

Modelagem e simulações dos fluxos superficiais de vapor d'água na área da represa do rio Manso/MT

Nelson L. G. Odi¹,

Matemática – UNEMAT, 78.390-000, Barra do Bugres/MT.

Geraldo L. Diniz²,

DMAT, ICET – UFMT, 78.060-900, Cuiabá/MT.

João Frederico C. A. Meyer³,

DMA, IMECC – UNICAMP, 13083-859, Campinas/SP.

Resumo. Neste trabalho, investigamos o fenômeno da dispersão do vapor d'água atmosférico oriundo do lago formado a partir do represamento do Rio Manso. É proposto um modelo matemático para simular os fluxos superficiais de umidade na região da Usina Hidroelétrica do Rio Manso (UHE de Manso). O objetivo é: propor um modelo matemático para simular cenários dessa dispersão do vapor d'água próximo à superfície. O modelo foi elaborado a partir de uma equação geral de transporte com difusão para o vapor d'água atmosférico e a aproximação numérica obtida por computador com o uso do método de elementos finitos (MEF) via técnica Streamline Upwind Petrov-Galerkin (SUPG). A abordagem proporcionou a obtenção de cenários para os campos direcionais dos fluxos de umidade e os resultados indicam que a presença do lago pode estar afetando o micro-clima local.

Palavras-chave: Fluxos de umidade; modelagem ambiental; elementos finitos; simulação por computador.

¹nlgraf@ufmt.br

²geraldo@ufmt.br – parcialmente financiado pela FAPEMAT - Proc. 563/04

³joni@ime.unicamp.br

1 Introdução

As atividades humanas, principalmente aquelas baseadas na exploração dos recursos naturais disponíveis, promovem alterações significativas na paisagem e nos mais variados ecossistemas do planeta. As constatações atuais são de que as interferências sofridas pela natureza estão alterando os fluxos significativos de matéria e energia entre os sistemas naturais. Tais mudanças ocasionam alterações nos processos naturais do meio ambiente. Um exemplo marcante disso é que a velocidade e a intensidade observadas no aumento da temperatura global nas últimas décadas são incompatíveis com os tempos necessários à adaptação natural de ecossistemas (Nobre, 1992).

As características do clima de uma localidade são afetadas pela sua localização, seja, por exemplo, um vale ou uma encosta ou pelo desenvolvimento local e regional. O aumento da temperatura do ar – uma das conseqüências mais imediatas do desflorestamento – aumenta exponencialmente a capacidade deste de reter vapor d'água. Dessa maneira, avalia-se que um empreendimento hidrelétrico pode produzir a alteração de características climáticas regionais.

O alcance ambiental e ecológico das alterações é fator dependente da vulnerabilidade do sistema (neste caso, uma bacia hidrográfica) a jusante e a montante da região onde se formou o lago (Müller, 1995). A extensão da área inundada e o seu volume nos levam a crer que, neste ambiente, poderão ocorrer alterações nos processos ambientais do ecossistema terrestre e na atmosfera, alterações estas que podem afetar as características do clima local.

O objetivo do presente trabalho é o de criar um instrumento que pode, com antecedência, fornecer informações de possíveis conseqüências advindas do represamento futuro de rios. O estudo de caso feito neste trabalho é relativo ao represamento do Rio Manso, MT.

2. Metodologia

O local de estudo é a UHE de Manso cujos extremos das áreas alagadas se estendem por aproximadamente 50 km nos sentidos Norte/Sul e Leste/Oeste (fig. 1), localizado na sub-bacia 1, conforme classificação proposta pelo relatório

preliminar do Plano de Conservação da Bacia do Alto Paraguai - PCBAP (Lobo, 1977). A área está localizada a montante da cidade de Cuiabá no rio Manso, afluente do rio Cuiabá e contribuinte para a bacia do rio Paraguai, formador do Pantanal Mato-grossense.

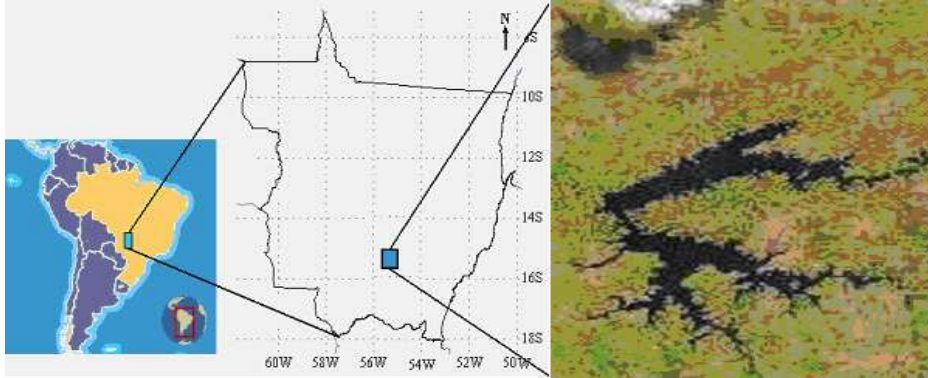


Figura 1: Localização geográfica e foto de satélite (à direita) da UHE de Manso, no Estado de Mato Grosso, Centro-Oeste Brasileiro.

2.1. Modelo Matemático

A aproximação foi feita em um domínio bidimensional pela possibilidade de se fazer um estudo por camadas sobrepostas, tomando planos horizontais representativos em uma camada delgada que contenha as características do comportamento médio dos fluxos superficiais de vapor d'água. A discretização do domínio foi obtida a partir de uma malha de triângulos sobre a imagem aérea da represa (fig. 1). Após estabelecer o número de nós nas direções x e y , foi gerado o arquivo de coordenadas dos nós $N = (x, y, k)$, com $k = 1$ se o nó se encontra sobre o lago e $k = 0$, caso contrário.

Denominando $c(x, y, t)$ a concentração de vapor d'água num nó (x, y) do domínio $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ e no instante $t \in (0, T]$, então a variação da concentração de vapor d'água de um ponto a outro será afetada por um conjunto de fluxos (James e Huntley, 1990), principalmente por gradientes de concentração (difusão), pelo transporte ocasionado pelo vento (transporte advectivo) e pela perda de alguma parcela para a atmosfera adjacente (Diniz, 2003; Cantão, 1998; Marchuk, 1986).

Então, a equação que rege o processo deve obedecer à clássica formulação genérica dada a seguir, que representa uma generalização do modelo que buscamos:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \{difusão\} - \left\{ \begin{array}{l} transporte \\ advectivo \end{array} \right\} - \{decaimento\} + \{fonte\} \quad (2.1)$$

onde, conforme é usual na literatura, temos:

$$\begin{aligned} \{difusão\} &= -div(-\alpha \nabla c) && \text{(cf. Okubo, 1980),} \\ \{transporte advectivo\} &= div(\vec{V}c) && \text{(cf. Jørgensen, 1988),} \\ \{decaimento\} &= \sigma c && \text{(cf. Edelstein-Keshet, 2005).} \end{aligned}$$

De modo que a equação (2.1) torna-se:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + div(-\alpha \nabla c) + div(\vec{V}c) + \sigma c = f \quad (2.2)$$

com:

- ✓ $\alpha = \alpha(x, y, t)$: aproxima a difusividade efetiva do meio aéreo;
- ✓ $\vec{V} = \langle V_1(x, y, t); V_2(x, y, t) \rangle$: é o campo de velocidade horizontal do vento com:
 $div(\vec{V}) = 0$, como aproximação de um campo bem comportado no sentido dos fluxos aéreos;
- ✓ σ : aproxima o parâmetro de decaimento global linear e,
- ✓ f : é o termo fonte.

Seja η o vetor normal exterior unitário ao longo do contorno¹ Γ_k . As condições de fronteira serão consideradas assintoticamente estacionárias – condição homogênea de Von Neuman (Bassanezi e Ferreira Jr, 1988), genericamente indicadas por:

$$-\alpha \frac{\partial c}{\partial \eta} \Big|_{\Gamma_k} = 0, \quad \forall t \in (0, T], \quad k = 1, 2, 3 \text{ e } 4. \quad (2.3)$$

¹Conforme mostrado pela figura 2

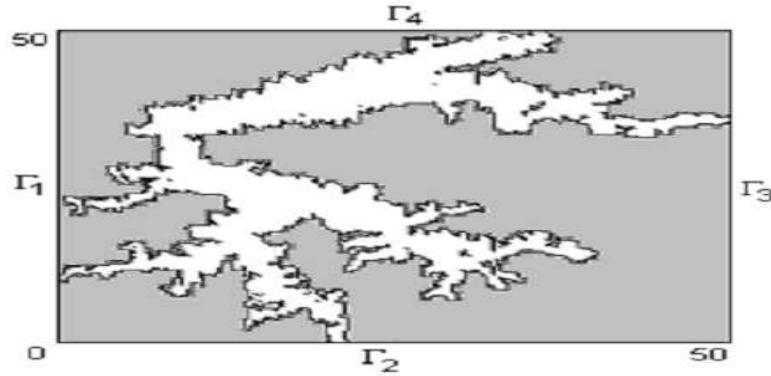


Figura 2: Discretização espacial do domínio Ω delimitado pelas fronteiras Γ_k por malha de triângulos. Suprimimos a malha da discretização para não prejudicar a visualização.

2.2. Formulação Variacional

A formulação variacional ou “fraca” do problema leva a uma solução no sentido de distribuições que consiste em obter uma outra formulação da equação (2.2) cuja solução deve ser procurada num espaço funcional conveniente. Uma justificativa para esta formulação fraca consiste na possibilidade de poder trabalhar em espaços bem menos restritos em termos de regularidade das soluções procuradas. Para isto iremos:

1. Considerar as derivadas do modelo clássico no sentido das distribuições;
2. efetuar o produto interno de cada termo da formulação clássica por uma função v , denominada função teste, sendo esta pertencente a um espaço conveniente (Meyer e Diniz, 2006), dado por:

$$\mathcal{S} = \left\{ \nu \in \mathcal{L}^2((0, T], \mathcal{A}) : \frac{\partial \nu}{\partial t} \in \mathcal{L}^2(\Omega) \right\}$$

onde

$$\mathcal{A} = \left\{ c \in \mathcal{H}^1(\Omega) : \frac{\partial c}{\partial \eta} \Big|_{\Gamma} = 0 \right\}.$$

Aqui, \mathcal{L}^2 é o espaço das funções de quadrado integráveis sobre $\Omega \subset \mathbb{R}^2$, no sentido de Lebesgue.

Em \mathcal{S} temos produtos internos definidos por:

$$\begin{aligned} \left(f \middle| g \right)_{\Omega} &= \iint_{\Omega} f \cdot g \, d\mu; \\ \left(\nabla f \middle| \nabla g \right)_{\Omega} &= \sum_i \iint_{\Omega} \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial g}{\partial x_i} \, d\mu \quad e \\ \left\langle f \middle| g \right\rangle_{\Gamma} &= \int_{\Gamma} f \cdot g \, ds \end{aligned} \quad (2.4)$$

Considerando o primeiro dos produtos internos definidos em \mathcal{S} e assumindo como constante a densidade do ar na faixa delgada do domínio, leva a uma aproximação por uma constante do coeficiente de difusão aérea α na equação (2.2). Desse modo, temos:

$$\left(\frac{\partial c}{\partial t} \middle| \nu \right)_{\Omega} - \alpha \left(\nabla(\nabla c) \middle| \nu \right)_{\Omega} + \left(\nabla(\vec{V}c) \middle| \nu \right)_{\Omega} + \left(\sigma c \middle| \nu \right)_{\Omega} = \left(f \middle| \nu \right)_{\Omega} \quad (2.5)$$

$$\forall \nu \in \mathcal{S}, \forall t \in (0, T]$$

Dessa forma, considerando funções em $\mathcal{L}^2(\Omega)$ e tomando $\vec{V} = \langle V_1, V_2 \rangle$, as componentes advectivas dadas por: $V_1 = V \cos \theta$ e $V_2 = V \sin \theta$, onde V é a velocidade horizontal do vento predominante e θ sua direção, obtém-se de (2.5):

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial c}{\partial t} \middle| \nu \right)_{\Omega} - \alpha \left(\Delta c \middle| \nu \right)_{\Omega} + V \cos \theta \left(\frac{\partial c}{\partial x} \middle| \nu \right)_{\Omega} + V \sin \theta \left(\frac{\partial c}{\partial y} \middle| \nu \right)_{\Omega} \\ + \left(\sigma c \middle| \nu \right)_{\Omega} = \left(f \middle| \nu \right)_{\Omega} \quad \forall \nu \in \mathcal{S}, \forall t \in (0, T] \end{aligned} \quad (2.6)$$

Ao fazer uso de uma identidade de Green (Wikimedia, 2006; Iório Jr. e Iório, 1988) para operadores (cf. Lions, 1961), aplicada ao termo $-\alpha (\Delta c | \nu)_{\Omega}$ da equação precedente, obtemos $-\alpha (\Delta c | \nu)_{\Omega} = \alpha (\nabla c | \nabla \nu)_{\Omega} - \alpha \langle \frac{\partial c}{\partial \eta} | \nu \rangle_{\Gamma}$ e, considerando as condições de contorno de von Neuman definidas anteriormente, vem:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial c}{\partial t} \middle| \nu \right)_{\Omega} - \alpha \left(\nabla c \middle| \nabla \nu \right)_{\Omega} + V \cos \theta \left(\frac{\partial c}{\partial x} \middle| \nu \right)_{\Omega} + V \sin \theta \left(\frac{\partial c}{\partial y} \middle| \nu \right)_{\Omega} \\ + \left(\sigma c \middle| \nu \right)_{\Omega} = \left(f \middle| \nu \right)_{\Omega} \quad \forall \nu \in \mathcal{S}, \forall t \in (0, T] \end{aligned} \quad (2.7)$$

O problema assim formulado tem a vantagem que a equação (2.7) trata apenas das derivadas de primeira ordem, no sentido das distribuições, enquanto na formulação clássica aparecem derivadas de segunda ordem. Além disso, podemos

demonstrar existência e unicidade de solução, ao fazer uso do teorema de Lions (Lions, 1961, Teorema 1.1 – Cap. IV, pg. 46).

Garantidas a existência e a unicidade de uma solução no espaço adotado \mathcal{S} e com a impossibilidade de obtê-la analiticamente, é necessário recorrer-se à sua aproximação – e a escolha natural desta equação diferencial parcial expressa na formulação variacional recai sobre o método de Galerkin com Elementos Finitos (MEF) para variáveis espaciais.

A aproximação numérica, via MEF, foi obtida com a aplicação da técnica Streamline Upwind Petrov-Galerkin – (SUPG), (Brooks e Hughes, 1982; Heinrich et al., 1977).

2.3. Método Streamline Upwind Petrov-Galerkin (SUPG)

O uso da técnica Galerkin Standard para aproximação numérica da parte espacial de uma equação que inclui termos de transporte, apresenta sérias dificuldades quando o termo advectivo-convectivo é preponderante na equação. As dificuldades se traduzem em oscilações numéricas quando o termo advectivo é muito maior que o termo difusivo. Um critério tanto para se verificar quanto para evitar o aparecimento dessas oscilações (certamente indesejáveis), é denominado núcleo de Péclet (Pe), que é dado por:

$$Pe = \frac{V_i \Delta x_i}{\alpha} \leq 2. \quad (2.8)$$

Este núcleo de Péclet fornece uma condição sobre a discretização do domínio de modo a minimizar as oscilações numéricas inerentes ao método utilizado na aproximação espacial. Uma maneira de suprimir as oscilações é usar malhas mais refinadas, de tal forma que a convecção-advectação perca a sua preponderância no nível do elemento finito. Este procedimento é bastante difundido e se constitui uma das principais características do MEF quando se adotam refinamentos automáticos da malha, mas levam a sistemas de grande porte com um conseqüente custo computacional alto.

Outra opção viável é o uso da técnica SUPG que considera o sentido do fluxo e leva a uma abordagem aerodinâmica. Diversos autores (Hughes e Mizukami, 1985; Brooks e Hughes, 1982; Heinrich et al., 1977) sugerem a seguinte forma para

a função teste $\nu \in \mathcal{S}$ de (2.7), adaptada aqui ao caso bidimensional:

$$\psi_i(x, y) = \varphi_i(x, y) + \delta F(x, y), \text{ onde } \delta = \max \left\{ 0; 1 - \frac{2\alpha}{V_i \Delta x_i} \right\} \quad (2.9)$$

é um peso que será obtido de acordo com os parâmetros provenientes da “condição de Péclet”, da forma sugerida por Carey e Oden (1981), em que $F(x, y)$ é uma função positiva, que se anula em cada nó e satisfaz a seguinte condição (Mistro, 1992), sobre cada elemento:

$$\iint_{\Omega_i} F(x, y) d\mu = \iint_{\Omega_i} \varphi_i(x, y) d\mu = \frac{\Delta x \Delta y}{6} \quad (2.10)$$

no caso de uma malha uniforme, sendo Ω_i o i -ésimo elemento triangular da discretização.

A introdução de SUPG não requer que se introduzam modificações de refinamento na triangulação do domínio, de modo que não se alterem as condições de contorno estabelecidas. Para a nova formulação variacional discretizada, denotando por c_h a aproximação de $c(x, y, t)$, por:

$$c_h(x, y, t) = \sum_{k=1}^{N_h} c_k(t) \varphi_k(x, y) \quad (2.11)$$

Substituindo ν_h de (2.7) pelas novas funções teste, $\mathcal{S}_h \subset \mathcal{S}$, como na formulação variacional obtida inicialmente, reescrevemos a equação (2.7) na forma:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{N_h} \frac{dc_j(t)}{dt} \left(\varphi_j \Big| \psi_i \right)_{\Omega_h} &+ \sum_{i=1}^{N_h} c_j(t) \left\{ \sigma \left(\varphi_j \Big| \psi_i \right)_{\Omega_h} + \alpha \left(\nabla \varphi_j \Big| \nabla \psi_i \right)_{\Omega_h} \right. \\ &+ V \cos \theta \left(\frac{\partial \varphi_j}{\partial x} \Big| \psi_i \right)_{\Omega_h} + V \sin \theta \left(\frac{\partial \varphi_j}{\partial x} \Big| \psi_i \right)_{\Omega_h} \left. \right\} \\ &= \left(f \Big| \psi_i \right)_{\Omega_h} \quad \forall \psi_i \text{ da base de } \mathcal{S}_h \text{ e } \forall t \in (0, T] \end{aligned} \quad (2.12)$$

Quanto à variável temporal iremos recorrer ao método de Crank-Nicolson pela ordem de aproximação e, dada a característica fortemente advectiva do problema, junto com a referida correção do tipo Streamline-Upwind/Petrov-Galerkin, com a qual se podem evitar naturais oscilações advinentes de diversas origens numéricas.

A adoção dessa opção algorítmica leva ao sistema linear dado na forma matricial:

$$\mathbb{A}c^{(n+1)} = \mathbb{B}c^{(n)} + d^{(n+\frac{1}{2})}, \quad (2.13)$$

com $c^{(0)}$ dado por: $c^{(0)} = c(x_k, y_k, 0) \quad k = 1, 2, \dots, N_h$.

3. Resultados e análises

Os parâmetros² utilizados foram estimados dentro de espectros plausíveis para o modelo matemático em discussão, para a simulação de cenários e teste dos códigos numéricos desenvolvidos. Os códigos foram desenvolvidos para utilização em ambiente MATLAB[®], cuja facilidade de interface gráfica permite a obtenção de animações que descrevem qualitativamente o processo evolutivo da dispersão no domínio discretizado, num determinado intervalo de tempo, previamente determinado. As integrais dos produtos internos envolvidos foram calculadas com o auxílio do software Mathematica[®].

São apresentados a seguir, os gráficos dos resultados numéricos obtidos com a combinação de técnicas adotadas. Vamos denominar estes resultados de ensaio 1, ensaio 2, ensaio 3 e ensaio 4 gerados sobre um refinamento da malha (ver fig. 2), cuja triangulação foi definida com 29.929 nós e 59.168 triângulos. A simulação foi desenvolvida em um PC – Pentium IV, 1 GB de RAM. O tempo para geração de cada ensaio foi de 19,34 minutos para 2.400 passos no tempo, para um tempo real de 15 horas.

3.1. Ensaio 1

Nos gráficos deste ensaio (figuras 3 e 4), o deslocamento é devido aos fluxos aéreos com vento de sudoeste. Ocorre o fluxo naquele sentido ao mesmo tempo em que a difusão se faz notar, contribuindo com a dispersão para regiões de menor concentração. Na figura 4, percebe-se um rápido aumento da concentração de vapor d'água sobre o nó final devido ao transporte pelo vento da massa de vapor d'água vinda do lago, enquanto que, para o nó médio, há uma ligeira variação.

²Ver tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros utilizados nos ensaios da simulação - SUPG

Parâmetros do Modelo	Símbolo	Valores	Unidades
coeficiente de difusão	α	0,1	km ² /h
decaimento global	σ	1×10^{-4}	h ⁻¹
velocidade do vento	V	0,5	Km/h
ângulo da direção do vento	θ	$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\pi}{4} \rightarrow \text{ensaio 1;} \\ \frac{3\pi}{4} \rightarrow \text{ensaio 2;} \\ \frac{5\pi}{4} \rightarrow \text{ensaio 3;} \\ -\frac{\pi}{4} \rightarrow \text{ensaio 4.} \end{array} \right.$	radianos
Parâmetros da discretização	Símbolo	Valores	Unidades
passo no tempo	Δt	0,00625	horas
passo na direção do eixo-x	Δx	0,29069	Km
passo na direção do eixo-y	Δy	0,29069	Km

3.2. Ensaio 2

Nos gráficos do ensaio 2 (figuras 5 e 6), o deslocamento da massa de vapor d'água é devido ao termo advectivo com vento de sudeste. Os pontos de concentração alta diminuem rapidamente ao mesmo tempo em que ocorre o espalhamento para as regiões situadas entre os braços da represa. Na figura 6 percebe-se o declínio da concentração de vapor d'água no nó inicial (vento desfavorável), enquanto o nó central apresentou ligeiro aumento, estabilizando no final.

3.3. Ensaio 3

A figura 7 mostra que o deslocamento devido ao termo advectivo se dá na direção para sudoeste (vento de nordeste). Ocorre um aumento da concentração neste sentido que podemos perceber através da massa de vapor d'água se movendo nesta direção ao longo do tempo. Na figura 8 podemos observar a variação da concentração de vapor d'água ao longo do tempo, em dois pontos (nós) do domínio discretizado.

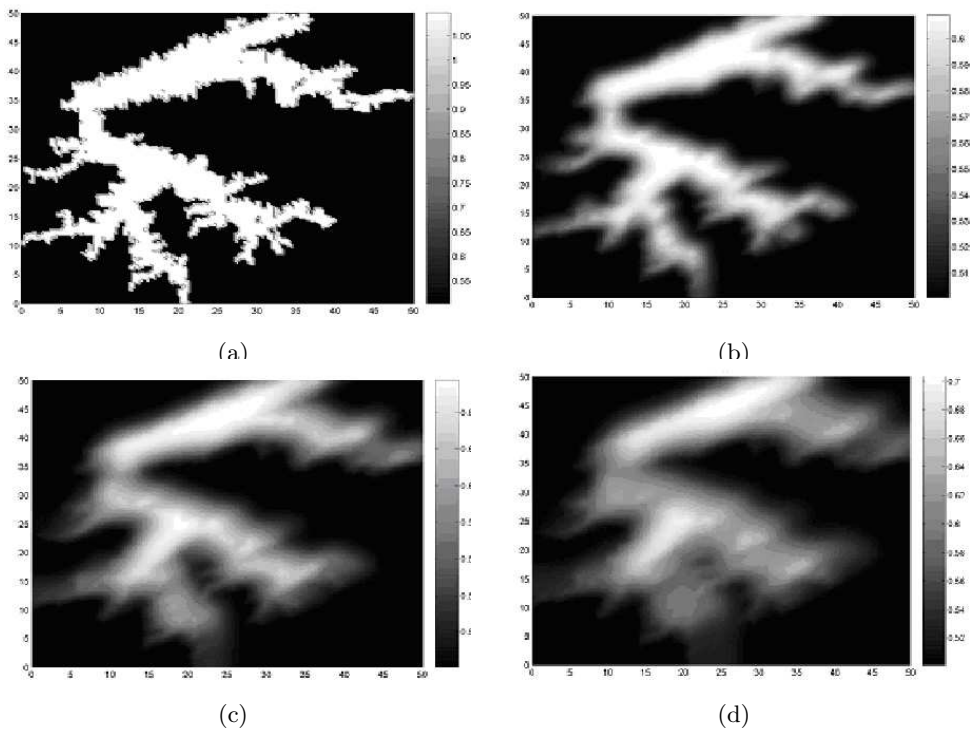


Figura 3: Distribuição da concentração da massa de vapor d'água no domínio em (a) $t = 0$ horas , (b) $t = 5$ horas, (c) $t = 10$ horas e (d) $t = 15$ horas, para o ensaio 1, em que o n^o de Péclet = 1,027.

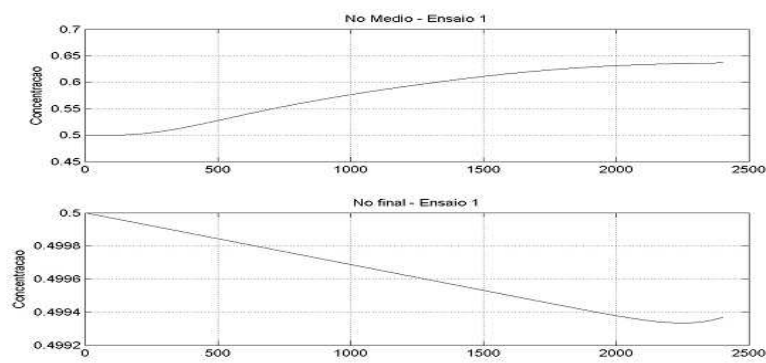


Figura 4: Resultados numéricos do ensaio 1 do processo evolutivo para dois nós da malha.

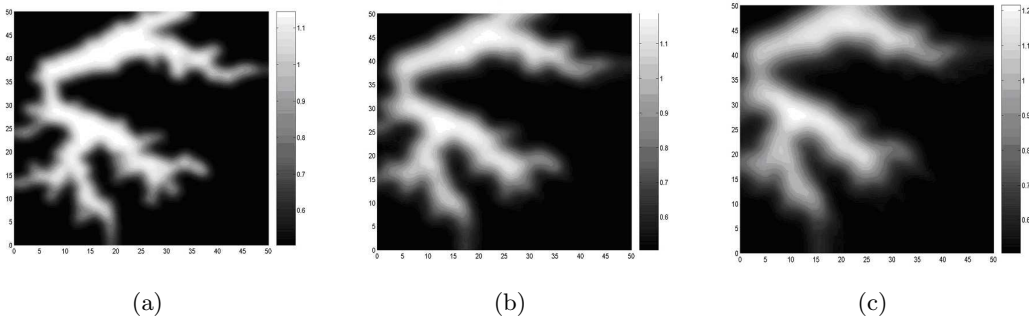


Figura 5: Distribuição da concentração da massa de vapor d'água no domínio em (a) $t = 5$ horas , (b) $t = 10$ horas e (c) $t = 15$ horas, para o ensaio 2, em que o nº de Péclet = 1,027.

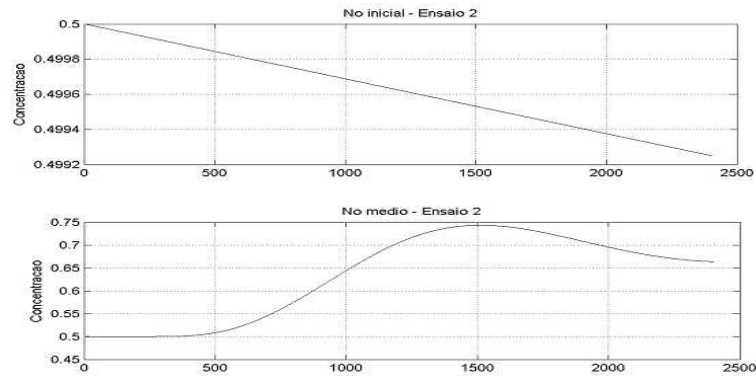


Figura 6: Resultados numéricos do ensaio 2 do processo evolutivo para dois nós da malha.

3.4. Ensaio 4

Na figura 9, a direção do fluxo é para sudeste (vento de noroeste). É interessante notar que, neste ensaio, a concentração se mantém mais elevada numa maior abrangência espacial, sobre o braço inferior do lago, em relação aos gráficos dos ensaios anteriores. Neste caso, a ação do vento move a massa de vapor de um ponto a outro, sem deslocá-lo para fora da área alagada. No ponto intermediário do domínio escolhido para visualizar o transiente em estudo (fig. 10) podemos notar a passagem da massa de vapor que se estabiliza num nível um pouco acima do inicial.

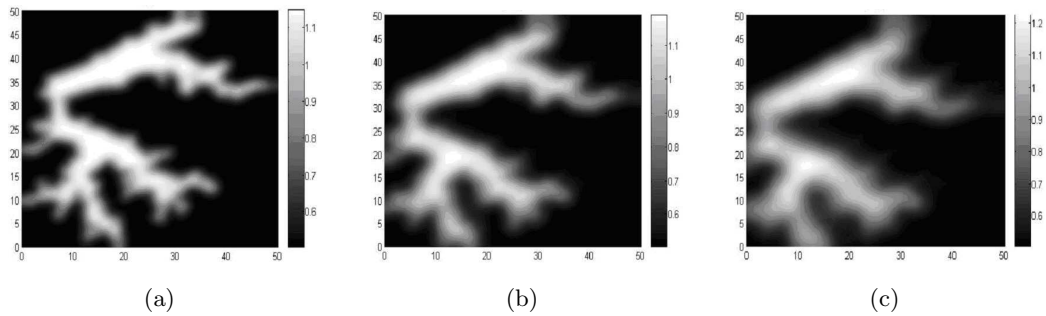


Figura 7: Distribuição da concentração da massa de vapor d'água no domínio em (a) $t = 5$ horas , (b) $t = 10$ horas e (c) $t = 15$ horas, para o ensaio 3, em que o n° de Péclet = 1,027.

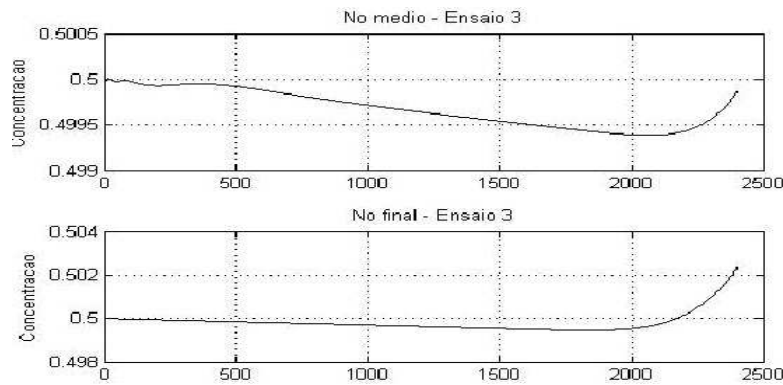


Figura 8: Resultados numéricos do ensaio 3 do processo evolutivo para dois nós da malha.

4. Discussão

A técnica de upwind apresenta boas características de estabilidade, pois introduz uma abordagem aerodinâmica, o que praticamente elimina o aparecimento de valores numéricos com variações espúrias. O uso dessa técnica possibilita uma maior flexibilidade no manuseio dos parâmetros o que permitiu introduzir valores predominantes para o termo advectivo. Nos ensaios apresentados, adotou-se um regime de ventos fracos e constantes. Para esta primeira abordagem isto é aceitável, pois considera-se que os ensaios serviram de teste para os códigos numéricos.

Nos quatro ensaios feitos com a técnica de upwind, apesar de adotarmos ven-

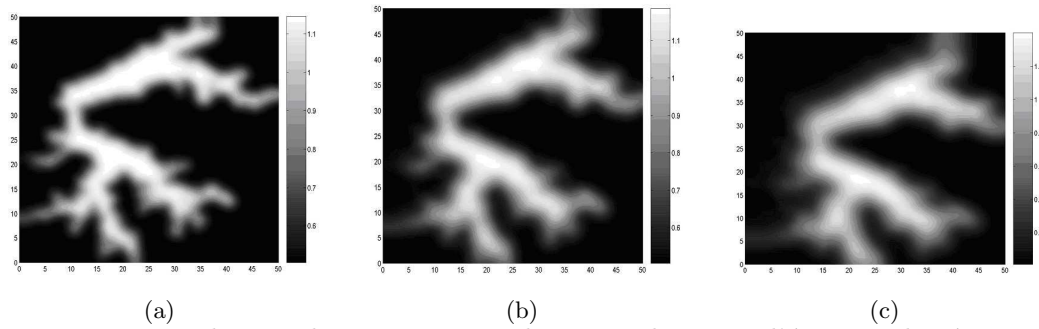


Figura 9: Distribuição da concentração da massa de vapor d'água no domínio em (a) $t = 5$ horas, (b) $t = 10$ horas e (c) $t = 15$ horas, para o ensaio 4, em que o nº de Péclet = 1,027.

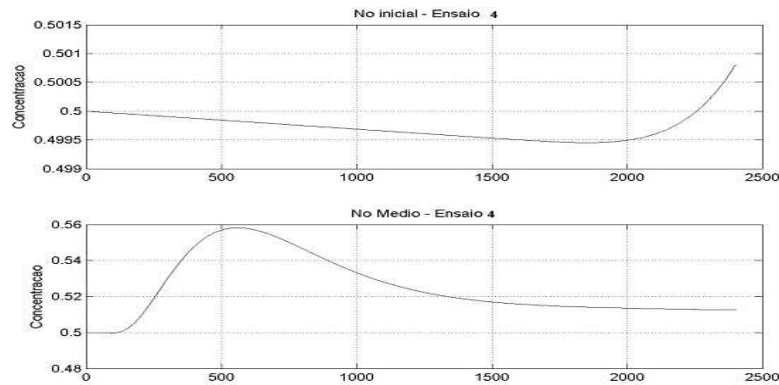


Figura 10: Resultados numéricos do ensaio 4 do processo evolutivo para dois nós da malha.

tos relativamente fracos, o efeito de transporte pelo vento é bastante significativo. As diferentes direções introduzidas para o fluxo advectivo geraram um padrão de dispersão do vapor d'água distinto.

Os fluxos são gerados na direção prevista, tendendo a se deslocar para fora do domínio considerado. Isso leva praticamente à certeza de que a abordagem teórica proposta foi adequada.

A linha da margem natural do lago é bastante irregular (ver figura 2). A análise dos gráficos subsequentes, em ambos os ensaios, revela que esta irregularidade, que é fruto da distribuição dos pontos de evaporação, é suplantada pelo efeito difusivo-advectivo de modo que a linha fica totalmente suavizada. Podemos

interpretar este fenômeno, no caso real, como sendo resultante do processo natural da dispersão, de modo que, na região mais próxima do lago, a concentração de vapor d'água é maior.

Isso significa que uma faixa do terreno próxima ao lago sofre influência direta da evaporação do lago, tornando-se gradativamente mais úmida. Este resultado é relevante para a avaliação do modelo proposto, pois o resultado numérico obtido reflete um cenário qualitativamente compatível com a realidade.

Relativamente aos nós destacados nos ensaios apresentados, a variação da concentração calculada se mostrou variável no tempo, pode ser observada alguma tendência, para a estabilidade ou instabilidade. É interessante notar que a concentração sobre o nó final apresentou comportamento similar em três ensaios (2, 3 e 4). A tendência no decorrer da simulação é um leve decaimento da concentração sobre este nó, porém sofre um aumento exponencial no final.

A concentração sobre o nó médio apresenta um comportamento distinto. Nos ensaios 1, 2, e 4 mostra uma concentração de vapor d'água estável no início e aumentando, à semelhança de uma curva logística, até alcançar um máximo e decaindo suavemente a partir deste pico. No ensaio 4, o nó médio exibe um comportamento instável da concentração de vapor d'água no início que depois se suaviza com um decaimento leve, porém aumentando exponencialmente no final. Consideramos que a variabilidade local da concentração se deve principalmente pela distância do ponto observado à fonte e o sentido do fluxo advectivo em cada caso.

5. Considerações Finais

A modelagem ambiental com o aporte das ferramentas aplicadas no presente trabalho adquire novas características e possibilidades de abordagem na avaliação de alterações ambientais provocadas pelas atividades decorrentes de mudança do uso do solo. A técnica mostrou-se muito robusta e estudos ambientais poderão ser assessorados de modo confiável, no sentido de contribuir para avanços significativos no estudo e análise de impactos devidos, *p.e.*, ao desflorestamento amazônico, fluxos de CO₂, dentre outros fluxos de matéria e energia nos mais diversos sistemas ambientais.

Este trabalho possui um caráter inédito quanto à forma de abordagem para o problema. A investigação de fluxos superficiais de umidade pela técnica de Elementos Finitos via SUPG não possui paralelo nos estudos ambientais de modo que o trabalho contribui de forma efetiva para a avaliação dos fluxos superficiais de vapor d'água na região da UHE de Manso.

As simulações permitem estudar possíveis impactos no micro-clima da região e abre um campo muito interessante para futuras investigações que permitam estabelecer critérios de implementação mais rigorosos do ponto de vista da análise numérica, bem como uma abordagem enriquecida com parâmetros experimentais de difusividade aérea e campos reais de vento, e novas considerações sobre o meio aéreo.

Referências

- Bassanezi, R. C. e Ferreira Jr, W. C. (1988). *Equações diferenciais com aplicações*. Ed. Harbra, S. Paulo.
- Brooks, A. N. e Hughes, T. J. R. (1982). Streamline upwind/Petrov-Galerkin formulations for convection dominated flows with particular emphasis on incompressible Navier-Stokes equations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 32:199–259.
- Cantão, R. F. (1998). Modelagem e simulação numérica de derrames de óleo no canal de São Sebastião, SP. Dissertação de Mestrado, IMECC–UNICAMP, Campinas/SP.
- Carey, G. F. e Oden, J. T. (1981). *Finite Elements: mathematical aspects*, volume 4. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs.
- Diniz, G. L. (2003). *Dispersão de Poluentes num sistema ar-água: modelagem, aproximações*. Tese de Doutorado, FEEC – Unicamp, Campinas/SP.
- Edelstein-Keshet, L. (2005). *Mathematical Models in Biology*, volume 46 of *Classics in Applied Mathematics*. SIAM, Philadelphia.

- Heinrich, J. C., Huyakorn, P. S., Mitchell, A. R., e Zienkiewicz, O. C. (1977). An 'upwind' finite elements scheme for two-dimensional convective transport equation. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 11:131–143.
- Hughes, T. J. R. e Mizukami, A. A. (1985). Petrov–galerkin finite element method for convection dominated flows: An accurate upwinding technique for satisfying the maximum principle. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 50:181–193.
- Iório Jr., R. e Iório, V. M. (1988). *Equações diferenciais parciais: uma introdução*, volume 17 of *Projeto Euclides*. IMPA/CNPq, R. Janeiro.
- James, D. J. G. e Huntley, I. D. (1990). *Some aspects of the processes of mathematical models*, in *Mathematical Modelling – a source book of case studies*, páginas 1–17. Elsevier, London.
- Jørgensen, S. E. (1988). *Fundamentals of Ecological Modelling*, volume 9 of *Developments in Environmental Modelling*. Elsevier, Amsterdam.
- Lions, J. L. (1961). *Equations Differentielles Operationelles*. Springer, Berlin.
- Lobo, M. L. C. (1977). Pcbap - plano de conservação da bacia do alto paraguai. in: Relatório Técnico. Centro Integrado de Estudos em Geoprocessamento-CIEG. Universidade Federal do Paraná url: <http://www.cieg.ufpr.br/pcbap.cieg.html>; acesso em: 22/04/2006.
- Marchuk, G. I. (1986). *Mathematical models in environmental problems*, volume 16 of *Studies in Mathematics and its Applications*. North-Holland, Amsterdam.
- Meyer, J. F. C. A. e Diniz, G. L. (2006). Pollutant dispersion in wetland systems: mathematical modeling and numerical simulation. *Ecological Modelling*, submetido.
- Mistro, D. C. (1992). O problema de poluição em rios por mercúrio metálico: modelagem e simulação. Dissertação de Mestrado, IMECC – UNICAMP, Campinas/SP.

- Müller, A. C. (1995). *Hidrelétricas, Meio Ambiente e Desenvolvimento*. Makron Books, São Paulo.
- Nobre, C. A. (1992). *Alterações Climáticas Globais e suas implicações para o Brasil*, volume Especial 1 of *Revista Brasileira de Energia, Centro de previsão do tempo e estudos climáticos*. CPTEC/INPE, S. J. Campos.
- Okubo, A. (1980). *Diffusion and Ecological Problems: Mathematical Models*. Springer, Berlin.
- Wikimedia (2006). Green's identities. *in*: Webpage of Wikipedia – The Free Encyclopedia, URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Green's_identities; acesso em: 22/04/2006.