

MODELAGEM ECOLÓGICA em ecossistemas aquáticos

Carlos Ruberto Fragoso Jr.
Tiago Finkler Ferreira
David da Motta Marques

© 2009 Oficina de Textos
CAPA E PROJETO GRÁFICO Malu Vallim
DIAGRAMAÇÃO Casa Editorial Maluhy & Co.
PREPARAÇÃO DE FIGURAS Resolvo Ponto Com.
PREPARAÇÃO DE TEXTOS Gerson Silva
REVISÃO DE TEXTOS Rena Signer

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

Fragoso, Júnior, Carlos Ruberto
Modelagem ecológica em ecossistemas aquáticos /
Carlos Ruberto Fragoso Júnior, David da Motta Marques,
Tiago Finkler Ferreira. – São Paulo : Oficina de Textos, 2009.

Bibliografia
ISBN 978-85-86238-88-8

1. Ecossistemas 2. Gestão ambiental 3. Limnologia
4. Modelos ecológicos 5. Modelos matemáticos 6. Recursos hídricos
7. Recursos hídricos – Desenvolvimento
I. Marques, David de Motta. II. Ferreira, Tiago Finkler III. Título.

09-06549

CDD-551.48

Índices para catálogo sistemático:

1. Ecossistemas aquáticos : Modelagem ecológica : Limnologia
: Ciência da terra 551.48

Todos os direitos reservados à Oficina de Textos
Trav. Dr. Luiz Ribeiro de Mendonça, 4
CEP 01420-040 São Paulo-SP - Brasil
tel. (11) 3085 7933 fax (11) 3083 0849
site: www.ofitexto.com.br e-mail: ofitexto@ofitexto.com.br

AGRADECIMENTOS

Aqui seguem nossos agradecimentos a todos que colaboraram para que esta obra fosse realizada.

Gostaríamos de agradecer o apoio do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) para a publicação deste livro. Colaboradores importantes também merecem destaque, como o Prof. Carlos E. M. Tucci, Prof. Walter Collischonn, a Engenheira Regina Camara Lins e a Bióloga Maria Betânia Gonçalves de Souza, que contribuíram com sugestões e informações adicionais. Os autores também agradecem o apoio incondicional de suas respectivas famílias que, sempre presentes, nos incentivaram e nos encorajaram a realizar mais um desafio.

produção primária, secundária e outros ecofisiológicos, é resultado de experimentos em campo ou em laboratório e encontra-se disponível na literatura. Entretanto, muitos desses processos retratam a realidade de ecossistemas temperados.

Poucos modelos conseguiram distinguir classes de grupos como fitoplâncton, macrófitas e peixes, e assim, generalizavam os principais processos dos grandes grupos como uma variável de estado para todos. Atualmente, existem modelos capazes de distinguir classes de fitoplâncton (cianobactérias, clorofíceas, diatomáceas etc.), macrófitas (submersas, emergentes e flutuantes) e peixes (piscívoros, onívoros e planctívoros), considerando seus estágios de vida (juvenil e adulta) (e.g. Janse, 2005; Fragoso Jr et al., 2007).

Para retratar o alto nível de diversidade funcional dos organismos aquáticos, os modelos ecológicos devem incluir os principais pro-

cessos de cada grupo, na forma de módulos que contêm um conjunto de equações diferenciais, os quais retratam as funções ecológicas e os coeficientes metabólicos referentes aos **processos biológicos**. Esses coeficientes são encontrados *in situ* ou experimentalmente, tais como (a) taxas de **respiração**, produções primária e secundária; (b) capacidade limite de suporte (*carrying capacity*) de biomassa ou densidade de espécie por área ou volume da água; (c) **assimilação** de nutrientes (**fósforo**, por produtores primários); (d) **competição** por nutrientes disponíveis na massa da água; (e) absorção de radiação fotossinteticamente ativa (**PAR**), taxas de crescimento, reprodução e **mortalidade**; (f) **excreção**, perda de biomassa e **decomposição**. Com a disponibilidade computa-

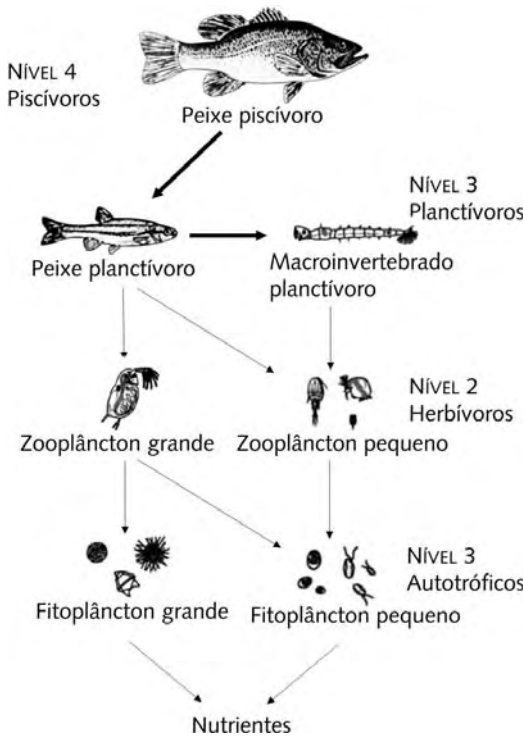


FIG. 1.3 Simplificação da cadeia alimentar aquática. A espessura das setas indica a força da interação

Fonte: adaptado de Carpenter e Kitchell, 1993.

2.4.5 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

Aqui, analisa-se a aceitação do modelo encontrado. Os parâmetros do modelo são ajustados de forma que a saída do modelo se aproxime dos dados observados (Fig. 2.14). A calibração do modelo pode ser realizada por tentativa e erro ou pelo uso de algoritmos que calibram automaticamente os parâmetros, utilizando funções objetivas que minimizam a

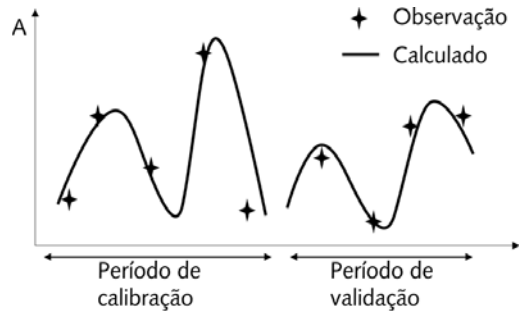


FIG. 2.14 Processo de calibração e validação do modelo

diferença entre os valores calculados e observados. Para validar o modelo, testam-se os parâmetros calibrados em um outro período com dados observados. Caso o modelo seja considerado não válido, ou seja, sua solução não foi próxima à realidade, deve-se retornar à formulação de hipóteses, simplificações e reiniciar o processo.

A eficiência da estimativa dos modelos é medida por meio de técnicas estatísticas que avaliam características particulares das séries calculadas. Exemplos dessas técnicas são apresentados na Tab. 2.1. O coeficiente de determinação de Nash-Sutcliffe (R^2) prioriza a comparação de valores com a média dos valores observados, o erro médio padrão ($RMSE$) dá um maior peso aos valores de maior magnitude, e no erro médio

TAB. 2.1 Coeficientes utilizados para descrever a eficiência do ajuste dos modelos

Coeficientes	Equação ¹
Coeficiente de determinação de Nash-Sutcliffe (R^2)	$R^2 = 1 - \frac{\sum (Y_{Obs}(t) - Y_{Cal}(t))^2}{\sum (Y_{Obs}(t) - \bar{Y}_{Obs})^2}$
Erro médio padrão ($RMSE$)	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Y_{Obs}(t) - Y_{Cal}(t))^2}{N}}$
Erro médio padrão invertido ($RMSEI$)	$RMSEI = \sqrt{\frac{\sum \left(\frac{1}{Y_{Obs}(t)} - \frac{1}{Y_{Cal}(t)} \right)^2}{N}}$

¹ Y_{Obs} é o valor observado, Y_{Cal} é o valor calculado pelo modelo, \bar{Y}_{Obs} é a média dos valores observados e N é o número total de valores.

formas orgânicas, também é considerado um elemento fundamental no processo de **mineralização** do sistema. Na modelagem, o carbono é incluído na massa da água como detrital (particulado em suspensão) e recalctrantes (substâncias húmicas dissolvidas), bem como a porção de detritos no sedimento. A troca de **matéria inorgânica** e detritos entre a água e o sedimento é simulada por meio da **sedimentação** e da ressuspensão. Oxigênio dissolvido e pH também devem ser modelados dinamicamente, dependendo da demanda bioquímica de oxigênio

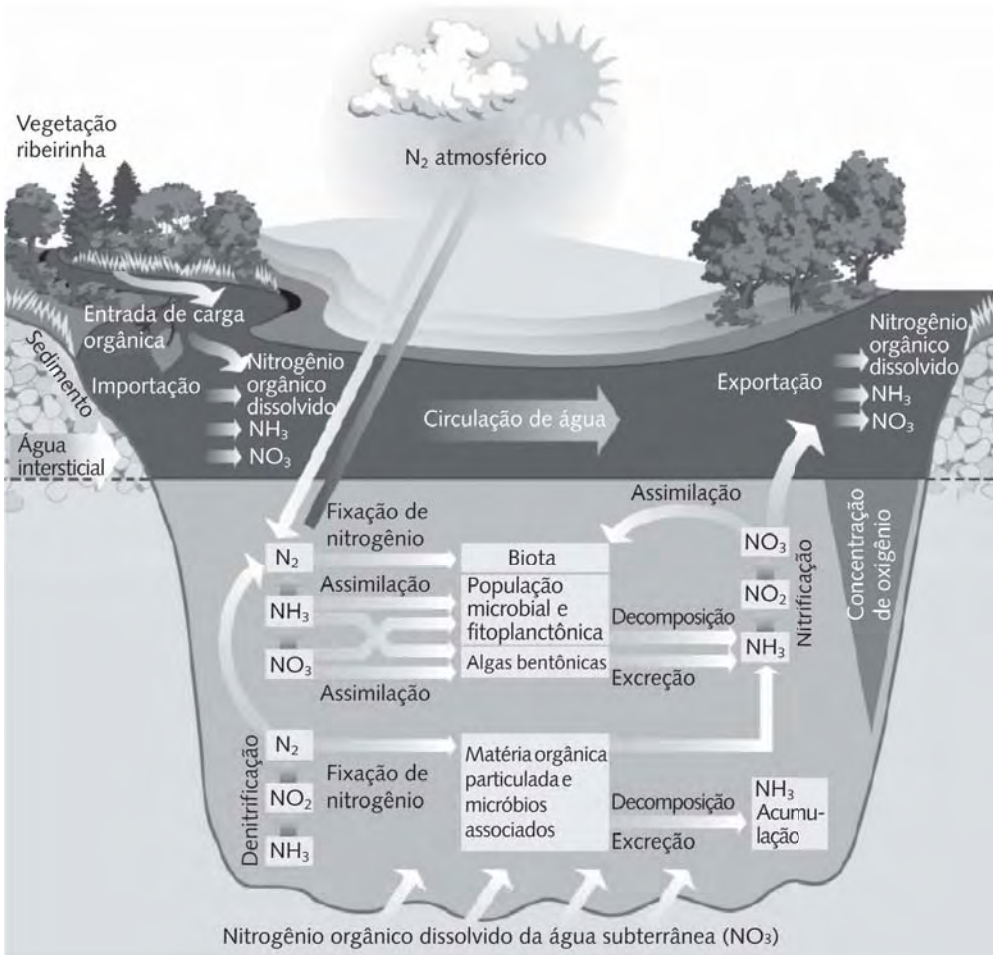


FIG. 6.1 Dinâmica e transformação do nitrogênio em um ecossistema aquático
 Fonte: adaptado de EPA, 1998.

$$oDOMW = sDDetW + sDPhytW \quad \mathbf{8.2}$$

Séston orgânico na água [mgD/l]

$$oDSestW = oDOMW + sDDIMW \quad \mathbf{8.3}$$

Séston total na água [mgD/l]

8.1.2 VARIÁVEIS DE FÓSFORO

$$oPPhytW = \sum_{i=1}^n sPSpecW_i \quad \mathbf{8.4}$$

Parcela de fósforo no Fitoplâncton total [mgN/l]

$$oPOMW = sPPhytW + sPDetW \quad \mathbf{8.5}$$

Parcela de fósforo no Séston orgânico na água [mgP/l]

$$oPSestW = oPOMW + sPDIMW \quad \mathbf{8.6}$$

Parcela de fósforo Séston total na água [mgP/l]

$$oPIinorgW = sPO4W + sPAIMW \quad \mathbf{8.7}$$

Fósforo inorgânico [mgP/l]

$$oPITotW = oPSestW + sPO4W \quad \mathbf{8.8}$$

Fósforo total na água [mgP/l]

8.1.3 VARIÁVEIS DE NITROGÊNIO

$$oNDissW = sNO3W + sNH4W \quad \mathbf{8.9}$$

Nitrogênio dissolvido na água [mgN/l]

$$sNPhytW = \sum_{i=1}^n sNSpecW_i \quad \mathbf{8.10}$$

Parcela de nitrogênio no Fitoplâncton total [mgN/l]

$$oNOMW = sNPhytW + sNDetW \quad \mathbf{8.11}$$

Séston orgânico [mgN/l]

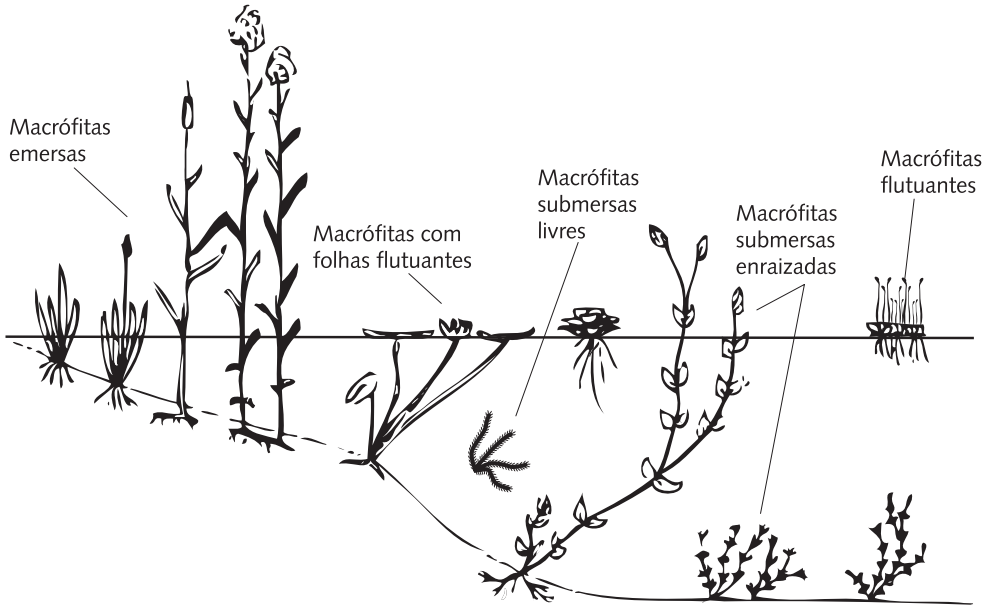


FIG. 10.1 Grupos ecológicos das macrófitas aquáticas

O crescimento das macrófitas é regularizado por diversos fatores, tais como a disponibilidade de luz, nutrientes, temperatura, estabilidade do sedimento, ação das ondas, mudança dos níveis da água e consumo por várias espécies de aves e peixes. Apesar do pouco conhecimento sobre importantes aspectos para o crescimento das macrófitas aquáticas, como a herbivoria por aves, modelos determinísticos são boas ferramentas de avaliação e predição da dinâmica do crescimento da vegetação. Esses modelos também podem ser utilizados para a geração de hipóteses, as quais podem ser testadas em campo ou em laboratório.

Neste capítulo, utilizamos a notação (Veg) para representar um determinado grupo funcional de macrófitas aquáticas. Cada grupo poderia ser modelado por compartimentos: peso seco (D), carbono (C), nitrogênio (N) e fósforo (P). As razões entre nutrientes e peso seco podem ser expressas por:

$$rPDVeg = sPVeg/sDVeg \quad \text{Razão P/D [gP/gD]} \quad \mathbf{10.1}$$

$$rNDVeg = sNVeg/sDVeg \quad \text{Razão N/D [gN/gD]} \quad \mathbf{10.2}$$

$$\begin{aligned}
 P_i H_i^{n+1} C_i^{n+1} = & P_i H_i^n C_i^n \\
 & - \Delta t \left[\sum_{j \in S_i^+} |Q_j^{n+\theta}| C_i^n - \sum_{j \in S_i^-} |Q_j^{n+\theta}| C_{m(i,j)}^n \right] \\
 & + \Delta t \sum_{j \in S_i + US_i^-} D_j^n (C_{m(i,j)}^n - C_i^n) \quad \mathbf{16.19}
 \end{aligned}$$

onde o coeficiente de advecção é definido como $Q_j^{n+\theta} = \lambda_j H_j^n u_j^{n+\theta}$, sendo $u_j^{n+\theta}$ a velocidade na face ponderada entre os intervalos de tempo n e $n + 1$.

A solução numérica apresentada não exclui o problema da difusão numérica, que é intrínseco ao esquema Upwind. Para minimizar esse problema, a equação de transporte de massa pode ser discretizada utilizando-se um esquema limitador de fluxo:

$$\begin{aligned}
 P_i H_i^{n+1} C_i^{n+1} = & P_i H_i^n C_i^n - \\
 & \Delta t \left[\sum_{j \in S_i^+} |Q_j^{n+\theta}| C_i^n - \sum_{j \in S_i^-} |Q_j^{n+\theta}| C_{m(i,j)}^n \right] \\
 & - \frac{\Delta t}{2} \sum_{j \in S_i^+ US_i^-} \Phi_j^n |Q_j^{n+\theta}| (C_{m(i,j)}^n - C_i^n) + \\
 & \Delta t \sum_{j \in S_i^+ US_i^-} D_j^n (C_{m(i,j)}^n - C_i^n) \quad \mathbf{16.20}
 \end{aligned}$$

onde Φ é o limitador *Roe's superbee*, definido por:

$$\Phi = \max [\phi, \min (2r, 1), \min (r, 2)] \quad \mathbf{16.21}$$

sendo:

$$r = \frac{1}{C_{m(i,j)}^n - C_j^n} \frac{\sum_{j \in S_i^-} |Q_j^{n+\theta}| C_{m(i,j)}^n}{\sum_{j \in S_i^-} |Q_j^{n+\theta}|} \quad \mathbf{16.22}$$

$$\phi = \min \left(1, \frac{2D_j^n}{|Q_j^{n+\theta}|} \right) \quad \mathbf{16.23}$$