

O impacto ambiental na bacia do Ribeirão do  
Pinhal - município de Limeira-SP:  
Caracterização, modelagem matemática e  
discussões

Camila P. Montovani<sup>1</sup>,

Curso de Mestrado em Tecnologia e Inovação, Faculdade de Tecnologia,  
UNICAMP – 13.484-332, Limeira/SP.

Elaine C. C. Poletti<sup>2</sup>

Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Inovação,  
Faculdade de Tecnologia, UNICAMP – 13.484-332, Limeira/SP.

**Resumo.** A preocupação relacionada aos problemas de ordem ambiental, no mundo todo, vem crescendo de maneira rápida e acentuada, com especial atenção aos recursos hídricos - fontes essenciais à vida. Dentro deste contexto, o objetivo desta pesquisa volta-se para um estudo do impacto ambiental causado pelo excesso de fósforo na Bacia do Ribeirão do Pinhal, localizada no município de Limeira-SP. Baseadas em modelagem matemática, análises e discussões do comportamento do poluente foram realizadas tendo-se em vista a quantidade da substância fora dos parâmetros admitidos pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, órgão responsável pelo controle, monitoramento e licenciamento de atividades geradoras de poluição no estado.

**Palavras-chave:** *Bacia do Ribeirão do Pinhal, impacto ambiental, modelagem matemática e simulação computacional.*

---

<sup>1</sup>camilamontovani@yahoo.com.br

<sup>2</sup>elainec@ft.unicamp.br

## 1. Introdução

O desperdício de água, a má conservação dos rios, a contaminação dos lençóis freáticos e a poluição dos corpos d'água são as principais causas da escassez de água que, ano após ano, se agrava (Lee, 2000).

Dados da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB (2011) indicam que poucas cidades do Brasil preocupam-se com o tratamento de esgoto na íntegra. O esgoto é considerado a principal fonte de contaminação dos corpos d'água e, mesmo no estado de São Paulo, verificam-se diversos municípios que não possuem o tratamento de seus resíduos gerados integralmente.

Concomitantes a este problema, têm-se os efluentes industriais e a utilização de agroquímicos na agricultura brasileira que também se caracterizam como grandes fontes de poluição nos corpos aquáticos (Marotta et al., 2008).

Embora diversas ações sejam tomadas no sentido de se minimizar os prejuízos, na forma de investimentos municipais e legislações atuando principalmente os grandes impactos, tais estratégias ainda se caracterizam como imperceptíveis diante da dimensão que a poluição atinge; assim os impactos resultantes da poluição dos corpos hídricos vêm se agravando devido ao fato das soluções serem escassas e os investimentos mínimos (Araujo et al., 2009).

São diversas as atividades que podem auxiliar os procedimentos e as análises de evolução destes fenômenos, dentre elas destacam-se as fiscalizações, os monitoramentos, as coletas e análises de amostras locais, além de estudos estatísticos e por meio de modelamentos (Pinho et al., 2009).

Atualmente há diversas áreas integradas de pesquisa contribuindo para estudos transversais que têm se tornados eficazes, possibilitando maior conhecimento e melhor mapeamento do cenário em que se encontram os recursos hídricos. Dentre estas áreas destacam-se os processos de modelagem, inclusive atrelados a instrumentos matemáticos e suportes computacionais, que avaliem estratégias e ações de impacto, preservação e recuperação dos recursos ambientais (Poletti e Meyer, 2010; Inforzato, 2008; Meyer e Diniz, 2007).

Muitos trabalhos de modelagem matemática têm favorecido discussões baseadas em simulações, análises qualitativas e quantitativas, além de intervenções como tomada de decisões, e têm a vantagem da geração de cenários, inclusive hipotéticos, com rapidez e baixo custo (Carniato, 2010; Alves, 2009; Pinho et al., 2009; Meyer e Diniz, 2007).

E é dentro deste contexto que este estudo se situa: com o objetivo de se avaliar o comportamento da concentração de plumas de poluente no Reser-

vatório do Tatu, localizado na Bacia do Ribeirão do Pinhal, Limeira-SP, via procedimentos de modelagem matemática e simulação computacional, baseados no estudo e caracterização dessas águas.

## **2. Ribeirão do Pinhal e o Reservatório do Tatu**

O município de Limeira pertence à Região Administrativa de Campinas, importante região do estado de São Paulo, e compõe um polo de desenvolvimento tecnológico na área industrial e de pesquisa, devido às diversas instituições, empresas, centros e universidades que contribuem para o desenvolvimento do estado. Na ocupação do solo há predominância da área urbana e cultivo de pastagens, cana-de-açúcar e citros, principalmente laranja (Souza, 2005).

O abastecimento de água da cidade ocorre através da captação dos mananciais: Rio Jaguari e Ribeirão do Pinhal com capacidade de reserva atual de 50 milhões de litros (Prefeitura Municipal de Limeira, 2012).

O Ribeirão do Pinhal possui 37 km de extensão e é uma sub-bacia da sub-bacia do Rio Jaguari que também abastece a cidade de Limeira-SP. Seu entorno é caracterizado pelas atividades agrícolas de produção de laranja e cana-de-açúcar.

A captação de água do município de Limeira, cujo consumo médio é de 185 L/habitante/dia de água, é proveniente ora do Rio Jaguari ora do Ribeirão do Pinhal (Violante, 2012).

O Ribeirão do Pinhal é uma fonte alternativa de abastecimento do município atendendo uma população de 278.093 habitantes, onde destes, 269.796 são residentes na área urbana (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB, 2011).

O Ribeirão do Pinhal se enquadra, de acordo com a Resolução CONAMA nº 357, de 2005, como um rio de classe 2 e, juntamente com o Rio Jaguari, é monitorado por uma sonda multi-parâmetros, na Estação de Captação de Água Jaguari que indica qual o rio apropriado para a captação de água no momento (Foz do Brasil, 2012).

A captação de água em Limeira localiza-se após o Reservatório do Tatu, à jusante da sub-bacia do Ribeirão do Pinhal, próximo a confluência com o Rio Jaguari.

O Reservatório do Tatu possui as dimensões de um pequeno lago ar-

tificial, é classificado como muito pequeno em relação à área, é classificado como pequeno em volume com aproximadamente  $1.005.063,818m^3$  de água armazenado. Apresenta profundidade máxima de  $6,50m$  e comprimento de  $5,9, km$  (Lima, 2012; Secretaria de Meio Ambiente, 2010; Mansor, 2005).

De acordo com as avaliações realizadas pela CETESB os parâmetros alumínio dissolvido, ferro dissolvido e fósforo total, têm se apresentado fora dos limites admitidos pela agência de monitoramento. Os dados podem ser consultados nos relatórios disponíveis no site da CETESB (<http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/aguas-superficiais/35-publicacoes>).

O fósforo total é um mineral indispensável nas plantações e pode causar a eutrofização do corpo aquático ao sofrer lixiviação. Dentro dos limites admitidos pela CETESB o impacto causado pelo mineral não é agravante. Entretanto, seu excesso provoca a eutrofização.

A eutrofização ocorre quando há um crescimento excessivo da produção aquática tendo como resultado final o desequilíbrio ecológico; neste estágio a água não tem condições de ser utilizada no abastecimento público devido a elevada quantidade de substâncias tóxicas e malcheirosas excretadas pelas algas, tais como gás sulfídrico e amônia, os quais não são removidos através do tratamento convencional.

Além dos problemas relacionados à qualidade da água e ao abastecimento público alguns problemas econômicos podem surgir como na saúde pública através de contaminação de sistemas de hemodiálise e surgimento de doenças, e no mercado pesqueiro devido à qualidade e a mortandade de peixes (Borges, 1998).

Tabela 1: Concentração de fósforo em  $mg\ m^{-3}$  medida entre 2008 e 2011.

Concentração em $mg\ m^{-3}$	2008	2009	2010	2011
Jan	100	1000	100	200
Mar	100	100	400	300
Mai	100	300	1000	100
Jul	20	100	700	29
Set	90	300	2000	20
Nov	40	200	90	13

Observa-se na tabela 1 os dados obtidos da medição de fósforo entre 2008 e 2011 em  $mg\ m^{-3}$ .

Na época das chuvas, a superfície do solo com pequena rugosidade superficial facilita o escoamento superficial das águas. Este escoamento pode provocar grandes problemas de erosão, ocorrendo o transporte do fósforo contido no material orgânico e nas partículas de solo para o ambiente aquático.

A perda de fósforo nesse caso pode ser pequena, ocorrendo geralmente por enxurrada, mas ao atingir um corpo aquático em quantidade superior a 100mg m deteriora a qualidade deste podendo, em pouco tempo, fazer com que este ambiente se torne eutrófico, alterando sua qualidade organoléptica e gerando um elevado custo para o tratamento (Bortolon, 2009).

### 3. O modelo matemático

O modelo utilizado neste estudo é baseado em um sistema de equações de diferenças e, embora simples, permite o estudo da presença de poluente em corpos aquáticos de baixa circulação e é utilizado pela principal agência de proteção ambiental dos Estados Unidos, a Environmental Protection Agency (EPA) e em institutos europeus de pesquisa (Inforzato, 2008).

Desta forma, conforme proposto por Meyer (2003), a represa é considerada homeomorfa à um retângulo. A quantidade de poluente  $C$ , existente na represa, no tempo  $(k+1)$ , indicada por  $C^{k+1}$ , pode ser representada, de acordo com Carniato (2010) e Alves (2009), por:

$$C^{k+1} = \left(1 - \frac{F}{V} - d\right) C^k + q^k$$

onde,

- $C^{k+1}$  representa a concentração de poluentes no tempo  $(k+1)$  dado em semanas;
- $(1 - \frac{F}{V} - d)C^k$  representa a concentração de poluente no instante atual,  $C^k$ , menos o que sai com o fluxo,  $\frac{F}{V}$ , menos o que é degradado,  $d$ ;
- $q^k$  representa o ingresso de poluente no instante atual.

Para a simulação do comportamento evolutivo do poluente na represa considerou-se o comprimento de 5,9 km e o fluxo proporcional ao volume de cada compartimento. Vale ressaltar que o fluxo médio do ano de 2011 foi de  $4,52\text{m}^3\text{s}^{-1}$ .

O reservatório, cujo volume é de  $1.005.063,818\text{m}^3$ , foi subdividido em compartimentos, de acordo com sua batimetria superficial. Foram necessários 5 compartimentos, com volumes de:  $78.163\text{m}^3$ ,  $93.810\text{m}^3$ ,  $184.080\text{m}^3$ ,  $224.200\text{m}^3$  e  $424.800\text{m}^3$ , respectivamente.

A degradação foi tomada, hipoteticamente, como sendo 1%, 5% e 10%.

A concentração inicial considerada foi de  $110\text{mg m}^{-3}$ , aproximadamente a quantidade média de fósforo medida no ano de 2011.

A simulação computacional teve como aporte duas situações: a primeira com aporte  $q$  fixo, sendo o valor médio de 2011 por compartimento, aproximadamente  $22\text{mg m}^{-3}$ . A segunda com aporte variando conforme a função:

$$q(k) = \bar{q} + \Delta q \text{sen} \left( \frac{k\pi}{26} \right)$$

onde,

- $\bar{q}$  representa o valor médio de 2011;
- $\Delta q$  representa a variação do período.

Desta forma, considerou-se a segunda situação com o aporte variando ao longo do ano, tendo-se períodos com maior ingresso de poluente, pelos processos principalmente por lixiviação, e outros de menor ingresso.

Assim, determinado o modelo, baseado em um sistema com cinco equações, uma para cada compartimento, considerando as possíveis interferências de um no outro tais como perda ou ganho de concentração de fósforo, foram realizadas as simulações baseadas nos valores obtidos das análises e medições.

## 4. Simulação e resultados

As simulações foram realizadas em ambiente Matlab, para um período de 52 semanas, considerando o ciclo anual, completo.

Nas figuras 1, 2(a) e 2(b), seguem as simulações tendo-se o aporte fixo, com degradação de 1%, 5% e 10%, respectivamente. Já, nas figuras 3(a), 3(b) e 4, seguem as simulações tendo-se o aporte variando conforme especificado na seção anterior e as mesmas taxas de degradação.

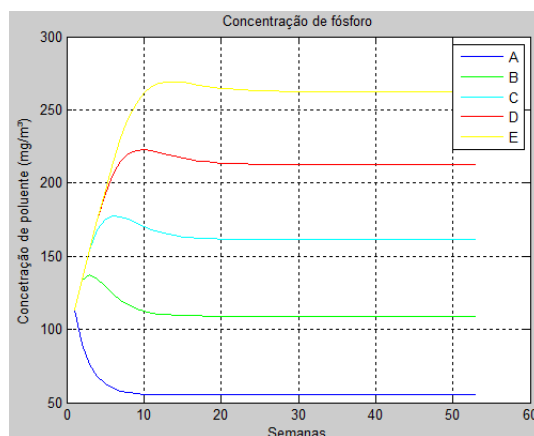
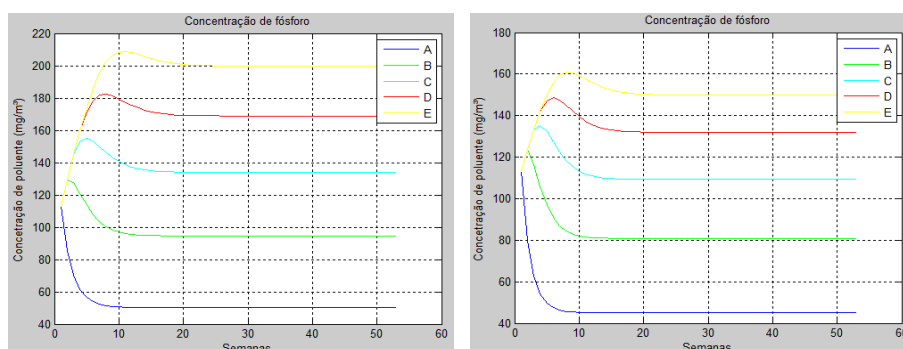


Figura 1: Degradação de 1% e aporte fixo.

Verifica-se pela figura 1 que, com potencial de degradação de 1%, todos compartimentos, exceto o compartimento A (o menor de todos), apresentam um comportamento evolutivo do poluente acima da concentração especificada pelo órgão governamental.



(a) Degradação de 5% e aporte fixo.

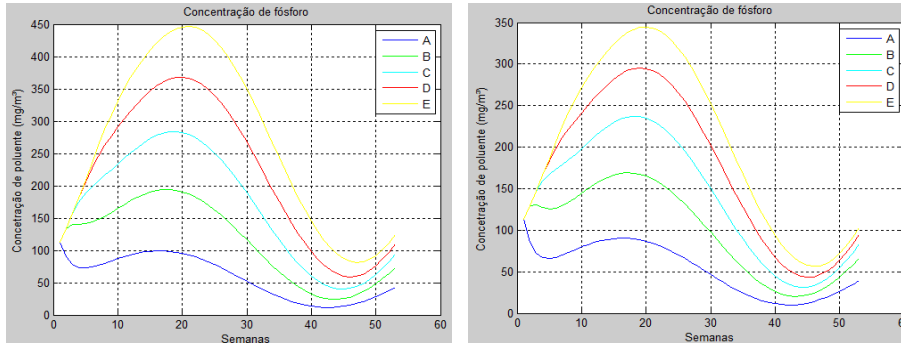
(b) Degradação de 10% e aporte fixo.

Figura 2: Simulações para dois valores de degradação e aporte fixo

Mesmo com potencial de degradação maior, de 5%, verifica-se a partir da figura 2(a) que a maioria dos compartimentos, exceto os compartimentos A e B, continuam apresentando um comportamento fora das especificações governamentais.

Com potencial de degradação maior ainda, de 10%, verifica-se pela figura

2(b) que a maioria dos compartimentos, exceto os compartimentos A e B, continuam apresentando um comportamento fora das especificações governamentais. No geral, observa-se que quanto maior o potencial de degradação do poluente, menor sua concentração.



(a) Degradação de 1% e aporte variando. (b) Degradação de 5% e 10% e aporte variando.

Figura 3: Simulações para três valores de degradação e aporte variando.

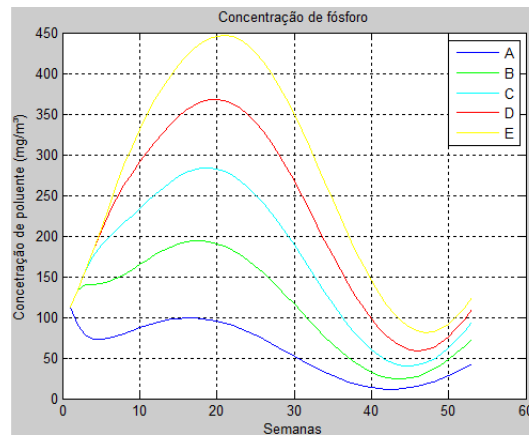


Figura 4: Degradação de 10% e aporte variando.

Nas figuras 3(a), 3(b) e 4, assim como esperado, verifica-se novamente que quanto maior o potencial de degradação da represa, menor a concentração de fósforo.



Com uma concentração inicial de fósforo de  $110\text{mg m}^{-3}$ , com os aportes considerados e as respectivas taxas de degradação, a quantidade de fósforo nas simulações toma valores altos, quando comparados à quantidade máxima permitida pelos órgãos governamentais que é de  $100\text{mg m}^{-3}$ .

De acordo com os dados da tabela 1, a quantidade de fósforo das últimas análises do ano de 2011 mostrou-se abaixo do limite estabelecido, entretanto na média, o ano teve esse valor acima das especificações dos órgãos governamentais.

Vale ressaltar que os compartimentos de D a E são maiores e apresentam, no local, visível aspecto de eutrofização de suas águas, entretanto não se têm, neste momento, análises de amostras retiradas destes pontos para possível comparação. Tais análises serão realizadas em outros pontos do reservatório, subsidiando, aprimoramentos do modelo.

Além disso, verifica-se que quando se toma a represa como sendo um único compartimento, com as mesmas condições das simulações acima (e degradação de 1%), verifica-se que o comportamento evolutivo do fósforo ao longo do tempo, com aporte variando, oscila entre  $12\text{mg m}^{-3}$  e  $104\text{mg m}^{-3}$ , valor próximo ao obtido nas análises.

## 5. Discussão

Através das simulações apresentadas observa-se que os instrumentos de modelagem matemática, aqui utilizados, embora simples, favorecem a representação de um dos fenômenos que ocorre comumente nos corpos aquáticos que é o comportamento evolutivo de resíduos nos corpos aquáticos.

De modo qualitativo, o modelo fornece dados que podem subsidiar discussões (e se aprimoradas, tomadas de decisão de prevenção e controle) favorecendo estudos sobre o tempo de reação em casos de contaminação ambiental e evitando acidentes ambientais atinjam grandes proporções.

No caso estudado observa-se que com uma concentração inicial de fósforo de  $110\text{mg m}^{-3}$  e sem aporte durante o ano, o Reservatório demora aproximadamente 40 semanas para que a quantidade de fósforo atinja valores mínimos no meio através de processo de autodepuração, além da saída do componente com o fluxo normal do reservatório.

Embora não se tenha as medições específicas mês a mês, sabe-se que existem épocas do ano em que o ingresso de fósforo é maior na represa devido à aplicação de agroquímicos nas plantações do entorno e de épocas com maior

índice pluviométrico.

Com relação especificamente ao poluente, sabe-se que cerca de 85% do solo, na região, é deficiente em fósforo, portanto comumente são realizadas adubações nas plantações, buscando-se suprir os problemas acarretados dessa deficiência.

Vale ressaltar que muitas das informações aqui mencionadas continuam sendo importantes para o estudo que não se finaliza aqui, pois esta pesquisa é parte integrante de um estudo mais específico com outros instrumentais matemáticos e, portanto, este estudo tem o papel fundamental de dar contribuições para o referido trabalho.

## Referências

- Alves, L. F. B. (2009). Modelagens matemáticas para simulações computacionais de impacto ambiental no Rio Balsas. Dissertação de Mestrado, IMECC–UNICAMP, Campinas/SP.
- Araujo, L. E., Sousa, F. A. S., Moraes Neto, J., Souto, J. S., e Reinaldo, L. R. L. R. (2009). Bacias hidrograficas e impactos ambientais. *Qualitas Revista Eletronica*, 8:1–18.
- Borges, J. T. (1998). Avaliação do estado trófico e sanitário e a adsorção de fósforo no sedimento da Lagoa do Taquaral de Campinas/SP. Dissertação de Mestrado, FEC–UNICAMP, Campinas/SP.
- Bortolon, L. (2009). *Fósforo em sistema plantio direto afetado pelo histórico de uso do solo e os efeitos agrônômico e ambiental*. Tese de Doutorado, Faculdade de Agronomia – UFRGS, Porto Alegre/RS.
- Carniato, N. K. S. M. (2010). Comportamento evolutivo de uma pluma superficial de poluente na bacia hidrográfica do Rio Mogi Guaçu. Dissertação de Mestrado, FEEC–UNICAMP, Campinas/SP.
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB (2011). Relatório de qualidade das águas superficiais do Estado de São Paulo 2011. URL: <http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/aguas-superficiais/35-publicacoes/-relatorios> Acesso em: 05/abr/2012.
- Foz do Brasil (2012). Limeira. URL: <http://www.fozdo brasil.com.br/web/limeira/> Acesso em: 15/nov/2011.

- Inforzato, N. F. (2008). *Dispersão de poluentes num sistema ar-água: modelagem matemática, aproximação numérica e simulação computacional*. Tese de Doutorado, IMECC-UNICAMP, Campinas/SP.
- Lee, T. (2000). Urban water management for better urban life in Latin America. *Urban Water*, 2:71-78.
- Lima, H. (2012). Reservatório do Tatu. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por camilamontovania@yahoo.com.br, em 08/mai/2012.
- Mansor, M. T. C. (2005). *Potencial de poluição de águas superficiais por fontes não pontuais de fósforo na bacia hidrográfica do Ribeirão do Pinhal, Limeira/SP*. Tese de Doutorado, FEA-UNICAMP, Campinas/SP.
- Marotta, H., Santos, R. O., e Enrich-Prast, A. (2008). Monitoramento limnológico: um instrumento para a conservação dos recursos hídricos no planejamento e na gestão urbano-ambientais. *Ambiente & Sociedade*, 11:67-79.
- Meyer, J. e Diniz, G. (2007). Pollutant dispersion in wetland systems: Mathematical modelling and numerical simulation. *Ecological Modelling*, 200:360-370.
- Meyer, J. F. C. A. (2003). Matematização da biologia não é novidade da ciência moderna. Com ciência – Bioinformática. Disponível em: <http://www.comciencia.br/reportagens/bioinformatica/bio02.shtml>. Acesso em: 13/jan/2012.
- Pinho, J., Vieira, J., Pinho, R., e Araújo, J. (2009). Web-based decision support framework for water resources management at river basin scale. *Current Issues of Water Management*, 1:43-66.
- Poletti, E. C. C. e Meyer, J. F. C. A. (2010). Estudo da dispersão de poluentes em um sistema de represamento via instrumentais fuzzy e aproximação numérica. *Biomatemática*, 20:111-115.
- Prefeitura Municipal de Limeira (2012). Município de Limeira. URL: <http://www.limeira.sp.gov.br/municipio/> Acesso em: 15/fev/2011.
- Secretaria de Meio Ambiente (2010). Batimetria Represa Tatu.
- Souza, L. C. F. (2005). Verificação de parâmetros hídricos da bacia do Rio Jaguari no município de Jaguariúna. Dissertação de Mestrado, FEC-UNICAMP, Campinas/SP.

Violante, P. (2012). Águas de Limeira - Aplicação do tubo de PEAD na cidade de Limeira. URL: [http://site.sabesp.com.br/uploads/file/audiencias\\_inovacao/Aplicacao\\_do\\_tubo\\_de\\_PEAD\\_na\\_cidade\\_de\\_Limeira.pdf](http://site.sabesp.com.br/uploads/file/audiencias_inovacao/Aplicacao_do_tubo_de_PEAD_na_cidade_de_Limeira.pdf). Acesso em: 28/dez/2011.