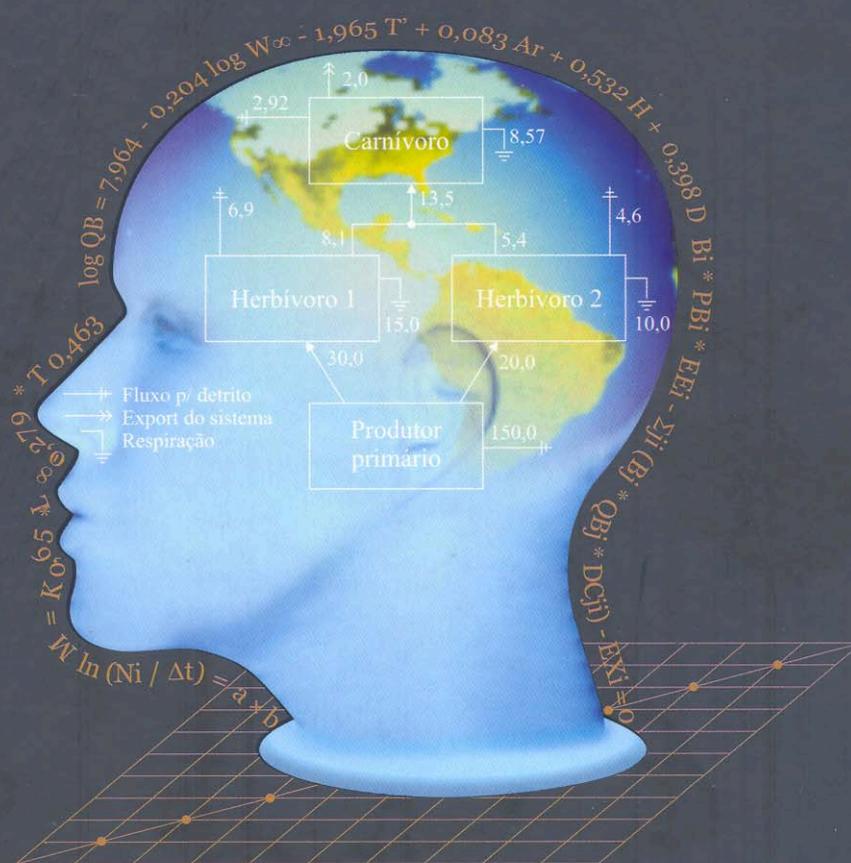


# O artesão de ecossistemas: construindo modelos com dados



**Ronaldo Angelini**  
**Luiz Carlos Gomes**  
 (Organizadores)



Ronaldo Angelini  
Luiz Carlos Gomes  
(Organizadores)

**O artesão de ecossistemas:  
construindo modelos com dados**



Capa: fotomontagem  
Softwares utilizados: CorelDral 9 e Adobe Creative Suite 3

“Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)”  
(Biblioteca Setorial - UEM. Nupélia, Maringá, PR, Brasil)

A786 O Artesão de ecossistemas: construindo modelos com dados / Ronaldo Angelini, Luiz Carlos Gomes (Organizadores). — Maringá : Eduem, 2008.  
173 p. : il.

Vários autores  
Inclui referências no final de cada capítulo  
ISBN 978-85-7628-141-2 (broch.)

1. Ecossistemas de água doce - Teoria da informação - Análise aplicada - Modelagem.  
2. Teia trófica - Reservatórios - Modelagem matemática. 3. Ecopath (software). I. Angelini, Ronaldo, 1966-, org. II. Gomes, Luiz Carlos, 1965-, org.

CDD 22. ed. -577.63160112  
NBR/CIP - 12899 AACR/2

Maria Salete Ribellatto Arita CRB 9/858

Copyright © 2008 para os autores  
Todos os direitos reservados. Proibida a reprodução, mesmo parcial, por qualquer processo mecânico, eletrônico, reprográfico, etc., sem a autorização, por escrito, dos autores.  
Todos os direitos reservados desta edição © 2008 para Eduem.

ISBN 978-85-7628-141-2



**Endereço para correspondência:**

Eduem - Editora da Universidade Estadual de Maringá  
Avenida Colombo, 5790 - Campus Universitário - 87020 - 900 - Maringá - Paraná - Brasil  
Fone: (0XX44) 3261-4103 - Fax: (0XX44) 3261-4253  
Site: <http://www.eduem.uem.br> - E-mail: [eduem@uem.br](mailto:eduem@uem.br)

## Capítulo 9 O uso de atributos ecossistêmicos na busca por padrões em reservatórios

Ronaldo Angelini, Luiz Carlos Gomes, Angelo Antonio Agostinho

Neste capítulo você irá:

Explorar as relações entre os atributos dos 31 reservatórios estudados;

aprender a importância fundamental de alguns desses atributos na análise ecossistêmica;

observar a condução de uma análise da busca de padrões nos ecossistemas;

avaliar algumas conclusões relacionadas ao uso do Ecopath para modelar reservatórios.

## Introdução

A busca de padrões na natureza é recorrente na literatura científica e, em alguns casos, tem originado novos programas de pesquisas, como a recente área da macroecologia, que é a análise de padrões estatísticos de variáveis ecologicamente relevantes, considerando um grande número de “partículas ecológicas”, entendendo-se por estas as espécies, suas abundâncias e ligações fenotípicas (DINIZ-FILHO; RANGEL, 2004). Porém uma espécie é uma unidade simples de identificar (a despeito de toda a discussão), e algumas de suas variáveis, como tamanho do corpo e área de distribuição geográfica, também são relativamente fáceis de medir e delimitar, possibilitando, então, o estudo dos padrões de diversidade, como, por exemplo, em gradientes latitudinais.

Uma espécie é um grupo de organismos com características comuns, e que crescem, produzem descendentes férteis ao se inter cruzarem, se desenvolvem e morrem. Se essa “história de vida” é verdadeira para organismos, também o é para entidades tomadas em macroescala como estruturas sociais, empresas, comunidades econômicas e, finalmente, ecossistemas.

Nesse contexto, um ecossistema é uma entidade viva que se desenvolve, restrita pelas leis da termodinâmica, mas não necessariamente de maneira determinística. Assim, dada a descrição dos diversos fenômenos (fluxos e taxas) que compõem essa entidade viva, seu comportamento pode ser previsto, auxiliando na solução de problemas de interesse.

A obediência à primeira e à segunda lei da termodinâmica poderia conduzir à descrição dos sistemas ecológicos como puramente físicos e matemáticos. Contudo, a segunda lei é muito simples para explicar as comunidades, visto que a dissipação de energia é maior em organismos vivos, o que requer o uso de outros instrumentos de avaliação.

Para entender as restrições impostas pelas leis da termodinâmica, Odum (1969) sintetizou o desenvolvimento dos ecossistemas em 24 atributos referentes a trocas energéticas, estrutura da comunidade (diversidade), história de vida, ciclagem de nutrientes e *homeostase*. Posteriormente, com a quantificação do estágio de amadurecimento dos ecossistemas, foi possível verificar o desempenho de cada componente, alicerçando o manejo de populações naturais. Mesmo assim, os estudos têm mostrado que os ecossistemas não têm um desenvolvimento determinístico, principalmente quando são perturbados, de forma que a teoria de Eugene P. Odum estabelece apenas tendências para a dinâmica dos 24 atributos.

Uma das maneiras de resolver o problema da análise conjunta de tantos atributos é diminuir o número deles, escolhendo aqueles que medem o sistema como um todo, em especial as propriedades emergentes. Estas apenas aparecem (“emergem”) quando os objetos estão interligados.

### **Análise e aplicação dos atributos**

A Tabela 9.1 mostra alguns dos 24 atributos de Odum (1969) apresentados nos capítulos 1 e 3. Esses atributos, que sintetizam o desenvolvimento de um sistema como um todo, serão relacionados às características dos reservatórios e nortearão a análise e discussão conjunta dos ecossistemas estudados. A escolha desses atributos também foi baseada em Christensen e Pauly (1998), para comparações, quando pertinente.

Os atributos da Tabela 9.1, ligados à produtividade (números 1, 2 e 4) e biomassa (número 3), nitidamente tendem ao equilíbrio quando o sistema se desenvolve, isto é, o ecossistema usa quase toda a produção para a manutenção de sua biomassa, que aumenta apenas entre os consumidores.

Tabela 9.1 - Atributos da teoria de Odum selecionados para as comparações, com respectivas tendências de amadurecimento e a quantificação realizada pelo Ecopath [segue numeração (Nº) original de Odum, 1969]

Nº	Atributos	Em desenvol- vimento	Estágio maduro	Cálculo no Ecopath
1	Produção primária total/respiração total	> 1 ou < 1	~ = 1	PPT/RT
2	Produção primária total/biomassa total	Alta	Baixa	PPT/BT
3	Biomassa total/total de fluxos	Baixa	Alta	BT/TFS
4	Produção líquida do sistema (rendimento)	Alta	Baixa	PLS
15	Ciclagem de nutrientes	Pequena e aberta	Alta e fechada	Índice de ciclagem de Finn (%)
17	Papel de detritos na regeneração dos nutrientes	Irrelevante	Importante	Comprimento do caminho
22	Estabilidade (resistência a perturbações)	Pobre	Boa	RT/BT (Schödingner)
23	Entropia	Alta	Baixa	Overhead (%)
24	Informação	Baixa	Alta	Ascendência (%)

### **Índice de ciclagem de Finn**

Odum (1969) previu a dominância da detritivoria em sistemas maduros. Assim, o índice de ciclagem de Finn (número 15), que mede a biomassa e fluxos reciclados no sistema, tende a aumentar. Essa reciclagem será mais representativa quanto maior for o tamanho médio dos caminhos que a energia/matéria faz para chegar a um compartimento. Isso pode ser calculado como o total de fluxos do sistema dividido pela soma do total exportado com o total respirado (atributo número 17), identificado como tamanho médio do caminho.

### **Estabilidade e razão de Schödinger**

A estabilidade é o conceito mais controverso e também o mais útil no estudo dos ecossistemas (PIMM, 1984). Odum (1971) escolheu a razão de Schödinger (número 22) para medir a estabilidade, em homenagem ao físico que mostrou que sistemas biológicos devem continuamente bombear desordem para manter a ordem. O aumento dessa razão mostra a capacidade do sistema em queimar energia (respiração é o custo de manutenção) e, portanto, aptidão para suportar distúrbios. Porém essa avaliação da estabilidade é pontual e específica, pois é calculada pela divisão entre o total respirado e a biomassa total. Ora, se um ecossistema é um “todo” e se este “é maior que a soma das partes”, então é necessário medir esse “maior”. Isso é feito através das propriedades emergentes, que são dependentes das inter-relações nos sistemas e permitem quantificar as “metas” dos sistemas (MÜLLER, 1997).

### **Propriedades emergentes: ascendência e overhead**

A ascendência é uma propriedade emergente, desenvolvida por Ulanowicz (1986, 1997), e mede a parte de informação

ordenada de um sistema. Sua contra - parte desordenada é chamada *overhead*, e constitui a energia de reserva. A soma de ascendência e *overhead* resulta na capacidade de desenvolvimento, que mostra o limite do desenvolvimento do sistema.

Por sua vez, a entropia (número 23) e a informação (número 24) são atributos capazes de avaliar a *homeostase* (estabilidade) do sistema, que podem ser medidas, respectivamente, através do *overhead* e da ascendência, que são baseadas na Teoria da Informação. A informação também pode ser medida pela informação média mútua, que é a quantia média de restrições aplicadas a um “quantum” arbitrário de unidade, que passa de um compartimento para outro (PERKINS, 1978; ULANOWICZ, 1997; ANGELINI; AGOSTINHO; GOMES, 2006).

A quantificação desses valores para apenas um ecossistema possibilita interpretar seu estágio de amadurecimento e inferir sobre seu uso sustentável, através da simulação de impactos e observação dos resultados das previsões (CHRISTENSEN; PAULY, 1998; ANGELINI; AGOSTINHO; GOMES, 2006). Mas, quando vários sistemas são estudados, a detecção de padrões e as suposições teóricas passam a ser passíveis de validação e teste.

Neste capítulo, os atributos macroscópicos descritos na Tabela 9.1 são relacionados para todos os reservatórios estudados. Outras variáveis, como área e idade do reservatório, também são analisadas. A abordagem é similar à adotada por Christensen (1995). O intuito é de que a análise desses atributos indique tendências de comportamento e de padrões ecossistêmicos. A Tabela 9.2 mostra algumas variáveis de cada reservatório, que são relacionadas aos atributos selecionados.

Tabela 9.2 - Reservatórios modelados e principais variáveis

Reservatórios	Ano de fechamento	Idade em 2006	Área (km <sup>2</sup> )	Número de compartimentos
Alagados	1968	38	13,0	15
Apucarantina	1957	49	2,0	18
Canoas I	1999	7	35,0	24
Canoas II	1999	7	25,7	24
Capivara	1975	31	609,7	24
Capivari	1970	36	12,8	22
Cavernoso	1965	41	2,9	20
Chavantes	1970	36	392,1	21
Curucaca	1982	24	2,0	24
Foz do areia	1980	26	138,5	26
Guaricana	1957	49	0,9	18
Harmonia	1950	56	3,0	16
Iraí	1999	7	14,6	25
Jordão	1996	10	3,7	26
Melissa	1962	44	0,1	20
Mourão	1984	22	11,0	11
Osório	1975	31	59,9	22
Passaúna	1978	28	8,3	18
Piraquara	1979	27	3,3	16
Rio dos Patos	1949	57	1,0	18
Rosana	1987	17	220,0	41
Salto Caxias	1998	8	141,0	24
Salto do Meio	1931	75	0,1	19
Salto do Vau	1959	47	2,0	15
Santa Maria	1950	56	0,1	15
Santiago	1980	26	208,0	23
Segredo	1992	14	80,6	29
Salto Grande	1958	48	14,9	24
Taquaruçu	1992	14	105,0	24
UJMF	1970	36	2,9	22
Vossoroça	1949	57	4,1	22

## Resultados e discussão

A relação entre o número de caminhos que a energia/matéria faz no sistema e o número de compartimentos de cada modelo é mostrado na Figura 9.1, que também destaca alguns reservatórios que aparentemente não seguiram a tendência positiva de tal relação. Os reservatórios de Rosana e Segredo, apesar de terem muitos compartimentos, têm poucos caminhos, indicando baixa conectividade entre eles. O oposto acontece com o reservatório de Melissa.

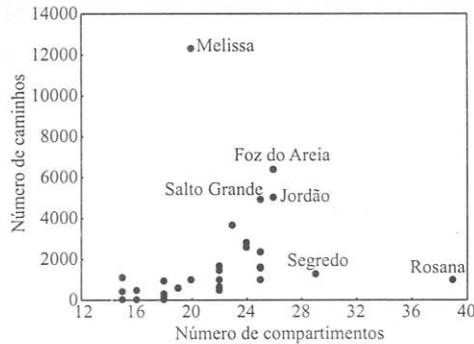


Figura 9.1 Relação entre o número de compartimentos dos modelos e o número de caminhos que a energia/matéria faz no sistema, para 31 reservatórios do Estado do Paraná (calculados pelo Ecopath).

As relações entre a produção líquida do sistema (PLS) com o *overhead* (Figura 9.2A) e a razão produção primária total/respiração total (Figura 9.2B) enfatizam o reservatório de Chavantes, que apresentou PLS negativa, ou seja, a respiração superou a produção. Apesar disso seu *overhead* é alto, comprovando a relação negativa da energia de reserva com PLS (Figura 9.2A). Assim, o sistema é mais estável quando acumula pouca biomassa, ou seja, quando PLS é baixa ou ainda quando o ecossistema é maduro. O aumento de PLS tende a acompanhar o aumento de PPT/RT, mas a relação não é tão direta (Figura 9.2B).

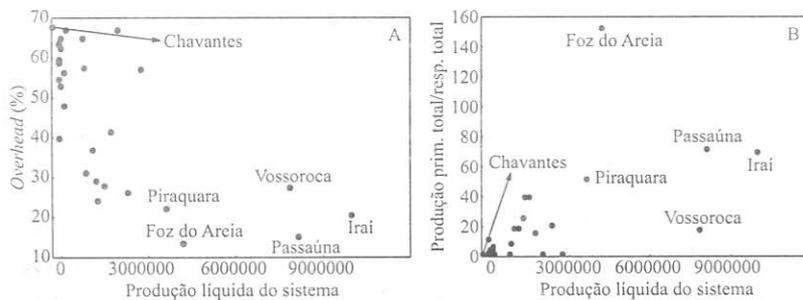


Figura 9.2 Relação da produção líquida do sistema com o *overhead* (A) e com a razão produção primária total/respiração total (B), para 31 reservatórios do Estado do Paraná (calculados pelo Ecopath).

Apesar de alta variabilidade, com o aumento da biomassa total/ fluxos totais do sistema (BT/FTS) houve diminuição do valor do índice de ciclagem de Finn, isto é, quanto menor a ciclagem de nutrientes, menos fluxos o sistema apresenta para sustentar a biomassa (Figura 9.3). Isso é também avaliado pelo comprimento desses caminhos (Figura 9.4), que apresentou tendência quase linear com o índice de Finn, com exceção do reservatório de Santa Maria, que, devido à presença de vários predadores de topo, teve comprimento médio de caminho maior, mas com baixa ciclagem de nutrientes.

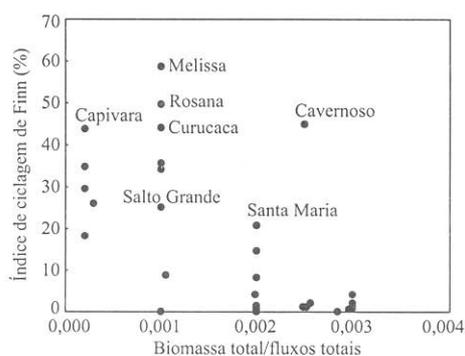


Figura 9.3 Relação entre a razão biomassa total/fluxos totais do sistema (BT/FTS) e o Índice de ciclagem de Finn (%) para 31 reservatórios do Estado do Paraná (calculados pelo Ecopath).

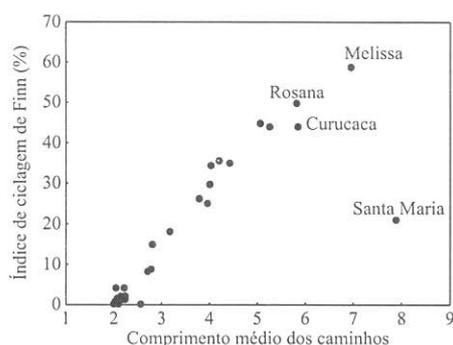


Figura 9.4 Relação entre o comprimento médio dos caminhos e o Índice de ciclagem de Finn (%) para 31 reservatórios do Estado do Paraná (calculados pelo Ecopath).

A relação entre as idades dos reservatórios e os atributos produção primária total/respiração total (PPT/RT), *overhead*, Finn e razão de Schödinger, está representada na Figura 9.5, com destaque para alguns ambientes. Percebe-se que a idade pareceu contribuir com o amadurecimento dos sistemas, mas ainda houve muitas exceções, como as apontadas na Figura 9.5A, em especial pelos reservatórios do Grupo I, que, apesar de recentes, apresentaram alto *overhead*.

Para PPT/RT (Figura 9.5B) e razão de Schödinger (Figura 9.5C) fica evidente a alta variabilidade, pois há muitos reservatórios novos e antigos com mesmos valores. Mesmo assim, há uma leve tendência de diminuição desses dois atributos com a idade. Por outro lado, o índice de Finn não apresentou relação com a idade (Figura 9.5D).

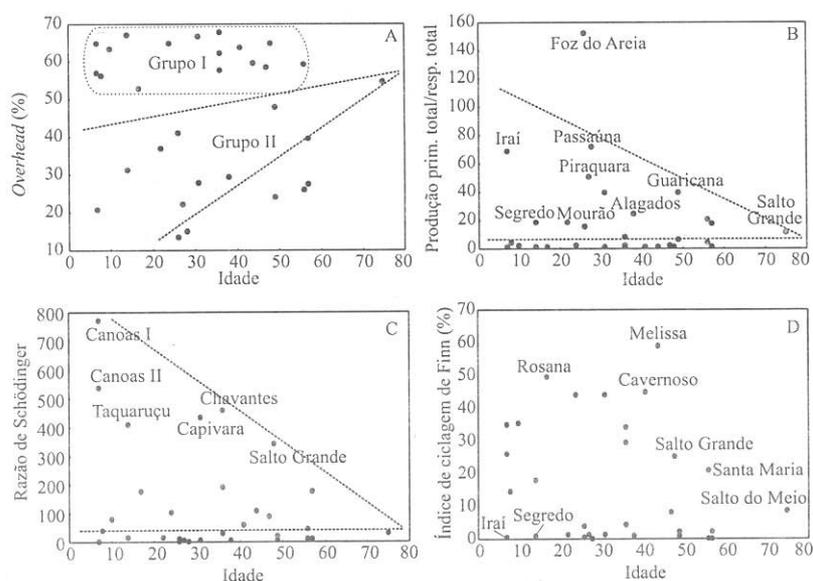


Figura 9.5 Relação da idade dos reservatórios com o *overhead* (A), produção primária total/respiração total (PPT/RT; B), a razão de Schödinger (C), e com o índice de ciclagem de Finn (D), para 31 reservatórios do Estado do Paraná (calculados pelo Ecopath).

A fim de dirimir dúvidas sobre essas tendências, aplicamos o programa Ecosim 7.0, de Nicholas Gotelli (<http://www.uvm.edu/~biology/Faculty/Gotelli/Gotelli.html>), e analisamos os padrões de “envelope”, procedimento comum entre os macroecólogos, buscando tendências significativas dos atributos em relação à idade dos ecossistemas (reservatórios), que seriam as nossas espécies. Para as quatro variáveis da Figura 9.5, os resultados não foram significativos, ou seja, apesar dos grupos e tendências identificadas, eles poderiam ter sido gerados ao acaso (teste não-significativo).

A relação positiva entre a razão de Schödinger e a produção primária total/biomassa total (PPT/BT; Figura 9.6) se deve ao fato de que ecossistemas com altos valores de PPT também apresentam altas respirações, pois necessitam consumir oxigênio para decompor o “excesso” de produção primária, casos, por exemplo, de Canoas I e Canoas II. Fica evidente que o *overhead* tem um limite para ser alcançado (neste caso 70%; Figura 9.7) e que, mesmo apresentando um índice de ciclagem de Finn abaixo de 10%, o *overhead* pode ainda ser considerado, pelo menos, razoável, como em Apucarantina, com 45%. Outra peculiaridade é que sistemas com altos índices de Finn certamente têm alto *overhead*.

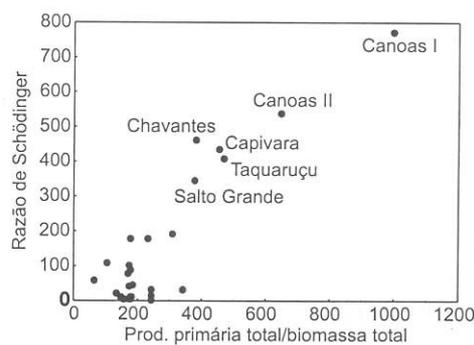


Figura 9.6 Relação entre a produção primária total/biomassa total e a razão de Schödinger para os 31 reservatórios do Estado do Paraná (calculados pelo Ecopath).

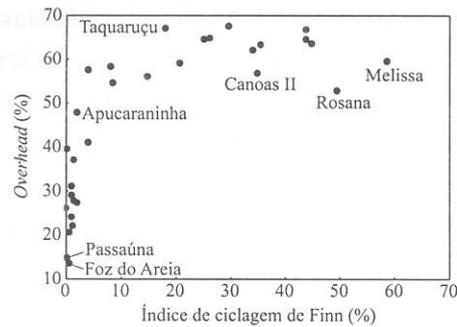


Figura 9.7 Relação entre o índice de Finn e o *overhead* para os 31 reservatórios do Estado do Paraná (calculados pelo Ecopath).

Assim, não foi verificada relação entre os atributos sistêmicos e a área dos reservatórios. Então, não é o tamanho em área do ecossistema que lhe confere maior ou menor estabilidade, mas sim as relações existentes entre os componentes.

### Considerações finais

O primeiro diagrama de fluxo de energia na natureza é creditado a Howard Odum para o ecossistema de Silver Springs na Flórida (ODUM, 1956). Desde então, mais de cinquenta anos se passaram e a necessidade de se estudar os ambientes como sistemas termodinâmicos, que apresentam compartimentos que trocam energia/matéria entre si, tem aumentado cada vez mais. Nos debates posteriores, em suas vidas acadêmicas, os irmãos Odum, que morreram em 2002, sempre ressaltavam que, para a humanidade conseguir sobreviver, é necessário firmar uma parceria com a natureza (CAMPBELL, 2004).

Todos os modelos apresentados neste livro foram feitos a partir de estudos em reservatórios, que, sem dúvida, estão entre as maiores intervenções humanas na natureza, em especial nos corpos d'água. É evidente que muitos estudos ainda são necessários, mas algumas conclusões sistêmicas podem aqui ser resumidas:

- i) a ciclagem de nutrientes é fundamental para o desenvolvimento do sistema e, conseqüentemente, sua estabilidade;
- ii) o tamanho do reservatório não influencia na estabilidade de seu ecossistema, segundo a abordagem utilizada;
- iii) o amadurecimento dos sistemas parece ser influenciado pela idade, mas há muitos reservatórios que não se encaixam nessa tendência;
- iv) sistemas com alta produção primária, normalmente provocada pela intervenção humana, dificilmente atingirão a estabilidade, já que os níveis de respiração são muito altos;
- v) as evidências de tendências aqui detectadas quase nunca exibem relações diretas e fáceis de entender e, segundo o teste realizado, elas podem ter sido geradas pelo simples efeito do acaso. Dessa forma, é necessário o uso de vários atributos para inferir sobre a estabilidade.

Angelini, Agostinho, Gomes, Costa e Latini (2005) construíram modelos Ecopath para seis reservatórios, que foram amostrados com redes de arrasto: Iraí, Segredo, Mourão, Rosana, Capivari e Salto do Vau (também analisados neste capítulo). Esses autores mostraram uma clara relação direta entre idade e razão de Schödinger e *overhead*, ou seja, quanto mais velho o sistema, mais maduro ou resiliente ele se apresenta. Isso é exatamente o esperado pela teoria de desenvolvimento de ecossistemas de Odum, mas que não foi encontrado aqui com a análise dos 31 reservatórios. Assim, quando seis sistemas são amostrados por um método comprovadamente melhor para estimar riqueza e biomassa, os dados encaixam-se na teoria de desenvolvimento de Odum, mas quando outros reservatórios, amostrados com redes de espera, são agrupados na análise, isso não acontece.

É claro que o método amostral de arrasto é mais eficaz que as malhadeiras. Contudo, será que as redes de espera geram informações de biomassa e riqueza tão imprecisas, de forma a influenciar os resultados nas análises ecossistêmicas? Ainda não se

tem uma resposta definitiva para essa questão. Mas é importante enfatizar que, segundo a teoria de desenvolvimento de ecossistemas, há forte indício de que as redes de espera, utilizadas nas amostragens de peixes, forneçam estimativas de biomassa e riqueza de espécies insuficientes ou mesmo tendenciosas (peixes mais ativos).

De qualquer forma, o problema é instigante, pois não se tem certeza se a teoria está errada ou se são os dados (fornecidos por métodos de coleta não-precisos). Então, há ainda um longo caminho para se entender o funcionamento completo dos ecossistemas, e, como se pode ver, os avanços continuam como a ciência praticada desde Galileu: suscitando mais dúvidas que respostas.

Apesar de ainda estarmos distantes de firmar uma parceria com a natureza, como desejavam os irmãos Odum, temos convicção de que “o caminho como as coisas se conduzem”, isto é, o modelo (Ecopath) adotado neste livro, pode ser um bom norteador para o manejo adequado de ecossistemas.

## Referências

- ANGELINI, R.; AGOSTINHO, A.A.; GOMES, L.C. Modeling energy flow in a large neotropical reservoir: a tool to evaluate fishing and stability. **Neotropical Ichthyology**, Mogi das Cruzes, v. 4, no. 2, p. 253-260, Apr./June 2006.
- ANGELINI, R.; AGOSTINHO, A.A.; GOMES, L.C.; COSTA, R.S.; LATINI, J.D. Análise ecossistêmica de reservatórios. In: RODRIGUEZ, L.; THOMAZ, S.M.; AGOSTINHO, A.A.; GOMES, L.C. (Org.). **Biocenoses em reservatórios**: padrões espaciais e temporais. São Carlos: RiMa, 2005. cap. 25, p. 311-321.
- CAMPBELL, D.E. “Prophet where art thou?”. Partnership with nature and other prophecies of H.T. Odum. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 178, no. 1-2, p. 255-262, Oct. 2004.
- CHRISTENSEN, V. Ecosystem maturity - towards quantification. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 77, no. 1, p. 3-32, 1995.
- CHRISTENSEN, V.; PAULY, D. Changes in models of aquatic ecosystems approaching carrying capacity. **Ecological Applications**, Washington, D.C., v. 8, no.1, suppl., p. 104-109, Febr. 1998.

- DINIZ-FILHO, J.A.F.; RANGEL, T.F.L.V.B. Macroecologia e ecologia geográfica. In: COELHO, A.S.; LOYOLA, R.D.; SOUZA, M.B.G. (Ed.). **Ecologia teórica: desafios para o aperfeiçoamento da ecologia no Brasil**. Belo Horizonte: Ed. O Lutador, 2004. p. 91-104.
- MÜLLER, F. State-of-the-art in ecosystem theory. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 100, p. 135-161, 1997.
- ODUM, E.P. **Fundamentals of ecology**. 2<sup>nd</sup> ed. Philadelphia: W.B. Saunders, 1971. 574 p., ill.
- ODUM, E.P. The strategy of ecosystem development. **Science (Washington DC)**, v. 164, p. 262-270, Abr. 1969.
- ODUM, H.T. Primary production in flowing waters. **Limnology & Oceanography**, Waco, v. 1, no. 2, p. 102-117, 1956.
- PERKINS, R.J. Information theory and ecology. **International Journal of Ecology and Environmental Sciences**, New Delhi, v. 4, p. 61-73, 1978.
- PIMM, S.L. The complexity and stability of ecosystems. **Nature (London)**, v. 307, no. 5949, p. 321-326, Jan. 1984.
- ULANOWICZ, R.E. **Ecology, the ascendent perspective**. New York: Columbia University Press, 1997. 201 p., ill. (Complexity in ecological systems series).
- ULANOWICZ, R.E. **Growth and development: ecosystems phenomenology**. New York: Springer-Verlag, 1986. 203 p., ill.