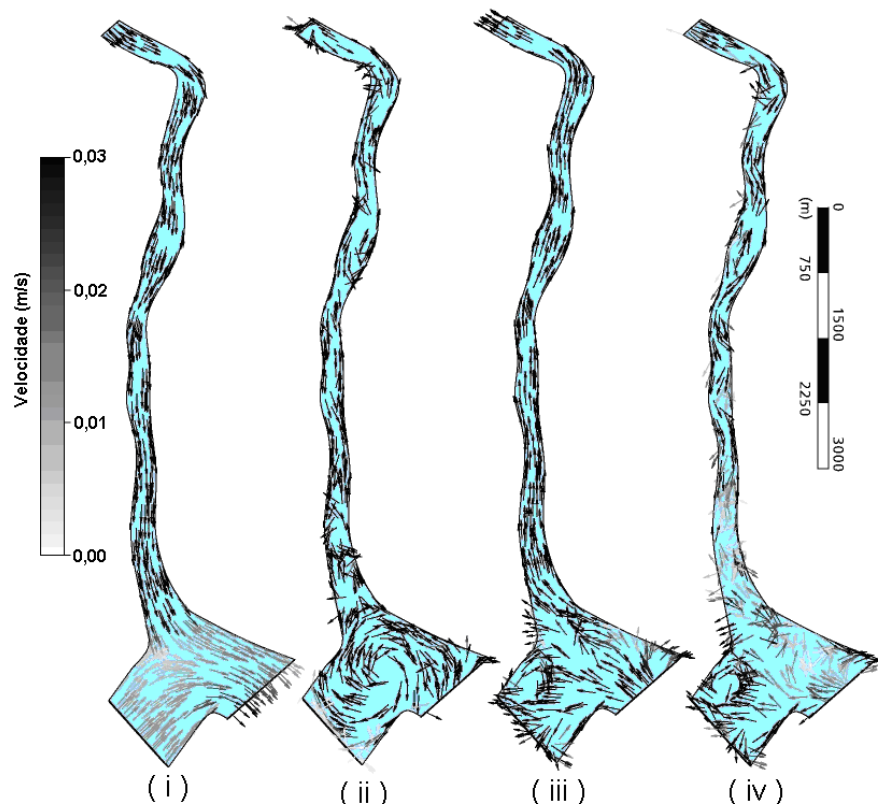


Figura 5 - Campos de velocidades simulados em regime transiente no rio Matapi: i)  $t = 30$  min (início da vazante), ii)  $t = 6$  h (início da baixa mar), iii)  $t = 10$  h (enchente), iv)  $t = 12$  h, início da preamar.

#### 4.2 Campos de concentração de poluente orgânico

As Figuras 6(i) a (iv) mostram os campos de concentração de duas plumas de poluentes de fontes contínuas não conservativas, as quais foram simuladas para a região do Distrito Industrial de Santana. As duas plumas de poluentes se dispersaram no canal ao longo de um ciclo completo de maré, segundo as seguintes etapas: inicialmente, a breve evolução do lançamento do poluente em dois pontos distantes entre si de 1,4 km, no período de vazante (direção à foz) no tempo  $t = 30$  min (vazante). Em seguida, a dispersão da pluma em direção à foz até atingir o tempo total de  $t = 6$  h. Logo após, há a inversão de escoamento (maré enchente) no tempo  $t = 10$  até atingir o patamar inicial em  $t = 12$  h (no início da preamar).

O comportamento observado nas Figuras 6(i) a (iv) mostra que parte do

poluente no rio Matapi não se dispersa imediatamente se a fonte emissora não for estancada em algum período da maré semidiurna. Os resultados também mostram que a localização dos pontos de lançamento e das seções de monitoramento pode influenciar sobremaneira todo o processo de observação do fenômeno de dispersão e, portanto, da análise das respostas do monitoramento da qualidade da água. De acordo com a localização dos pontos de lançamento pode-se ter a situação de parte do poluente manter-se acumulado em regiões específicas do trecho estudado, mesmo quando se finaliza o ciclo de maré semidiurna, conforme observado na simulação.

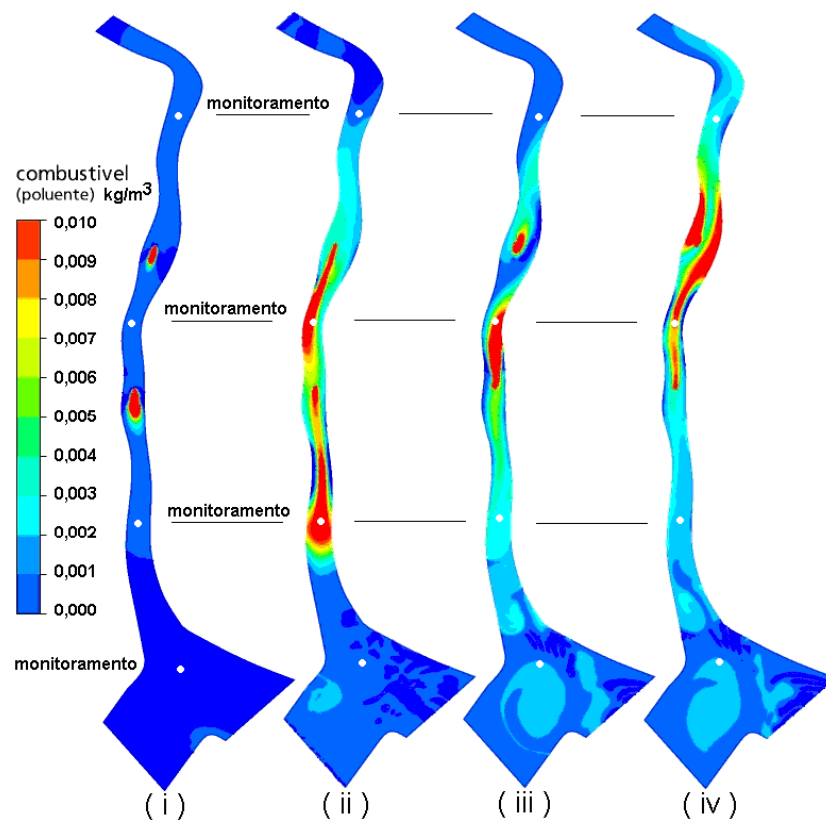
As figuras apontam para a necessidade de um monitoramento mais consistente e necessário para a região próxima ao Distrito Industrial de Santana, tendo em vista seu potencial de ampliação e o conseqüente aumento das emissões

poluentes. Em princípio, isso implicaria na necessidade de maior fiscalização nos locais próximos aos empreendimentos mais poluentes.

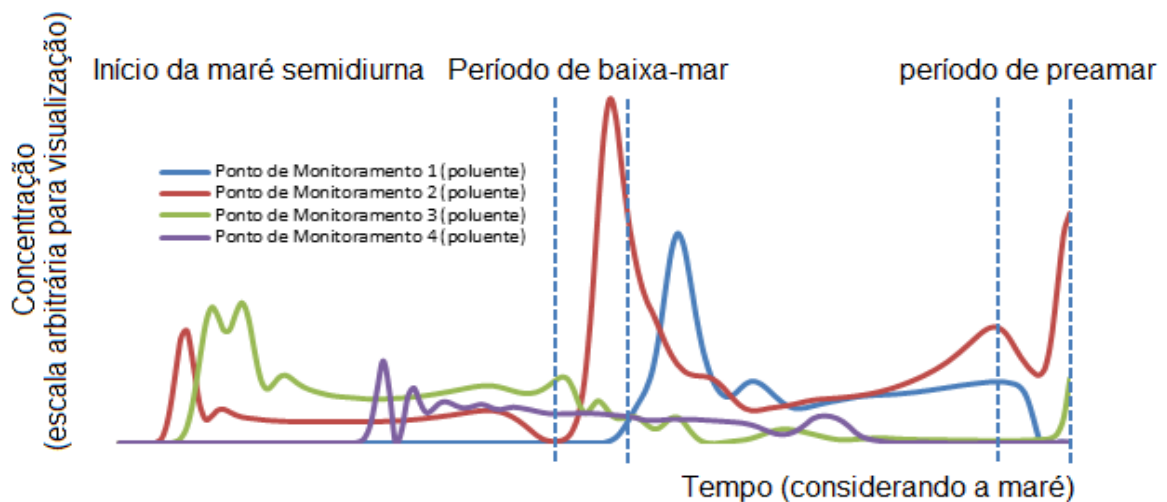
A Figura 6 mostra todo o campo de concentração de poluentes, que permite uma análise mais completa do seu comportamento espacial e temporal. A Figura 7 apresenta as curvas respostas da concentração para as quatro seções de controle aqui adotadas. Trata-se de uma simulação de respostas possíveis em seções de monitoramento em campo, aqui apresentadas visando à análise comparativa, nas quais os sinais estão representados proporcionalmente às grandezas simuladas, mas sem enfatizar a unidade de medida, porém considerando um mesmo poluente. É interessante observar as diferenças de comportamento entre as curvas. Por exemplo, as curvas para as seções 2 e 3, embora apresentem um comportamento inicial razoavelmente próximo, passam a apresentar comportamentos significativamente diferentes a partir do

período de baixa mar. Assim, dependendo do período em que se monitora a qualidade da água e do local da estação de coleta, há significativas diferenças comportamentais e de valores das curvas respostas de concentração de poluentes. Em outras palavras, observa-se a dificuldade inerente aos processos reais de monitoramento, que decorrem da grande variabilidade a que estão sujeitas as plumas poluentes.

Complexidades maiores podem ser esperadas quando se consideram ainda variações na emissão e no tipo de poluente, como por exemplo: densidade relativa (se o poluente flutua ou sedimenta), taxa de emissão do poluente (kg/s), intermitência do lançamento (ao invés de lançamento contínuo), momento do lançamento intermitente (período da maré, se enchente, vazante, preamar ou baixa mar) e, como demonstrado nesta simulação, do local de onde se monitora a qualidade da águas (no presente estudo, representado pelas estações de coleta nas seções 1, 2, 3 ou 4).



**Figura 6 - Campos de concentração de poluentes de duas fontes contínuas: i)  $t = 30$  min (início da vazante), ii)  $t = 6$  h (início da baixa mar), iii)  $t = 10$  h (início da enchente), iv)  $t = 12$  h (início da preamar). Os dois pontos de emissão são facilmente reconhecíveis. Os quatro pontos de monitoramento estão indicados por pontos brancos.**



**Figura 7 - Simulação da influência da localização das estações de monitoramento virtual da qualidade da água e picos de concentração para duas fontes contínuas em um ciclo de maré semidiurna no rio Matapi - AP.**

Esta abordagem permite avaliar criticamente que a tomada de decisões sobre quando e onde se deve realizar o monitoramento é tarefa complexa e difícil em regiões como a estudada. A Figura 7 mostra a variabilidade das respostas de qualidade de água com relação aos aspectos espacial e temporal ao longo do ciclo de 12 horas. Verifica-se que cada observador, representado pelas curvas individuais, registra seu próprio perfil de concentração. A pergunta imediata que surge em nível de gestão é: qual é a melhor combinação de local e momento para executar o monitoramento da qualidade da água no Matapi? Para o caso estudado, no qual a posição e continuidade de emissão das fontes foram especificadas (não se altera aleatoriamente), é possível argumentar que o local mais favorável para esse monitoramento seria a seção 2 (localizado entre as duas fontes poluidoras) no período de baixa mar, pois ali foram obtidos os maiores picos de concentração no períodos entre 6 e 8,5 horas a partir da vazante (início da simulação). Essa característica favorece, por exemplo, a detecção dos poluentes com maior segurança, considerando-se a capacidade de detecção dos sensores, que normalmente representa um fator econômico limitante.

Uma resposta geral (para qualquer caso) é inviável, uma vez que, como foi demonstrado, qualquer decisão depende de fatores como local, momento, tipo e quantidade das fontes de emissão.

## 5 Considerações finais

Foi realizado um estudo de simulação numérica com objetivo de avaliar o comportamento hidrodinâmico e de dispersão de poluentes no rio Matapi. As simulações permitem que o gestor de recursos hídricos compreenda melhor o ambiente aquático em questão. Entre as aplicações desta simulação está o fornecimento de subsídios para elaborar um sistema robusto de monitoramento da qualidade da água no rio Matapi. De forma mais geral, o estudo é relevante porque demonstra a necessidade de fortalecer os sistemas de monitoramento da qualidade dos recursos hídricos em todos os ambientes costeiros amazônicos, uma vez que se infere que venham a apresentar características semelhantes. Este estudo representa um avanço no uso de novas ferramentas de análise, que propiciam a geração de conhecimentos sobre a hidrodinâmica e a dispersão de poluentes nos ecossistemas estuarinos amazônicos impactados pela urbanização e pela industrialização. Essas ferramentas permitem, como aqui demonstrado, a análise de cenários ambientais e as consequentes tomadas de decisões a partir desses cenários.

As conclusões específicas para o caso estudado foram as seguintes:

- O estudo traz a expectativa de aprofundamentos nas pesquisas na área em questão e de melhor embasamento acerca dos complexos (e frágeis) sistemas físicos que a compõem. Verificou-se o potencial de estudos de cenários para a gestão ambiental

no rio Matapi, associando simulação numérica e experimentação. Verificou-se ser possível, mesmo em um contexto aproximado de investigação, avaliar quantitativamente e qualitativamente os principais componentes governantes dos fenômenos hidrodinâmicos e da dispersão de poluentes em escoamentos naturais em ambientes amazônicos estuarinos;

- O Modelo Híbrido SST mostrou-se robusto e capaz de representar o escoamento hidrodinâmico esperado para o sistema fluvial em questão, em que pese a variação das grandezas físicas do escoamento, no espaço e no tempo. Praticamente todos os parâmetros de entrada do modelo foram fundamentados em grandezas e características físicas, químicas, geométricas e hidrodinâmicas do escoamento real;

- Verificou-se o comportamento de duas plumas poluentes lançadas em dois pontos medianos do domínio computacional. Observou-se que em ambientes com as características estudadas há a manutenção de parte do poluente no trecho próximo ao lançamento. Isto corrobora a observação experimental de Cunha, Brasil e Coelho (2006) e mostra que regiões estuarinas apresentam mecanismos diferenciados para dispersão da poluição e, por consequência, também diferentes áreas de risco devido ao acúmulo de poluentes ao longo de sucessivos lançamentos e ciclos de marés, ainda que os rios possuam grandes vazões. Nestes casos, os resultados das simulações numéricas são interessantes do ponto de vista da descrição adequada da dispersão e acúmulo de poluentes ao longo do canal e, certamente, fundamentarão os trabalhos subsequentes nessa região;

- Observou-se que a ferramenta computacional é interessante para estudar ambientes complexos como as zonas estuarinas amazônicas. Ficou demonstrado

que a análise não sistêmica do ambiente estudado pode ser frágil se não se considerar a sua variabilidade espacial e temporal. Nesse sentido, a percepção da dinâmica global desse ambiente é de suma importância, não sendo suficiente o simples monitoramento de variáveis ou parâmetros da qualidade da água em um único ponto. É preciso efetuar-lo otimamente em um contexto que considere o local das fontes, a complexidade geométrica do canal, o nível de turbulência envolvido, fatores esses que norteiam o entendimento do comportamento das plumas poluentes ao longo dos ciclos de maré nos ambientes costeiros.

Como observação adicional, vale lembrar que a degradação ambiental das águas causada pelo homem, sem parâmetros de controle do seu avanço, que possam ser estabelecidos, controlados ou monitorados, tem historicamente levado a perdas dos ambientes naturais nos quais o ser humano se insere. Entretanto, pesquisas demonstram mais e mais o potencial da simulação numérica aplicada aos escoamentos ambientais, sendo esta uma ferramenta que abre perspectivas otimistas de estudos em ecossistemas aquáticos na Amazônia, uma área sensível e pouco investigada, sobre a qual pesam muitas lacunas de conhecimento. O tema deste estudo mescla com bastante evidência as Engenharias Sanitária e de Recursos Hídricos, mostrando que soluções adequadas para problemas ambientais, nas aplicações da Engenharia Ambiental, não podem prescindir da integração obtida com ferramentas mais atuais, permitindo analisar conjuntamente as respostas de parâmetros físicos, químicos e biológicos de forma mais efetiva. Sem a componente aglutinante da análise numérica, nesses casos, torna-se quase que inócuo e superficial o estudo mais representativo da realidade local.

## 6 Simulation of hydrodynamics and pollutant dispersion with virtual monitoring in the Matapi river-AP

**Abstract:** Numerical simulations were performed for a tidal period of the flow in a segment of the Matapi river, an affluent of the Amazon river, near the cities of Santana and Macapá, in the State of Amapá, Brazil. The general aim of this study was to evaluate the spatial and temporal variability of the flow and of potential pollutant sources in the low Amazon river. The region under study involves the Industrial District of Santana, with a high potential of accidental pollutant releases. Natural flow conditions were simulated, considering the tidal movements, which strongly influence the behavior of pollutant compounds in water. Results are presented as unsteady hydrodynamic fields and the related pollutant concentration fields. The information generated here is useful to evaluate the maintenance of pollutants in this part of the river, and may be used to

*help the management of the disposal of sewage waters in the river, considering the different points of view of sanitary engineering, environmental engineering and public health. The comprehension of the maintenance of pollutants in the river is important to establish the critical areas of this estuarine zone, either already polluted or on risk of pollution.*

**Key-words:** Numerical simulation. River flows. Finite elements. Pollution in rivers. Matapi River. Amazon River. Estuaries.

## 7 Referências

CUNHA, A.C.; CUNHA, H.F.A.; SIQUEIRA, E.Q. Water Pollution Survey in Rivers of the State of Amapá–Brazil. In: **V Workshop Ecolab**, 2000, Macapá-AP. Anais do V Workshop Ecolab, 2000, p. 315-323.

CUNHA, A.C. **Levantamento de Parâmetros Físico-químicos e Hidráulicos para a Avaliação da Qualidade da Água em escoamentos naturais – Desenvolvimento do Distrito Industrial na Baía do Rio Matapi**. Relatório. Na. p/ CNPq/IEPA. Macapá-AP, 2001, 58 p.

CUNHA, A.C.; CUNHA, H.F.A.; SIQUEIRA, E.Q. Diffuse Pollution Survey in Rivers of Southeast of Amapá State – Brazil. In: **5<sup>th</sup> International Conference on Diffuse/Nonpoint Pollution and Watershed Management**, 2001, Milwaukee, USA, Proceedings, 2001.

CUNHA, A.C.; COUTO, A. (Orgs). **Diagnóstico Rápido Participativo na Bacia do Igarapé da Fortaleza-AP**. Macapá, SETEC/GEA, 2002, 55p.

CUNHA, A.C. et al. Qualidade microbiológica da água em rios de áreas urbanas e periurbanas no Baixo Amazonas: o caso do Amapá. **Revista da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental - ABES**, V.9, n. 4, p. 322-329, 2004.

CUNHA, A.C.; BRASIL Jr., A.C.P.; COELHO, J.G. Estudo numérico do escoamento superficial na foz do Rio Matapi – Costa Interna Estuarina do Amapá. In: **XI ENCIT-ABCM**, 2006, Rio de Janeiro, Anais do XI ENCIT, 2006.

CUNHA, A.C. **Pollutants movement in the environment: the shallow flow experimentation and numerical simulation on Matapi River, in Amapá/Brazil, estuarine coast**. Post-Doctorate Report. Engg. American World University, AWU, USA, 2008, 111 p.

ECOTUMUCUMAQUE, Licenciamento Ambiental no. 32.0001047, 2008.

LUNG, S.W. **Water quality modeling: Application to Estuaries**, V. III, CRC Press Inc., USA, 1993, 194 p.

MARTINS, D.A.M.; PADILLA, E.; NETO, A.S. Implementação do modelo de turbulência  $k-\omega$  SST em uma cavidade tridimensional. In: **17 POSMEC**,

**Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**, 2007, Uberlândia, Anais do 17 POSMEC, 2006, 6 p.

MENTER, F. R. A scale-adaptative simulation model for turbulent flow predictions, In: **41st Aerospace Science Meeting & Exhibit**, 2003, Reno, Nevada, Proceedings of the 41st Aerospace Science Meeting & Exhibit, 2003.

MIRANDA, L.B.; CASTRO, B.M; KJIERFVE. **Princípios da Oceanografia Física de Estuários**. São Paulo, Editora Edusp, 2002, 414 p.

MOURA, M.D. **Modelagem e simulação numérica do escoamento turbulento em tubos de sucção de turbinas**. Dissertação de Mestrado, Eng. Mecânica, UnB, Brasília, 2003, 157 p.

NOLETO, L. (Comunicação pessoal) **Estudo de escoamentos de cilindros-Simulação numérica híbrida e grandes escalas do escoamento turbulento em uma matriz de cilindros**. Dissertação de Mestrado UnB, Brasília, 2006.

SCHULZ, H.E. **Alternativas em turbulência**, São Carlos, Rima Editora e EESC/USP, 2001, 127 p.

SCHULZ, H.E. **O essencial em fenômenos de transporte**, São Carlos, Editora Edusp EESC, 2003, 382 p.

SCHULZ, H.E.; SIMÕES, A.L.A.; JANZEN, J.G. Statistical approximations in gas-liquid mass transfer, In: KOMORI, S.; MCGILLIS, W.; KUROSE, R. (Orgs) **Gas Transfer at Water Surfaces 2010**, Kyoto, Japan, Selected Papers of the GTWS-6 Conference, 2011, p. 208-221.

SCHULZ, H.E.; SIMÕES, A.L.A.; LOBOSCO, R.J. (Orgs) **Hydrodynamics – optimizing methods and tools**, Rijeka, Croatia, InTech, 2011, 420 p.

SILVA, A.M.; SCHULZ, H.E.; CAMARGO, P.B. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas**, 2<sup>a</sup>. Edição revisada e ampliada. São Carlos, Rima Editora, 2007, 153 p.

SILVA, M.S.; KOSUTH, P. Comportamento das vazões do rio Matapi em 27.10.2000. In: **Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário**, 8, 2001, Imbé-RS, Resumos, ABEQUA, 2001, p. 594-596.

SIQUEIRA, E.Q; CUNHA, A.C. Re-oxygenation coefficient in model QUAL2E: Prediction methodology. In: **Int. Stormwater and Urban Water Syst. Modeling Conf.**, 2001, Ontario, Canada, Monog. 9 in the Series, Proc. Edited by William Jame,. Computational Hydraulics International (CHI), 2001, p. 153-160.

SOUZA, L.B.S. de et al. Experimental study and numerical simulation of sediment transport in a shallow reservoir. **Journal of Applied Fluid Mechanics**, V. 3, p. 9-21, 2010.

VELZ, C. J. **Applied Stream Sanitation**, 2<sup>nd</sup> Ed., Michigan, Wiley-Interscience Publication, 1984, 799p.

VICTORIA, R. L. **O papel dos sistemas fluviais amazônicos regional e global de carbono: evasão de CO<sub>2</sub> e interações entre os ambientes terrestres e aquáticos**. CNEM-USP, Piracicaba, 2003, 22p.

## 8 Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (CT-Hidro) e NHMET/IEPA, CAESA, LEA/UnB, REMAM1, REMETAP, CAPES e FAPESP. Essas instituições, em conjunto, permitem a integração de conhecimentos relevantes na linha de pesquisa em qualidade de água.