

Estudo da Dispersão de Poluentes em um Sistema de Represamento via Instrumentais Fuzzy e Aproximação Numérica

Elaine Cristina Catapani Poletti

Departamento de Disciplinas Básicas e Complementares, CESET, UNICAMP,
13484-332, Limeira, SP
E-mail: elainec@ceset.unicamp.br

João Frederico C. A. Meyer

Departamento de Matemática Aplicada, IMECC, UNICAMP
13083-970, Campinas, SP
E-mail: joni@ime.unicamp.br

Resumo: *Neste trabalho, é apresentado o estudo, via Modelagem Matemática, de um problema de dispersão de poluente no reservatório de Salto Grande, Americana - SP. Para tanto, são apresentados o modelo descritivo do problema, baseado na Equação de Difusão-Advecção, bem como as justificativas do processo e dos fenômenos físicos considerados. Para análise, é proposto a integração de instrumentais fuzzy e métodos numéricos, com intuito de contribuir para avaliações de estado real, considerando características intrínsecas de incertezas, e de estudo comparativo de estratégias com vistas a ações preventivas de conservação ou de recuperação, de modo a minimizar danos bioecológicos e impactos ambientais.*

Introdução

A utilização energética dos recursos hídricos no Brasil pode ser considerada um insumo básico para o desenvolvimento econômico do país, devido a exploração desse potencial energético, em detrimento dos demais usos desses recursos [13].

O funcionamento de sistemas aquáticos tem sido objeto de diversas pesquisas ao longo desses anos, tanto quanto às condições naturais quanto em relação aos impactos neles causados pelas atividades antrópicas [4], [9], [14] [16], entre outros.

A maioria dos tipos de poluentes acaba sendo transportada para a água e acumulados em lagos, reservatórios, mares e rios [15].

No tocante à poluição desses recursos hídricos, verifica-se a alteração de suas características por quaisquer ações ou interferências, naturais ou provocadas pelo homem tais como lançamento ou derramamento de volumes de detritos e outros efluentes domésticos e, sobretudo, industriais. Inclusive decorrentes de aplicação de agrotóxicos, assoreamento, drenagem urbana, entre outros.

A demanda crescente e acelerada da água em decorrência do aumento da diversidade das ações antrópicas vem preocupando vários segmentos da sociedade, quanto à qualidade e disponibilidade do recurso para os anos futuros.

De acordo com [11], especialmente no Estado de São Paulo, a maior parte das bacias hidrográficas já se encontra no estado em que as medidas preventivas para conservação se tornaram praticamente inócuas, necessitando de medidas imediatas de recuperação.

Dentro deste contexto, o foco deste trabalho volta-se para a análise da dispersão de poluentes na água, em um sistema de represamento.

Como forma de aplicação, é utilizada a situação evolutiva do reservatório de Salto Grande, localizado no município de Americana/SP.

O propósito é desenvolver uma análise do quadro de impactos ambientais, possibilitando uma avaliação gradual, qualitativa e quantitativa e gerando cenários de possíveis ações de recuperação e conservação do reservatório.

O Reservatório de Salto Grande

O reservatório de Salto Grande é considerado um reservatório de pequeno porte. É formado principalmente pelo represamento do rio Atibaia, e outros ribeirões e córregos de menor vazão, sua capacidade de geração de energia é de 30MW.

Está inserido na sub-bacia do rio Atibaia que pertencente à bacia hidrográfica do Rio Piracicaba. Sua localização geográfica é definida pelas coordenadas $22^{\circ}44'$ de latitude Sul e $47^{\circ}19'$ de longitude Oeste, a uma altitude de 530m.

A represa foi construída entre 1940 e 1949, e teve início de operação em 1950 [3]. A finalidade da sua construção foi possibilitar um aproveitamento hidrelétrico para a região de Americana, pela Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL). Entretanto, atualmente contribui com a regularização da vazão do rio Piracicaba, além de ser importante para irrigação, piscicultura, recreação e abastecimento.

Vale mencionar que o reservatório de Salto Grande está inserido numa região importante do Estado de São Paulo, considerada a segunda região mais rica do Estado e a terceira do País, abrange aproximadamente 12.746 km^2 e 44 municípios.

A bacia do rio Atibaia, um dos mais importantes mananciais de abastecimento público da região, deságua no reservatório de Salto Grande e é a sua grande fonte poluidora, pois apresentando alta densidade urbana e industrial, determina um processo crescente de deterioração da qualidade água do reservatório, causado principalmente pela entrada de efluentes domésticos e industriais provenientes das cidades de Paulínia e Campinas.

A qualidade das águas em uma bacia hidrográfica resulta das características de seu uso e ocupação. Neste caso, verifica-se no reservatório de Salto Grande, que o mesmo acaba funcionando como um sistema de tratamento de efluentes, retendo grande parte do material que chega pelo rio Atibaia.

Ainda, de acordo com [5], o acúmulo de efluentes domésticos e industriais neste reservatório ocasiona a floração permanente de cianobactérias, e além da presença de elevada biomassa de macrófitas aquáticas, influi no aumento de toxicidade, nas alterações das comunidades aquáticas, na minimização dos usos

múltiplos, na redução na produção de energia e, conseqüentemente, no aumento dos problemas para a saúde pública da região e para a biota aquática local.

Dentre os usos da água do reservatório, constata-se a geração de energia, o abastecimento local, lazer, irrigação, piscicultura e o crescente uso de água na região devido à alta densidade urbana e industrial da região tem comprometido a qualidade desses recursos hídricos, principalmente devido ao grande aporte de nutrientes, transportados pelo rio Atibaia.

A quantidade de efluentes domésticos e industriais sem tratamento, provenientes, principalmente das cidades próximas, auxiliam o florescimento freqüente de algas que produzem toxinas e odor e as fontes de poluição difusa tais como áreas de agricultura local podem lançar substâncias potencialmente poluidoras.

Além disso, o próprio sistema de represamento contribui na retenção metais, de resíduos de produtos fitossanitários, nutrientes, sólidos em suspensão, entre outros. Estes compostos podem situar-se na superfície, bem como na coluna d'água, além de degradar-se ou sedimentar-se no substrato de fundo.

O Modelo Determinístico

A equação utilizada para a modelagem deste processo é conhecida como Equação de Difusão-Advecção, onde são incorporados fatores microscópios e macroscópios tais como os fenômenos de dispersão, na concepção de difusão "efetiva", como citado e usado, por exemplo, por [6] e por [10], o transporte advectivo, os fenômenos de decaimento e possíveis fontes de material impactante que possam ocorrer.

A concentração do poluente como a quantidade de matéria existente em um determinado ponto do plano (x, y) no instante (t) é denotada por $c = c(x, y; t)$. A variação dessa concentração em um elemento de área em $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ é dada pela caracterização dos fenômenos mencionados a seguir.

Os microscópicos estão associados aos conceitos de fluxo e conservação e os macroscópicos ao de balanço de massa.

Segundo a formulação clássica, conforme [7], [8], [6], [10]; e incorporando ao modelo de difusão-advecção os fenômenos já citados de difusão efetiva, transporte advectivo, decaimento

e possíveis fontes, temos o modelo genérico dado por:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \text{div}[\alpha \nabla c] - \text{div}[\vec{V}c] - \sigma c + f, \quad (1)$$

com $(x, y) \in \Omega \subset \mathbb{R}^2$, $t \in (0, T] \subset \mathbb{R}$.

Na equação, o fenômeno da difusão efetiva é um importante mecanismo em sistemas bioecológicos, sendo o processo pelo qual uma substância é transferida de uma parte de um sistema para outra, resultado tanto de movimentos moleculares aleatórios (microscópica) quanto como resultado de efeitos de turbulência (macroscópico).

Já o transporte advectivo, é provocado por agentes externos. Impõe uma direção "preferencial" ao transporte das partículas no meio. Assim, além da movimentação aleatória das partículas, deve-se considerar esse fluxo direcionado tal como resultante de ventos, correntezas, etc.

Com relação ao decaimento, trata-se de um fenômeno molecular, quando uma fração de partículas da substância poluente reage com o meio externo excluindo-se do cenário durante o processo. Esse processo pode dar-se de diversos modos: seja pela reação com a biota (biotransformação e biodegradação), pelo decaimento por efeito da luz (fotodegradação), ou ainda pela perda para o sedimento ou evaporação, etc.

Finalmente, a fonte é considerada macroscopicamente, ela é levada em consideração pela possibilidade múltipla de ingresso de poluente no meio, numa quantidade que depende de situações externas, vale mencionar que ela ser pontual ou por fenômenos como a deriva ou o escorrimento.

Dificuldades Determinísticas

Na abordagem, são considerados dois tipos de poluentes, característicos do quadro apresentado pelo reservatório, o poluente de superfície e o poluente que tem solubilidade em água, isso devido à acentuada presença de floração de cianobactérias e de macrófitas aquáticas, refletindo nitidamente na minimização dos usos múltiplos e redução na produção de energia, além do grande aporte de nutrientes que adentram a coluna d'água, auxiliando a produção de toxinas e odor.

Definindo em cada caso as condições iniciais e de contorno, verifica-se, com relação ao primeiro poluente, que ele é fortemente influenciado pelo vento, cujo deslocamento é predominantemente horizontal. Já o segundo, o poluente que tem solubilidade em água, bastante influenciado pela taxa de decaimento, pela correnteza e profundidade em que se encontra o poluente.

Neste sentido, surge a precisão dos parâmetros utilizados refletindo o quadro real de dispersão de poluente do reservatório. Essa observação torna-se importante no desenvolvimento de modelagem matemática clássica de processos variacionais, de sistemas de equações determinísticas [2].

Verifica-se que essas previsões são dependentes de informações precisas, muitas vezes difíceis de serem mensuradas e, não obstante, envolvendo incertezas intrínsecas assumidas pelas variáveis e variações.

Assim, um recurso que surge são os instrumentais fuzzy que têm sido fortemente empregados em estudos onde é constatada a subjetividade intrínseca das variáveis ou informações imprecisas de parâmetros utilizados, [1], [12].

Voltando para a equação, verifica-se que alguns parâmetros abordados trazem, por si só, algumas incertezas, assim como as propriedades que caracterizam o vento, a correnteza, o decaimento, inclusive a difusão. Desta forma propõe-se uma abordagem desses parâmetros através de instrumentais fuzzy.

Assim, os parâmetros: α , que representa a taxa de difusibilidade efetiva, \vec{V} , o transporte advectivo e σ , que representa a taxa de decaimento global são modelados por meio de controladores fuzzy, ou seja sistemas baseados em regras fuzzy, consideradas um importante recurso para a modelagem de fenômenos cujo comportamento é parcialmente conhecido [1], [12].

O Sistema de Base de Regras

Sistemas baseados em Regras Fuzzy são conceitualmente simples, consistem, basicamente, de três fases: o processo de fuzificação, o estágio de processamento (composto por base de regras e um método de inferência) e o processo de defuzificação.

O processo de fuzificação é o estágio onde as entradas do sistema são modeladas por con-

juntos fuzzy.

O estágio de processamento é o núcleo do controlador fuzzy. Cada regra é composta pelas proposições fuzzy da forma: *Se "condição" Então "ação"* de acordo com as informações que se têm sobre as variáveis.

Em seguida o método de inferência traduz matematicamente estas regras por meio das técnicas da lógica fuzzy, gerando para cada regra uma saída, cuja combinação gera uma saída fuzzy do sistema, dentre os métodos mais utilizados, destaca-se o método de Mamdani.

Por fim tem-se o processo de defuzzificação, que trata-se do processo saída do sistema, transformando a variável de saída, fuzzy, em variável real. Dentre os métodos de defuzzificação, o Centro de Massa ou Centro de Gravidade é o mais conhecido.

Buscando uma aproximação da solução numérica do problema, pretende-se combinar os instrumentais fuzzy, através da leitura dos parâmetros acima mencionados como parâmetros fuzzy, com o método de Elementos finitos (via Garlekin) para discretização das variáveis espaciais e o método de Diferenças Finitas (via Crank Nicolson) para a discretização da variável temporal.

Referências

- [1] L. de C. Barros & R. C. Bassanezi, "Tópicos de Lógica Fuzzy e Biomatemática", Coleção Imecc - Textos Didáticos, Vol. 5, Campinas - SP: UNICAMP/IMECC, 2006, 344p.
- [2] R. C. Bassanezi, "Ensino e Aprendizagem com Modelagem Matemática: Uma nova estratégia", Contexto, 2002, 389p.
- [3] G. L. B. Deberdt, Produção primária e caracterização da comunidade fitoplanctônica no Reservatório de Salto Grande (Americana, SP) em duas épocas do ano, Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos - USP, 1997.
- [4] G. L. Diniz, Dispersão de poluente num sistema ar-água: modelagem, aproximação e aplicações, Tese de Doutorado, FEEC - UNICAMP, 2003.
- [5] E. L. G. Espindola, O. B. Faria e M. A. Leite, Reservatório de Salto Grande: Uma Caracterização Geral do Sistema. *Espíndula, E. L. G.; Leite, M. A. e Dornfeld, C. B. (Orgs.), "Reservatório de Salto Grande (Americana, SP): Caracterização, Impactos e Propostas de Manejo"*, São Carlos: RiMa, Cap. 1, 2004, 1 - 17.
- [6] G. I. Marchuk, "Mathematical models in environmental problems: Studies in Mathematical and its Applications", Vol. 16, North-Holland, Amsterdam, 1986.
- [7] J. F. C. A Meyer & G. L. DINIZ, Pollutant dispersion in wetland systems: Mathematical modelling and numerical simulation, *Ecological Modelling*, Vol. 200, N. 3-4, Janeiro 2007, 360 - 370.
- [8] J. D. Murray, "Mathematical Biology", Springer - Verlag, Berlin, 1989.
- [9] R. F. de Oliveira, O Comportamento Evolutivo de uma Mancha de Óleo na Bacia de Ilha Grande, RJ: Modelagem, Análise Numérica e Simulações, Tese de Doutorado, IMECC - UNICAMP, 2003.
- [10] A. Okubo, "Diffusion and Ecological Problems: Mathematical Models", Springer, Berlin, 1980.
- [11] G. M. de Palma-Silva, Relações dos indicadores Microbiológicos com Outros Parâmetros Limnológicos no Rio Corumbataí, SP, no Intuito de Propor um Modelo Matemático para Gestão Ambiental, Tese de Doutorado, IB - UNESP, 2006.
- [12] W. Pedrycz & F. Gomide, "An Introduction to fuzzy sets: Analysis and design", MIT Press, Cambridge, USE, 1998.
- [13] Secretaria do Meio Ambiente. São Paulo (Estado). Recursos hídricos: histórico, gestão e planejamento, São Paulo, 1995. 90p.
- [14] R. C. Sossae & J. F. C. A. Meyer, A presença evolutiva de um material impactante e seu efeito transiente populacional de espécies interativas: modelagem e aproximação, : *Biomatemática*, N. 14, 2004, 131-159.
- [15] J. G. Tundisi & M. Straskraba, Strategies for building partnerships in the context

of river basin management: The rote of ecotechnology and ecological engineering, *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, Vol. 1, 1995, 31 - 38.

- [16] J. C. Vásquez & J. F. C. A. Meyer
Descarga de Água de Produção em Operações *offshore*: Modelagem Matemática, Aproximação Numérica e Simulação Computacional, : *Bio-matemática*, N. 15, 2005, 119-136.