

10 Gerenciamento de recursos hídricos e enquadramento de corpos d'água

*Jader Lugon Jr.**

*Mariana Rodrigues de Carvalhaes Pinheiro***

*Pedro Paulo Gomes Watts Rodrigues****

10.1 Introdução

A preservação dos recursos hídricos existentes é uma das questões mais relevantes que se apresentam para a sociedade contemporânea. No Brasil, a preocupação com essa matéria é evidenciada, entre outras, na Lei 9433/97, que veio disciplinar o uso das águas no país, e nas resoluções CONAMA 01/86 e 357/2005 que, respectivamente, criaram e atualizaram o sistema de classificação das águas de acordo com seu uso preponderante. Dependendo do enquadramento de um determinado corpo hídrico fica então definida a qualidade mínima a ser exigida, sendo então previstos em nossa legislação os instrumentos necessários para exercer o controle da qualidade por meio do monitoramento e o diagnóstico.

Nesse particular, modelos matemáticos de qualidade de água podem ser ferramentas úteis. Tais modelos consistem em um conjunto de equações que, resolvidas, fornecem a distribuição espaço-temporal de constituintes que são transportados, em solução e em suspensão, pelo corpo hídrico. Essas equações, via de regra, são resolvidas numericamente, gerando o que se chama de simulação numérica, e o modelo, uma vez calibrado, permite traçar cenários futuros e passados em função das entradas que sejam prescritas. Assim, zonas de mistura, comportamento de plumas de poluentes e diluições podem ser devidamente calculadas e previstas pela simulação, sendo este estudo previsto na resolução CONAMA 357/2005.

Mas os problemas que precisam ser solucionados, no gerenciamento de recursos hídricos, vão muito além da simulação matemática e da geração de cenários. Os gestores precisam levar em consideração, também, muitos aspectos

* Professor do PPEA do IFF. Engenheiro Mecânico, Doutor em Modelagem Computacional pela Universidade do estado do Rio de Janeiro. Instituto Federal Fluminense / *Campus* Macaé.

** Pesquisadora associada ao Núcleo de Pesquisa em Petróleo, Energia e Recursos Naturais / Instituto Federal Fluminense / *Campus* Macaé. Bióloga, Mestre em Engenharia Ambiental pelo Instituto Federal Fluminense.

***Professor adjunto da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Doutorado em Oceanografia pela University of Newcastle Upon Tyne.

referente ao uso da água, legislação, etc. Sistemas de Suporte à Decisão - SSD são aplicativos computacionais que têm por objetivo ajudar indivíduos que tomam decisões na solução de problemas não estruturados (ou parcialmente estruturados). A solução desses problemas exige uma estreita interação entre homem e máquina, sendo essa uma das principais características dos SSD e que tem sido aproveitada na área de gerenciamento de recursos hídricos.

10.2 Qualidade da água

A qualidade da água é resultante de fenômenos naturais e da atuação do homem. De maneira geral, pode-se dizer que a qualidade de uma determinada água é função do uso e da ocupação do solo na bacia hidrográfica. Tal fato se deve aos seguintes fatores:

a) Condições naturais

Mesmo com a bacia hidrográfica preservada, nas suas condições naturais, a qualidade das águas subterrâneas é afetada pelo escoamento superficial e pela infiltração no solo, resultantes da precipitação atmosférica. O impacto nas mesmas é dependente do contato da água com as partículas, substâncias e impurezas no solo. Assim, a incorporação de sólidos em suspensão (ex. partículas de solo) ou dissolvidos (ex. íons oriundos da dissolução de rochas) ocorre, mesmo na condição em que a bacia hidrográfica esteja totalmente preservada em suas condições naturais (ex. ocupação do solo com matas e florestas). Neste caso, tem grande influência a cobertura e a composição do solo.

b) Interferência do homem

A interferência do homem, quer de uma forma concentrada, como na geração de despejos domésticos ou industriais, quer de uma forma dispersa, como na aplicação de defensivos agrícolas no solo, contribui na introdução de compostos na água, afetando a sua qualidade. Portanto, a forma como o homem usa e ocupa o solo tem uma implicação direta na qualidade da água.

Em contraposição à qualidade existente de uma determinada água, tem-se a qualidade desejável para esta água. A qualidade desejável para uma determinada água é função do seu uso previsto.

10.2.1 Impurezas encontradas na água

Os diversos componentes presentes na água, e que alteram o seu grau de pureza, podem ser retratados, de uma maneira ampla e simplificada, em termos das suas características físicas, químicas e biológicas. Estas características podem ser traduzidas na forma de parâmetros de qualidade da água.

Características físicas: As impurezas enfocadas do ponto de vista físico estão associadas, em sua maior parte, aos sólidos presentes na água. Estes sólidos podem ser em suspensão, coloidais ou dissolvidos, dependendo do seu tamanho.

Características químicas: Essas características podem ser interpretadas por meio de uma das duas classificações: matéria orgânica ou matéria inorgânica.

Características biológicas: Os seres presentes na água podem ser classificados como pertencentes aos reinos animal e vegetal, além dos protistas.

10.2.2 Principais agentes poluidores das águas

Entende-se por poluição das águas a adição de substâncias ou de formas de energia que alterem a natureza do corpo d'água de uma determinada maneira tal que prejudique os legítimos usos que dele são feitos (VON SPERLING, 1996). Os principais agentes poluidores das águas estão listados no Quadro 1.

Quadro 1
Principais agentes poluidores das águas

		Fonte					
		Esgotos			Drenagem Superficial		
		Doméstico	Industrial	Reutilizados	Urbana	Agrícola e Pasto	
Sólidos em suspensão	Sólidos em suspensão total	muito	variável	-	médio	pouco	- problemas estéticos - depósitos de lodo - adsorção de poluentes - proteção de patogênicos
Matéria orgânica biodegradável	Demanda Bioquímica de Oxigênio	muito	variável	-	médio	pouco	- consumo de oxigênio - mortandade de peixes - condições sépticas
Nutrientes	Nitrogênio Fósforo	muito	variável	-	médio	pouco	- crescimento excessivo de algas - toxicidade aos peixes (amônia) - doenças em recém-nascidos (nitrito) - poluição da água subterrânea
Patogênicos	Coliformes	muito	-	-	médio	pouco	- doenças de veiculação hídrica
Matéria orgânica não biodegradável	Pesticidas Alguns detergentes Outros	-	variável	-	-	médio	- toxicidade (vários) - espumas (detergentes) - redução da transferência de oxigênio (detergentes) - não biodegradabilidade - maus odores
Metais pesados	Elementos específicos (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn, etc.)	-	variável	-	-	-	- toxicidade - inibição do tratamento biológico dos esgotos - problemas na disposição do lodo na agricultura - contaminação da água subterrânea

Metais pesados	Elementos específicos (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn, etc.)	-	variável	-	-	-	- toxicidade - inibição do tratamento biológico dos esgotos - problemas na disposição do lodo na agricultura - contaminação da água subterrânea
Sólidos inorgânicos dissolvidos	Sólidos dissolvidos totais Condutividade elétrica	-	-	médio	-	-	- salinidade excessiva - prejuízo às plantações (irrigação) - toxicidade a plantas (alguns íons) - problemas de permeabilidade do solo (sódio)

Fonte: VON SPERLING, 1996.

10.2.3 Coleta de amostras para monitoramento da qualidade da água

O monitoramento da qualidade da água é um procedimento de grande complexidade e dispendioso, assim sendo para garantir a qualidade dos resultados obtidos. Além dos cuidados durante os procedimentos de análise laboratorial, devem ser tomadas precauções na etapa de coleta das amostras.

O local de amostragem deve ser marcado com precisão para que possamos coletar amostras no mesmo ponto, em outras ocasiões, e comparar resultados obtidos. Com esse cuidado, conclusões poderão ser tiradas e decisões importantes poderão ser tomadas a partir dos resultados.

A amostragem pode ser simples (uma única coleta) ou composta (mistura de diversas coletas efetuadas no tempo ou no espaço). Podemos ainda efetuar coletas diárias, semanais, mensais, ou seja, em diferentes frequências de amostragem dependendo do objetivo da avaliação.

E, finalmente, um ponto fundamental a ser considerado se refere à preservação das amostras. Dependendo do parâmetro a ser analisado, pode ser necessário acrescentar algum composto químico ao frasco de coleta, ou mesmo preservar a amostra congelada para garantir sua qualidade.

10.3 Modelos de qualidade de água

Os modelos matemáticos de qualidade de água podem ser ferramentas muito úteis para o gerenciamento de recursos hídricos. Sendo desenvolvidos a partir de balanços de massa e levando em conta conhecimentos científicos consistentes, esses modelos são constituídos de um conjunto de equações cuja solução permite conhecer a variação da concentração de constituintes que são transportados, em solução e em suspensão, pelo corpo hídrico no tempo e no espaço.

Devido à complexidade dos problemas enfrentados, não são utilizadas soluções analíticas e sim numéricas, gerando o que se chama de simulação numérica. O modelo passa, então, por uma fase de calibração, durante a qual são ajustados alguns dos parâmetros presentes na formulação, comparando resultados simulados com dados reais de campo. Após essa fase, tendo o modelo calibrado, é possível gerar cenários futuros e passados em função das entradas que sejam prescritas. Assim, zonas de mistura, comportamento de plumas de poluentes e diluições, podem ser devidamente calculadas e previstas pela simulação, sendo este estudo previsto na resolução CONAMA 357/2005.

Por meio dessas simulações, é possível avaliar situações críticas, tanto de operação industrial quanto ambiental, e tomar decisões antecipadas sobre as mesmas. Sabendo como o sistema irá responder aos diversos fatores, é possível direcionar para ações ambientalmente mais apropriadas. Por exemplo, uma represa pode liberar suas águas para aumentar, momentaneamente, a vazão do rio e reduzir as concentrações de alguns poluentes ou uma empresa pode ser solicitada a não emitir efluentes com determinada característica durante uma época do ano.

O conhecimento do comportamento das plumas de contaminação pode ser considerado como uma ferramenta de aprendizagem, possibilitando experimentar livremente diversas alternativas e avaliar o resultado obtido, sem nenhum prejuízo ambiental.

10.3.1 Metodologia

Embora simulações tridimensionais do corpo hídrico em questão sejam desejáveis, aproximações que reduzam o problema a duas ou uma dimensão são igualmente aceitáveis, sob determinadas condições. Tais são os casos de rios e alguns estuários. Assim, regiões estuarinas estreitas e pouco profundas, com modesto aporte fluvial, podem ser adequadamente simuladas por modelos bidimensionais, ou seja, as propriedades resolvidas são integradas na profundidade da seção, assumindo-se homogeneidade das propriedades na direção vertical.

A seguir será descrito um modelo elaborado para simular a dispersão bidimensional de poluentes em rios. A Figura 1 apresenta uma representação esquemática de um rio onde são mostradas, também, a localização de um hipotético lançamento de contaminante e onde seriam realizadas as coletas de amostras para sua quantificação.

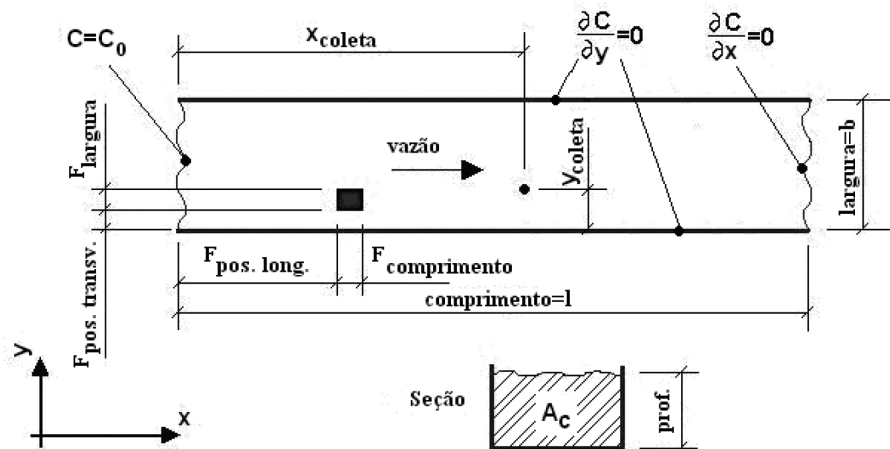


Figura 1: Representação esquemática de um rio

O modelo pode ser formulado pela seguinte equação diferencial:

$$\frac{\partial C(x, y, t)}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = E_L \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right) + E_T \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial C}{\partial y} \right) + R \quad (1)$$

onde C corresponde à concentração do contaminante, t é o tempo, x é a posição longitudinal, y é a posição transversal, u é a velocidade longitudinal, E_L é o coeficiente de dispersão longitudinal, E_T é o coeficiente de dispersão transversal e R corresponde ao termo de reação, sendo função da substância e do meio.

A velocidade u a ser utilizada no modelo poderia ser calculada por meio de um modelo hidrodinâmico considerando-se a declividade e características de atrito do leito do rio. Entretanto bons resultados podem ser alcançados adotando-se uma velocidade média para toda a seção transversal (AMARAL, 2003), sendo obtida a partir da relação

$$u = \frac{Q}{A_c} \quad (2)$$

onde A_c é a área seção transversal, considerada uniforme para todo o trecho simulado, e Q é a descarga do rio.

Todas as entradas e coeficientes são assumidos como constantes durante todo período de simulação. Assim, o modelo apresentado não só adota a simplificação da completa homogenização vertical das propriedades transportadas, como assume também uma geometria simples, o trecho simulado sendo representado por um canal uniforme. Eventuais erros decorrentes dessas hipóteses simplificadoras podem, eventualmente, ser compensados satisfatoriamente por meio dos coeficientes de dispersão.

As condições de contorno adotadas foram:

$$\left\{ \begin{array}{l} C(0, y, t) = C_0 \\ \frac{\partial C(l, y, t)}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial C(x, 0, t)}{\partial y} = \frac{\partial C(x, b, t)}{\partial y} = 0 \end{array} \right. \quad (3)$$

No modelo foi adotada como condição inicial:

$$C(x, y, 0) = C_0, \quad (4)$$

A solução do modelo aqui proposto pode ser implementada pelo do Método de Volumes Finitos – MVF, implícito no tempo, sendo os termos dispersivos aproximados por diferença centrada e o termo advectivo pelo “*Weighted Upstream Difference Scheme – WUDS*” (MALISKA, 2004).

10.4 Sistemas de suporte à decisão

Sistemas computacionais que têm por objetivo ajudar indivíduos que tomam decisões na solução de problemas não estruturados (ou parcialmente estruturados) são denominados “Sistemas de Suporte à Decisão” ou simplesmente SSD (PORTO, 1997).

Denomina-se problema não estruturado aquele para o qual não existe solução por meio de algoritmos bem definidos, motivo pelo qual não é facilmente tratável por computador. Dessa forma, a solução desses problemas exige uma estreita interação entre homem e máquina, sendo essa uma das principais características dos SSD.

O conceito de suporte é fundamental na definição anterior, significando que o computador é colocado à disposição do tomador de decisão para que ele possa dispor de informações, identificar e formular problemas, conceber e analisar alternativas e, finalmente, escolher o melhor curso de ação. Deve ficar claro que um SSD não é construído para tomar decisões e sim para auxiliar o homem em sua missão de decidir.

A solução de um problema é obtida por meio de dois elementos essenciais: (i) informações, que permitem conhecer uma determinada situação e (ii) uma concepção intelectual (em geral simplificada) do problema, de quais são suas variáveis, de como elas interagem, etc. Sendo que esse último elemento recebeu o nome, já consagrado, de modelo. Conclui-se que um SSD, deve auxiliar o homem na utilização de informações e modelos.

Existem aplicações de SSD nas mais diversas áreas de conhecimento. Na área de recursos hídricos existem inúmeras dificuldades a serem superadas para o desenvolvimento e uso de aplicações complexas, sendo muito comum que muitas das estradas do sistema sejam elementos sobre os quais não se tenha poder de manipulação (vazões, precipitações e outras variáveis climáticas) e, portanto, pertencentes ao ambiente. Na Figura 2 está

representada esquematicamente, uma arquitetura de um Sistema de Suporte à Decisão – SSD.

A “Base de Modelos” deve conter os instrumentos conceituais (modelos) necessários à análise e formulação de alternativas de solução do problema. Deve solicitar e receber os dados necessários, conferir-lhes significado adequado e, eventualmente, realimentar a base de dados.

A “Base de Conhecimentos” permite incorporar ao sistema informações que, geralmente, não são passíveis de tratamento pelos módulos anteriores, mas que são indispensáveis para a tomada de decisão sobre a problemática em estudo. Tipicamente estes conhecimentos referem-se à experiência de especialistas, conhecimentos empíricos, disposições e normas, regulamentos, etc. Usualmente esta base é formada por regras do tipo “Se... então...” e são atualmente denominados de “Sistemas Especialistas”.

O “Módulo de Diálogo” é responsável pela comunicação do usuário com o computador e deve ser capaz de receber instruções, consultas e informações do usuário, transmitindo respostas a estes estímulos da forma mais adequada possível.

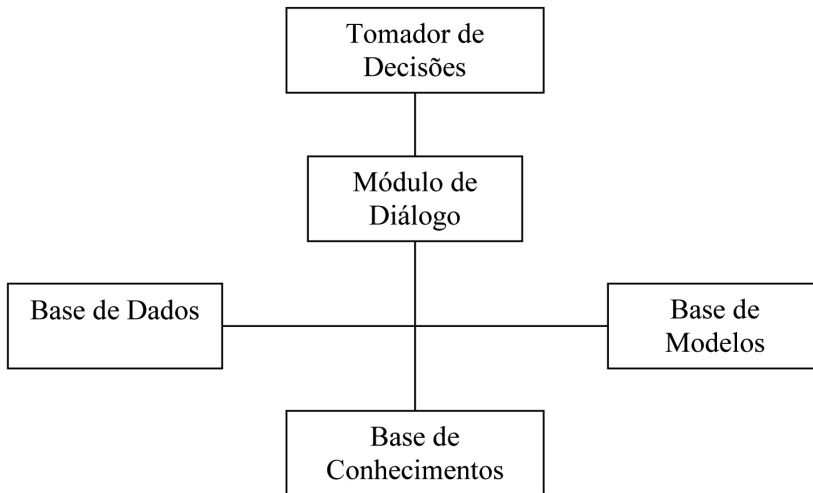


Figura 2: Representação esquemática de um Sistema de Suporte à Decisão – SSD
Fonte: Elaboração própria.

No Estado de São Paulo, foram desenvolvidos “Sistemas de Suporte à Decisão” com objetivo de apoiar na decisão para concessão de outorga de uso da água. Em 1996, na bacia do rio Corumbataí, sub-bacia do rio Piracicaba, um SSD foi implantado experimentalmente com um conjunto de, aproximadamente, 100 indústrias e 30 municípios, permitindo analisar, rapidamente, a viabilidade de autorização de captação e lançamento de efluentes na bacia daquele rio (PORTO, 1997). Em 2005, na bacia do rio Jundiá, afluente do Tietê, um SSD foi desenvolvido com capacidade de gerar cenários e apoiar no processo de outorga e cobrança pelo uso da água (RODRIGUES, 2005).

10.5 Estudo de caso regional: os efluentes da Termomacaé

O Rio Macaé nasce na Serra de Macaé, próximo ao pico do Tinguá (1560 m de altitude), em Nova Friburgo, fluindo na direção leste-sudeste, numa extensão de cerca de 136 km, até a desembocadura no Oceano Atlântico. A população dos municípios incluídos em sua bacia é de 141.000 habitantes, dos quais 93% da população está situada no limite territorial do município de Macaé, tendo a área urbana desse município a maior densidade na bacia, estando localizada às margens da zona estuarina do rio. Assim, o estuário do Macaé recebe a influência do entorno urbanizado da cidade de Macaé, cuja principal consequência é a degradação das condições sanitárias deste trecho do rio (Consórcio MRA-5, 2004). Já em 1989, segundo a Fundação Estadual do Meio Ambiente, FEEMA (comunicação pessoal), no município de Macaé e arredores, diagnosticaram-se alguns dos problemas clássicos encontrados em cidades maiores, tais como a ocupação desordenada de áreas alagadas e ribeirinhas, a destruição da cobertura vegetal, a insuficiência de infra-estrutura e a falta de tratamento completo e adequado de esgotos. Ainda, os municípios litorâneos da bacia constituem o pólo industrial do norte fluminense, e respondem pela produção, recebimento e distribuição em grande escala, de petróleo e gás natural oriundos da bacia de Campos dos Goytacazes.

A Figura 3 destaca a região de interesse deste estudo, cujo domínio simulado compreendeu uma extensão de 3 km, centrado no ponto de descarte de efluentes da Usina Termomacaé – UTE Mário Lago.

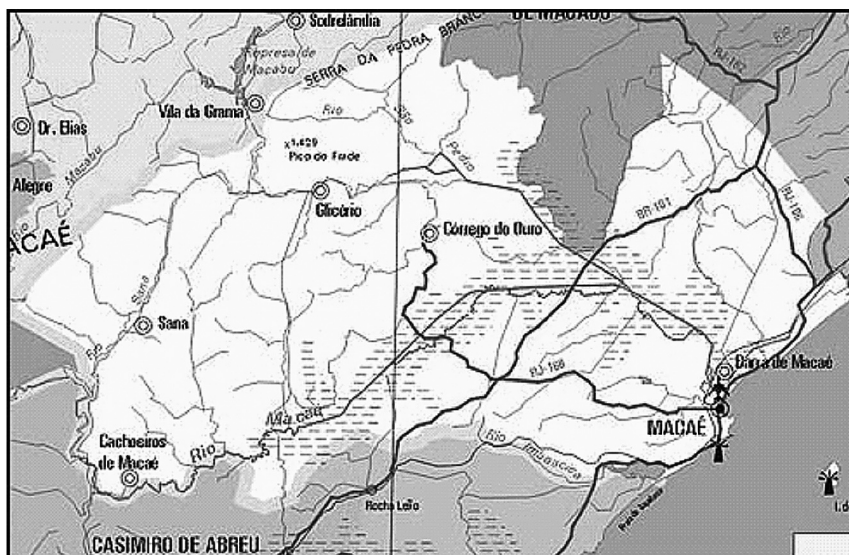


Figura 3: Região do estudo (entorno de 3km da UTE Mário Lago)

Fonte: COSTA, 2000.

Nesse trabalho são apresentadas algumas simulações geradas por um modelo 2D-horizontal da região do baixo Rio Macaé, situada no litoral norte fluminense. Essas simulações são discutidas sob a ótica de avaliação ambiental, como o transporte de poluentes ocasionalmente lançados nas margens do rio.

É sabido que, mesmo para escoamentos unidirecionais, como os que predominam em rios, plumas de poluentes podem ser dispersadas para montante do lançamento se as velocidades de corrente predominantes forem suficientemente pequenas (JAMES, 1984). Velocidades pequenas são registradas, principalmente, durante as estações secas, como as simuladas nesse estudo. Tais resultados sinalizam que altas concentrações de alguns poluentes, eventualmente determinadas a montante do lançamento de algum efluente, não necessariamente devem ter sua origem atribuída a outra fonte que não o próprio efluente, principalmente, se o monitoramento for feito, sistematicamente, muito próximo a esse lançamento. Monitoramento sistemático da empresa Termomacaé, com estações localizadas em um raio de 100 m em torno do ponto de lançamento, indicou concentrações igualmente elevadas para alguns parâmetros tanto a jusante quanto a montante do efluente (MATOS, 2008).

10.5.1 Simulação do contaminante Cloro (Cl_2)

O estudar-se o lançamento do Cloro (Cl_2), cuja concentração máxima permitida em efluentes é de 200 mg/m^3 e em águas continentais de classe II de 10 mg/m^3 (Resolução CONAMA 357/2005), observa-se que, em média, o lançamento da empresa fica em torno de 90 mg/m^3 , portanto abaixo do limite legal, enquanto o monitoramento sistemático registra médias de 60 mg/m^3 e 70 mg/m^3 , respectivamente, a montante e a jusante do ponto de lançamento.

A simulação considerou uma condição inicial nula, ou seja, a inexistência de Cloro no instante inicial da simulação, num período de 4 horas, modelando o lançamento de efluente por um período de 2 horas, com uma vazão de $11,8 \text{ l/s}$, correspondendo ao lançamento de um volume de 85 m^3 de efluente.

Na Figura 4 é apresentada a evolução no tempo da concentração de Cloro (Cl_2) simulada nos pontos localizados, 100 m a montante e a jusante do lançamento, junto à margem próxima ao lançamento. Verifica-se que as concentrações simuladas nos pontos, a montante e a jusante do lançamento, são muito inferiores às efetivamente observadas no monitoramento do rio pela Usina Termomacaé, da ordem de $20,0 \text{ mg/m}^3$.

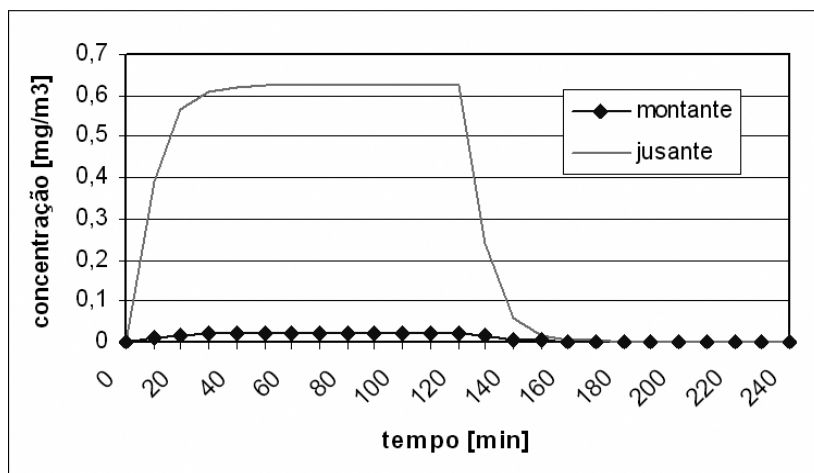


Figura 4: Evolução no tempo da concentração de Cloro (Cl_2) simulada nos pontos localizados 100 metros a montante e a jusante do lançamento, junto à margem próxima ao lançamento

Analisando-se o resultado da simulação pode-se concluir que realmente a origem do cloro é externa à empresa Termomacaé e que as águas do rio Macaé já chegam à região com valores elevados.

10.5.2 Simulação do contaminante Zinco (Zn)

Um outro parâmetro de interesse é o Zinco (Zn), cujas medições atenderam à regulamentação até o primeiro trimestre de 2004 e que, posteriormente, apresentou certa instabilidade, interpretada como proveniente de processos corrosivo associados aos sistemas de Torres de Resfriamento e tratamento químico anticorrosivos potencialmente ineficiente (MATOS, 2008).

Em média, a concentração no efluente da empresa fica em torno de 1.720 mg/m³ e o monitoramento sistemático registra concentrações médias de 40 mg/m³ e 80 mg/m³, respectivamente, a montante e a jusante do lançamento.

A simulação considerou uma concentração inicial de 37 mg/m³, o mesmo lançamento de 85 m³ de efluente, abrangendo um período de 4 horas, modelando o lançamento de efluente por um período de 2 horas com uma vazão de 11,8 l/s.

A seguir, na Figura 5, é apresentada a evolução no tempo da concentração de Zinco (Zn) simulada nos pontos localizados 100 m a montante e a jusante do lançamento, junto à margem próxima ao lançamento.

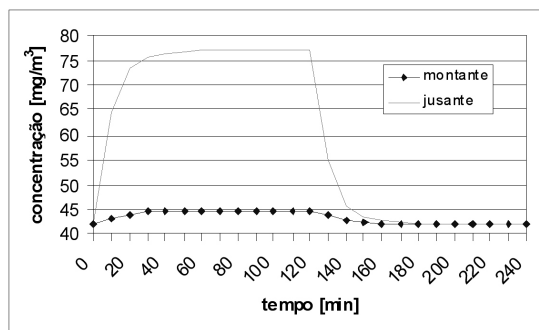


Figura 5: Evolução no tempo da concentração de Zinco (Zn) simulada nos pontos localizados 100 metros a montante e a jusante do lançamento, junto à margem próxima ao lançamento

Analisando-se o resultado, conclui-se que o lançamento do efluente pela Termomacaé contribui para o aumento da concentração de Zinco (Zn) no Rio Macaé na zona de mistura, e já estão em curso esforços na operação da Termomacaé e investimentos na construção de uma nova Estação de Tratamento de Efluentes, visando reduzir a concentração do mesmo no efluente.

10.5.3 Desafios e trabalhos futuros

O futuro é altamente demandante em relação ao tema Gerenciamento de Recursos Hídricos. A humanidade necessita de aperfeiçoar diversos aspectos, desde a insuficiência de dados, à necessidade de desenvolver e validar os modelos computacionais, além de disponibilizar as informações de interesse para os usuários, bem como a elaboração de “Sistemas de Suporte à Decisão”, devidamente preparados, para lidar com a problemática de recursos hídricos escassos e maior demanda por parte do homem.

Os próximos passos desta pesquisa serão a implementação de melhorias no monitoramento realizado pela Usina Termomacaé – Petrobras, a investigação experimental dos coeficientes de dispersão longitudinal e transversal utilizando a abordagem de Problemas Inversos (LUGON *et al.*, 2007), a introdução de melhorias na modelagem matemática, etc.

