

MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS: EFEITOS SOBRE AS ÁGUAS CONTINENTAIS SUPERFICIAIS



09

Dimensão
ECOLÓGICA

INTRODUÇÃO

A verdade hoje é irrefutável: o clima da Terra está mudando, e a velocidade dessa mudança já é preocupante. Segundo Houghton [10], a temperatura no Reino Unido, por exemplo, e em boa parte da Europa deverá aumentar entre 3 e 5°C durante a primeira metade deste século. Os resultados recentes divulgados nos relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas [12] indicam que, no período de 200 anos, entre 1900 e 2100, a temperatura média global pode aquecer entre 1,4 e 5,8°C, o que representa um aquecimento mais rápido do que o verificado no século XX e que, aparentemente, não tem precedente durante, pelo menos, os últimos 10.000 anos [18].

Tal mudança foi inequivocamente atribuída aos impactos antropogênicos [12], saíram do círculo restrito da comunidade científica e passaram a causar inquietação na opinião pública, principalmente em função de eventos extremos e mesmo catastróficos de clima, como as ondas de calor, inundações e ciclones, promovendo grande pressão no sentido de tomadas de decisões políticas em nível mundial.

O planeta Terra foi chamado de “Planeta Azul” ou “Planeta Água” quando visto do espaço pelo primeiro astronauta, na década de 1960. Essa beleza singular se deve, sem dúvida alguma, às grandes massas de água que compõem sua hidrosfera e, em particular, à água salgada líquida dos oceanos que cobre cerca de dois terços da superfície da Terra. Apesar dessa grande abundância de água, somente 2,6% do volume total consiste em água doce. Desse percentual, 99,7% encontra-se grandemente indisponível, por estar congelado formando as calotas polares (76,4%) ou fazer parte de aquíferos (22,8%). Em outras palavras, apenas uma fração ínfima (0,3% dos 2,6%) do total dos recursos de águas doces estão prontamente acessíveis como água superficial, seja ela área alagada, rio, lago ou represa [16].

Carlos E. de M. Bicudo
Denise de C. Bicudo

Seção de Ecologia,
Instituto de Botânica

O termo água refere-se ao elemento natural desvinculado de qualquer uso ou utilização. O termo recurso hídrico é, por sua vez, a consideração da água como um bem econômico passível de utilização para tal fim. Na visão antropocêntrica de lidar com o bem natural, o valor máximo da água está em servir o homem. Entretanto, na perspectiva ecológica presentemente adotada, o valor máximo está na preservação e no uso sustentado desse recurso. Assim, a visão sistêmica reconhece a inter-

dependência fundamental de todos os ciclos de energias e matéria da Terra e o fato de que nós estamos, seja como indivíduo, seja como sociedade, inseridos nesses processos cíclicos da natureza [24]. Nesta perspectiva, a água deve ser vista como um bem tanto econômico quanto natural, do qual depende a manutenção da vida no planeta onde o homem é parte integrante do todo.

É fundamental reconhecer, pois, que um dos grandes desafios do século XXI é a crise da água, que resulta da redução global de seu suprimento por conta do aumento da população, dos usos múltiplos e da perda dos mecanismos de retenção da água, tais como a remoção das áreas alagadas, o desmatamento, a perda de volume por sedimentação de lagos e represas e a degradação dos ambientes aquáticos. Essa crise tem enorme importância e interesse geral, pois impõe dificuldades ao desenvolvimento, aumenta a incidência de doenças veiculadas pela água, produz estresse econômico e social, aumenta as desigualdades entre regiões e países, além de colocar em risco a manutenção da vida no planeta [30].

Muito tem sido escrito sobre os efeitos das mudanças climáticas globais nos mares e oceanos. Em contrapartida, muito pouco ainda foi abordado sobre tais efeitos nas águas continentais. Não foi a finalidade deste trabalho esgotar a informação sobre o efeito das mudanças climáticas globais sobre as águas doces, mas, sim, a de reunir algumas publicações e tendências relevantes que mostrassem claras tais influências para que, alertas, os cientistas possam investigar mais mediante programas nacionais e internacionais e, conseqüentemente, fornecer informação confiável sobre essa temática; ademais, para que os tomadores de decisão possam assumir de modo consciente seu papel e definir as melhores medidas e estratégias políticas a serem tomadas para a mitigação desse novo desafio sobre a água, um bem natural já grandemente ameaçado.

MUDANÇAS CLIMÁTICAS CONSTITUEM EVENTOS RÁPIDOS OU DE LONGA DURAÇÃO?

Mudanças climáticas podem ocorrer tanto abrupta quanto lentamente. Mudanças abruptas foram descritas por Thompson *et al.* [29] em geleiras de várias partes do mundo. A retração de geleiras situadas fora das regiões polares está ocorrendo de forma acelerada, especialmente as localizadas na região dos Andes peruanos, que contêm ao redor de 70% das geleiras tropicais de todo o mundo. Os referidos autores documentaram, a partir de fotografias aéreas feitas em 1963 e mapas posteriores, a retração da ordem de 60 m ano⁻¹ da Geleira de Qori Kalis nos últimos 14 anos (1991-2005), mas de 6 m ano⁻¹ durante os primeiros 15 anos (1976-1990), ou seja, uma retração dez vezes mais rápida no último período. Taxa acelerada de retração também foi observada em seis outras geleiras situadas na Cordilheira Branca, também localizada no Peru.

Há inúmeras evidências de que o período decorrido desde o início até a metade do Holoceno foi mais quente e mais úmido do que a última metade do mesmo período. Essas evidências provêm de estudos realizados em locais de baixas e altas latitudes situados nos trópicos, como, por exemplo, no Monte Kilimanjaro (África Equatorial) e no Monte Huascarán (Andes Tropicais do Peru). Inúmeras evidências arqueológicas e geológicas mostram que ocorreu, no final do Holoceno, um resfriamento abrupto e generalizado do clima mundial, com regiões frias e secas e outras frias e úmidas. Nas áreas em que houve precipitação abundante, formaram-se geleiras.

O rápido recuo recente das geleiras e sua aceleração em escala quase universal sugerem que o aumento global da temperatura pode ter interrompido a progressão natural do resfriamento do Holoceno. Essas observações sugerem que no lapso de um século as atividades humanas podem ter deflagrado o surgimento de condições climáticas próximas daquelas que prevaleceram há 5.000 anos, durante o início do Holoceno. Conforme Thompson *et al.* [29], se este for o caso, a retração das geleiras pode sinalizar que o clima excedeu o ponto crítico e que a maioria das geleiras de baixas e altas latitudes tenderá, por isso, a desaparecer futuramente.

IMPACTOS SOBRE O CICLO HIDROLÓGICO

Toda a água do planeta está em contínuo movimento, em um verdadeiro ciclo formado pelas reservas sólida, líquida e gasosa. Conforme mencionado antes, maiores temperaturas na atmosfera da Terra levarão a uma diminuição da fase sólida da água, com perda e retração das geleiras e decréscimo de seu congelamento nos sistemas aquáticos. Trará, por conseguinte, implicações para a conservação desse recurso (qualidade da água) e para o suprimento de água nos locais em que o degelo é fonte importante de água doce. O aquecimento significa, ainda, em termos hidrológicos, maior potencial de evaporação e, conseqüentemente, maiores quantidades de precipitações na forma de chuva, neblina e neve.

Conforme Rebouças [23], existem estimativas de que a mudança climática global será responsável por cerca de 20% do aumento da precipitação nas regiões já ricas nesse elemento, com aumento da frequência de tempestades ou a redução equivalente nas regiões onde a disponibilidade da água já é relativamente escassa, ou seja, enchentes e secas serão mais freqüentes. Assim, as irregularidades na ocorrência das precipitações serão especialmente observadas, provavelmente havendo mais chuvas nas áreas úmidas, enquanto que em regiões mais propícias à seca e até mesmo em algumas regiões tropicais e subtropicais as precipitações poderão ser muito mais irregulares. Como será abordado mais adiante, tais mudanças e suas conseqüências para a qualidade ecológica dos lagos europeus já vêm sendo noticiadas [15,25].

AQUECIMENTO GLOBAL E QUALIDADE ECOLÓGICA DOS ECOSISTEMAS AQUÁTICOS

Mudanças na comunidade de algas e cianobactérias

A duração de uma geração do fitoplâncton (as microalgas livre-flutuantes nas massas de água) pode ser até bastante curta, sendo usualmente menor do que cinco a sete dias durante o período vegetativo. Com isso, um ciclo de mudança climática pode acomodar de 200 a 500 gerações de algas plancônicas. Ainda que não esteja claro como as comunidades de algas plancônicas irão se modificar, esse rápido suceder de gerações deverá propiciar a seleção das formas mais bem adaptadas às novas condições ambientais.

O estudo da ecologia do fitoplâncton pode, por conseguinte, constituir uma valiosa ferramenta e excelente modelo para entender a forma de atuação das mudanças climáticas sobre os seres vivos, com resultados que podem ser aplicados às comunidades de organismos maiores, que não conseguem mostrar as possíveis mudanças adaptativas em curtos períodos de tempo. As informações sobre as mudanças da comunidade fitoplancônica são ainda bastante pontuais, mas algumas tendências estão emergindo a partir de estudos de casos realizados, principalmente, em regiões temperadas do continente europeu.

Alguns resultados têm causado grande preocupação, uma vez que o aquecimento global parece intensificar os efeitos da eutrofização, trazendo, em conseqüência, alterações nas comunidades algais.

O processo da eutrofização artificial é hoje considerado um fenômeno global, responsável pela grande degradação dos ecossistemas aquáticos. É objeto de preocupação crescente a partir da década de 1960 e está longe de ser resolvido, mormente nos países considerados em desenvolvimento. A eutrofização artificial resulta do enriquecimento de nutrientes, principalmente de fósforo e nitrogênio, que são despejados de forma dissolvida ou particulada nos rios, lagos,

• **Eutrofização artificial:** *Enriquecimento da água por ação antrópica resultante do aumento, principalmente, da concentração de nitrogênio e fósforo, que causa deterioração da qualidade da água e efeitos deletérios à biodiversidade do ambiente.*

represas e áreas alagadas a partir de lançamentos de esgotos domésticos e industriais (fontes pontuais) e de aportes de fertilizantes aplicados na agricultura (fontes difusas). De modo geral, a eutrofização leva à grande simplificação estrutural da comunidade aquática, aumento da produtividade, crescimento não controlado de macrófitas aquáticas e floração de cianobactérias (crescimento exacerbado desses organismos, chegando a ≥ 20.000 células ml^{-1}), algumas das quais tóxicas, com produção de cianotoxinas (Figuras 1 e 2). Esses metabólitos atuam nos mamíferos em diferentes níveis, afetando o fígado, as sinapses nervosas, o trato gastrointestinal, podendo, inclusive, levar à morte. Tem, com isso, se tornado um problema bastante sério em águas de abastecimento [26]. Tundisi [30] discorreu, com extrema propriedade, sobre os grandes impactos ambientais, econômicos e à saúde humana resultantes do processo de eutrofização.

A despeito dos esforços despendidos nos últimos 20-30 anos e dos grandes programas direcionados ao combate da eutrofização na Europa e na América do Norte, principalmente no que tange à redução do aporte pontual de fósforo, as fontes difusas de nutrientes permanecem elevadas, em particular nos países com intensa atividade agrícola [15]. Além desse aspecto, fortes indícios apontam para o agravamento da eutrofização e a menor eficácia dos processos de recuperação de lagos rasos em decorrência do aquecimento global. Vale destacar que, em âmbito mundial e em particular nos trópicos, a maior parte dos



Figura 1. Manchas verdes de cianobactérias na superfície da água (floração) (foto: Denise de C. Bicudo).



Figura 2. Represa eutrófica. As manchas azuis no caule das plantas representam as cianobactérias secas, após o abaixamento do nível da água (foto: Denise de C. Bicudo).

ambientes aquáticos continentais é rasa [6], com profundidades médias que não excedem 5 m, e que justamente esses ecossistemas são os mais vulneráveis às mudanças climáticas.

O maior lago raso da Europa Central (Lago Balaton, Hungria) passou por amplo programa de restauração no início da década de 1980, que resultou na redução de pelo menos 50-60% de sua carga de fósforo, seguida pelo declínio de cianobactérias. Entretanto, florações intensas de *Cylindrospermopsis raciborskii*, uma cianobactéria fixadora de nitrogênio e potencialmente tóxica, foram observadas em alguns verões após a recuperação do ambiente (Figura 3). Uma característica ecológica importante dessa espécie é sua aparente independência das cargas externas de fósforo, desde que sua necessidade seja suprida, como, no caso do Lago Balaton, a partir da acumulação intracelular de fósforo presente no sedimento lacustre durante seu estágio de repouso no inverno. Com base em estudos observacionais de longa duração e experimentais, foi verificado que a faixa ótima de germinação dos acinetos (estrututa de resistência) dessa alga está entre 21-22°C, encontrada nos sedimentos do Lago Balaton apenas nos anos excepcionalmente quentes. Conforme Padisák [21], essa cianobactéria entra, invariavelmente, em floração sempre que a temperatura do ar no verão desvia positivamente

• **Cianobactérias:**
Organismos extremamente primitivos, sem núcleo nem plastídios diferenciados, fotossintetizantes, que vivem sobre a Terra desde há 2,5 bilhões de anos (Pré-Cambriano). Algumas espécies são produtoras de substâncias tóxicas.

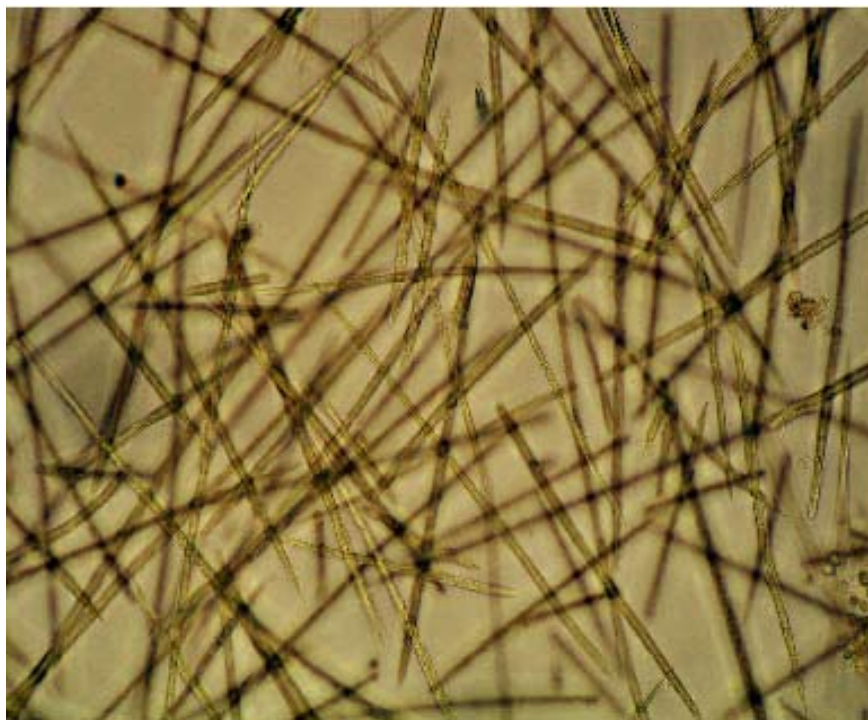


Figura 3. Campo do microscópio mostrando a quantidade de espécimes da cianobactéria *Cylandrospermopsis raciborskii*, *Planktothrix agardhii* e *Aphanizomenon gracile* encontradas durante uma floração (foto: Luciane O. Crossetti).

em cerca de 2°C da média dos últimos 30 anos. Assim sendo, foi possível prognosticar uma tendência de florações mais intensas e mais persistentes, independente das mudanças de fertilidade do Lago Balaton, desde que o reservatório de fósforo no sedimento permanecesse ativo e que as temperaturas do ar fossem mais elevadas em pelo menos 2°C.

Florações da cianobactéria tóxica *Planktothrix rubescens* observadas a partir de 1996, após a restauração do maior lago da França (Lago de Bourget), também foram associadas ao aquecimento global junto com a redução da carga de fósforo. Após a restauração do lago, a cianobactéria foi favorecida pela maior transparência da água, menor disponibilidade de fósforo orgânico (aumentando sua competitividade) e pelos períodos mais prolongados de estratificação da água (estabilidade), estes últimos associados ao aquecimento global [13].

Em termos de grandes grupos de algas, experimentos controlados realizados com microcosmos de 10 L de capacidade mostraram respostas significativas do fitoplâncton às simulações de cenários com estações mais quentes durante a primavera em lago de região temperada [5]. Tais resultados, acoplados a estudos de monitoramento de série histórica, permitiram concluir que as cianobactérias respondem mais prontamente ao aumento da temperatura do que as algas verdes e diatomáceas, já que apresentaram maiores taxas de crescimento e picos de abundância com o aquecimento do clima.

A aplicação de um modelo preditivo sobre o efeito das mudanças da turbulência da água (mistura da coluna da água) sobre a competição pela luz em espécies do fitoplâncton, que flutuam ou sedimentam, também forneceu dados esclarecedores sobre o efeito do aquecimento global, já que a estabilidade da água é fortemente controlada por fatores climáticos. Tal avaliação

foi feita a partir de um estudo experimental que simulou condições de mistura da coluna da água em um lago hipereutrófico mais profundo (profundidade média = 18 m e máxima = 30 m) situada na Holanda, durante o verão mais quente da Europa nos últimos 500 anos [11]. As mudanças observadas de substituição de espécies foram previsíveis e demonstraram que aquelas adaptadas à flutuação, incluindo a cianobactéria tóxica *Microcystis*, foram favorecidas durante os períodos mais quentes e de ventos fracos, ou seja, nos períodos de maior estabilidade térmica da coluna d'água (Figura 4). Como conclusão, os autores previram a maior incidência de florações de cianobactérias tóxicas com o aumento das temperaturas durante o verão nas regiões de clima temperado.

Em síntese, o conhecimento atual aponta para o maior favorecimento de cianobactérias e de florações tóxicas, principalmente, porém não apenas em lagos rasos, sob influência do aquecimento global.

IMPACTO SOBRE A TRANSPARÊNCIA DOS ECOSISTEMAS AQUÁTICOS RASOS

A preocupação com os ambientes aquáticos rasos é justificada não apenas pela dominância desses sistemas em escala mundial e pelos serviços ambientais que oferecem, mas também pelo fato de o processo de eutrofização nesses ambientes ser catastrófico, em função da intensa interação entre o sedimento e a coluna d'água. Esses aspectos têm propiciado, ao menos no continente europeu e na América do Norte, a integração dos esforços de gestores, ictiólogos (especialistas em peixes), limnólogos (especialistas em ecologia de águas continentais) e autoridades responsáveis pela gestão da água [9].

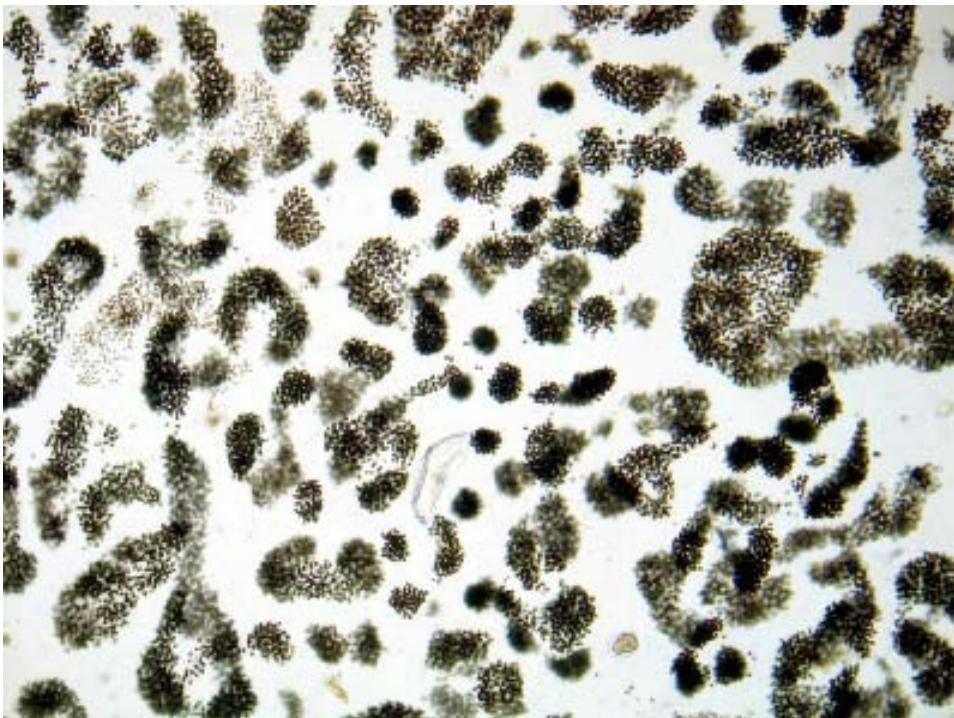


Figura 4. Campo do microscópio mostrando a quantidade de espécimes de cianobactérias das espécies *Microcystis aeruginosa* e *Microcystis panniformis* comumente encontradas durante uma floração (foto: Luciane O. Crossetti).

Entre as variáveis que o clima pode exercer grande impacto nos lagos rasos está a **transparência**, de particular interesse por ser uma das medidas utilizadas para avaliar o sucesso das ações de restauração [19]. Essa variável constitui um fator-chave para as mudanças de estados de equilíbrio nos ecossistemas rasos.

Ao longo de um gradiente de eutrofização, a mudança das comunidades de lagos rasos pode ser vista como um “continuum”, no qual as substituições graduais de espécies podem ser interrompidas, em um dado ponto crítico, para dar lugar à mudança mais abrupta para um estado de equilíbrio dominado por diferentes espécies. Assim, a teoria dos estados alternativos de equilíbrio pode ser aplicada às mudanças entre estados ecológicos de lagos rasos, cujos extremos são caracterizados pelos estados de águas claras e águas turvas [27]. No primeiro deles, a elevada transparência da água permite o profuso desenvolvimento de macrófitas submersas. No segundo, quando as cargas externas de nutrientes ultrapassam níveis críticos, há expressivo aumento de biomassa algal com dominância de algas verdes e, principalmente, de cianobactérias, levando à reduzida penetração de luz, que, por sua vez, impede a manutenção das plantas submersas. Nesse estado de equilíbrio, mecanismos de retroalimentação química e biológica são estabelecidos, dificultando sobremaneira a recuperação do ecossistema.

Conforme destacado por Scheffer & van Nes [27], uma questão relevante que surge é a avaliação do impacto das mudanças climáticas sobre a possibilidade de os lagos rasos passarem para o estado de águas turvas.

Durante os últimos 20-30 anos, muito esforço foi direcionado para melhorar a qualidade ecológica de lagos rasos na Europa e nos EUA, a partir da redução dos aportes externos de fósforo. Tais estudos foram grandemente impulsionados pela introdução de programas em nível da Comunidade Européia [8] e permitiram sínteses de longas séries temporais (5-35 anos, média = 16 anos) sobre o processo de recuperação da eutrofização (reoligotrofização) de 22 e de 35 lagos [14,15]. Os ambientes estudados abrangeram lagos rasos a profundos (profundidade média < 5 até 177 m), de região temperada e subtropical e altitudes variando de 0 a 481 m. A grande maioria dos lagos é da zona temperada do norte, havendo apenas um estudo de caso para lago subtropical, em função da escassez e mesmo da ausência de informação de séries históricas para regiões tropicais/subtropicais.

As principais tendências observadas foram: (a) o aporte interno de fósforo provocou atraso na recuperação (autofertilização a partir do sedimento decorrente da baixa concentração de oxigênio no fundo do ecossistema); (b) um novo estado de equilíbrio para o fósforo total foi atingido após 10-15 anos e para o nitrogênio; **após < 5-10 anos**; (c) a redução da biomassa de algas acompanhou a diminuição de fósforo, indicando que o limite por nutriente foi o fator-chave nesse processo; (d) aumento da transparência da água; (e) elevação da relação entre o nitrogênio total e fósforo total em 80% dos lagos; (f) freqüente redução da biomassa de algas e de peixes, com aumento proporcional da quantidade de peixes piscívoros (peixes predadores de peixes); e (g) aumento da proporção entre biomassa algal e zooplâncton (em especial herbívoros), indicando a maior influência do controle descendente (cadeia alimentar) sobre as algas.

Com base, principalmente, na análise comparativa das respostas observadas em 21 lagos da região temperada do globo (Dinamarca) e em um da subtropical (Estado da Flórida, EUA) [14,15] e também de outras contribuições [19, 27], foi possível inferir algumas tendências esperadas sobre a qualidade ecológica dos lagos temperados do norte sob efeito das mudanças climáticas globais, principalmente, as relacionadas com o aquecimento, como segue: (a) aumento da carga externa de nutrientes (aumento da precipitação líquida no inverno e, principalmente, intensificação dos eventos extremos de chuva, levando a maior escoamento

superficial de nutrientes e a impacto por fontes difusas); (b) aumento da temperatura da água superficial, levando à maior estabilidade da coluna da água, acompanhada da diminuição do teor de oxigênio no fundo e do conseqüente aumento do processo de autofertilização de fósforo a partir de sua liberação dos sedimentos; (c) ambos os aspectos anteriormente citados contribuirão para a aceleração do processo de eutrofização; (d) aumento das épocas de crescimento, com maior risco de dominância de cianobactérias e de florações mais duradouras, bem como da formação de densos bancos de macrófitas flutuantes; (e) diminuição da transparência da água provocada tanto pelo aumento da biomassa algal quanto pela diminuição da capacidade das plantas submersas de manter as condições de águas claras do ecossistema; e (f) mudanças na cadeia trófica, propiciando condições para passagem para águas turvas (aumento da predação do zooplâncton herbívoro, isto é, predador de algas, decorrente da diminuição da mortalidade de peixes durante o inverno; aumento de peixes menores e mais generalistas, com maior agregação na vegetação aquática, levando à perda de refúgios do zooplâncton herbívoro). Todos esses fatores apontam para a maior probabilidade de os lagos temperados do norte tornarem-se mais vulneráveis à eutrofização e passarem para o estado de águas turvas.

Ainda, um estudo de recuperação de lago raso (lagoa marginal de área alagada na Holanda) feito a partir de série histórica de dados e modelo de processos de qualidade de água permitiu avançar sobre o intrincado impacto da flutuação do clima sobre os estados alternativos de equilíbrio do ecossistema. A redução do aporte externo de fósforo para a área alagada propiciou rápida redução da biomassa fitoplânctônica, aumento da transparência e, em quatro anos, grande crescimento de *Characeae* (macroalgas submersas). Entretanto, o estado de águas claras manteve-se instável, alternando com o de águas turvas [25]. Os autores concluíram que o aquecimento global na Holanda vem causando invernos cada vez mais quentes e úmidos durante os últimos 50 anos, aumentando o fluxo de fósforo e ácidos húmicos do solo para a água superficial e, por fim, elevando a instabilidade das populações das macroalgas submersas. Durante os anos com invernos mais úmidos, o nível da água subterrânea sobe acima do nível da água superficial e o fósforo carregado fica estocado no fundo do lago e nos bancos de macroalgas. Na primavera e no verão seguintes, sob condições anaeróbicas no sedimento, o fósforo estocado é liberado, resultando em grande aumento do fitoplâncton e diminuição da transparência da água. Nessas condições climáticas, a transparência da água é ainda mais atenuada pelo transporte de substâncias húmicas via fluxo da água do solo para a água superficial. Nos anos com invernos secos, entretanto, o transporte de fósforo e ácidos húmicos é reduzido, elevando a transparência da água e o crescimento das macroalgas submersas. Os autores consideraram, enfim, que na primeira metade do século XX as variações interanuais de precipitação não foram suficientes para causar grandes mudanças no fluxo interanual de fósforo, de forma que o estado de águas claras pôde ser mantido.

Conforme Jeppesen *et al.* [14,15], diferentes cenários podem ser esperados para lagos de zona temperada de regiões mais quentes e (sub)tropicais do globo como conseqüência da ciclagem mais rápida de nutrientes e sua maior retenção, do melhor potencial de crescimento de macrófitas aquáticas e, provavelmente, do controle mais intenso dos predadores zooplânctônicos. Entretanto, os mesmos autores enfatizaram a escassez de informação de séries históricas que incluam processos de recuperação em lagos sub(tropicais).

De fato, há enorme lacuna de estudos que abranjam longa série temporal de informação sistematizada sobre processos de eutrofização em regiões tropicais. O único existente, realizado em uma represa urbana rasa da cidade de São Paulo, comprovou o estabelecimento de mecanismos de retroalimentação química e biológica bem mais intensos do que os registrados para outras regiões do globo, decorrentes das temperaturas mais propícias à estabilidade da água e

manutenção de florações de cianobactérias ao longo do ano [2]. A despeito da relativa pouca base de dados, esse estudo de caso sinaliza para a maior dificuldade na recuperação de ambientes eutróficos situados em zonas mais quentes do globo e antecipa a intensificação dos problemas associados à eutrofização com o aquecimento global.

Carvalho & Kirika [3] observaram declínio dos teores de fósforo reativo solúvel e de fósforo total após a redução da entrada de fósforo no Lago Leven. Observaram, também, grandes modificações na disponibilidade temporal dessas duas características ambientais detectadas em um período de 34 anos sucessivos (1968-2000) e, mais do que tudo, nos últimos anos no referido lago, o maior lago raso da Escócia (13,3 km² de superfície, 25,5 m de profundidade máxima e 3,9 m de profundidade média), eutrófico, dominado por cianobactérias. Dentre essas modificações, ênfase deve ser dada à tendência ao aumento anual, em média, de 1°C da temperatura da água durante todo o período de estudo, mesmo durante a primavera e o inverno. O fitoplâncton respondeu a essas mudanças diminuindo sua biomassa medida em termos de concentração de clorofila *a*. De início, a diminuição ocorreu não por conta direta da diminuição na disponibilidade de nutrientes, mas do reaparecimento de *Daphnia* e, conseqüentemente, de seu pastoreio sobre o fitoplâncton. Só bem recentemente é que o declínio da biomassa do fitoplâncton foi, efetivamente, devido à queda na disponibilidade de nutrientes.

Fogo

Philibert *et al.* [22] demonstraram as conseqüências da ação do fogo sobre a química da água ao partirem do princípio de que as maiores modificações na frequência e na intensidade dos incêndios florestais são entendidas como resultado do aquecimento global. Os referidos autores trabalharam com um testemunho de 1.200 anos retirado do sedimento do Lago à la Pessière, um pequeno corpo d'água situado na região de Québec, no Canadá. Estudando as algas diatomáceas, Philibert *et al.* [22] reconstruíram as mudanças sofridas por algumas variáveis ambientais potencialmente associadas aos incêndios, que foram: pH, fósforo total, nitrogênio total, carbono orgânico dissolvido e gás carbônico epilimnético (das camadas superficiais do lago); e acoplaram essa informação às espécies de diatomáceas encontradas em seções do testemunho coletado antes e depois de cada episódio de incêndio. O resultado mais importante desse estudo é a aparente falta de impacto dos incêndios florestais na comunidade de diatomáceas e, por extensão, na constituição química do lago. A única exceção significativa a essa afirmação foi o declínio na abundância relativa da diatomácea *Cyclotella stelligera*. Uma explicação para esse fato ainda não é totalmente conhecida, pois o intervalo entre os anos 750 e 1.000, que não apresentou incêndios, também não continha grande abundância da referida espécie de diatomácea. Tampouco apresentou coincidência com os incêndios a diminuição na abundância de outras diatomáceas, como, por exemplo, de *Tabellaria* sp. O gás carbônico epilimnético mostrou, entretanto, nítida queda ao longo dos últimos 400 anos e com esta também declinou a densidade de *Cyclotella stelligera*, também documentado pelo próprio A. Philibert na pesquisa que efetuou no Lago Francis, também no Canadá (A. Philibert, tese de doutorado não publicada).

CONTAMINANTES INORGÂNICOS

Durante os anos 1999-2002, foram conduzidos estudos sobre o efeito de contaminantes inorgânicos sobre a biota dulciaquícola das regiões ártica e subártica do Canadá. Evans *et al.* [7] mostraram que os níveis de mercúrio e metilmercúrio são maiores em lagos de pequeno porte do que nos maiores por conta das temperaturas mais elevadas do verão e da influência das bacias hidrográficas. Os mesmos autores estudaram os efeitos desses dois contaminantes, princi-

palmente, sobre os peixes, porém, fizeram alusão a outros componentes da biota dos ambientes estudados, os quais podem ser perfeitamente aplicados para o fitoplâncton já que estes últimos organismos constituem a base da cadeia alimentar nos ambientes aquáticos, uma vez que sem as algas ocorre diminuição da cadeia alimentar.

EFEITO ESTUFA

Dentre os efeitos deletérios causados pelo aquecimento global está o chamado efeito estufa. Não há estudo sobre o efeito de gases à base de carbono (metano e gás carbônico) sobre o fitoplâncton. Abe *et al.* [1] estudaram os sedimentos do Reservatório do Lobo (Reservatório do Broa), um sistema raso situado nas proximidades da cidade de São Carlos, no Estado de São Paulo, Brasil, e verificaram que, apesar do reservatório ser classificado como oligotrófico, seus sedimentos contêm teores extremamente elevados desses dois gases, os quais excederam os valores de saturação dos mesmos no sistema a ponto de formar numerosas bolhas na superfície dos sedimentos. Com a oxidação do metano em condições aeróbicas, ao redor de 30% do fluxo de gases à base de carbono para a atmosfera pode ser creditado à produção tanto de metano quanto de gás carbônico nos sedimentos do reservatório, os quais seriam, posteriormente, transportados por difusão para a atmosfera.

Considerada a maior disponibilidade de gás carbônico no sistema, pode-se conjecturar que os aportes reduzidos de nitrogênio e fósforo podem propiciar um aumento da biomassa do fitoplâncton no reservatório, levando à eutrofização. É urgente e inevitável considerar que a quantidade de gás carbônico, elemento indispensável à fotossíntese, associada à maior tendência de aporte externo de nutrientes com a mudança climática, pode levar ao aumento gradual da biomassa fitoplanctônica, mormente de cianobactérias, que tornarão o ambiente, pouco a pouco, mais rico em nutrientes. A partir de um nível crítico, podem-se estabelecer mecanismos de autofertilização de forma a acelerar o processo da eutrofização.

AQUECIMENTO GLOBAL E A EXTINÇÃO DE ESPÉCIES ENDÊMICAS

As mudanças climáticas globais constituem uma das ameaças mais propaladas à biodiversidade. Entretanto, a despeito do amplo conhecimento dessa assertiva, pouquíssimos pesquisadores mediram a magnitude dessa ameaça em escala global. Malcolm *et al.* [17] focalizaram a vulnerabilidade da biodiversidade de 25 “hotspots” localizados em diferentes partes do mundo, os quais incluíam um número desproporcional de espécies (ao redor de 44% das espécies de plantas e 35% das espécies de vertebrados) em relação a uma área equivalente a 1,4% da área do globo e que sofreu considerável perda de habitats. Trabalhando com vegetação superior, os referidos autores constataram que a Região Florística do Cabo, o Caribe, a Região Indo-Kalimantanense, a Bacia do Mediterrâneo, o sudoeste da Austrália e os Andes Tropicais apresentam a maior vulnerabilidade à perda de biodiversidade, por apresentarem extinções que, algumas vezes, excederam a 2.000 espécies.

As espécies endêmicas são constituídas por organismos bastante adaptados a espectros estreitos de variação das condições ambientais, de modo que qualquer modificação nessas condições pode ocasionar dano à existência desses organismos e, até mesmo, sua completa extinção. Apesar da maior tendência ao cosmopolitismo entre as algas, o efeito do aquecimento global pode causar impactos sobre sua diversidade. O primeiro deles resulta da intensificação dos processos de eutrofização que leva ao favorecimento de alguns grupos de algas como as euglenófitas e, principalmente, as cianobactérias. Tal alteração pode reduzir a transparência da água que, por sua vez, restringe a manutenção das macrófitas submersas, levando, conseqüentemen-

te, à perda de habitats. É importante destacar que são justamente as regiões mais rasas dos ecossistemas aquáticos as que sustentam elevada diversidade de algas, sendo fundamentais para os ciclos biogeoquímicos e para a manutenção da biodiversidade dos demais níveis tróficos do sistema [32]. Pode-se ainda esperar que a elevação da temperatura alterará os ambientes mais vulneráveis, como, por exemplo, os situados em maiores altitudes, com sério impacto sobre a diversidade de algas de distribuição mais restrita a esses ambientes.

Finalmente, quase não há trabalhos realizados especificamente para medir a perda de biodiversidade de algas nas águas continentais. Tampouco há trabalhos de séries históricas que mostrem a diferença na composição florística de um mesmo ambiente antes e após eventos perturbatórios ligados às mudanças climáticas globais.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como já abordado, as mudanças climáticas globais podem causar impactos bastante relevantes nas águas continentais, trazendo sérias consequências em seu suprimento e qualidade.

Algumas previsões vêm gerando grande preocupação na comunidade científica e nos gestores ambientais, uma vez que o aquecimento global interage com uma série de estressores externos, intensificando, dentre outros aspectos, os efeitos da eutrofização dos ecossistemas aquáticos, dificultando seu uso sustentado.

Os esforços direcionados, nas últimas três décadas, para melhorar a qualidade ecológica de lagos impulsionados por programas amplos no âmbito da Comunidade Européia são exemplos de estratégias bem-sucedidas, aliando o conhecimento científico com políticas públicas. Tais programas definiram metas por distritos de bacia hidrográfica (algo comparável aos Comitês de Bacias Hidrográficas do Brasil) para atingir um estado no mínimo bom da qualidade ecológica para as águas superficiais e subterrâneas até o ano 2015 [8].

Os resultados têm permitido inferências relevantes para a Europa e que podem prenunciar os impactos nas demais partes do globo. De modo geral, espera-se que os lagos se tornem cada vez mais vulneráveis à eutrofização e que os ecossistemas eutróficos atinjam estados mais turbidos. No noroeste da Europa, as precipitações mais elevadas combinadas com o menor congelamento durante o inverno aumentarão o escoamento dos nutrientes em solos cultivados, elevando a degradação dos ecossistemas aquáticos (cargas difusas). No sul da Europa, o risco de secas e os aumentos da evaporação e do consumo de água para irrigação farão com que a salinização se torne um fenômeno mais comum. Ainda que a menor precipitação nessas áreas possa diminuir as cargas difusas de nutrientes, o efeito da concentração dos nutrientes será preponderante, contribuindo para a eutrofização dos lagos.

Caso as inferências se confirmem, será difícil cumprir as metas estabelecidas na Europa para o estado de qualidade ecológica dos lagos para o ano de 2015 sem que medidas adicionais sejam introduzidas para reduzir ainda mais as expectativas de diminuição das cargas de nutrientes estabelecidas para o presente. Dentre as principais medidas sugeridas para mitigar esses problemas estão: (a) melhores práticas de gerenciamento, abrangendo otimização do uso de fertilizantes, redução da pecuária intensiva e melhora no tratamento de esgotos; (b) restabelecimento de áreas alagadas perdidas de forma a aumentar a capacidade de retenção do fósforo, mas principalmente do nitrogênio (mitigação de cargas difusas de nutrientes); (c) restabelecimento de zonas tampão ao longo dos rios (mata ciliar). Ainda, visando à redução do risco de salinização, da perda de espécies, da eutrofização e da diminuição do nível da água dos lagos no sul da Europa, será fundamental estabelecer restrições ao uso da água pelo homem, implicando a diminuição da agricultura intensiva

em áreas mais vulneráveis, aperfeiçoamento da reciclagem da água em âmbito de bacias hidrográficas, aumento da eficiência com que a água é alocada para seus diferentes usos e, finalmente, maior controle da seca [15].

Pelos dados acumulados até então, com o impacto do aquecimento global, as metas e estratégias propostas pelo programa europeu já necessitam ser reavaliadas no sentido de providenciar ajustes para as metas definidas para as cargas críticas de nutrientes no futuro próximo [20].

Particularmente nas regiões mais quentes do globo (subtropicais e tropicais) e conforme destacado anteriormente, há fortes indícios de que os lagos sejam muito mais vulneráveis à eutrofização e atinjam estados mais turbidos. Reafirma-se que, a despeito da relativa pouca base de dados hoje disponível, é possível sinalizar para a maior dificuldade na recuperação de ambientes eutróficos situados em zonas mais quentes do globo, bem como prognosticar a intensificação dos problemas associados à eutrofização com o aquecimento global.

Desta forma, os desafios a serem enfrentados no Brasil demandarão ainda mais esforços do que os atualmente traçados para a Europa. Essa situação agrava-se mais pela falta de base científica consolidada para o país e as regiões mais quentes do globo de modo geral, o que pode resultar em estratégias não bem-sucedidas de gerenciamento dos ecossistemas aquáticos.

É importante ressaltar ainda que no Brasil, apesar de possuir grande disponibilidade hídrica, da ordem de 12-16% do volume total de águas doces existentes no planeta, 80% da produção hídrica está contida em três grandes unidades hidrográficas apenas (Amazonas, São Francisco e Pará), ou seja, sua distribuição é bastante heterogênea, intensificando os problemas relacionados com a crise da água [31].

Urgem, então, a criação e o incentivo de programas maiores e multidisciplinares de pesquisa, buscando, na medida do possível, sínteses e inferências. Urge também a geração de informações de monitoramento de séries históricas (hoje quase inexistentes), bem como a definição das lacunas científicas. Esta base de conhecimento é imprescindível para que se avance mais rapidamente sobre os efeitos do aquecimento global no país e possam ser elaboradas políticas públicas com maiores possibilidades de êxito.

Os efeitos do aquecimento global deverão ser, necessariamente, levados em consideração no gerenciamento das águas doces, com o reconhecimento e o cuidado de que se desconhece até que ponto o conhecimento gerado a partir dos ambientes temperados é transferível para as regiões (sub)tropicais.

Finalmente, o tema mudança climática global e sua associação com as águas continentais precisam ser destacados e veiculados na mídia e nas escolas, já que a crise da água será fatalmente agravada pelo aquecimento global, trazendo sérios impactos ecológicos, econômicos, de saúde pública e sociais. A educação é essencial para avançar na proatividade e no exercício da cidadania em sua plenitude. Só assim será possível o entendimento entre as partes, visando ao bem-estar das gerações que nos sucederão.

REFERÊNCIAS CITADAS

1. ABE, D.S.; ADAMS, D.D.; GALLI, C.V.S.; SIKAR, E.; TUNDISI, J.G. Sediment greenhouse gases (methane and carbon dioxide) in the Lobo-Broa reservoir, São Paulo State, Brazil: concentrations and diffuse emission fluxes for carbon budget considerations. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, 10: 201-209. 2005.
2. BICUDO, D.C.; FONSECA, B.M.; BINI, L.M.; CROSSETTI, L.O.; BICUDO, C.E.M.; ARAÚJO-JEUS, T. Undesirable side-effects of water hyacinth control in a shallow tropical reservoir. *Freshwater Biology*, 52: 1120-1133. 2007.
3. CARVALHO, L.; KIRIKA, A. Changes in shallow lake functioning: response to climate change and nutrient reduction. *Hydrobiologia*, 506-509: 789-796. 2003.

4. CHRISTOFFERSEN, K., ANDERSEN, N., SØNDERGAARD, M., LIBORIUSSEN, L. & JEPPESEN, E. Implications of climate-enforced temperature increases on freshwater pico- and nanoplankton populations studies in artificial ponds during 16 months. **Hydrobiologia**, 560: 259-266. 2006.
5. DOMIS, L.N.S.; MOOIJ, W.M.; HUISMAN, J. Climate-induced shifts in an experimental phytoplankton community: a mechanistic approach. **Hydrobiologia**, 584: 403-413. 2007.
6. DOWING, J.A.; PRAIRIE, Y.T.; COLE, J.J.; DUARTE, C.M.; TRAVIK, L.J.; STRIEGL, R.G.; MCDOWELL, W.H.; KORTELAINEN, P.; CARACO, N.F.; MELACK, J.M.; MIDDELBURG, J.J. The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments. **Limnology and Oceanography**, 51: 2388-2397. 2006.
7. EVANS, M.S.; MUIR, D.; LOCKHART, W.L.; STERN, G.; RYAN, M.; ROACH, P. Persistent organic pollutants and metals in the freshwater biota of the Canadian Subarctic and Arctic: an overview. **Science of the Total Environment**, 351-352: 94-147. 2005.
8. FOUNDATION OF WATER RESEARCH (Org.). Water Framework Directive: a summary. Information note FWR – WFD02.. Disponível em: <http://www.euwfd.com> 2005.
9. GULATI, R.D.; LAMMENS, E.; PAUW, N.D.; DONK, E.V. Preface. **Hydrobiologia**, 584: 1-2. 2007.
10. HOUGHTON, J.E.T.; DING, Y.; GRIGGS, D.J.; NOGUER, M.; VAN-DER-LINDEN, P.J.; DAI, X.; MASKELL, K.; JOHNSON, C.A. **Climate change 2001: the scientific basis**. Cambridge University Press. 2001.
11. HUISMAN, J.; SHARPLES, J.; STROOM, J.M.; VISSER, P.M.; KARDINAAL, W.E.A.; VERSPAGEN, J.M.H.; SOMMEIJER, B. Changes in turbulent mixing shift competition for light between phytoplankton species. **Ecology**, 85: 2960-2970. 2004.
12. IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2007: The Physical Science Basis – **Summary for Policymakers**. Disponível em <http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf>. 2007
13. JACQUET, S.; BRIANT, J.; LEBOULANGER, C.; AVOIS-JACQUET, C.; OBERHAUS, L.; TASSIN, B.; VINÇON-LEITE, B.; PAOLINI, G.; DRUART, J.; ANNEVILLE, O.; HUMBERT, J. The proliferation of the toxic cyanobacterium *Planktothrix rubescens* following restoration of the largest natural French lake (Lac du Bourget). **Harmful Algae**, 4: 651-672. 2005.
14. JEPPESEN, E., SØNDERGAARD, M., JENSEN, J.P., HAVENS, K.E., ANNEVILLE, O., CARVALHO, L.; COVENEY, M.F.; DENEKE, R.; HILT, S.; KANGUR, K.; KÖHLER, J.; LAMMENS, E.H.H.R.; LAURIDSEN, T.L.; MANCA, M.; MIRACLE, M.R.; MOSS, B.; NÖGES, P.; PERSSON, G.; PHILLIPS, G.; PORTIELJE, R.; ROMO, S.; SCHELSKE, C.L.; STRAILE, D.; TATRAL, I.; WILLÉ, E.; WINDER, M. Lake responses to reduced nutrient loading – an analysis of contemporary long-term data from 35 case studies. **Freshwater Biology**, 50: 1747-1771. 2005.
15. JEPPESEN, E.; SØNDERGAARD, M.; MEERHOFF, M.; LAURIDSEN, T.L.; JENSEN, J.P. Shallow lake restoration by nutrient loading reduction – some recent findings and challenges ahead. **Hydrobiologia**, 548: 239-252. 2007.
16. KALFF, J. **Limnology: inland water ecosystems**. Upper Saddle River, Prentice-Hall, Inc., 2002.
17. MALCOLM, J.R.; LIU, C.; NEILSON, R.P.; HANSEN, L. Global warming and extinctions of endemic species from biodiversity hotspots. **Conservation Biology**, 20(2): 538-548. 2006.
18. MARENGO, J.A.; SILVA-DIAS, P.L. Mudanças climáticas globais e seus impactos nos recursos hídricos. In: REBOUÇAS, A.C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J.G. (orgs.) **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. 3ª edição revisada e ampliada São Paulo: Escrituras Editora e Distribuidora de Livros Ltda., 2006. p. 63-109.
19. MOOIJ, W.M.; JANSE, J.H.; DE SENERPONT DOMIS, L.N.; HÜLSMANN, S.; IBELINGS, B.W. Predicting the effect of climate change on temperate shallow lakes with the ecosystem model PCLake. **Hydrobiologia**, 584: 443-454. 2007.
20. NÖGES, P.; VAN DE BUND, W.; CARDOSO, A.C.; HEISKANEN, A. Impact of climatic variability on parameters used in typology and ecological quality assessment of surface waters – implications on the Water Framework Directive. **Hydrobiologia**, 584: 373-379. 2007.
21. PADISÁK, J. Sudden and gradual responses of phytoplankton to global climate change: case studies from two large, shallow lakes (Balaton, Hungary and the Neusiedlersee Áustria/Hungary). In: GEORGO, D.G.; JONES, J.G.; PUNCOCHAR, P.; REYNOLDS, C.S.; SUTCLIFFE, D.W. (Eds.). **Management of lakes and reservoirs during global change**. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1998. p. 111-125.
22. PHILIBERT, A.; PRAIRIE, Y.T.; CARCAILLET, C. 1200 years of fire impact on biochemistry as inferred from high resolution diatom analysis in a kettle lake from the *Picea mariana*-moss domain (Quebec, Canada). **Journal of Paleolimnology**, 30: 167-181. 2003.
23. REBOUÇAS, A. **Uso inteligente da água**. São Paulo: Escrituras Editora, 2004.
24. REBOUÇAS, A. Água doce no mundo e no Brasil. In: REBOUÇAS, A.C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J.G. (orgs.) **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. 3ª edição revisada e ampliada São Paulo: Escrituras Editora e Distribuidora de Livros Ltda., 2006. p. 1-34.

25. RIPE, W.J.; OUBOTER, M.R.L.; LOS, H.J. Impacto f climatic fluctuations on Characeae biomass in a shallow, restored lake in The Netherlands. **Hydrobiologia**, 584: 415-424. 2007.
26. SANT'ANNA, C.L.; AZEVEDO, M.T.; AGUIJARO, L.F.; CARVALHO, M.C.; CARVALHO, L.R.; SOUZA, R.C.R. **Manual ilustrado para identificação e contagem de cianobactérias planctônicas de águas continentais brasileiras**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2006.
27. SCHEFFER, M.; VAN NES, E.H. Shallow lakes theory revised: various alternative regimes driven by climate, nutrients, depth and lake size. **Hydrobiologia**, 584: 455-466. 2007.
28. SOUZA, O.; CAMARGO, L. Megassoluções para um megaproblema. **Veja**, ano 39, nº 52: 138-149, 30 de dezembro de 2006.
29. THOMPSON, L.G.; MOSLEY-THOMPSON, E.; BRECHER, H.; DAVIS, M.; LEÓN, B.; LES, D.; LIN, P.-N.; MASHIOTTA, T.; MOUNTAIN, K. Abrupt tropical climate change: past and present. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America** 103(28): 10536-10543. 2006.
30. TUNDISI, J.G. Água no século XXI: enfrentando a escassez. 2ª edição São Carlos: Rima Editora e Instituto Internacional de Ecologia, 2005.
31. TUNDISI, J.C.; BRAGA, B.; REBOUÇAS, A.C.. Os recursos hídricos e o futuro: síntese. In: REBOUÇAS, A.C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J.G. (orgs.) Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação. 3ª edição revisada e ampliada São Paulo: Escrituras Editora e Distribuidora de Livros Ltda., 2006 p. 739-747.
32. VADEBONCOUER, Y.; STEINMAN, A.D. Periphyton function in lake ecosystems. **The Scientific World Journal** 2: 1449-1468. 2002