



# CIÊNCIAS AMBIENTAIS

## DIAGNÓSTICOS AMBIENTAIS

Organizadores

**Carmino Hayashi**

**Diego De Souza Sardinha**

**Paulo Augusto Zaitune Pamplin**

1ª Edição

## ORGANIZADORES

**CARMINO HAYASHI**  
**DIEGO DE SOUZA SARDINHA**  
**PAULO AUGUSTO ZAITUNE PAMPLIN**

## EDITOR

**CARMINO HAYASHI**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Ciências ambientais : diagnósticos ambientais  
[livro eletrônico] / organizadores Carmino  
Hayashi, Diego de Souza Sardinha, Paulo Augusto  
Zaitune Pamplin. -- 1. ed. -- Ribeirão Preto, SP :  
Carmino Hayashi, 2020.  
PDF

Vários autores.  
Bibliografia.  
ISBN 978-65-00-08205-0

1. Ciência ambiental 2. Educação ambiental  
3. Impacto ambiental 4. Meio ambiente - Proteção  
5. Política ambiental I. Hayashi, Carmino.  
II. Sardinha, Diego de Souza. III. Pamplin, Paulo  
Augusto Zaitune.

20-42982

CDD-363.7

### Índices para catálogo sistemático:

1. Ciência ambiental 363.7

Cibele Maria Dias - Bibliotecária - CRB-8/9427

### Imagem de capa

Pixabay



Alfenas/ MG  
Agosto/2020

---

# MODELAGEM DINÂMICA DE SISTEMAS AMBIENTAIS

Júlio Cesar de Souza Inácio Gonçalves; Pedro de Souza Lopes Silva;  
Thiago Vinicius Ribeiro Soeira & Cristiano Poletto

## INTRODUÇÃO

Sabe-se que os seres humanos possuem a capacidade de formar teorias para explicar tudo o que acontece no mundo, as quais são conhecidas como modelos mentais. Frequentemente, isto acontece de maneira instantânea e, raramente, há a percepção clara de que o fazem. Apesar de serem extremamente inteligentes, dificuldades no que tange a problemas mais sérios são comuns como, por exemplo, envolvendo o meio ambiente. Desde um problema localizado, como a poluição atmosférica urbana, até problemas mais globais, como o acúmulo de gases de efeito estufa, nesse caso os modelos mentais parecem não serem capazes de resolvê-los. Muitas vezes as pessoas ficam divididas entre explicações múltiplas e conflitantes sobre um determinado tema, o que gera dúvidas e incertezas e, no momento de uma tomada de decisão importante, utilizam de seus modelos mentais, muitas vezes limitados, o que pode gerar complicações e agravos na situação (Ford, 2010).

Um modelo é uma representação de um determinado sistema real. Tendo em vista as várias dificuldades de se trabalhar com o sistema real, um modelo pode ser empregado para substituir este sistema, facilitando o trabalho dos usuários. Os projetos desenvolvidos por arquitetos e engenheiros na construção de obras, rodovias e foguetes espaciais, assim como os gráficos utilizados por economistas, são exemplos da utilização de modelos. A aplicação de modelos permite aos usuários aprenderem algo novo sobre o sistema que está sendo representado.

Os modelos podem apresentar comportamentos inesperados, especialmente quando se espera que um modelo leve a respostas comprovadas. Neste sentido, é interessante que o usuário se prepare e se atente para possíveis imprevistos, que são fundamentais neste processo, pois possibilitam melhor entendimento sobre determinados assuntos. Lee (1993) enfatiza a importância de resultados imprevistos devido à sua utilidade em discussões em grupos sobre o manejo de grandes ecossistemas: “O que torna um ecossistema “grande” não é o uso em terrenos, mas o uso interdependente; o grande ecossistema é socialmente construído. Os rios

alimentam peixes e plantas, campos e cidades, fornecem transporte para o comércio e, às vezes, hidreletricidade para a indústria. Múltiplas utilizações de um rio ou outro ecossistema de grande porte requerem a troca de qualidades que são difíceis de comparar, pois são controlados ou beneficiados por pessoas diferentes. As construções sociais podem ser difíceis de alterar, e os limites entre requerentes concorrentes e um recurso natural muitas vezes produzem um impasse em vez de solução de problemas. Mas uma abordagem adaptativa pode afrouxar o impasse com resultados surpreendentes. O dinamismo social da aprendizagem pode reduzir o impasse socialmente construído.”

A modelagem dinâmica de sistemas pode estimular o aprendizado sobre os sistemas interconectados de grande escala, principalmente quando a modelagem atua para um grupo de pessoas com interesses, especialidades e perspectivas diferentes. Novos *insights* sobre a interação dos seres humanos com a natureza podem diminuir os impasses e prepara o terreno para a aplicação de novas políticas de controle e gerenciamento dos recursos naturais.

Portanto, a premissa deste capítulo é que os modelos de simulação auxiliam o desenvolvimento de habilidades nos usuários no que tange ao gerenciamento de sistemas ambientais. O primeiro passo é construir o modelo matemático para armazenar as principais interrelações no sistema e, em seguida, os experimentos são conduzidos com o modelo. Ao verificar os resultados e as razões do comportamento do sistema, é possível ampliar a compreensão acerca do gerenciamento de sistemas ambientais.

A experimentação dos modelos é uma atividade de aprendizagem que obtém resultados de forma exploratória. O fato de experimentar várias simulações utilizando uma abordagem clara e explícita sobre as suposições adotadas no modelo é a melhor maneira de aprender sobre as tendências simuladas do sistema. Com isso, outros usuários poderão analisar as suposições e entender as conclusões dos experimentos. Além disso, a modelagem seguida de uma abordagem disciplinada permite que outras pessoas desafiem o modelo adicionando suposições mais realistas, conduzindo novos experimentos e obtendo novas percepções sobre o comportamento do sistema.

Nesse intuito, abordar-se-á alguns modelos em sistemas ambientais envolvendo a aplicação prática. Estes modelos fazem uso de equações matemáticas para representar as interconexões de um sistema, de modo que os modelos serão “simulados” no computador. Os cálculos matemáticos serão realizados pelo computador e cabe aos usuários pensar sobre a melhor maneira de construir o modelo que descreverá o sistema. Um modelo bem construído possibilita a realização de experimentos, que serão testados, observados os resultados e testados novamente. Com a prática e experimentação, os usuários irão melhorar a compreensão dos caminhos naturais que o sistema ambiental dispõe, reconhecendo, assim, até que ponto este caminho poderia ser aprimorado.

## Conceito e Definição de Dinâmica de Sistemas

Os conceitos presentes neste capítulo não são novos. Eles são retirados da área da dinâmica de sistema, originado na década de 1960 por Jay Forrester e seu grupo de colegas do Instituto de Tecnologia de Massachusetts. Forrester (1968) conduziu estudos para explicar o rápido crescimento populacional seguido de um declínio observado em grandes cidades dos Estados Unidos, tais como Boston, Chicago e Manhattan. Seus estudos puderam comprovar que as cidades cresciam rapidamente em condições favoráveis, mas à medida que as áreas disponíveis eram ocupadas, a cidade iniciava um período de estagnação caracterizado pelo envelhecimento das moradias e declínio das indústrias.

Foi identificado que durante esta fase a cidade sofria um declínio na população.

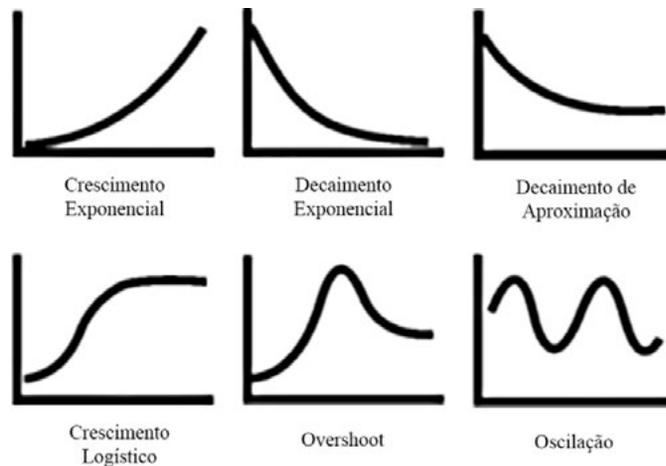
Então, Forrester (1968) aplicou a dinâmica de sistemas para lidar com os desafios da revitalização das cidades em processo de envelhecimento. Com o uso da modelagem dinâmica de sistemas, ele descobriu que aumentar as construções familiares poderia levar a uma maior estagnação nas cidades, pois as indústrias teriam menos espaço disponíveis. Ao experimentar um programa de demolição removendo uma fração da habitação em bairros da periferia, o resultado geral foi positivo. A demolição destas moradias criava espaço para novas indústrias, o que permitia renovar e melhorar a proporção de áreas industriais e, conseqüentemente, trabalhadores dentro do ambiente urbano.

A recomendação de Forrester em 1968 não foi bem acatada, pois era contrária ao pensamento convencional da maioria dos planejadores da época. Contudo, o autor reforçou que todos os modelos são imperfeitos devido a sua simplificação do sistema real, mas apesar disso, ele identificou a necessidade de refletir sobre a mesma, uma vez que a maneira normal do pensar humano sobre os sistemas complexos é limitada e equivocada. Mais que isso, o autor reforçou que, os modelos que levam a resultados contraintuitivos, são ainda melhores, pois levam os planejadores a reexaminarem sua compreensão intuitiva.

A modelagem dinâmica de sistemas é definida como uma metodologia que estuda e gerencia sistemas complexos ao longo do tempo. Este método emprega a modelagem computacional e o foco da atenção está nas informações que dão origem ao comportamento dinâmico através dos diagramas de causa e efeito. Estes modelos diferem dos modelos de previsão, os quais são empregados para prever o valor de uma variável em um determinado tempo. O que difere este modelo dos modelos de dinâmica de sistemas é que a sua utilização não consegue prever e simular o comportamento dos ecossistemas, os quais estão sujeitos a perturbações aleatórias. No entanto, a modelagem dinâmica de sistemas possibilita que o usuário compreenda a estrutura básica de um sistema, de modo a entender o comportamento que ele pode produzir a partir das perturbações sofridas.

## O COMPORTAMENTO DINÂMICO

Na dinâmica de sistemas, a chave para o entendimento é adquirida através da utilização de modelos estoque-taxa. Os resultados são apresentados em gráficos contendo a variável em análise em função do tempo. Oscilações, crescimentos e decaimentos são algumas das formas que os padrões dinâmicos podem assumir. A Figura 1 apresenta seis formas de padrões dinâmicos que podem ocorrer na modelagem de sistemas descritas por Ford (2010).



**Figura 1.** Padrões dinâmicos que ocorrem na modelagem de sistemas. Fonte: Adaptado de Ford (2010).

O primeiro gráfico apresenta o comportamento de *Crescimento Exponencial*, uma das formas mais significativas na dinâmica de sistemas ambientais. Nota-se um rápido crescimento do sistema, que duplica seu tamanho rapidamente no intervalo de tempo conhecido por tempo de duplicação. Já o segundo gráfico, denominado *Decaimento Exponencial*, possui comportamento inverso ao crescimento exponencial. O sistema reduz seu valor pela metade no intervalo de tempo conhecido por tempo de meia-vida. Em seguida, o gráfico de *Exponencial de Aproximação* assemelha-se ao anterior, entretanto, o sistema tende a um valor constante positivo. Isto ocorre devido às taxas que são capazes de neutralizar o efeito do decaimento, aproximando o sistema de seu equilíbrio.

O quarto gráfico apresenta o comportamento de *Crescimento Logístico*, que se assemelha inicialmente ao crescimento exponencial, porém sofre limitações no sistema em determinado momento devido à, por exemplo, degradação do *habitat*, falta de nutrientes ou condições climáticas desfavoráveis e, com isso, o sistema atinge equilíbrio.

O comportamento do penúltimo gráfico, conhecido por *Overshoot*, é um fenômeno que ocorre quando os recursos limitantes não são acomodados de maneira suave pelo sistema, assim como no Crescimento Logístico.

Atrasos na reação aos limites ou danificação dos recursos durante um intenso período de crescimento podem levar a este tipo de comportamento. O último gráfico apresenta o comportamento de *Oscilações*, que pode ocorrer tanto de maneira repetitiva e estável, garantindo longevidade do sistema quanto de maneira aleatória e instável, ameaçando a sua sustentabilidade. Esta figura apresenta oscilações que se amenizam ao longo do tempo, mas as oscilações podem assumir diversas formas, as quais podem surgir devido a simples atrasos no sistema.

### Passos para elaboração da modelagem de sistemas

Um projeto de modelagem envolve algumas etapas principais, as quais foram descritas por Cavana & Maani (2000), porém adaptadas para o escopo deste capítulo. Entretanto, é importante destacar que estas etapas são apenas diretrizes a serem seguidas, pois a sequência de cada uma depende das questões e dos problemas que deram início à investigação do sistema. Sendo assim, a sua complexidade é que irá determinar a realização ou não das etapas descritas nesta seção.

A modelagem é um processo iterativo de tentativas e erros: os modelos são construídos, testados e analisados de maneira sequencial e a compreensão de cada passo permite aos usuários aumentar gradativamente a complexidade do sistema, adicionando novos parâmetros e interconexões para sua representação. O primeiro passo necessita da identificação do problema e dos objetivos a serem atingidos, reconhecendo os limites do estudo e do sistema. Estes objetivos devem ser claros e estar em consonância com todas as partes interessadas na resolução do problema. Neste aspecto, é necessário realizar a coleta de informações pertinentes e de dados preliminares, assim como: reportagens, registros históricos e estatísticos, documentos legais, estudos prévios e entrevistas com as partes interessadas, o que facilitará a validação do modelo a ser construído nas etapas posteriores.

O segundo passo de um projeto de modelagem é estabelecer um modelo de referência, podendo ser representado por um gráfico contendo a principal variável em análise em função do tempo. A forma geral do gráfico é muito importante nesta etapa, pois torna facultativa a atribuição numérica para a principal variável, uma vez que esta depende da disponibilidade de dados e, além disso, pode assumir uma das seis formas presentes na Figura 1. O intervalo de tempo no eixo horizontal do modelo de referência é chamado de “horizonte de tempo”, e por ele é possível decidir o que incluir ou excluir do modelo a ser construído. Por exemplo, modelos construídos com horizonte de tempo de 100 anos ou mais poderão ter os efeitos causados por variações diárias ou mensais desprezados.

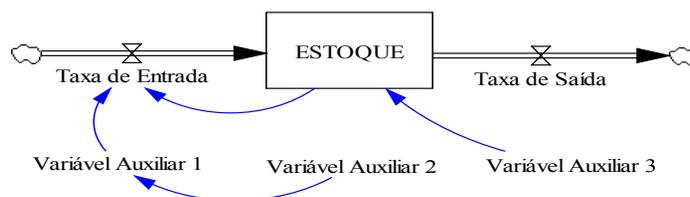
Na próxima etapa, deve ser elaborado o modelo de referência da maneira mais simples possível. O usuário deve elaborar o modelo, testar e colocar em prática sua reflexão acerca dos resultados obtidos para, então, passar para um modelo mais complexo, pois, um

modelo perfeito logo de início é o pior caminho a ser seguido. Aprender o máximo com modelos simples, antes de deixá-los mais completos, permite aos usuários obter maiores progressos a longo prazo, compreendendo melhor o comportamento do sistema, seus potenciais e limites.

Vensim, Stella, Powersim, entre outros, são os softwares de simulação computacional que possibilitam a construção de modelos baseados nos princípios de Forrester (1968). Porém, antes de iniciar, o usuário necessita informar a unidade de tempo (por exemplo, horas, dias, anos), o horizonte de simulação e o intervalo, comumente conhecido como “passo de tempo” (por exemplo, 0,1; 0,5; 1,0), para que seja possível simular o modelo em função do tempo, gerando condições de estado estacionário.

Os modelos de dinâmica de sistemas são elaborados através de uma representação visual estruturada e simplificada conhecida por diagramas de estoque e taxa, além das variáveis auxiliares e conectores. O estoque, representado por um retângulo, configura-se o estado do sistema. Já as taxas são representadas por uma válvula e um par de linhas. A taxa apontada para dentro do estoque é chamada de “taxa de entrada”, enquanto que a taxa apontada para fora se chama “taxa de saída” e ambas caracterizam ações que alteram o sistema em função do tempo. Caso as taxas sejam pequenas, os estoques serão pouco afetados, ou seja, pouca mudança terá o estado do sistema, ao passo que, grandes taxas tendem a causar variações relevantes. Além disso, os estoques acumulam o efeito das taxas e podem permanecer invariáveis por um determinado período em que não haja mais taxas agindo sobre ele.

Na elaboração do modelo, deve-se criar o estoque, e, inserir as taxas de entradas e saídas que modificam o estado do sistema. Diante disso, devem ser introduzidas as variáveis auxiliares e conectores, que dão forma ao sistema. A Figura 2 apresenta um exemplo do diagrama de estoque e taxa, com variáveis auxiliares e conectores. Todas as conexões entre os três tipos são aceitas na elaboração dos modelos de dinâmica de sistemas: estoque-estoque, estoque-taxa, estoque-variável, taxa-taxa, taxa-variável e variável-variável. Neste exemplo, a Taxa de Entrada depende do Estoque e da Variável Auxiliar 1, que por sua vez, depende da Variável Auxiliar 2, já o Estoque depende da Variável Auxiliar 3.



**Figura 2.** Exemplo de diagrama de estoque e taxa.

Após a elaboração do modelo tem-se a etapa de validação, a qual consiste em simular e verificar sua compatibilidade com o modelo de referência. Essa etapa é muito importante, uma vez que a comparação do modelo simulado com o de referência permitirá a continuidade das próximas etapas. Caso haja disparidade entre os modelos, o usuário deve retornar para as etapas anteriores e revisar as hipóteses adotadas e a reestruturação de seu modelo.

A modelagem dinâmica de sistemas pode nos ajudar a analisar sistemas complexos, dando ênfase no papel do *feedback* de informação que podem ser expressados através dos diagramas de *loop* causal, em relações de causa e efeito com diagrama de cadeia fechada, positivo ou negativo. A característica do *feedback positivo* é de amplificar o efeito das ações externas ao sistema, já o *negativo* tem, por sua vez, a função de amenizar o efeito destas ações. Sendo assim, é atribuído o sinal positivo “+” para os conectores que relacionam duas variáveis diretamente proporcionais e o sinal negativo “-” para os conectores que relacionam duas variáveis indiretamente proporcionais. Quando houver dificuldade em definir a função do *loop* é necessário contar o número de sinais negativos ao seu redor. O *feedback negativo* possui números ímpares de sinais negativos e o *feedback positivo* possui números pares.

O domínio de um *feedback positivo* sobre um *feedback negativo* pode ocasionar o comportamento de crescimento exponencial (Figura 1), por exemplo. Sendo assim, os diagramas de *loop* causal ajudam a identificar os principais *feedbacks* do modelo, servindo como uma ferramenta de compreensão e não como uma ferramenta analítica. Caso o modelo de referência possua comportamento de crescimento exponencial, é esperado pelo menos um *feedback positivo*.

## MODELAGEM DINÂMICA DE SISTEMAS AMBIENTAIS APLICADA EM LAGO HIPOTÉTICO

Para facilitar o entendimento sobre a construção de modelos, a partir do diagrama de estoque e taxa, é apresentado a seguir um modelo simples que representa as variações no volume de um lago durante o período de doze meses, dado pela Equação 1.

(1)

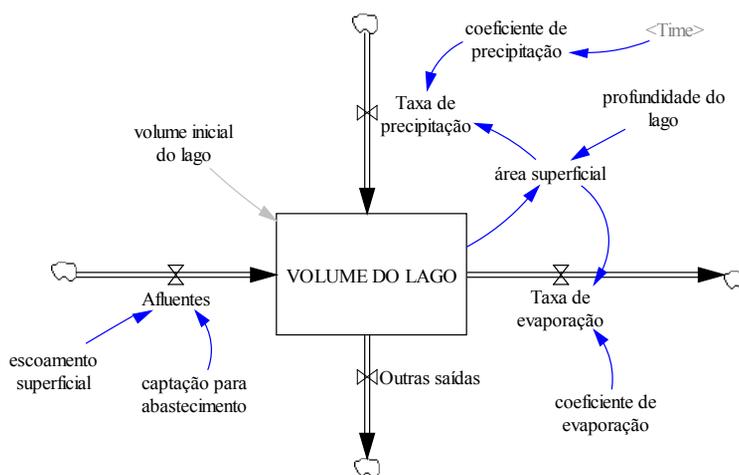
$$\frac{\partial V}{\partial t} = \text{afluentes} + \text{precipitação} - \text{evaporação} - \text{outras saídas}$$

Neste exemplo, serão consideradas duas taxas de entrada e duas taxas de saída, respectivamente, que variam o volume do lago (estoque) as quais são: a taxa de afluentes, taxa de precipitação, taxa de evaporação e outras saídas. É importante ressaltar que as taxas de precipitação e de evaporação são governadas pelos seus respectivos coeficientes. O coeficiente de precipitação varia ao longo do tempo (meses), de acordo com a Tabela 1, e o coeficiente de evaporação permanece constante em 100 milímetros por mês durante todo o período de

simulação. A taxa afluente varia com a captação para abastecimento, retirando 250.000 metros cúbicos dos 1.660.000 metros cúbicos que escoam superficialmente no lago por mês. A taxa de outras saídas também possui valor constante de 1.660.000 metros cúbicos por mês. O lago possui um formato retangular, com profundidade de 9,3 metros e volume inicial de 100.000.000 metros cúbicos. A Figura 3 apresenta o diagrama de estoque e taxa construído no software Vensim PLE.

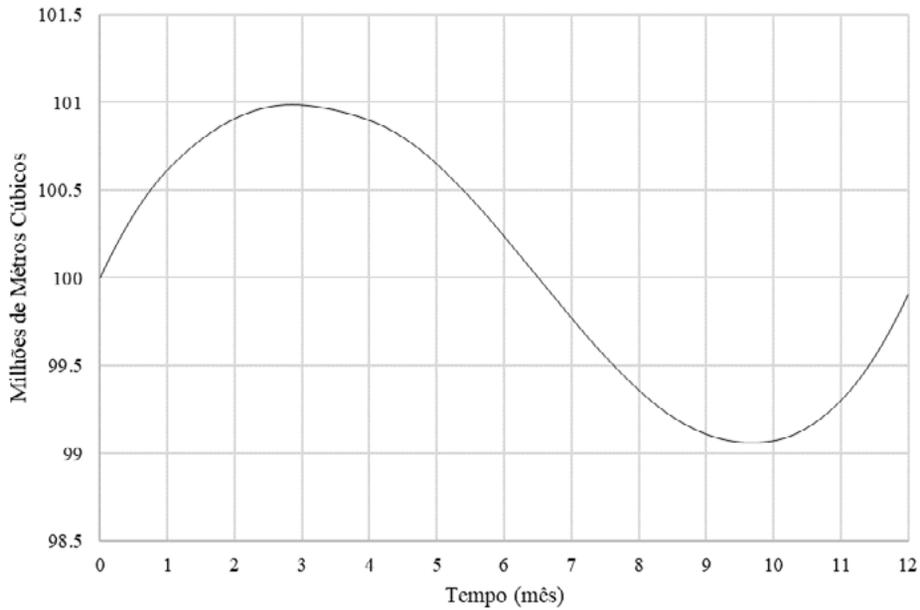
**Tabela 1.** Coeficiente de precipitação.

Mês	Precipitação (milímetros)
00	200
01	160
02	140
03	120
04	110
05	90
06	80
07	80
08	90
09	110
10	130
11	160
12	200



**Figura 3.** Diagrama de estoque e taxa para o volume de um lago.

Tendo em vista as considerações feitas anteriormente, é possível simular este modelo e visualizar a variação do volume do lago durante o período de um ano, dado pela Figura 4. Observa-se que o volume do lago varia entre aproximadamente 101 e 99 milhões de metros cúbicos, tendo um maior volume no primeiro semestre e menor no segundo semestre.



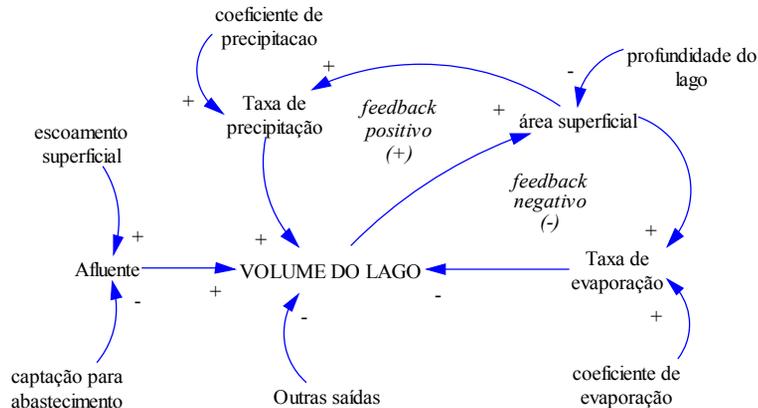
**Figura 4.** Variação do volume do lago ao longo de doze meses.

A Figura 5 ilustra o diagrama de loop causal para o exemplo do lago hipotético. Logo de início é possível identificar um feedback positivo e um feedback negativo atuando sobre o modelo. Um aumento na taxa de precipitação, por exemplo, pelo aumento do coeficiente de precipitação, aumenta o volume do lago. Com isso, aumenta-se também a área superficial, ocasionando um aumento ainda maior da taxa de precipitação, pois o lago receberá maior volume de chuva, *feedback positivo*. Porém, o aumento no volume do lago e na sua área superficial promove o aumento da taxa de evaporação (maior área para evaporar água) e, se a taxa de evaporação aumenta, o volume do lago reduz, *feedback negativo*.

Este diagrama ajuda a compreender o porquê da variação do volume do lago observado na Figura 4. Com uma maior taxa de precipitação ao longo dos primeiros meses, dado pelos altos valores de coeficiente de precipitação (Tabela 1), o volume do lago tem um rápido aumento, porém o cenário começa a se inverter com a diminuição desta taxa. Observa-se, também, o efeito cumulativo do modelo, visto que os meses de menores volumes de água não são os mesmos de menores coeficientes de precipitação, caracterizando um atraso na resposta do sistema.

Ainda neste exemplo, o que aconteceria:

- com o volume do lago supondo um aumento ou uma diminuição no coeficiente de evaporação?
- caso a captação para abastecimento fosse dobrada?
- Ou pior, como seria o comportamento do lago caso houvesse um aumento no coeficiente de evaporação junto à duplicação da captação para abastecimento?

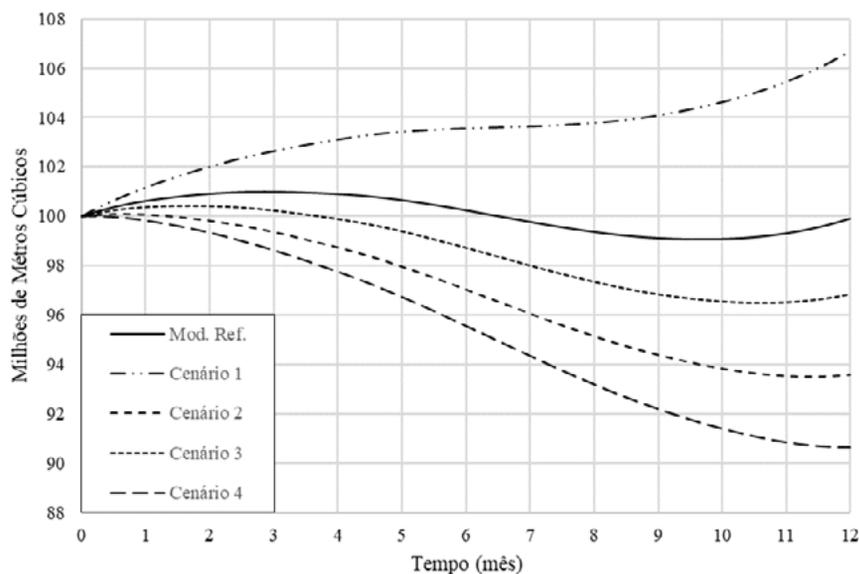


**Figura 5.** Diagrama de loop causal para o exemplo do lago.

Todas essas perguntas podem ser respondidas através da modelagem dinâmica de sistemas. Após a simulação do modelo e comparação com o modelo de referência, é possível realizar diversas análises de sensibilidade, criando cenários temáticos ou futuros na identificação das principais variáveis que impactam significativamente as estratégias, políticas ou tomadas de decisões. A elaboração de cenários otimistas e cenários pessimistas contribuem para a avaliação do desempenho das políticas e estratégias adotadas, permitindo atingir os objetivos comuns das partes interessadas na investigação.

A implementação de políticas é o principal objetivo da modelagem pragmática. Isto é, a utilidade do modelo é garantida se o processo de modelagem levar a um melhor entendimento das políticas que podem melhorar o comportamento do sistema (Ford, 2010). A Figura 6 apresenta a variação do volume do lago ao longo de doze meses para o modelo de referência e para os cenários:

1. Redução em 50% no coeficiente de evaporação;
2. Aumento em 50% no coeficiente de evaporação;
3. Valor da captação para abastecimento dobrado;
4. Aumento em 50% no coeficiente de evaporação e valor da captação para abastecimento dobrado.



**Figura 6.** Variação do volume do lago ao longo de doze meses do modelo de referência e dos cenários: 1 - Redução em 50% no coeficiente de evaporação; 2 - Aumento em 50% no coeficiente de evaporação; 3- Valor da captação para abastecimento dobrado, e 4 - Aumento em 50% no coeficiente de evaporação e valor da captação para abastecimento dobrado.

A redução no coeficiente de evaporação (Cenário 1) promoveu um aumento ainda maior no volume do reservatório, já o aumento (Cenário 2) acarretou redução do volume. Se o modelo fosse criado para estudar o possível aumento no volume do lago, uma política de controle poderia ser estudada para avaliar o efeito da dessalinização, que interfere diretamente na taxa de evaporação. O aumento na densidade de sólidos dissolvidos pode reduzir o volume de água. Por outro lado, águas altamente salinas tendem a evaporar mais lentamente devido à redução da diferença na pressão de vapor entre a superfície da água e o ar.

Dobrando o valor de captação para abastecimento (Cenário 3), nota-se, também, a redução no volume do lago, de menor intensidade se comparado com o Cenário 2. Na prática, essa variável pode estar relacionada com o desenvolvimento de novas tecnologias de tratamento e reuso. Além disso, percebe-se que a atuação da evaporação no modelo é mais pronunciada, ou seja, é mais sensível que a captação para abastecimento. Esta é uma das principais informações que se pode ter no processo de análise de sensibilidade. O Cenário 4 é o mais pessimista, tendo a maior redução de volume. O modelo apresenta queda constante no volume até próximo dos últimos meses, em que se iniciou um período de estabilização.

Diversos outros cenários podem ser explorados, como, por exemplo: modificá-lo para ajustar a um formato mais realista; ter o coeficiente de evaporação variando ao longo dos meses, assim como feito com o coeficiente de precipitação; adicionar o efeito da salinidade na taxa de evaporação; entre outros. Há, também, a possibilidade de trabalhar com o horizonte de tempo, que pode ser aumentada para dois, cinco ou quantos anos ao interesse do usuário.

## MODELAGEM DINÂMICA DE SISTEMAS AMBIENTAIS APLICADA EM ESTUDO DE AUTODEPURAÇÃO

O aumento da demanda por água, devido às diversas atividades humanas e industriais, acaba por provocar grande geração de resíduos, muitas vezes destinados *in natura* aos corpos hídricos através dos esgotos sanitários e industriais. Esta conduta causa mudanças nas composições físico-químicas e nas características naturais dos corpos d'água. Uma das principais alterações ocasionadas, é o do consumo de oxigênio dissolvido (OD), parâmetro fundamental para garantir a manutenção e qualidade da biodiversidade local. Este consumo ocorre devido às atividades bacterianas de decomposição que promovem a estabilização da matéria orgânica (MO) recebida e, para isso, consomem oxigênio por meio da respiração. Porém, o alto consumo de oxigênio dissolvido provoca diversas implicações do ponto de vista ambiental, tornando-se um dos principais problemas de poluição hídrica (Teles e Silveira, 2006; Hespanhol, 2009; Ricciardone et al. 2016).

De acordo com Von Sperling (2005), a atividade bacteriana está ligada ao fenômeno de autodepuração, que busca reestabelecer o equilíbrio do meio aquático através de mecanismos essencialmente naturais, diante das possíveis perturbações e despejos de materiais orgânicos. O comportamento do OD é resultado de dois mecanismos principais: o consumo de oxigênio pelas bactérias em função da degradação da MO e a reaeração natural do curso d'água, que consiste na transferência de oxigênio da atmosfera para os corpos hídricos.

Sendo assim, os corpos hídricos são capazes de recuperar as suas condições naturais dependendo das suas características e do aporte de MO recebido. Estudando a capacidade natural que os cursos d'água possuem de depurar a MO lançada, Harold Warner Streeter e Earle Bernard Phelps foram os primeiros a propor uma forma inicial de modelo em 1925, sendo este baseado em dados obtidos entre 1914 e 1915, do processo de oxidação e reaeração do Rio Ohio, nos Estados Unidos. Através do modelo de Streeter-Phelps, foi possível empregar o OD para determinar o grau de poluição e a capacidade de autodepuração dos corpos hídricos, expressos em concentrações quantificáveis e capazes de serem modelados matematicamente (Streeter e Phelps, 1925; Von Sperling, 2005).

Basicamente, este modelo compõe-se de duas equações diferenciais ordinárias: a Equação 2 que modela a oxidação do material biodegradável, conhecida por equação de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), e a Equação 3, que modela o fluxo de oxigênio proveniente da reaeração atmosférica, conhecida por equação de reaeração.

(2)

$$\frac{\partial L}{\partial t} = -K_1 L$$

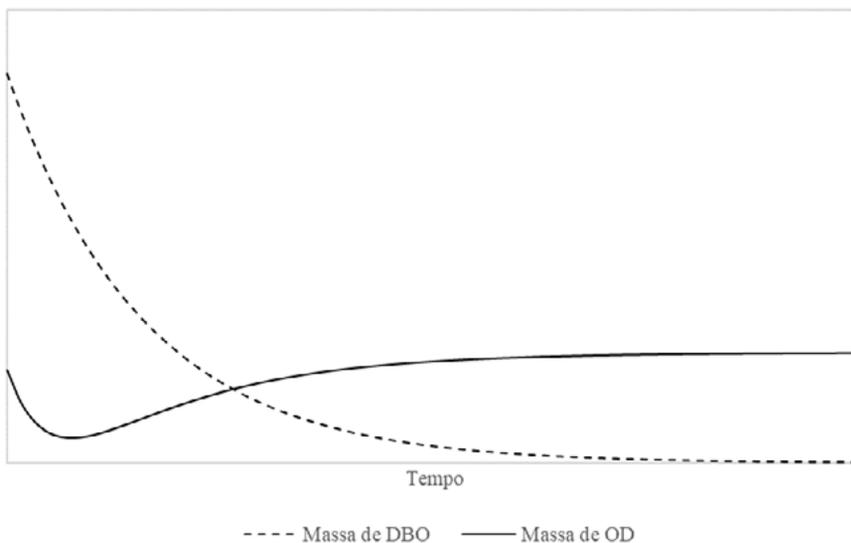
(3)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -K_1 L + K_2 (C_s - C)$$

Onde: L = concentração de DBO; coeficiente de degradação; C = concentração de OD; coeficiente de reaeração; concentração de saturação de OD.

Neste sentido, a modelagem dinâmica de sistemas ambientais pode ser empregada no modelo de Streeter-Phelps para representar o comportamento dinâmico da autodepuração de lagos, rios e cursos d'água a partir de alterações nas características de seu ambiente. O modelo construído para representar este problema é constituído de algumas variáveis auxiliares, tais como: volume do lago, concentração de DBO e OD, massa de DBO e OD, coeficiente de degradação e de reaeração, concentração de saturação de OD, além das taxas de degradação da matéria orgânica, desoxigenação e de reaeração. A modelagem da demanda bioquímica de oxigênio e do oxigênio dissolvido são concebidas pelos estoques, que representam o fenômeno de autodepuração.

O modelo de referência é apresentado na Figura 7, contendo o perfil da DBO e do OD ao longo do tempo. Como pode ser observado, a MO lançada de uma só vez em um determinado lago contribui para a redução de OD, que se recupera a partir de um dado momento. O nível mais alto de MO é identificado logo após o seu lançamento sendo, em seguida, estabilizado aos poucos pelas bactérias decompositoras.



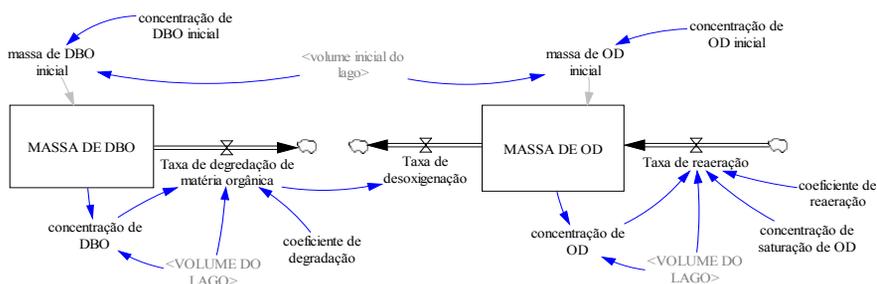
**Figura 7.** Modelo de referência para o estudo de autodepuração de corpos hídricos.

As simulações para o modelo de autodepuração são realizadas utilizando-se das características presentes na Tabela 2, as quais servem de base para a construção do modelo. No entanto, assim como no exemplo anterior do lago hipotético, são adotados valores meramente representativos. A Figura 8 apresenta o modelo simplificado que relaciona a demanda bioquímica de oxigênio e o oxigênio dissolvido em um lago hipotético de volume constante, com horizonte temporal determinado em dias, devido à rapidez que o processo de autodepuração possui para que haja um lançamento único de matéria orgânica.

**Tabela 2.** Variáveis auxiliares para o modelo de autodepuração.

Variável Auxiliar		
L inicial	30	$\text{g.m}^{-3}$
C inicial	7.2	$\text{g.m}^{-3}$
Volume do lago	$1 \times 10^8$	$\text{m}^3$
$K_1$	0.4	$\text{dia}^{-1}$
$K_2$	1.2	$\text{dia}^{-1}$
$C_s$	8.5	$\text{g.m}^{-3}$

Na modelagem da DBO e OD, a relação entre as suas concentrações iniciais e o volume do lago fornece suas respectivas massas iniciais, variáveis auxiliares utilizadas para dar início às simulações. A concentração de DBO é obtida através da relação entre a massa de DBO e o volume do lago e, é empregada juntamente com o coeficiente de degradação e o volume do lago para determinar a taxa de degradação de matéria orgânica. Esta taxa representa o consumo de oxigênio dissolvido e, por sua vez, a taxa de desoxigenação. Já a taxa de reaeração, responsável pela introdução do oxigênio atmosférico no corpo hídrico, depende das variáveis auxiliares de concentração de OD, volume do lago, concentração de saturação de OD e coeficiente de reaeração.

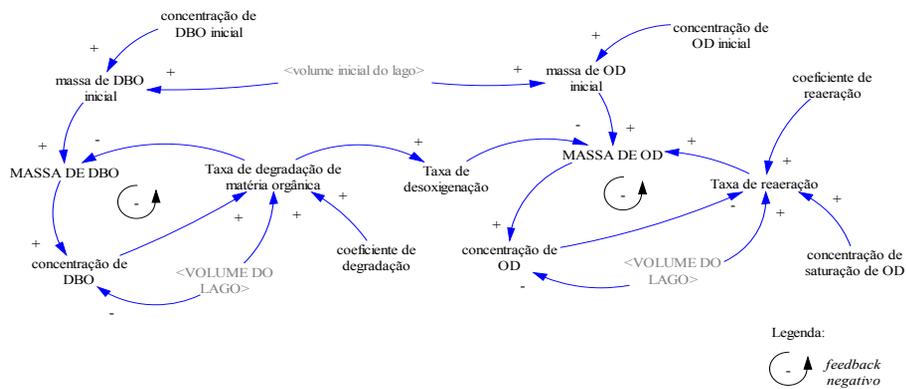


**Figura 8.** Diagrama de estoque e taxa para simulação de autodepuração.

A Figura 9 ilustra o diagrama de loop causal para a modelagem de DBO e OD do lago hipotético. Nesta figura é possível identificar as relações de causa e efeito do sistema ambiental dinâmico modelado. Por exemplo, o aumento da massa de DBO dado pelo despejo de MO aumenta a concentração de DBO que, por sua vez, aumenta a taxa de degradação de matéria orgânica, porém o aumento desta taxa reduz a massa de DBO, obtendo-se, assim, o feedback negativo para a modelagem da DBO. Além disso, o aumento na taxa de reaeração proveniente da interação ar-água promove o aumento na massa de OD, que aumenta a concentração de OD presente no lago, porém o aumento desta concentração auxilia na redução da própria taxa de reaeração, uma vez que esta depende da concentração de saturação de OD (limite de saturação), obtendo-se, assim, o feedback negativo para a modelagem do OD.

Após a construção e validação do modelo por comparação com o modelo de referência (Figura 7), deve ser realizada a análise de políticas e simulações de cenários para compreender o comportamento do fenômeno de autodepuração em função da modelagem da demanda bioquímica de oxigênio e do oxigênio dissolvido. Neste sentido, os seguintes cenários são elaborados e apresentados na Figura 10:

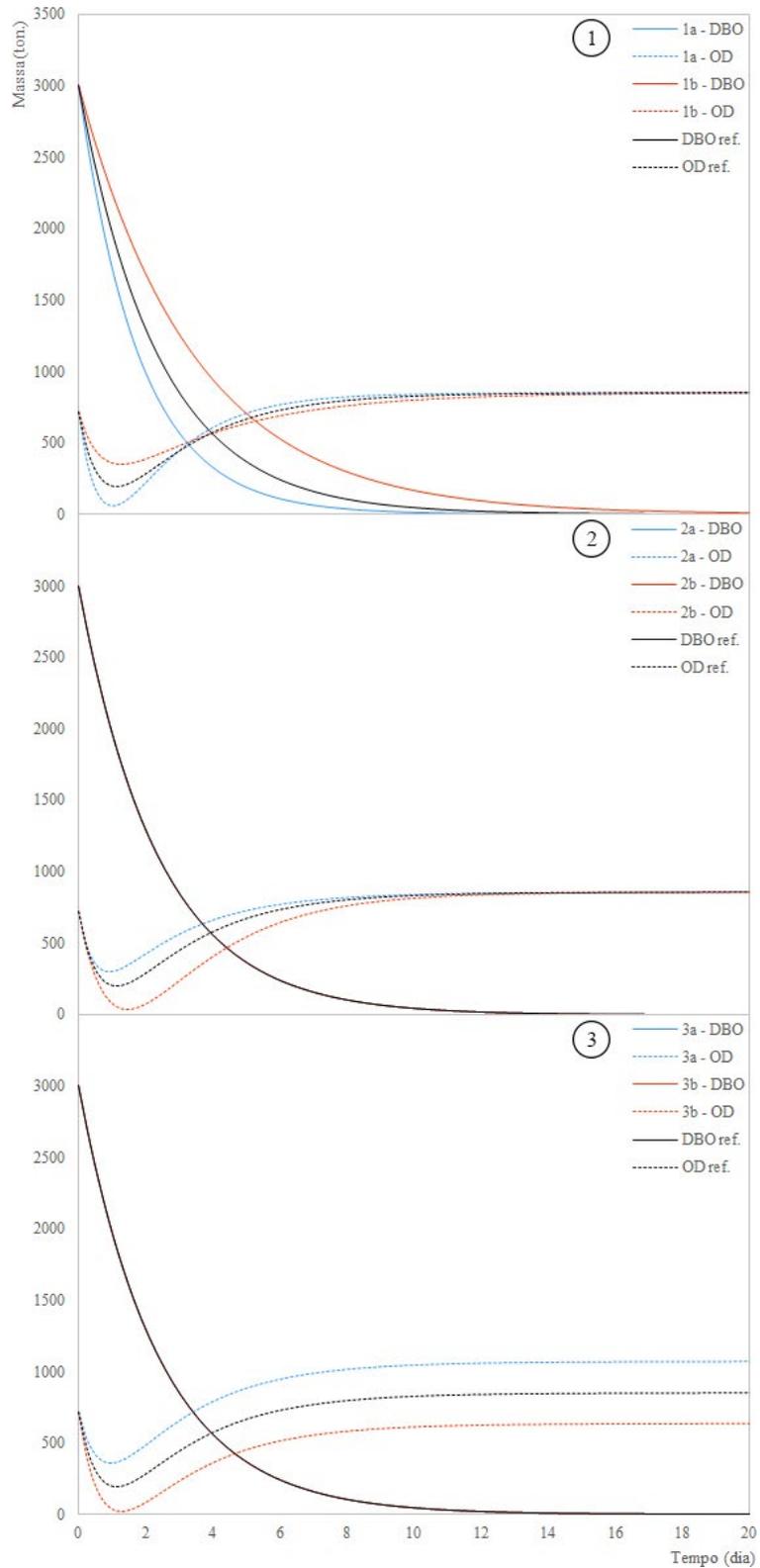
1. Variação do coeficiente de degradação.
  - a) Aumento em 30%.
  - b) Redução em 30%.
2. Variação do coeficiente de reaeração.
  - a) Aumento em 30%.
  - b) Redução em 30%.
3. Variação na concentração de saturação de OD.
  - a) Aumento em 25%.
  - b) Redução em 25%.



**Figura 9.** Diagrama de loop causal para o modelo de autodepuração.

Observa-se na Figura 10.1 que o coeficiente de degradação foi responsável por alterar o comportamento da DBO e de OD no sistema. Além disso, o aumento em 30% é responsável por acelerar a degradação da MO, consumindo OD a uma taxa maior. Já a redução em 30% apresenta comportamento oposto, ou seja, este cenário promove desaceleração da degradação da MO com menor consumo de OD.

A Figura 10.2 apresenta o resultado da variação no coeficiente de reaeração. Pode-se observar que as variações não interferem no comportamento da DBO, mas no comportamento do OD. Além disso, o aumento em 30% é responsável por reduzir a demanda de OD do corpo hídrico, por outro lado, o maior consumo de OD é observado quando o coeficiente de reaeração é reduzido em 30%. Este resultado reforça a importância da reaeração do oxigênio em corpos hídricos para o fenômeno de autodepuração.



**Figura 10.** Perfis de autodepuração para os cenários com variação em: 1 – 30% no coeficiente de degradação; 2 – 30% no coeficiente de reeração; 3 – 25% na concentração de saturação de OD. Para todos os cenários, aumento e redução em A e B, respectivamente. Modelo de referência incluso nos cenários.

Por fim, a variação na concentração de saturação de OD é apresentado na Figura 10.3. As variações não causam mudanças no comportamento da DBO, somente nas concentrações de OD. O aumento em 25% reduz a demanda por oxigênio e aumenta a quantidade de OD em equilíbrio no sistema. Já a redução em 25%, além de aumentar a demanda por oxigênio também diminuiu a quantidade presente em equilíbrio. Portanto, este parâmetro demonstra ser o mais sensível, uma vez que 25% de redução é suficiente para consumir quase a totalidade de OD, ao passo que os outros parâmetros necessitam de maior variação (30%) para atingir o mesmo comportamento.

Sendo assim, é possível identificar que, de maneira geral, corpos hídricos com altos coeficientes de degradação e reaeração possuem maior capacidade para autodepuração, uma vez que a degradação e a reposição de oxigênio são mais aceleradas. Por outro lado, corpos hídricos com coeficientes menores não podem receber grande quantidade de matéria orgânica, necessitando de maiores atenções e cuidados nas políticas públicas, que devem considerar as particularidades de cada sistema ambiental.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A modelagem dinâmica de sistemas ambientais é uma metodologia empregada para estudar e gerenciar sistemas complexos que mudam com o tempo. Mudanças climáticas, disposição de resíduos sólidos, despejos de efluentes em corpos hídricos, entre outros, são exemplos de dinâmicas interdisciplinares complexas que interconectam os sistemas ambientais, sociais e econômicos, desafiando a compreensão humana. Antecipar as consequências de políticas públicas para tratar destas particularidades, é uma tarefa difícil, especialmente entre as ações tomadas e as reações causadas no sistema. Além disso, o entendimento humano acerca do comportamento do sistema ambiental é limitado pela complexidade dos diversos processos que o controlam.

O direcionamento, aqui adotado, abordou a modelagem dinâmica de sistemas ambientais pela perspectiva de feedbacks utilizando simulações em modelos estoque-taxa, empregados para descrever como os estoques, as taxas e as variáveis presentes no sistema se inter-relacionam no padrão dinâmico do sistema ambiental. Assim, as constatações fornecidas através desta ferramenta proporcionam aos usuários condições de desenvolver estratégias e políticas que podem auxiliar na solução de problemas complexos como, a mitigação do impacto proveniente do despejo de matéria orgânica nos corpos hídricos, assunto exemplificado neste capítulo.

Diante da limitada habilidade cognitiva humana, é de se esperar que ocorram algumas surpresas nas simulações. De fato, as simulações podem resultar em comportamentos opostos aos esperados. Neste sentido, políticas consideradas para tornar o sistema melhor podem piorá-lo ainda mais e, em certos casos, políticas que supostamente favorecem ou desfavorecem alguns setores, na verdade, podem oferecer resultados vantajosos a longo prazo. Entretanto, estes resultados podem ser o grande diferencial para melhorar o entendimento sobre os sistemas ambientais, contribuindo para as transformações de pensamento e prática de todos os envolvidos neste processo.

## REFERÊNCIAS

- CAVANA, R. Y.; MAANI, K. E. A Methodological Framework for Systems Thinking and Modelling (ST&M) Interventions. In: International Conference on Systems Thinking in Management, 2000, Geelong/Australia. **Anais...** Geelong: ICSTM2000, 2000.
- FORD, A. **Modeling the environment**. 2. Ed. Washington: Island Press, 2010.
- FORRESTER, J. **Urban dynamics**. Waltham, MA. Pegasus Communications, 1968.
- HESPANHOL, Katia M. H. **Monitoramento e Diagnóstico da Qualidade da Água do Ribeirão Morangueiro**. 2009. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Pós-graduação em Engenharia Urbana, Universidade Estadual de Maringá, Maringá. 2009.
- LEE, K. **Compass and gyroscope: Integrating science and politics for the environment**. Washington, DC: Island Press, 1993.
- RICCIARDONE, P.; PEREIRA, O. dos S.; et al. Avaliação da Capacidade de Autodepuração do Rio das Mortes no Município de Vassouras/RJ. **Revista Eletrônica Teccen**, v. 4, n. 3, p. 63-76, 2016.
- SPERLING, M. Von. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. Ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental UFMG, 2005.
- STREETTER, H. W.; PHELPS, E. B. **A Study of the Pollution and Natural Purification of the Ohio River**. Washington: United States Public Health Service, 1925.
- TELES, R. B.; SILVEIRA, A. Autodepuração de Escoamentos Naturais de Água: Estudo De Caso: de Modelagem Matemática em um Trecho do Ribeirão Preto, Ribeirão Preto-SP. In: XXX Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária y Ambiental, 2006, Punta del Este/Uruguai. **Anais...** Uruguai: AIDIS, 2006.