

*Os lagos e lagoas de água doce do mundo contêm cerca de 100 vezes mais água que os rios. Conhecer melhor tais ambientes é condição básica para o uso racional da água e a manutenção da qualidade desse recurso essencial. Os estudos, porém, devem levar em conta as variações que os sistemas aquáticos apresentam, nos aspectos espacial e temporal, para que o conhecimento gerado possa realmente ser aplicado na recuperação de ambientes degradados e na preservação de mananciais ainda intactos.*

**Paulo Pedrosa e  
Carlos Eduardo Rezende**  
*Laboratório de Ciências Ambientais,  
Centro de Biociências  
e Biotecnologia,  
Universidade Estadual  
do Norte Fluminense*

# As mu

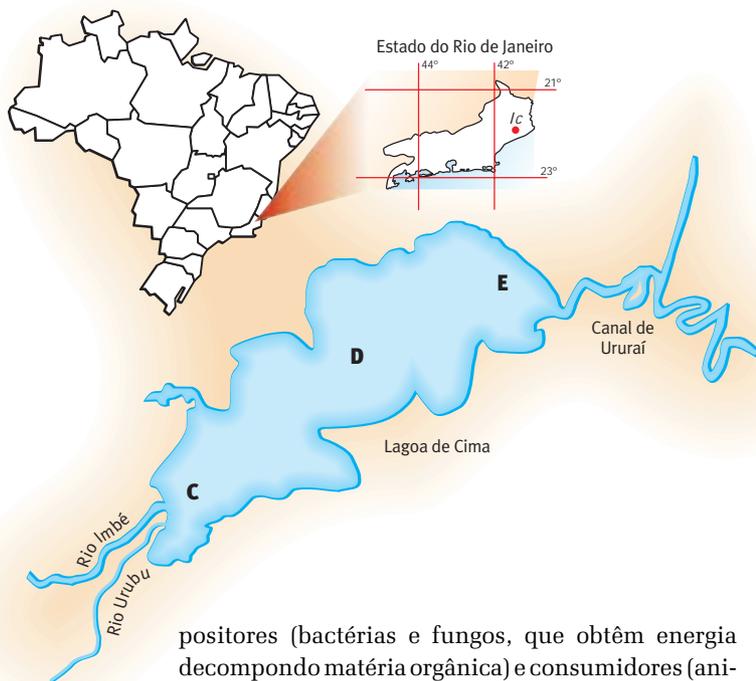
**A crescente demanda pela água**, a escassez desse recurso e o mau uso dos mananciais tornam cada vez mais necessários os estudos de limnologia. Essa ciência trata da ecologia de sistemas aquáticos continentais, como lagos, lagoas e lagoas, mas pode também ser aplicada a rios, estuários, baías e sistemas artificiais (açudes, represas e reservatórios). Nos últimos tempos, a proposta de que o estudo de um corpo d'água deve levar em conta toda a bacia de drenagem à qual está associado deu à limnologia maior abrangência e responsabilidade.

FOTO: VLADIMIR RIBEIRO

# Muitas faces de uma lagoa

Os desafios aumentam à medida que relatórios de governos e de entidades civis confirmam o mau uso da água e apontam problemas emergenciais nessa área. Esse quadro reforça a idéia de que o uso, a gestão e a proteção dos recursos hídricos devem ser orientados por pesquisas criteriosas. No entanto, as variações de um corpo d'água para outro, e mesmo no interior de um mesmo sistema, além das alterações ambientais causadas por atividades humanas, exigem que tais estudos levem em conta os aspectos espaciais e temporais.

Em limnologia, o 'meio' primário de estudo é a água. A grande riqueza estrutural e funcional dos sistemas aquáticos é o resultado da associação desse 'meio' a outros elementos, que podem ser biológicos (os organismos que ali vivem) e não-biológicos (radiação solar, ventos, natureza física e química do sedimento etc.). Os organismos presentes na água podem ser divididos em produtores primários (alguns gêneros de bactérias, todas as algas e as plantas aquáticas, que transformam luz solar em energia química, também chamados de autótrofos), decom-



**Figura 1.** Localização da lagoa de Cima e de algumas estações (pontos) de coleta utilizados nos estudos da Universidade Estadual do Norte Fluminense

positores (bactérias e fungos, que obtêm energia decompondo matéria orgânica) e consumidores (animais que se alimentam de outros organismos).

## A classificação dos lagos e lagoas

Esses sistemas podem ser classificados de muitas maneiras, dependendo da base de classificação utilizada. Um dos fatores mais importantes para a limnologia refere-se ao 'estado nutricional' de sistemas aquáticos, definido pelo teor de alguns elementos (nitrogênio e fósforo, por exemplo) ou pela biomassa de algas e plantas aquáticas. Essa riqueza define o 'estado trófico' do ambiente. Um corpo d'água pode ser ultra-oligotrófico, oligotrófico, mesotrófico, eutrófico e hipereutrófico (o estado nutricional aumenta a cada nível), mas nem sempre a distinção entre esses estágios é clara (ver 'Eutrofização artificial: a doença dos lagos' e 'Ambientes, barragens e represas', no suplemento especial de *CH Eco Brasil*, maio de 1992).

Quando um corpo d'água apresenta eutrofização, causada por um aumento dos nutrientes inorgânicos ou orgânicos, é difícil prever a 'qualidade' dos produtos biológicos gerados pelas relações ecológicas. Alguns sistemas eutróficos apresentam grande diversidade de organismos e fornecem produtos comestíveis e de interesse para o homem. Mas outros tipos de eutrofização levam a condições críticas do ponto de vista ecológico/ambiental, com redução da biodiversidade e favorecimento de altas densidades populacionais, muitas vezes de uma só espécie de alga, o que quase sempre reduz a 'qualidade' da água e dos produtos do sistema aquático.

A matéria orgânica pode ser gerada dentro do corpo d'água (autogênica) ou vir de fora (alogênica). Quando um sistema tem suas águas 'tingidas' por substâncias húmicas, geradas pela decomposição de fontes orgânicas vegetais, é chamado de distrófico – nesse caso, a fonte principal de matéria orgânica tende a ser alogênica. Outras formas de classificação levam em conta a 'função trófica' do sistema aquático como um todo (podem produzir matéria orgânica, consumi-la ou apresentar equilíbrio entre produção e consumo) ou a estrutura física da coluna d'água, entre o fundo e a superfície (nesse caso, os sistemas podem ser holomíticos, quando há circulação vertical em toda a coluna, ou meromíticos, quando a circulação fica restrita a estratos horizontais separados, por exemplo, por diferenças de temperatura e densidade da água). Outras tipologias são definidas pela origem geológica (há lagos tectônicos, fluviais, costeiros, glaciais, vulcânicos e outros) e pela posição geográfica, associada à climatologia (há lagos tropicais, subtropicais, temperados e árticos).

Caracterizar a estrutura e a função de sistemas aquáticos exige uma abordagem científica e metodológica que gere dados consistentes. Para garantir a compreensão ampla e holística dos processos ecológicos, um modelo de estudo limnológico deve levar em conta as escalas espaciais e temporais. Também é necessário considerar os ambientes ter-

**Figura 2.** Referências visuais da lagoa de Cima: rios Imbé e Urubú (A), banco de macrófitas perto do litoral sudeste (B), área central (C) e floresta secundária às margens da lagoa (D)



**Figura 3.** Outras referências visuais estão associadas a atividades humanas, como o uso do solo para criação de gado bovino (A), o lazer (B), a pesca (C) e o lançamento de resíduos sólidos (D)



FOTOS CEDIDAS PELOS AUTORES

restres marginais, importantes fontes de interações e impactos nos corpos d'água. Atualmente, muitas atividades humanas (desmatamento, uso de terras para agricultura ou pecuária, despejo de efluentes domésticos e industriais e resíduos sólidos, pesca irregular e outras) afetam as características dos ambientes aquáticos, tornando necessário avaliá-las periodicamente.

Para demonstrar a importância das variações espaciais e temporais, usaremos o exemplo da lagoa de Cima (figura 1) e dos ambientes a ela associados. Localizada no município fluminense de Campos dos Goytacazes, essa lagoa tem cerca de 13,5 km<sup>2</sup>, recebe águas dos rios Imbé (do tipo lótico, ou seja, de águas rápidas) e Urubu (do tipo lântico, ou seja, de águas paradas ou lentas), e é drenada pelo canal de Ururai (de águas também rápidas). Os períodos de seca e chuva, bem definidos na região, estão associados respectivamente às estações de inverno e verão. Dependendo da estação, a profundidade máxima varia de 2,5 a 5 m.

Os estudos limnológicos na lagoa de Cima, iniciados nos anos 70, envolveram pesquisadores como Lejeune P. H. de Oliveira, Francisco de Assis Esteves, Vera L. de Moraes Huszar e outros. Atualmente, pesquisadores do Laboratório de Ciências Ambientais da Universidade Estadual do Norte Fluminense contribuem para uma nova avaliação e caracterização do seu cenário ambiental. O exemplo

dessa lagoa permite ressaltar a importância de algumas 'referências' na aplicação de conceitos limnológicos.

### Referências visuais: a observação direta

As interações entre os componentes naturais e os introduzidos pelo homem são freqüentes e complexas em ambientes lacustres. Na lagoa de Cima, observações diretas permitem reconhecer algumas referências visuais dessas interações.

Algumas estão associadas a características próprias da lagoa em estudo (figura 2). No ponto de confluência dos rios Imbé e Urubu, por exemplo, é possível perceber os efeitos diferentes dessas duas bacias de drenagem sobre a lagoa. A presença de macrófitas (plantas aquáticas) nas margens próximas à área de entrada dos dois rios indica que as condições existentes ali são favoráveis a esses vegetais. Já na área aberta e central (zona limnética) da lagoa não há macrófitas flutuantes nem submersas, sugerindo que a produção primária de matéria orgânica é baseada no fitoplâncton, o conjunto dos vegetais microscópicos ou diminutos que vivem em suspensão na água. Nota-se ainda, nas áreas marginais, fragmentos de floresta secundária.

O impacto de atividades humanas sobre a lagoa e os ambientes marginais pode ser detectado em ▶

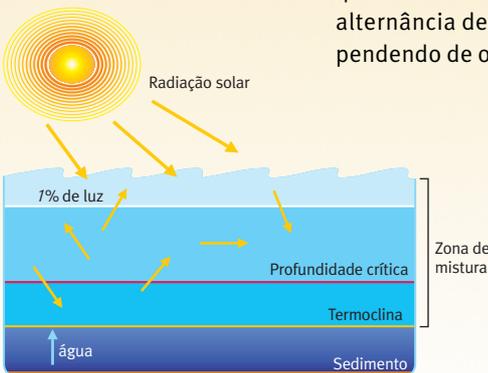


## A coluna d'água

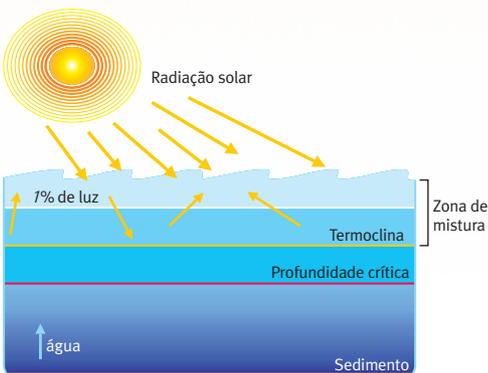
Determinar a estrutura física (térmica e óptica) da coluna d'água, quando essa estrutura não é homogênea, é importante para avaliar a formação e o crescimento do fitoplâncton. A estrutura térmica é definida pela 'termoclina', que divide essa coluna em camadas com temperaturas diferentes: uma superior ('epilímnio', ou zona de mistura) e outra mais profunda ('hipolímnio'). Já a estrutura óptica depende da penetração da radiação luminosa responsável pela fotossíntese (com comprimento de onda de 400 a 700 nanômetros). A parte da coluna d'água até a profundidade em que essa radiação equivale a 1% da que incide logo abaixo da superfície é denominada zona eufótica.

Outra informação de interesse é a profundidade crítica, limite em que o balanço entre produção primária (processo autotrófico) e respiração (processo heterotrófico) é igual a zero. A profundidade crítica situa-se sempre abaixo da zona eufótica.

As combinações entre a termoclina e a profundidade crítica podem revelar muito sobre o estado trófico de um sistema aquático. Em situações hipotéticas nas quais não haja limitação química e biológica ao crescimento do fitoplâncton, podem ocorrer dois tipos de combinação. No primeiro (figura 4), a termoclina está abaixo da profundidade crítica. Isso inviabiliza, ao longo do tempo, o crescimento do fitoplâncton, porque o balanço produção primária/respiração será negativo, em função da extensão da zona de mistura. Nesse caso, o sistema será fortemente heterotrófico: o fitoplâncton só crescerá se houver entrada de matéria orgânica de fontes externas (como a trazida por rios). No segundo (figura 5), a termoclina está acima da profundidade crítica, e portanto há condições para o crescimento do fitoplâncton. Nesse caso, pode ocorrer domínio tanto da autotrofia quanto da heterotrofia, ou uma alternância desses processos, dependendo de outros fatores.



**Figura 4.** Se a termoclina fica abaixo da profundidade crítica, o balanço entre produção primária e respiração é negativo e o fitoplâncton não cresce



**Figura 5.** Se a termoclina fica acima da profundidade crítica, o balanço é positivo e o sistema aquático pode ou não apresentar crescimento do fitoplâncton

diversas referências (figura 3), como a transformação da paisagem natural em pastagem, a pesca, o lazer e o lançamento de detritos pela população não-consciente. Esse reconhecimento do ambiente (objeto de estudo) e dos componentes associados a ele, através de observações diretas, é valioso para orientar o desenvolvimento de pesquisas limnológicas em suas diversas abordagens.

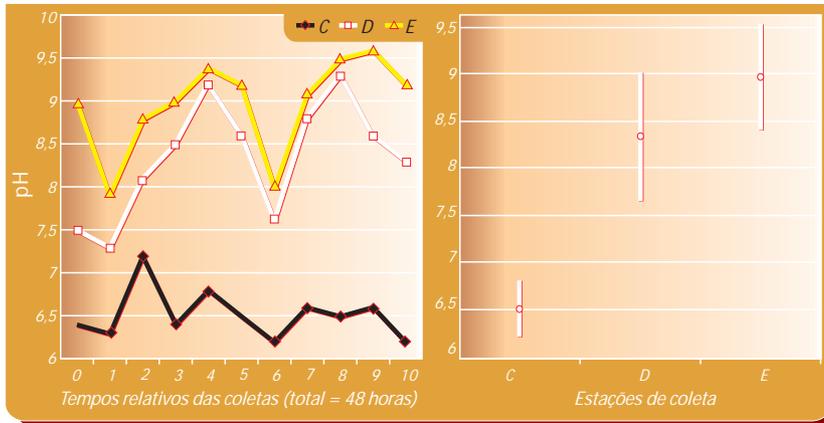
## Referências espaciais: diferenças internas

A caracterização espacial de ambientes aquáticos deve levar em conta as idéias de homogeneidade e heterogeneidade. Um ecossistema é homogêneo quando mostra características semelhantes, ou com pequena variação, entre suas diferentes partes, e é heterogêneo se apresenta compartimentos diferentes ou alterações em uma ou mais características ao longo do espaço físico.

A caracterização é feita pela análise de amostras coletadas nos eixos horizontal e vertical do sistema. Os estudos realizados na lagoa de Cima revelam que a estrutura vertical é em geral homogênea, com raras alterações (ver 'A coluna d'água'). A mistura das águas ocorre em toda a coluna, favorecida por baixas profundidades e fortes ventos. No espaço horizontal, porém, a lagoa mostra características tanto homogêneas quanto heterogêneas, dependendo da matriz de análise (sedimento, água, biota), da variável considerada (temperatura, pH, condutividade elétrica, alcalinidade e outros), da hora da coleta e da época do ano.

As medidas do potencial hidrogeniônico – ou pH (figura 6) – e da condutividade elétrica (figura 7) obtidas na lagoa de Cima em outubro de 1997, através da análise de 11 amostras coletadas ao longo de 48 horas, em três estações, mostram como duas variáveis podem ter comportamento distinto. Os valores de pH (calculados a partir das concentrações de íons hidrogênio) variam muito no espaço horizontal. No tempo 9, por exemplo, os valores são bem diferentes nas três estações: 6,6 (estação C), 8,6 (D) e 9,6 (E). Essa variação dos valores, em um mesmo (ou aproximado) momento de medição, indica alto grau de heterogeneidade espacial. A variação é clara principalmente entre a estação C (levemente ácida) e as outras (D e E, alcalinas), o que é reforçado pelas diferenças entre as médias de pH calculadas para cada estação.

As medições em dias diferentes devem ser feitas em horários aproximados, em especial se a variável estudada (física, química ou biológica) apresentar um padrão de comportamento variável ao longo do dia, como o pH na lagoa de Cima. Se isso não for feito, os resultados podem refletir uma variação



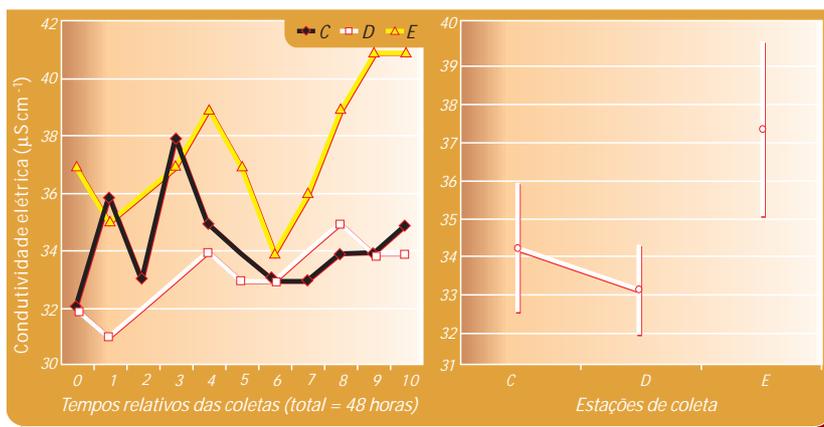
do uma força iônica relativamente semelhante entre as estações C, D e E.

Tais exemplos mostram, de modo simplificado, que é preciso considerar diferentes variáveis e realizar medições em momentos próximos para minimizar interferências que levem a uma caracterização espacial incorreta de um sistema aquático. Isso vale também para a comparação limnológica entre diferentes sistemas aquáticos. A consistência dos dados depende do número de repetições de amostragens em cada abordagem de estudo.

### Referências temporais: mudanças de ocasião

Pesquisas feitas em épocas diferentes revelam como as características de um corpo d'água podem mudar com o tempo. Um exemplo é a com-

**Figura 6. Valores de pH obtidos em 11 coletas (a primeira às 18h e as demais entre 6h e 18h, nos dois dias seguintes) nas estações C, D e E e valor médio de pH em cada estação – os valores diferentes mostram heterogeneidade**



**Figura 7. Valores de condutividade elétrica obtidos também em 11 coletas (idênticas às do pH) e valor médio em cada estação – a barra que une C e D representa igualdade estatística (homogeneidade) entre esses pontos**

mais nictemeral (ao longo das 24 horas do dia) do que espacial. Na lagoa de Cima, a variação nictemeral do pH é muito semelhante nas estações D e E, nas quais os menores valores estão no início da manhã (tempos 1 e 6) e os maiores entre o final da manhã e o início da tarde (tempos 4 e 8). Isso sugere forte influência das atividades metabólicas dos organismos que vivem nessa lagoa: a concentração de íons hidrogênio é reduzida pela fotossíntese e aumenta pela respiração.

No caso da condutividade elétrica, não houve um padrão sistemático ao longo das 48 horas do estudo. Os valores dessa variável são mais influenciados por fatores físicos (clima, hidrologia) e químicos (geologia local, solubilidade de minerais) e por impactos humanos (uso de fertilizantes, alterações da vegetação e outros) do que por fatores biológicos. No espaço horizontal da lagoa de Cima, a condutividade elétrica apresentou valores aproximados (média entre 34 e 37 microsie mens por segundo), indican-

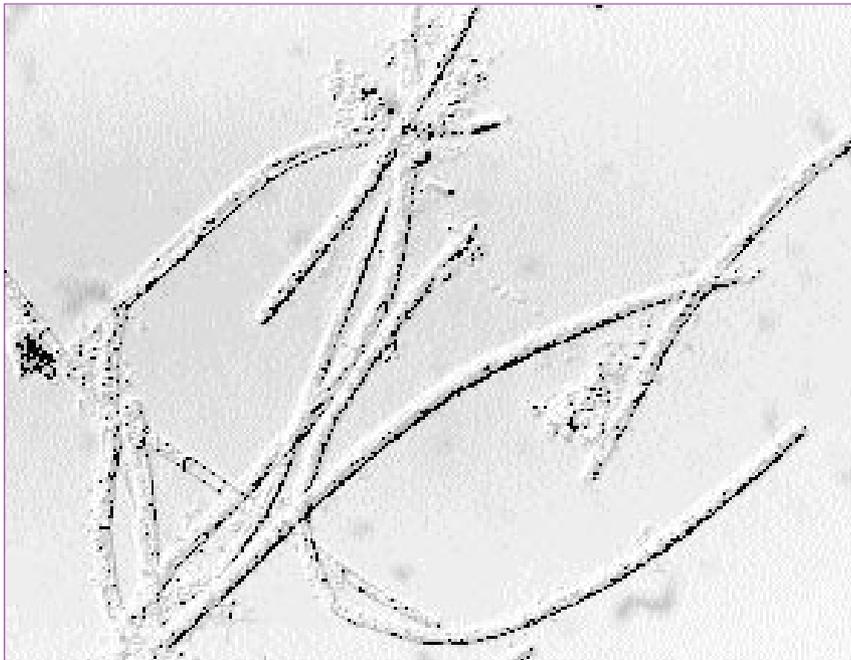
posição do fitoplâncton na lagoa de Cima: verificou-se em junho de 1995 um 'domínio' quase absoluto (figura 8) da cianobactéria *Cylindrospermopsis raciborskii*, mas curiosamente esse organismo não havia sido detectado em trabalhos anteriores, nos anos 70 e 80. Nesses estudos, as classes de algas Zygnemaphyceae, Chlorophyceae e Bacillariophyceae alternavam-se como dominantes no fitoplâncton.

O domínio de *C. raciborskii* (figura 9) tem sido associado, em diversos trabalhos científicos, a au-



**Figura 8. Participação relativa, em percentagem, das classes de algas (e da espécie cianofíceia *C. raciborskii*) na composição do fitoplâncton da lagoa de Cima em junho de 1995 – o percentual referente a *C. raciborskii* (em azul claro) faz parte do total atribuído às cianofíceas**

**Figura 9.** Dominante na lagoa de Cima em junho de 1995, *C. raciborskii* (imagem com aumento de 800 vezes) sequer havia sido detectada em estudos nos anos 70 e 80



mentos no grau trófico de ambientes lacustres. Na lagoa de Cima, o registro do domínio dessa espécie pode ser episódico, por ter sido realizada apenas uma amostragem, mas não deixa de ser uma informação limnológica, que deve ser usada com cuidado e critério. Uma avaliação mais precisa da composição e das mudanças no tempo da comunidade fitoplanctônica da lagoa depende de amostragens continuadas. Esse exemplo revela como as alterações ambientais podem afetar a composição de organismos de um corpo d'água e ainda trazer implicações negativas quanto ao uso dos recursos hídricos, já que *C. raciborskii* é apontada, em muitos trabalhos, como potencial produtora de uma substância tóxica para o fígado.

## A integração dos diferentes dados

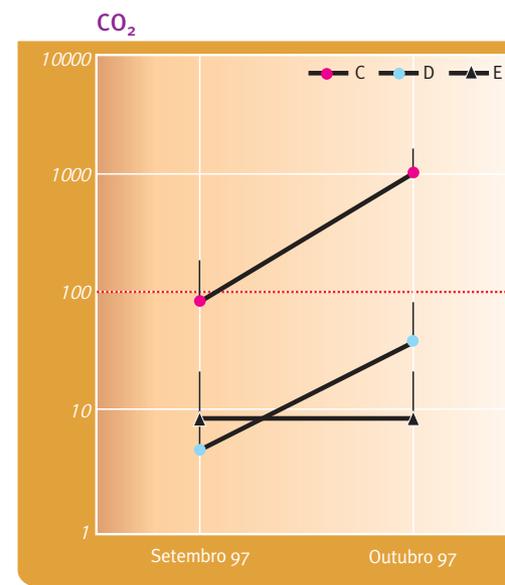
Medições da profundidade e do teor de clorofila *a* e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) na água da lagoa de Cima, feitas nas mesmas estações de coleta (C, D e E) em setembro e outubro de 1997 (figura 10), mostram outras diferenças de comportamento espaço-temporal. A profundidade revela as flutuações no nível da água, os valores de clorofila *a* indicam a biomassa vegetal (fitoplanctônica) e a saturação de  $\text{CO}_2$  mostra se há domínio de atividade autotrófica (menos de 100%) ou heterotrófica (mais de 100%), ou um equilíbrio físico e termodinâmico sem ou com participação biológica significativa (nesse último caso, a produção é igual à respiração).

Como esperado, a variação da profundidade, medida a cada 24 horas, foi igual nos três pontos,

e o teor de nutrientes na água, entre outros fatores.

Os percentuais médios de  $\text{CO}_2$  foram estimados em função de várias medições (temperatura da água, velocidade do vento, pH, condutividade elétrica e alcalinidade total) feitas em 11 amostras, coletadas nos horários das medidas de pH e condutividade. Os valores da clorofila *a* basearam-se em quatro amostras (duas às 6h e duas às 18h). Nos dois casos, foram claras as diferenças de comportamento espaço-temporal. Entre setembro e outubro de 1997, o teor de  $\text{CO}_2$  aumentou de 89% para 1.080% (mais de 10 vezes) no ponto C e de 5% para 40% no ponto D, mas a alteração foi mínima no ponto E. A clorofila *a* também mostrou grande variação: as concentra-

**Figura 10.** Valores de teor de  $\text{CO}_2$ , clorofila *a* e profundidade obtidos em setembro e outubro de 1997 – no gráfico referente ao  $\text{CO}_2$ , a escala é logarítmica e a linha tracejada indica o limite de supersaturação (acima de 100%)



ções, medidas em microgramas por litro ( $\mu\text{g/l}$ ), caíram no ponto C (de 49 para 2) e no ponto D (de 86 para 62), e aumentaram no ponto E (de 90 para 98).

As mesmas tendências observadas nos pontos C e D (aumento do  $\text{CO}_2$  e queda da clorofila *a*) têm uma explicação: o fitoplâncton, indicado pela clorofila, fixa carbono inorgânico dissolvido, em especial  $\text{CO}_2$ , na atividade fotossintética (autotrófica). Assim, a concentração menor de clorofila *a* indica menos biomassa fitoplanctônica, e nesse caso espera-se menor demanda bioquímica de  $\text{CO}_2$  por unidade de volume de água. No ponto C, a supersaturação de  $\text{CO}_2$  obtida em outubro indica intensa atividade de respiração (processo heterotrófico), mediada provavelmente pela comunidade bacteriana, que atua sobre a matéria orgânica trazida pelas águas do rio Imbé.

## Bases científicas para o uso da água

Os exemplos apresentados – de natureza física, química e biológica – revelam que os dados gerados por estudos limnológicos têm limitações de natureza espacial e temporal. A complexidade dos sistemas aquáticos torna relativa a validade de qualquer estudo, seja momentâneo ou pontual, seja de longa duração, com base anual. Muitas vezes, porém, é difícil alcançar a qualidade científica ideal, em função dos limitados recursos financeiros e da estrutura de apoio logístico ausente ou inadequada. Apesar desses problemas, é essencial buscar uma abordagem ideal nos estudos limnológicos, para orientar em bases científicas tanto a otimização do uso dos recursos hídricos quanto o direcionamento de atitudes preservacionistas.

Essa necessidade é mais bementendida quando se considera que 99% das águas doces superficiais (em estado líquido) da Terra estão em sistemas lacustres. A parcela restante, não menos importante, está nos rios. Tais águas somam 130 mil  $\text{km}^3$ , o que representa cerca de 0,01% do total de águas do planeta (1,4 bilhão de  $\text{km}^3$ ). Portanto, a questão do uso e gerenciamento da água, em especial a água doce, precisa ter um tratamento político e científico sério. As decisões políticas nessa área devem ser baseadas no conhecimento científico (ver 'Águas no Brasil: má utilização e falta de planejamento', em *CH* n° 110).

Nos sistemas lacustres, esse conhecimento ainda depende de mais estudos que levem em conta os aspectos espaço-temporais. Além disso, é preciso considerar que as informações limnológicas são influenciadas pelas relações entre o sistema lacustre e a bacia de drenagem a ele associada, pela intensidade e natureza da degradação e ocupação dessas bacias e das áreas marginais, e pela intensidade e natureza das atividades humanas no próprio sistema.

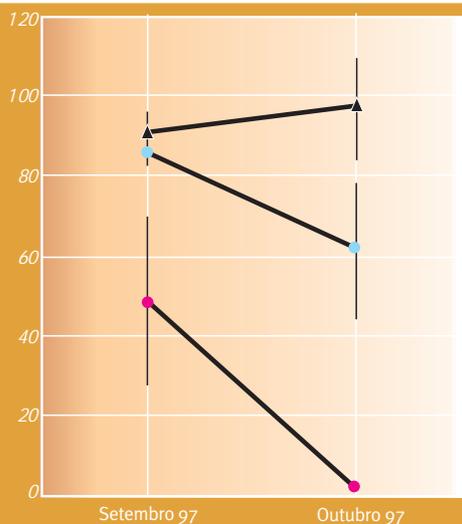
Embora o enfoque limnológico tenha sido, neste artigo, mais direcionado aos sistemas lacustres, as observações e referências aqui tratadas também podem ser aplicadas, até certo ponto, ao estudo de outros ambientes aquáticos, como baías e rios. Nos rios, isso pode ser feito principalmente em suas porções mais baixas, próximas ao nível do mar, ou em partes com baixa correnteza. Nesses casos são observadas, muitas vezes, alterações nas condições do meio líquido em função de atividades metabólicas associadas aos organismos que ali vivem. O estudo científico de fatores ambientais nos rios, portanto, deve considerar tais alterações.

Em limnologia, é essencial formar um banco de dados, além de integrar e cruzar os dados conseguidos para avaliar com maior precisão as variações ambientais e suas conseqüências nas características dos sistemas aquáticos estudados. O conhecimento detalhado de cada ambiente particular permitirá diagnosticar de maneira mais confiável os problemas ambientais e propor as medidas mais adequadas para a recuperação de corpos d'água com problemas de degradação inicial ou crônica. ■

### Sugestões para leitura

CARMOUZE, J.-P., *O metabolismo dos ecossistemas aquáticos: fundamentos teóricos, métodos de estudo e análises químicas*, São Paulo, Edgar Blücher/Fapesp, 1994.  
WETZEL, R.G., *Limnology*, Filadélfia, W. B. Saunders, 1975.

Clorofila *a*



Profundidade

