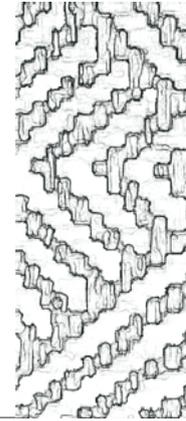


Biotupé: Meio Físico,
Diversidade Biológica e Sociocultural do Baixo Rio Negro, Amazônia Central
Edinaldo Nelson SANTOS-SILVA, Fábio Marques APRILE, Veridiana Vizoni SCUDELLER,
Sérgio MELO (Orgs.),
Editora INPA, Manaus, 2005



Capítulo 3

Meio Físico

Limnologia do Lago Tupé: dinâmica espaço-temporal do oxigênio dissolvido

Assad José DARWICH
ajdarwich@yahoo.com.br

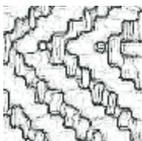
Fábio Marques APRILE
aprilefm@hotmail.com

Barbara Ann ROBERTSON
barbara@inpa.gov.br

Luiz Fernando ALVES
lfalves@inpa.gov.br

*Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Coordenação de Pesquisas em Biologia Aquática
Av. André Araújo 2936, Caixa Postal 470 Manaus, AM, 69060-001*

RESUMO - Neste capítulo são comentadas características físicas, químicas e físico-químicas da substância água, sua importância ecológica, assim como, das substâncias dissolvidas no meio hídrico, particularmente o oxigênio dissolvido. Nesse contexto, são discutidos os teores de O₂ dissolvido na coluna de água do lago Tupé, variações espaciais, nictemerais, sazonais, estratificações, fluxos laminares, supersaturação e déficit de O₂ durante o ciclo hidrológico 2001/2002. São feitas comparações com o O₂ que afluí do rio Negro e dos principais igarapés de floresta à bacia lacustre. As medidas de oxigênio dissolvido nos



Darwich *et al.*

diferentes ambientes evidenciaram, em todas as fases do ciclo hidrológico, elevadas concentrações de O_2 nas camadas mais superficiais do lago e um déficit considerável de oxigênio no hipolímnio. Na região central do lago, a área mais profunda da bacia lacustre, ficou caracterizada a existência de oxiclina com perfil clinogrado clássico. A análise nictemeral do oxigênio na região central mostrou a existência de uma acentuada estratificação no teor de saturação desse gás durante o período pesquisado. O pulso de inundação apresentou participação decisiva sobre a dinâmica do oxigênio nos ambientes lacustre e fluvial

PALAVRAS-CHAVE: água, substâncias dissolvidas, oxigênio, estratificação, fluxo laminar, Igarapé, lago, Amazônia.

Introdução

A Substância Água

A abundância de água é a característica fundamental do planeta Terra e, a água doce é o tipo mais diretamente envolvido com as atividades e necessidades básicas do Homem. Em qualquer análise sobre os recursos continentais dessa substância deve-se considerar que a água potável é um recurso finito, utilizado pela humanidade que cresce exponencialmente.

Para o entendimento da estrutura e função das águas doces é necessário o conhecimento de características fundamentais da substância água. Em particular, as propriedades de expansão térmica e densidade como consequência do arranjo atômico dos átomos de hidrogênio e oxigênio que formam a molécula de água, bem como das ligações entre moléculas, o que conduz a estados tanto ionizados quanto covalentes mantendo-se a integridade da água como substância.

A água dissocia-se em ligações heteropolares, o que a faz um excelente solvente, no entanto, longe de ser o solvente universal. A maior parte das propriedades da água está em função da temperatura, pressão e substâncias dissolvidas. Algumas são de interesse ecológico marcante. Sua elevada **capacidade calorífica** (calor específico a 1 atm a $15^\circ C$ é $4,1855 J.g^{-1} = 1 cal.g^{-1}$, é menor apenas que o do Li , H e NH_3 líquido) e o alto **calor de fusão** ($79 kcal.L^{-1}$) e **de evaporação** ($537 kcal.L^{-1}$ a $100^\circ C$) têm efeito termostático e regulador (Margalef,

1986). Estas propriedades proporcionam um ambiente hídrico muito mais estável que o ambiente terrestre. Isso ocorre porque são necessárias quantidades relativamente elevadas de energia, em forma de calor, para romper as ligações de hidrogênio na água em sua forma líquida. Por isso, as flutuações de temperatura na água se dão de forma gradual e os extremos estacionais e diurnos são pequenos em comparação com os habitats aéreos e terrestres (Margalef, 1983; Wetzel, 1993). O calor específico do gelo é a metade ($0,5 cal.g^{-1}$) do da água. Como resultado disso, o gelo se forma de maneira relativamente rápida ao esfriar-se a água a $0^\circ C$ (Hutchinson, 1967, 1975a,b; Wetzel, 1993). Dessa forma, a água necessita perder pequenas quantidades de calor ($80 cal.g^{-1}$), para que suas moléculas se unam formando gelo, em comparação com a quantidade de energia necessária ($540 cal.g^{-1}$) para romper as ligações de hidrogênio durante a evaporação. Ao contrário, o gelo funde com relativa rapidez e requer menor quantidade de energia para voltar ao estado líquido, que a necessária para



aumentar a temperatura da água (Wetzel, 1993).

As singularidades na relação entre o **volume específico** (do vapor é $1729,6\text{cm}^3.\text{g}^{-1}$ a 100°C e 1atm) e a temperatura regulam a circulação vertical e a estabilidade nos lagos e mares. A forte absorção de radiação de grandes comprimentos de onda, que contrasta com a maior transparência à luz, influi sobre a estratificação térmica e sobre a distribuição das plantas (Margalef, 1986).

A elevada **constante dielétrica** (em unidades c.g.s. é $88,0$ a 0°C e $80,36$ a 20°C) da água deve-se à estrutura assimétrica de sua molécula e explica a facilidade com que se ionizam os sais dissolvidos na água, pois a atração entre os íons é inversamente proporcional à constante dielétrica. A **viscosidade**, relativamente elevada (1×10^{-3} Pas a 20°C), diminui conforme aumenta a temperatura (a 0°C é $1,8 \times 10^{-3}$ Pas). De 0°C a 25°C , a viscosidade cai à metade. Esta propriedade tem importância na locomoção dos organismos, fazendo com que a resistência por fricção ao deslocamento de um organismo seja 100 vezes maior na água do que no ar, dependendo da área da superfície exposta, da velocidade e temperatura, e da quantidade de sais dissolvidos. Assim como a viscosidade, a **tensão superficial**, também diminui conforme aumenta a temperatura, ($72,76\text{dina.cm}^{-1}$ a 20°C , a maior de todos os líquidos à temperatura ambiente, com exceção do Hg), e, juntas, influenciam a locomoção de

organismos aquáticos. A tensão superficial da água diminui com a presença de compostos orgânicos, sejam eles de origem alóctone (e.g., agrotóxicos) ou produzidos durante a fotossíntese por algas e angiospermas submersas ou por morte e lise de células. A tensão superficial da água pode sustentar organismos grandes como girinos e coleópteros, porém pode prejudicar outros como cladóceras que uma vez sobre a película superficial da água não podem, por si só, submergir ao seu habitat (Wetzel, 1993). Alguns organismos estão adaptados a viver nessa película, um habitat especial na interface ar-água. O conjunto dessa comunidade chama-se nêuston.

Uma das características de particular importância para a manutenção da vida no meio hídrico é a **densidade** da água que é 775 vezes maior que a densidade do ar à pressão e temperatura padrões (0°C e 760mmHg). Isto proporciona uma maior flutuabilidade aos organismos e um menor gasto de energia para manterem sua posição no meio hídrico. Conseqüências importantes na estrutura interna de organismos que vivem no meio aquático são as modificações (e.g., redução) nos tecidos de sustentação de animais de água doce, especialmente de invertebrados e em plantas vasculares.

A densidade da água sofre variação singular em função da temperatura e este fato tem importância ecológica considerável sobre a circulação, a estabilidade e o congelamento da água dos lagos, rios, mares etc. A água atinge sua densidade máxima à $3,94^\circ\text{C}$ (igual a $1,000000\text{g.cm}^{-3}$ a 1atm). Acima e abaixo dessa temperatura (até 0°C), há expansão molecular da substância água com conseqüente diminuição da densidade a uma taxa progressivamente crescente de valor (Fig. 1). A mudança de densidade ocorre porque as variações de temperatura modificam as distâncias intermoleculares e os movimentos de reorientação e translação das moléculas de água. Por isso, a 0°C e a 1atm , a densidade da água no estado líquido é $0,9998679\text{g.cm}^{-3}$ e a do gelo é igual a $0,9168\text{g.cm}^{-3}$ em conseqüência do aumento do espaço entre as moléculas da substância água ao congelar-se. Essa diferença faz



com que o gelo seja cerca de 9% mais leve do que a água a zero grau centígrado. Por isso, o gelo flutua. Assim, no inverno rigoroso de regiões temperadas, o congelamento da água nos lagos, rios etc. ocorre primeiramente na superfície e o estrato congelado tende a se espessar à medida que diminuem as temperaturas. Dessa forma, o gelo flutua sobre a água mais “quente” e mais densa.

A diminuição da densidade à medida que a temperatura se distancia de 3,94°C, como foi dito, provoca diferenças de densidades que são pequenas entre um grau e outro, mas altamente significativas dos pontos de vista físico-químico, químico, biológico e ecofisiológico. Verifica-se, entretanto, que essas diferenças de densidade da água por grau são cada vez maiores à medida que as temperaturas se distanciam de 3,94°C. Assim, a variação da densidade com a temperatura não é linear, visto que na faixa de temperaturas altas, uma pequena diferença de temperatura já provoca uma grande diferença de densidade. Dessa forma, a análise da “diferença de densidade por grau descendente” (DDD) (Fig. 1) é altamente importante para o entendimento de estratificações e misturas da coluna de água de lagos. Sabe-se que para misturar líquidos de densidades diferentes necessita-se de trabalho (energia) que é proporcional à diferença de densidade entre eles. Da mesma forma, para se misturar massas de água com densidades diferentes necessita-se de forças que deverão ser tanto maiores quanto maiores forem as diferenças de densidades entre as massas. A partir desses dados verifica-se que a quantidade de trabalho necessária para misturar massas “estratificadas” de água, p. ex., a temperaturas de 32 e 33°C é 40 vezes maior que a necessária para misturar as mesmas massas entre 4 e 5°C. Entre 29 e 30°C o trabalho necessário é 37 vezes maior.

O ponto fundamental dessa variação de densidade com a temperatura é verificar que, na região Amazônica, pequenas diferenças de temperatura podem estabelecer estratificações químicas (e.g., oxiclina) muito estáveis. Na estação central do lago Tupé a coluna de água apresentou amplitude térmica de cerca de 6 graus

centígrados no período de águas baixas, a seca (de 27 a 33°C), e quase três no período de cheia (de 27 a 30°C). Nessa faixa de temperatura a coluna de água na seca é cerca de 2,1 vezes mais estável do que na cheia. Se esses dados forem comparados com variações de temperaturas de região temperada, verifica-se que a coluna de água do Tupé estaria quase 7 (6,7) vezes mais estável na seca do que a mesma coluna de água entre 4 e 10°C (mesma amplitude térmica). Na cheia, a coluna de água do Tupé estaria mais estável ainda (cerca de 12,3 vezes) do que em uma faixa equivalente de temperatura na região temperada (entre 4 e 7°C).

Quanto à distribuição de oxigênio dissolvido em um lago de bacia isolada dessa região equatorial, a estabilidade verificada na coluna de água do Tupé pode conduzir à conseqüências negativas, como anoxia permanente. Sob esta condição o O₂ produzido na zona eufótica torna-se impedido de atingir as camadas mais profundas do lago porque a difusão é lenta e o consumo é grande, tornando o seu hipolimnio pouco propício aos organismos aeróbicos. Como a densidade também aumenta de forma aproximadamente linear com o aumento das concentrações de sais dissolvidos, a permanência dessa condição em uma região rica em sais dissolvidos, poderia conduzir o lago à uma meromixia permanente. A avaliação estática das curvas de oxigênio no Tupé sugere a condição de meromixia, no entanto, a contribuição permanente de pequenos afluentes



(igarapés) promove um fluxo constante nas camadas mais profundas de maior densidade. Além disso, a reduzida quantidade de sais dissolvidos (expressa pelos reduzidos valores da condutividade elétrica) nas águas desses afluentes, são fatores antagônicos a este tipo de estratificação, ainda que as curvas de O_2 sejam sempre do tipo clinogrado. Isto pode ser explicado pelo maior consumo de oxigênio nas camadas mais profundas, em consequência de processos de

decomposição do material orgânico oriundo, principalmente, do escoamento superficial da floresta.

Wetzel (1993), comenta que de forma específica, as características da água regulam eficazmente o metabolismo dos lagos e que as modificações do meio aquático se produzem como resposta às variações climáticas e geográficas. Salienta o autor, que as peculiares propriedades de expansão térmica, o alto calor específico e as características líquido-sólidas da água formam um ambiente estratificado que controla eficientemente a dinâmica química e biótica dos lagos.

A água, enfim, proporciona um meio temperado no qual as flutuações extremas de suas características

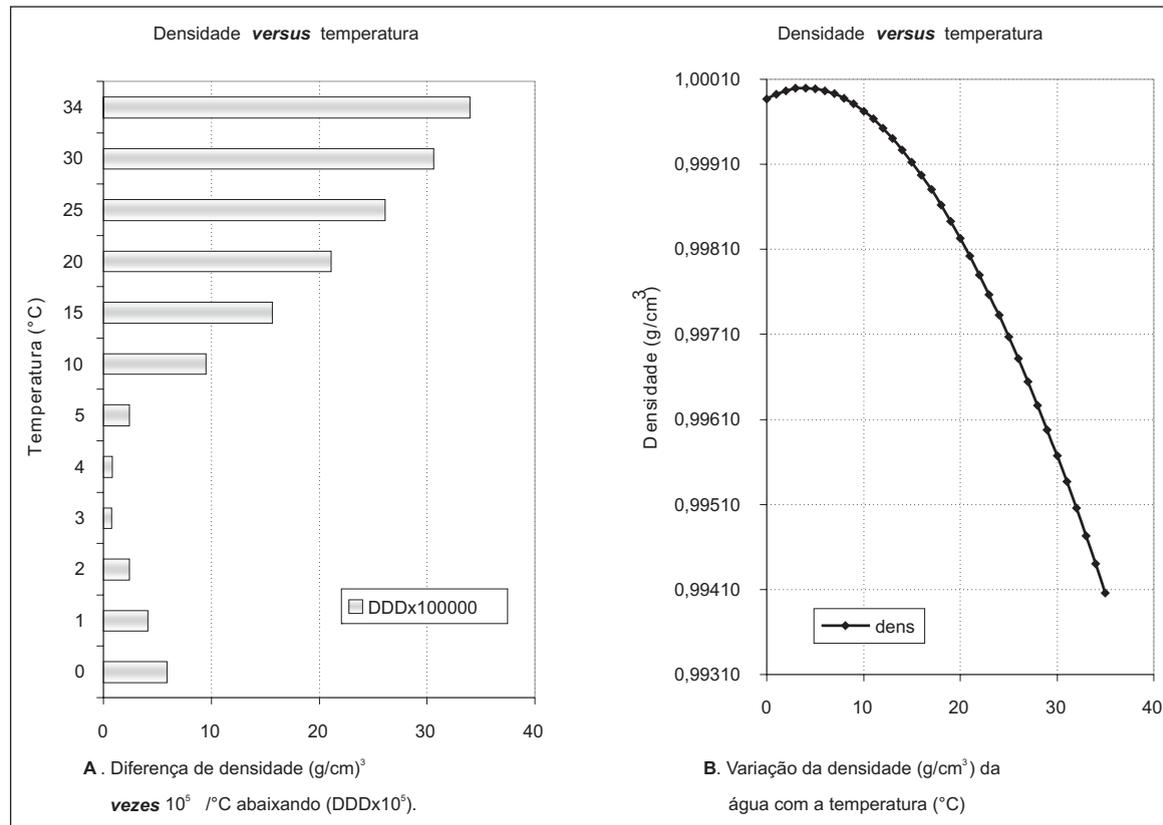


Figura 1. Influência da temperatura sobre a densidade da água: importância na circulação e estratificação térmica de lagos.



Darwich *et al.*

químicas, físicas e físico-químicas, em especial a temperatura, são menos drásticas do que no meio aéreo. Algumas propriedades da água (e.g., variação de temperatura e de densidade com a temperatura), unidas a um grau de viscosidade relativamente elevado, têm possibilitado o desenvolvimento de um grande número de adaptações bióticas, que têm servido para sustentar a produtividade aquática.

Todas as particularidades da água como substância estão relacionadas às suas características físicas, químicas e físico-químicas peculiares e intrínsecas dessa substância como conseqüência de sua estrutura atômica e ligações, bem como pela associação de suas moléculas nas fases sólida, líquida e gasosa. Certamente por isso, a água tornou-se a essência da vida como a conhecemos na Terra e domina por completo a composição química de todos os organismos.

A matéria viva é fortemente hidratada e grande parte das reações bioquímicas características da vida se realiza entre as substâncias dissolvidas no meio aquoso. Estas substâncias foram e continuam sendo adicionadas ao meio aquático, basicamente por meio da circulação global da substância água, tornando as águas de determinadas regiões caracterizadas de acordo com as espécies químicas nelas contidas.

Espécies Químicas Dissolvidas na Água

A água de todos os compartimentos no planeta Terra circula e se renova em tempos estimados para cada compartimento. Wetzel (1993), apresenta dados sobre os tempos de renovação das águas. O tempo para os oceanos, calculado com base na evaporação líquida, foi estimado em 37 mil anos. No outro extremo, o tempo de renovação da água dos rios está estimado em cerca de 20 dias para os grandes rios que deságuam nos oceanos. Rios menores apresentam tempos mais reduzidos. A água sempre volta aos compartimentos por precipitação pluviométrica completando o ciclo nos mares. Ao voltar, a água absorve parte da terra. Por dissolução, erosão e escoamento adquirem os seus componentes dissolvidos. Estes são essencialmente os mesmos em todos os compartimentos (oceanos, gelo polar, água subterrânea,

umidade do solo e subsolo, lagos, rios, vapor atmosférico etc.), contudo, as concentrações são muito variáveis por razões diversas, e.g., diferenças geológicas nas bacias de drenagens e sazonalidade.

Como conseqüência da grande variabilidade química e do teor dos constituintes adicionados, os componentes das águas naturais podem ser divididos em 5 classes, classificados como 1) íons e compostos inorgânicos dissolvidos, 2) compostos inorgânicos particulados, 3) compostos orgânicos dissolvidos, 4) materiais orgânicos particulados e 5) gases dissolvidos (Golterman *et al.*, 1978). Os principais fatores que determinam as quantidades, tipo e origem de material dissolvido e em suspensão são: o clima, o relevo, e o tipo de rochas que constituem as bacias de drenagem.

De particular importância na limnologia são os íons e compostos inorgânicos dissolvidos (1) e os gases (5). Os primeiros podem ser convenientemente divididos em constituintes principais, constituintes secundários, elementos-traço.

Os constituintes principais são aqueles elementos ou compostos que, freqüentemente ocorrem em maiores quantidades nas águas naturais. A concentração dos constituintes numericamente mais importantes ($\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Cl}^- + \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$) varia de 1,0 a 10 meq.L⁻¹ e em conjunto são os principais responsáveis pela condutividade da água e pela salinidade de águas interiores (Stumm & Morgan, 1981). São também citados como os principais cátions e ânions os



íons de Fe^{3+} e Mn^{2+} , e carbonatos ($\text{CO}_3=$) em águas com elevados valores de pH (Hutchinson, 1975b; Golterman *et al.*, 1978). Têm importância na produtividade global dos ecossistemas aquáticos e no metabolismo de certas bactérias, capazes de obter energia a partir de formas reduzidas de alguns elementos (Fe^{3+} e Mn^{2+}) (Lampert & Sommer, 1997). Os componentes deste grupo têm origem, principalmente, no intemperismo das rochas e dos solos da bacia de drenagem e de acumulação dos corpos de água, além da precipitação pluviométrica e da contribuição antrópica.

Os constituintes secundários ocorrem em menores quantidades, com concentrações entre menos de 1mg/L e poucos mg/L, destacando-se compostos do N e suas frações (NH_4+ ; NO_3^- ; NO_2^-); do P e suas frações (ortofosfatos P-PO_4^{3-} , e fósforo dissolvido) e silicatos (SiO_2 , HSiO_3^- , Si-Si(OH)_4+), os quais podem ocorrer em maiores quantidades. Em conjunto têm importância no metabolismo de ecossistemas aquáticos, como na produtividade primária, no armazenamento de energia e na formação de estruturas de organismos aquáticos. Têm origem principal na chuva e na fixação molecular (N), nas rochas da bacia de drenagem dos corpos de água (P), na decomposição de minerais (silicatos). Alguns compostos do N (NO_3^-) e P (P-PO_4^{3-}) podem ocorrer em elevadas concentrações em lagos de várzea amazônicos enriquecidos por decomposição de macrófitas aquáticas no período de águas baixas (Darwich *et al.*, 2001). Além disso, podem ser

adicionados ao meio hídrico por atividades antropogênicas etc., e provocarem problemas como eutrofização e poluição.

Os elementos-traço ocorrem em quantidades muito pequenas, freqüentemente em partes por bilhão, em todos os ambientes. São essenciais no metabolismo de organismos aquáticos tais como na fotossíntese, cadeia respiratória, fixação de nitrogênio etc. Golterman (1975), inclui entre eles o Al, B, Fe, Co, Cu, Mo, Mn e Zn, além de Ag, Cd, Cr, Hg, Pb, Sn e outros. Têm origem natural no intemperismo das rochas e erosão dos solos. Podem ser adicionados ao meio aquático por atividades industriais, de mineração, na agricultura, doméstica etc., e dessa forma, em quantidades maiores, tornam-se tóxicos aos organismos em geral.

Ainda quanto à separação, divisão dos elementos no ambiente aquático, há considerações quanto à quantidade dos elementos ou a importância deles no meio, podendo-se separá-los ou agrupá-los em macro e micronutrientes. Nessa condição, p.ex., tanto constituintes secundários quanto os elementos-traço podem aparecer como micronutrientes. Afora essas considerações generalizadas quanto aos teores e a qualidade dos constituintes nos compartimentos, é certo que há considerável variação local dentro de um mesmo compartimento, de uma mesma bacia hidrográfica, de um mesmo lago.

Os gases dissolvidos na água podem vir do ar ou de atividades metabólicas de organismos aquáticos. Os mais importantes são o oxigênio (O_2), o nitrogênio (N_2) e o gás carbônico (CO_2), todos com origem atmosférica e, respectivamente, na fotossíntese, na atividade bacteriana e na respiração dos organismos. Além desses, são importantes também o gás sulfídrico (H_2S) e o metano (CH_4), ambos com origem na atividade bacteriana. Todos têm solubilidade influenciada pela temperatura e pela pressão parcial do gás específico. O CO_2 tem solubilidade também relacionada com o sistema bicarbonato e apresenta fontes adicionais importantes como a (a) oxidação bacteriana de matéria orgânica, tanto na água como nos sedimentos, a (b) atmosfera e chuva, a (c) decomposição e, (d) em certas formações rochosas e em águas subterrâneas.



Para todos os gases dissolvidos há um equilíbrio por difusão e a quantidade que se dissolve depende também da constante de solubilidade do gás específico. Biologicamente, no entanto, o oxigênio é o gás dissolvido mais importante na água.

Oxigênio Dissolvido

O oxigênio dissolvido na água tem origem no processo de fotossíntese de algas e macrófitas aquáticas e sua presença no meio hídrico depende, como fonte, dessa produção e da difusão do ar atmosférico. O ar contém cerca de 20,95% de oxigênio e praticamente todo o restante é nitrogênio, além de uma pequena quantidade de outros gases. No entanto, o oxigênio é mais solúvel que o N_2 e sua concentração no meio aquático pode apresentar considerável variação sazonal, espacial e diária, dependendo do ambiente considerado. Obviamente, o oxigênio é essencial para o metabolismo de todos os organismos aquáticos aeróbicos. Por isso, a distribuição do O_2 nos lagos é essencial para se entender a distribuição, a abundância, o comportamento, e o crescimento fisiológico dos organismos aquáticos, além de influir até sobre a solubilidade de muitos nutrientes inorgânicos (Wetzel, 1993), o que faz desse gás dissolvido o parâmetro de fundamental importância para o meio hídrico.

A presença do O_2 na água depende da sua solubilidade, a qual varia com a temperatura e a pressão atmosférica. Consequentemente a solubilidade é também influenciada pela altitude que se encontra o ambiente aquático considerado, pelas condições meteorológicas e, pela pressão hidrostática a uma determinada profundidade na coluna de água. Visto que a solubilidade aumenta com a profundidade, quanto maior a profundidade, maior é a capacidade de acumulação de gás no ponto considerado até que se forme bolhas que se deslocam à superfície.

A solubilidade do O_2 diminui conforme aumenta a temperatura e a quantidade máxima para a saturação (14,621mg/L) ocorre a zero grau centígrado (Fig. 2-A). Verifica-se que a 40°C a quantidade de O_2 necessária

para a saturação é apenas 43,9% daquela a 0°C. Considerando uma temperatura média de 29°C para as águas amazônicas, observa-se que para ocorrer saturação a essa temperatura são necessários 7,691mg/L, ou seja, cerca de 52,6% daquela a 0°C. A importância ecológica dessas observações é que menores concentrações de O_2 na coluna de água de lagos amazônicos próximos ao nível do mar, representam maiores níveis de saturação desse gás no meio hídrico. Como o lago Tupé encontra-se praticamente ao nível do mar (ca. de 20m a.n.m.) e as temperaturas registradas na sua coluna d'água variaram de 27 a 34°C de 2001 a 2002, nota-se que as concentrações para a saturação do O_2 naquele ambiente estiveram em torno da metade do teor para a saturação a 0°C, respectivamente, 54,5% e 48,3% (Fig. 2B). Por isso, pequenas concentrações de O_2 representam elevadas percentagens de saturação nessa região. Dessa forma, como será discutido neste capítulo, foram registradas até 10,81mg $O_2 \cdot L^{-1}$ a uma temperatura de 32,9°C nas camadas superficiais. Esta concentração corresponde a 148,9% de saturação, o que significa supersaturação. Nas camadas mais profundas, abaixo da zona eufótica, as concentrações de O_2 foram sempre muito baixas e as temperaturas de fundo mantiveram-se sempre em torno de 27°C durante todo o ciclo hidrológico. Nota-se que a essa temperatura, 1,0mg O_2 /L equivale a cerca de 13% de saturação e que, do ponto de vista funcional, pode

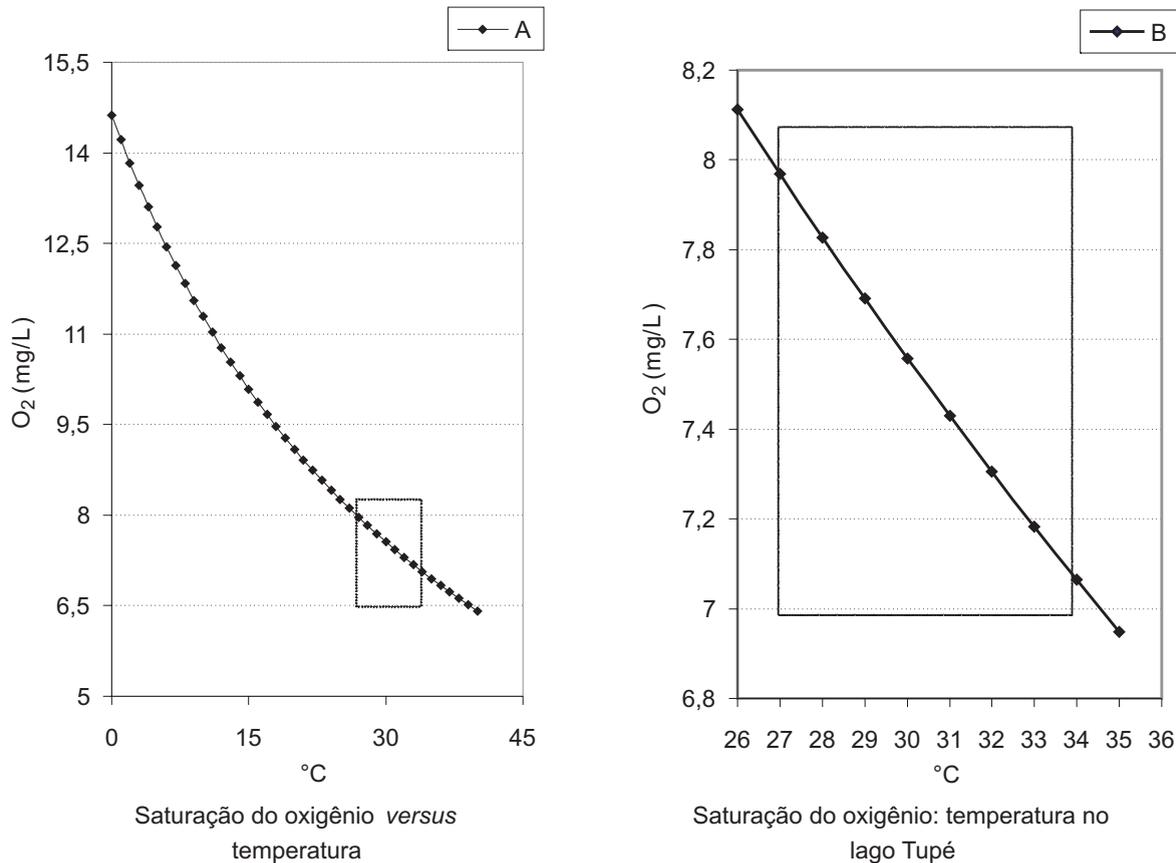


Figura 2. Variação da solubilidade do oxigênio com a temperatura na água pura a 760 mmHg, de 0°C a 40°C (lado A) e nas temperaturas registradas no lago Tupé a mesma pressão. De novembro de 2001 a setembro de 2002 (de 27°C a 34°C), caixa pontilhada (lado B em detalhe).

representar razoável quantidade de oxigênio para a comunidade aquática.

Nos rios, abaixo de grandes cachoeiras o teor de oxigênio na água pode estar aumentado em consequência da agitação mecânica, ou como menciona Likens & Ragotzkie (1965, 1966), bolhas de ar podem ser transportadas para maiores profundidades, onde, devido à maior pressão hidrostática, a solubilidade do O₂

aumenta. Dados recentes (Darwich *et al.*, Não publicado) sobre o curso superior do rio Madeira evidenciaram que a concentração do oxigênio dissolvido na coluna de água está aumentada em cerca de 20% até mesmo cerca de 10 quilômetros à jusante das principais cachoeiras. Considerando que nesse trecho o rio apresenta grande velocidade de corrente e visibilidade praticamente nula em consequência da grande quantidade de material em suspensão (transparência ao disco de Secchi de 10cm), este oxigênio é certamente



Darwich *et al.*

proveniente da atmosfera em sua quase totalidade e está sendo adicionado ao rio por agitação mecânica nas cachoeiras.

Têm-se determinado o metabolismo de certas comunidades de rios, lagos etc., através de medidas de variações diárias do teor de oxigênio na água. Rios não poluídos normalmente estão saturados ou ligeiramente supersaturados de oxigênio e podem apresentar grandes variações sazonais (Golterman, 1975). No entanto, na Amazônia, grandes rios como o Negro, Solimões e o Amazonas, em excelente estado de conservação, podem apresentar baixas concentrações de oxigênio dissolvido no período de águas altas (cheia). Nesse período Darwich (1995), mediu no rio Solimões/ Amazonas concentrações com cerca de $1,3\text{mg.L}^{-1}$, em torno de 15% de saturação na coluna de água. Os teores mais elevados registrados variaram de 77 a 95% de saturação, no período de seca, com média anual pouco abaixo de 60%. O teor de oxigênio nos grandes rios amazônicos parece ser consideravelmente estável em ciclos diários, independente de sua quantidade na coluna de água como registrou Darwich (1995) para o rio Amazonas. Os valores variaram com a fase do ciclo hidrológico. Por outro lado, em ambientes lênticos amazônicos a variação é freqüentemente grande e estreitamente relacionada com a área do lago, com a fase do ciclo hidrológico, com a hora do dia e com a profundidade da coluna de água, como registrado no lago Tupé. Nesses ambientes, certamente, dois fatores antagônicos importantes atuam na disponibilidade do O_2 presente: de um lado a difusão atmosférica e a produtividade primária e, de outro, a oxidação direta do material orgânico que entra no ambiente, a atividade bacteriana e a respiração da comunidade aquática.

Os lagos de várzea amazônicos têm pouca profundidade (cerca de 6-8m no nível médio das águas), quase sempre variando com a flutuação anual do nível da água dos grandes rios. Através da sua conexão com o rio (paraná, canal de ligação), enchem durante o período de subida das águas desses rios e secam à medida que essas águas baixam de nível. Independente da sua superfície, alguns secam parcialmente, enquanto outros ficam

completamente secos, no nível mais baixo das águas dos rios que os abastecem. De acordo com Junk (1980) e Furch *et al.* (1983), dentro de uma classificação limnológica esses lagos podem ser colocados entre rios (sistemas abertos) e lagos (sistemas fechados). Como resultado dessa mudança periódica, a química da água do lago de várzea é principalmente influenciada pelo suprimento, também periódico, de substâncias solúveis e de matéria inorgânica particulada a qual forma os depósitos de sedimentos aluviais e com isso o sedimento do próprio lago (Furch *et al.*, 1983). Como parte desse conjunto encontram-se os lagos de várzea em ilhas de várzea, provavelmente muito mais dinâmicos em suas modificações do que os demais, visto que, no pico das cheias podem adquirir características fluviais pelo transbordamento dos diques laterais. Além disso, estão sujeitos à modificações geográficas mais acentuadas pela queda de diques e deposição anual sedimentos. Todas essas modificações cíclicas exercem particular influência sobre a concentração do oxigênio dissolvido na coluna de água dos rios e lagos dessa região.

Estudos sobre mudanças sazonais de variáveis físico-químicas e químicas em lagos de várzea têm mostrado que eles podem ser quimicamente diferentes entre si; que a qualidade de suas águas pode ser consideravelmente diferente da do rio e que um mesmo lago, quase sempre, apresenta diferentes padrões no conteúdo de eletrólitos em diferentes anos e períodos de um mesmo ano (Schmidt,



1972a,b; Junk, 1973; Furch *et al.*, 1983; Darwich, 1995; Kern, & Darwich, 1997, 1999).

Sabe-se que, independente das modificações hidrológicas do rio principal, é de fundamental importância a contribuição de pequenos igarapés que fluem da terra firme para os lagos de várzea localizados nas margens dos rios. Nos períodos de maior afluência, as águas destes igarapés apresentam elevados teores de oxigênio dissolvido e grande escassez de eletrólitos e nutrientes. De um lado, podem diluir o teor das substâncias dissolvidas e, de outro, melhorar as condições de oxigênio das águas dos lagos de várzea. A influência dessa contribuição sobre o lago é tanto maior quanto maior for o volume da afluência ou, quanto menor for o volume do lago. Além disso, se o lago estiver mais próximo da terra firme essa influência pode ser ainda maior porque a área de várzea drenada será menor. Nesse caso, há, portanto, menor possibilidade de consumo de O_2 no trajeto e menor quantidade de material lixiviado do solo devido ao menor percurso na área de várzea rica em nutrientes. A maior parte dessa água da terra firme é dependente das chuvas locais e sem correlação com a oscilação do nível da água dos rios. Nos lagos de ilhas do Solimões/Amazonas, e em outros, obviamente a água das chuvas nas proximidades, antes de chegar ao lago passa por solos ricos em nutrientes oriundos da deposição de sedimentos do rio. No seu trajeto, além do empobrecimento dos solos com maior quantidade de nutrientes, a

água favorece os processos de decomposição, principalmente do material vegetal morto provocando lixiviação e liberação de íons e nutrientes que são transportados ao lago.

Soma-se a isso, uma série de processos internos do lago, como o desenvolvimento e a decomposição dos produtores primários e os processos de ressuspensão dos sedimentos, que desempenham um papel decisivo no enriquecimento da água. De acordo com Furch *et al.* (1983), o conteúdo de elementos e nutrientes de um lago de várzea é muitas vezes atribuído às macrófitas aquáticas e semi-aquáticas cuja produção primária e biomassa por unidade de área, excede àquela do fitoplâncton.

Os lagos da bacia do rio Negro também estão sujeitos à variação de nível do rio, bem como recebem a afluência de pequenos igarapés de floresta. Da mesma forma, as águas destes igarapés apresentam-se bem oxigenadas e com baixa concentração de íons dissolvidos, diluindo ainda mais a água dos lagos. Assim como na várzea, sob esse aspecto, a maior parte dessa água depende das chuvas nas bacias desses igarapés e não da oscilação do nível do rio. A diferença marcante é que, mesmo no trajeto final desses igarapés, onde fluem por solos de áreas inundáveis, não há arraste de solos ricos em nutrientes depositados junta-mente com os sedimentos na inundação anterior, como acontece na várzea. Além disso, pode ser desprezível a lixiviação de íons de material vegetal oriundo da decomposição de macrófitas aquáticas que cresceram durante a enchente e cheia, pela quase ausência dessa vegetação na bacia do rio Negro. A consequência imediata desse fato no período de descida das águas e na seca é a diminuição do teor iônico de suas águas nas camadas mais superficiais, mesmo com a decomposição do material vegetal morto da floresta transportado ao lago pelas chuvas e igarapés. Ainda como resultado dessa atividade há o transporte de água com maior concentração de oxigênio dissolvido, pelo baixo consumo desse gás no trajeto até o lago e pela adição mecânica de O_2 durante o percurso à bacia lacustre. Nessa fase o aumento da concentração de oxigênio dissolvido pode também estar favorecido pelo



Darwich *et al.*

aumento da transparência dos lagos tornando o ambiente mais propício à produtividade primária.

Para o conhecimento ecológico de um sistema aquático são necessárias informações básicas sobre sua dinâmica. Essa dinâmica, de acordo com Ganf & Horne (1975, *apud* Esteves *et al.*, 1988), se encontra em relação direta com a posição geográfica do ecossistema, tendendo a ser menos evidenciada em latitudes menores. Desta forma, até mesmo os modelos propostos dentro da própria Amazônia para o entendimento de ambientes hídricos devem ser observados especificamente para os locais e épocas onde foram desenvolvidos. Como o Tupé recebe a afluência de pequenos igarapés de floresta e está submetido à flutuação do nível do rio Negro, objetivou-se investigar a dinâmica espaço-temporal do oxigênio dissolvido na água desse lago e na sua afluência durante um ciclo hidrológico. Para melhor entender essa dinâmica, foram medidas variações nictemerais do O₂ na coluna de água do lago no mesmo período, o que poderá fornecer informações valiosas sobre o funcionamento e a ecologia de lagos na Amazônia.

Material e Métodos

Área de Estudo - Lago Tupé

O Tupé é um lago de área inundável com margens íngremes em um vale em forma de “V”, bloqueado por bancos de areia na sua foz, com superfície aparentemente bem protegida dos ventos. Está na margem esquerda do rio Negro, o maior rio de águas pretas do mundo em bom estado de conservação. Apresenta características hidrológicas semelhantes à maioria dos lagos de área inundável da bacia desse rio. Há presença de estreitas faixas de igapó nas áreas de cabeceiras, nas laterais, nos igarapés e vales no entorno do lago. Há também registros de poucos indivíduos de *Utricularia* sp. Durante a enchente, cheia e vazante a qualidade de sua água aproxima-se mais da do rio Negro, visto que acima da cota 19m a.n.m. o rio aflui ao lago e ambos apresentam flutuação de nível semelhante. Na

cheia as profundidades variam de 10m a 15m. No período de águas baixas (seca), quando a cota do rio é menor que 19m a.n.m., há apenas afluência do lago ao rio e pode-se dizer que o lago isola-se do rio, visto não haver qualquer possibilidade de influência do rio sobre o lago. Nesta fase do ciclo hidrológico, sua água assemelha-se quimicamente às águas dos igarapés de terra firme que afluem à bacia do lago e, à água da precipitação pluviométrica. No pico dessa fase sua profundidade varia de 0,5m nas áreas de cabeceira, à 4,5m, em média, na região central, que é o encontro dos eixos principal e secundário do lago. Esse desnível no fundo do lago, dá um declive no eixo principal de cerca de 1,3m.km⁻¹ das cabeceiras à região central, maior no eixo secundário. Detalhes sobre a área do lago são encontrados em Aprile *et al.* (2005a, neste volume).

Período da Amostragem

O teor de oxigênio dissolvido foi medido durante um ciclo hidrológico que compreendeu a seca (águas baixas) de 2001, e a enchente, cheia e vazante de 2002. As datas de registros nesses períodos foram, respectivamente, 21 de novembro, 08 de março, 09 de junho e 28 de setembro. As medidas foram feitas com a finalidade de acompanhar a dinâmica espacial e as variações nictemerais e sazonais do oxigênio na coluna de água do lago. Além disso, a concentração de O₂ foi medida a) na coluna d'água dos cinco principais igarapés de floresta que



afluem ao lago; b) no canal de ligação do lago ao rio e, c) no rio Negro, visando quantificar a participação da afluência de acordo com a fase do ciclo hidrológico.

Estações de Coleta

O oxigênio foi medido em 12 (doze) estações de coleta: uma no trecho inferior de cada um dos cinco principais igarapés; uma no canal de conexão do lago ao rio (EC11); uma no rio Negro na parte central da calha do rio à montante do canal (EN12) e, 5 (cinco) no lago, sendo duas em cada um dos dois eixos do lago e uma na parte central de encontro desses eixos. Nesta última, a estação central do lago (ET10), foi medida a variação nictemeral da concentração do oxigênio dissolvido no mesmo período. Os principais igarapés e as respectivas estações de coleta foram: igarapés da Helena (EI2), das Pedras (EI3), da Cachoeira (EI4), do Monteiro (EI6) e da Terra Preta (EI8). As estações no lago compreenderam, além da estação central, as estações nas cabeceiras principal (ET1) e secundária (ET7), e as estações laterais ET5 e ET9, respectivamente, nos eixos principal e secundário. São estações aproximadamente equidistantes da estação ET10, sendo a primeira entre os igarapés da Cachoeira e do Monteiro e a outra, abaixo do igarapé da Terra Preta (Darwich *et al.*, 2005, neste volume; Aprile *et al.*, 2005b, neste volume).

Nível da Água

O nível da água no rio Negro variou de 16,81m a.n.m. (metros acima do

nível do mar) na seca de 2001, à 28,91m a.n.m., no pico da cheia de 2002. No período final desse estudo (vazante de 2002), o nível d'água era de 23,25m a.n.m. O nível de enchente no dia de coleta foi de 23,91m. Na seca de 2002 (novembro), o nível do rio baixou até a cota 17,19m a.n.m. e pode-se verificar o pulso de inundação do rio Negro (Fig. 3), com curva monomodal característica, como as registradas para o rio Amazonas. No período de seca a profundidade do rio na estação EN12 variou em torno de 30m e a largura entre 3000 e 3500m. Informações adicionais sobre a flutuação do nível das águas em outro ciclo hidrológico estão também descritas em Aprile & Darwich (2005, neste volume) e Aprile *et al.* (2005, neste volume).

Durante todo o período dessa pesquisa a profundidade do lago variou com uma amplitude máxima de cerca de 10m. Pode-se verificar que tanto na seca de 2001 quanto na de 2002, com diferentes níveis do rio, a profundidade na estação central do lago (ET10) foi sempre a mesma (Fig. 3). A curva indica que na seca de 2001, o lago ficou isolado do rio por um período bem maior, e ainda assim a profundidade máxima do lago pouco oscilou em torno de 4,5m. O fato da profundidade na estação central ser sempre em torno de 4,5m, ainda que o rio esteja muito abaixo da cota 19m a.n.m., acontece porque o lago “isola-se” do rio abaixo dessa cota. A cota 19m a.n.m. (18,7m) corresponde ao nível altimétrico do canal de ligação do lago ao rio. Durante o isolamento há apenas afluência do lago ao rio. A água que flui é resultante, principalmente, dos principais igarapés acima mencionados e das afluências das cabeceiras principal e secundária do lago, além da água de precipitação pluviométrica diretamente no lago e na sua bacia de captação.

Como tem sido dito, o pulso de inundação exerce influência marcante sobre as áreas inundáveis na Amazônia. No lago Tupé a variação da amplitude do período do ciclo hidrológico com água abaixo da cota 19m tem importância sobre a variação das condições hidroquímicas do lago, porque nesta fase do ciclo não há influência do rio sobre a bacia lacustre. Durante esse período as características da água são resultantes da afluência ao lago e dos processos internos na bacia

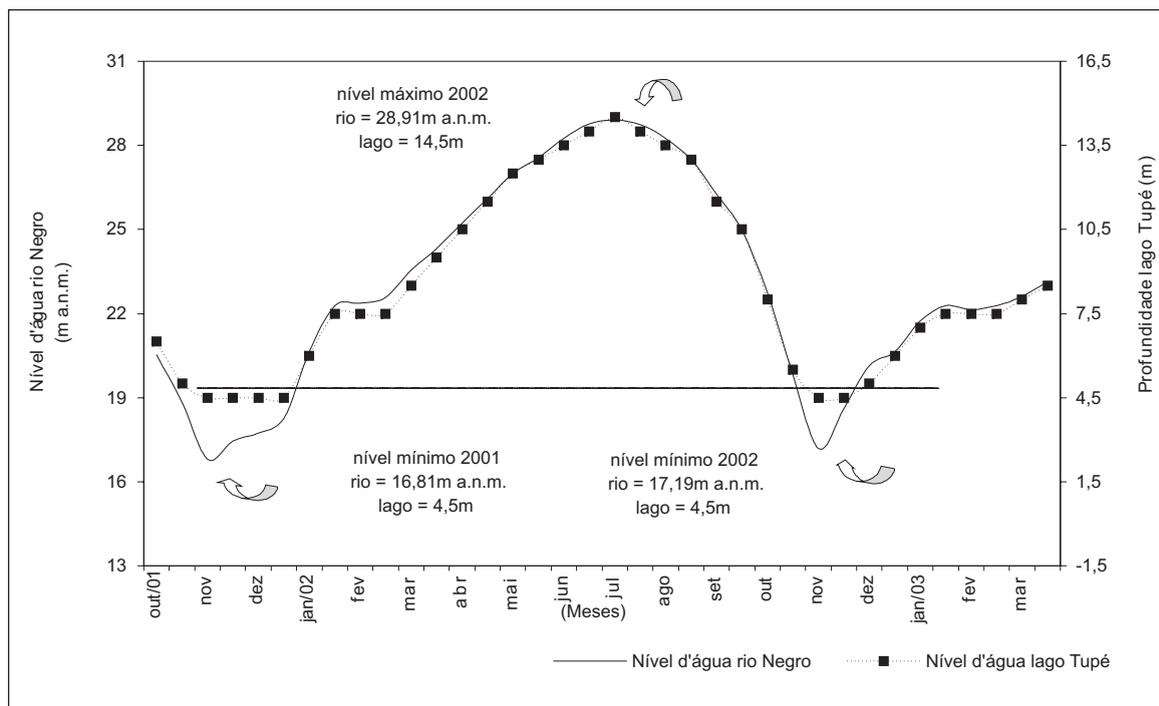


Figura 3. Nível da água no rio Negro medido no Porto de Manaus e no lago Tupé, na Estação Central (ET10). De outubro de 2001 a março de 2003.

lacustre. Há modificações evidentes em variáveis limnológicas, como a transparência da água, temperatura, produtividade primária, teor de gás carbônico, potencial hidrogeniônico, condutividade elétrica, demandas química e bioquímica de oxigênio e, particularmente, na concentração do oxigênio dissolvido, objetivo central dessa abordagem.

Medidas do Oxigênio

A concentração de oxigênio dissolvido foi medida na coluna de água de todas as estações de amostragem do lago, a cada 0,5m, da superfície à profundidade máxima. No rio Negro as medidas foram, a cada metro, até 10m de profundidade. Para o estudo da variação nictemeral as medidas foram realizadas na coluna de água da Estação Central, em intervalos de três horas, durante 24h, em cada fase do ciclo hidrológico. A escolha da Estação

Central tomou como base a geomorfologia do local, de tal maneira que a amostragem coincidissem com a confluência dos braços principal (longitudinal) e secundário (transversal) do lago, e abrangesse a maior área livre e mais profunda da bacia lacustre. Essa região central é a área de captação de toda a afluência, tanto do rio quanto dos igarapés, à bacia lacustre, podendo-se detectar nessa região, grandes transformações no ambiente em estudo. Nesse ponto foram registradas as maiores profundidades da bacia do lago.

As medidas do oxigênio dissolvido tiveram por base as recomendações do Programa Biológico Internacional para



ambientes aquáticos (Golterman *et al.*, 1978). Os teores foram obtidos em mg.L^{-1} e em porcentagem de saturação por meio de leitura direta com um oxímetro digital WTW modelo OXI-197, com sensibilidade respectiva de 0,1 e 0,01. Paralelamente, as medidas obtidas no potenciômetro foram comparadas com determinações analíticas pelo método de Winkler modificado segundo recomendações de Mackereth *et al.* (1978) e Wetzel & Likens (2000).

Foi descrito que, o lago Tupé encontra-se praticamente ao nível do mar e em uma localização equatorial com elevadas temperaturas. Como em temperaturas mais elevadas, menores concentrações de O_2 representam maiores porcentagens de saturação, uma mesma quantidade em mg.L^{-1} tem significados diferentes para regiões de latitudes diferentes. Dessa forma, a importância fisiológica desse gás dissolvido para a comunidade aquática deve estar associada às suas medidas em porcentagem de saturação.

Resultados e Discussão

Oxigênio Dissolvido

Durante o ciclo hidrológico pesquisado as camadas mais superficiais da coluna de água, em torno da zona eufótica do lago Tupé e principais afluições, apresentaram elevadas concentrações de O_2 . Excetuando-se o rio Negro, com distribuição homogênea na coluna de água, nas camadas mais profundas dos outros ambientes os teores de O_2 foram consideravelmente reduzidos. Houve variação de

acordo com o local, com a posição no lago e na coluna de água, bem como com o período do ciclo. As variações sazonais e diárias evidenciaram, em todas as fases, a existência de epilímnio e hipolímnio bem definidos. A localização geográfica do lago, seu posicionamento em relação ao rio, suas margens íngremes e com foz bem protegida, além das elevadas temperaturas, são alguns dos fatores considerados de importância quanto à distribuição espacial (longitudinal e vertical), temporal (sazonal) e nictemeral do O_2 , bem como quanto à circulação de camadas naquele ambiente.

Variação Espaço-Temporal

As medidas de oxigênio dissolvido nos diferentes ambientes evidenciaram, em todas as fases do ciclo hidrológico, elevadas concentrações de O_2 nas camadas mais superficiais (Figs. 4 a 7). Verifica-se, entretanto, em todo o ambiente, uma nítida diferença entre os teores registrados na cheia e nas outras fases do ciclo. Na cheia, com profundidades entre 10 e 15m, as maiores concentrações de O_2 na bacia lacustre estiveram em torno de 50% de saturação nas camadas mais superficiais da área central do lago, no rio e no canal do lago (Fig. 6). Nas outras regiões do lago e nos igarapés os teores superficiais oscilaram em torno de 30% de saturação. Na seca, com profundidades entre 0,5m e 5m, a saturação de O_2 dissolvido atingiu seus maiores valores e manteve-se entre 100% e 150% nas camadas superficiais, principalmente nas áreas mais rasas e na região central do lago (Fig. 4). No rio Negro e nas outras regiões da bacia lacustre a saturação manteve-se entre 80 e 100% de saturação. Nesta fase do ciclo, nas estações com profundidades até 1,0m, as concentrações foram elevadas, mesmo no fundo. No rio, durante todo o período, praticamente não existiu diferenças entre as concentrações registradas na coluna de água. Ainda nesta fase, apenas na estação Central e nas laterais a esta estação (principal e secundária) foi registrada a existência de epilímnio e hipolímnio bem definidos. Desta forma,

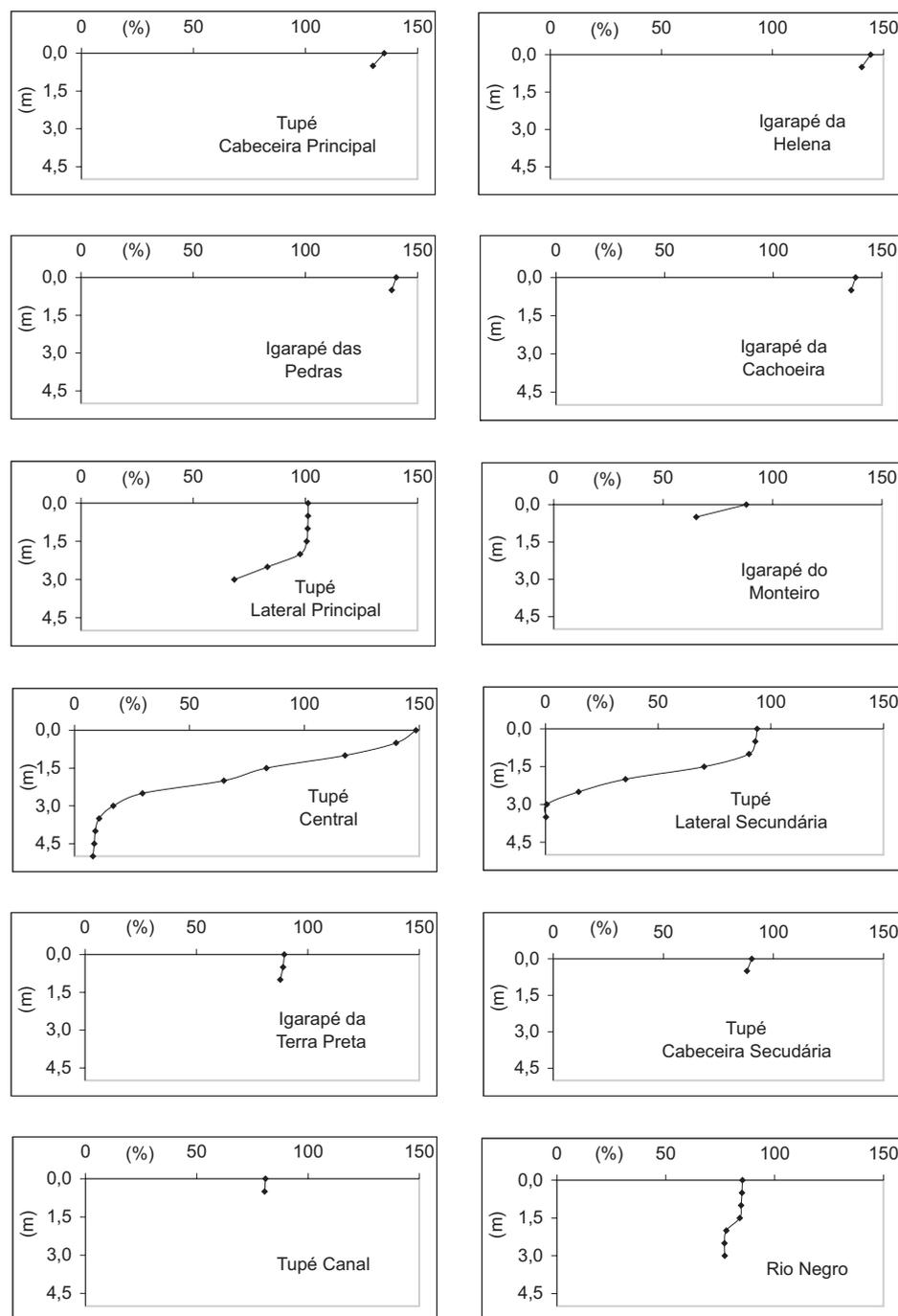


Figura 4. Variação espacial da concentração de oxigênio dissolvido no lago Tupé, margem esquerda do Rio Negro (Manaus-AM) e afluentes. Seca 2001.

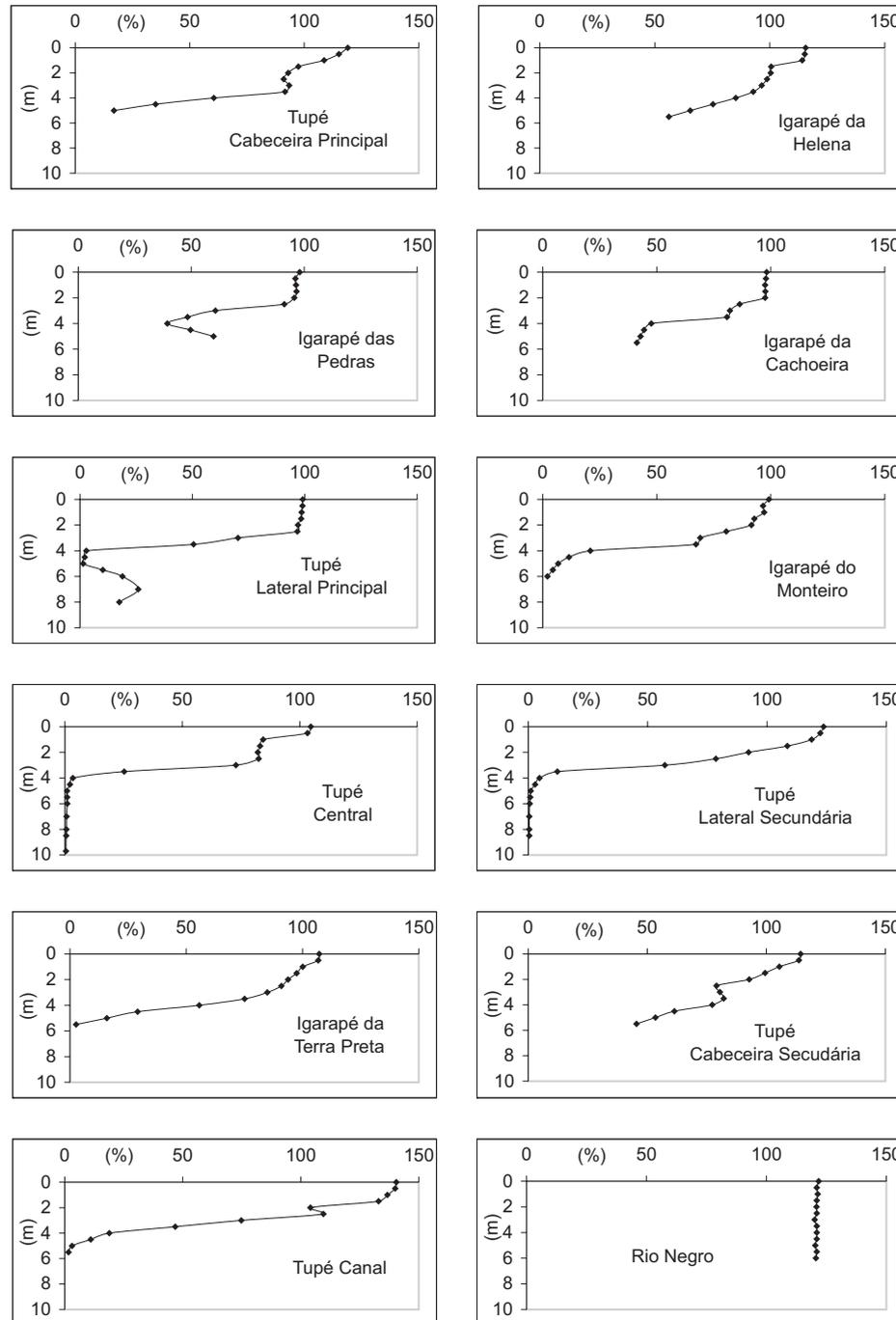
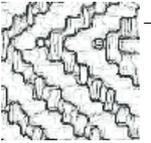


Figura 05. Variação espacial da concentração de oxigênio dissolvido no lago Tupé, margem esquerda do Rio Negro (Manaus-AM) e afluentes. Enchente 2002.

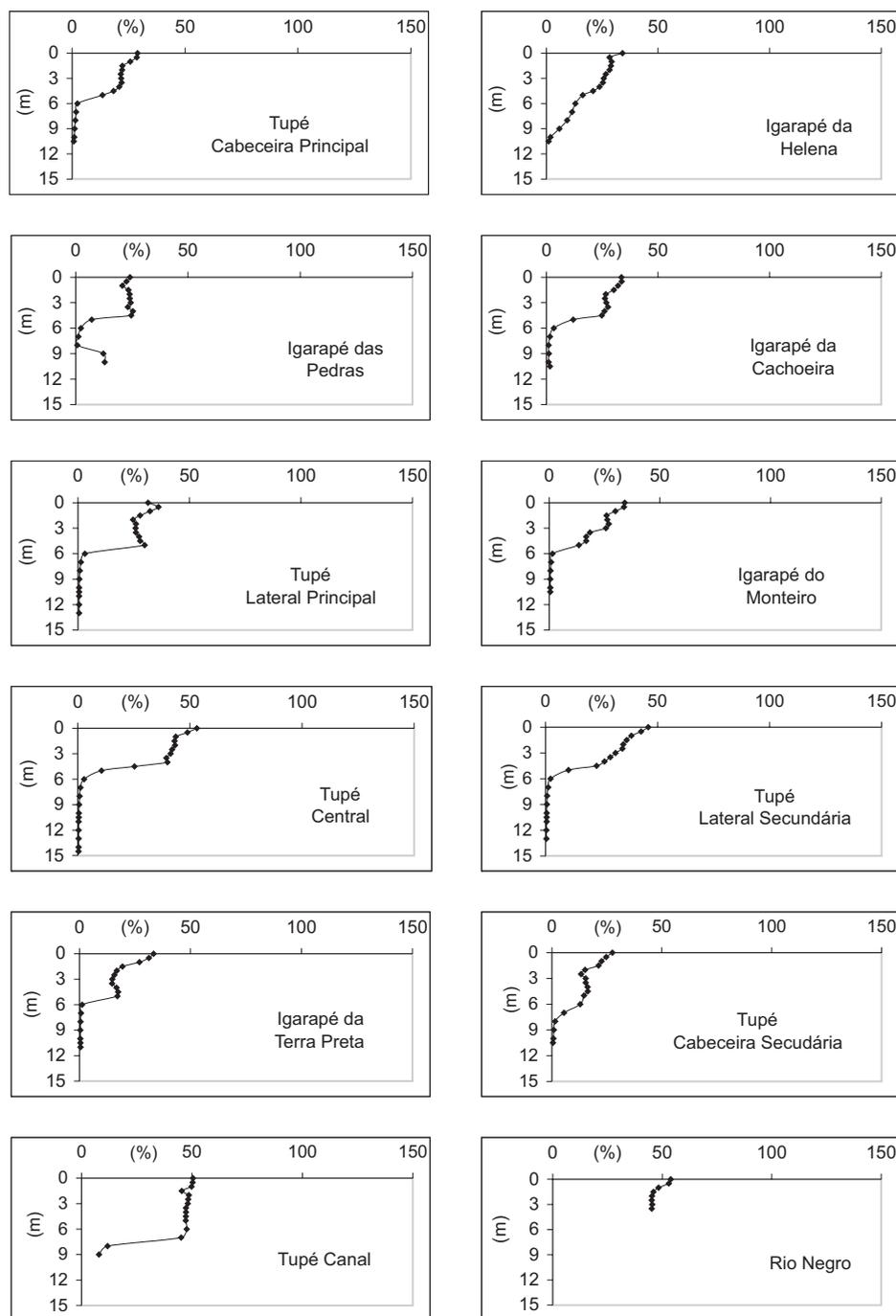


Figura 6. Variação espacial da concentração de oxigênio dissolvido no lago Tupé, margem esquerda do Rio Negro (Manaus-AM) e afluentes. Cheia 2002.

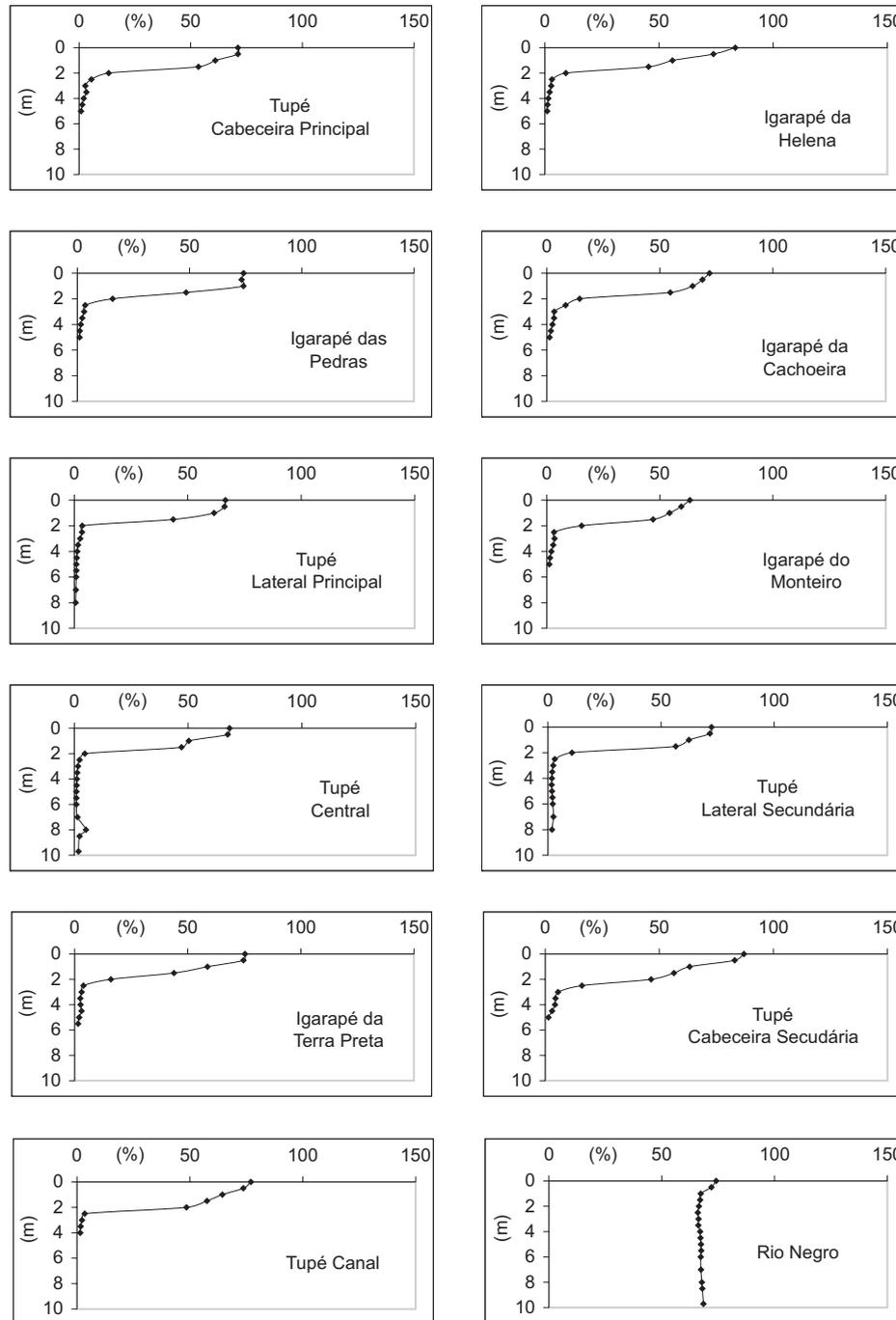
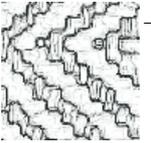


Figura 7. Variação espacial da concentração de oxigênio dissolvido no lago Tupé, margem esquerda do Rio Negro (Manaus-AM) e afluentes. Vazante 2002.



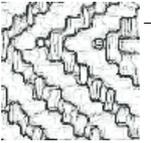
na área central do lago, essas duas regiões ocuparam cerca 20% e 40% da coluna de água, respectivamente. O epilímnio, supersaturado, e o hipolímnio com teores em torno de 10% de saturação. No metalímnio a saturação do O_2 diminuiu de cerca de 80 a 15% de saturação. Assim sendo, na área mais profunda do lago ficou caracterizada a existência de oxiclina com perfil clinogrado clássico. Esses dados sugerem a existência de elevada produção primária e falta de circulação da coluna de água do lago no período de águas mais baixas. Este fato não implica, necessariamente, em falta de movimentos na coluna de água. Sugere-se, todavia, a existência de fluxos laminares nos eixos principal e secundário do lago, das cabeceiras ao canal de ligação. Na seca, certamente os fluxos são nas camadas mais superficiais, menos densas, em consequência do maior aquecimento superficial e da menor amplitude de temperatura entre pequenas camadas. Esses fluxos são provenientes da afluência à bacia lacustre e devem seguir estratos diferentes de acordo com o nível da água. Durante a época em que não há entrada de água do rio ao lago, a principal contribuição de água à bacia lacustre é dos igarapés e das próprias cabeceiras, além da pluviométrica. Embora as concentrações de O_2 dessa afluência sejam elevadas nesse período, o hipolímnio da região central apresenta teores abaixo de 10% de saturação. Deve ser o resultado da falta de circulação vertical e do maior consumo por respiração e decomposição da matéria orgânica que se precipita no fundo e pode variar em concentração de acordo com a hora do dia.

Na enchente (Fig. 5) e cheia (Fig. 6), os dados induzem confirmar a existência de fluxos laminares das cabeceiras à foz do lago em estratos mais profundos da coluna de água. Em estações à montante da Central, com maior frequência no eixo longitudinal do que no transversal, foram medidas maiores concentrações de oxigênio em camadas mais profundas de regiões do hipolímnio. Embora sejam períodos de entrada de água do rio com maior teor de oxigênio, não foi registrado, no canal ou mesmo na estação Central, alterações na quantidade de O_2 que se pudesse concluir em um movimento de camadas profundas no sentido rio-lago.

Especialmente na enchente quando as camadas superficiais do lago parecem estar sendo influenciadas pela entrada de água do rio com maior concentração de oxigênio. Além disso, em todos os períodos a mistura na coluna d'água das estações no lago parece estar restrita às camadas superficiais, limitada, no máximo à zona eufótica com as maiores concentrações. Na enchente a quantidade de O_2 esteve entre 100 e 140% de saturação nas camadas mais superficiais de todo o ambiente, inclusive do rio. Os dados de vazante mostraram, apenas na estação Central, pequeno aumento no teor de oxigênio em camadas do hipolímnio. Nesta fase, o teor de O_2 foi maior do que no período anterior e menor do que na enchente e seca. Nota-se ainda, que a região do epilímnio com maiores concentrações de oxigênio foi consideravelmente reduzida, oscilando em um estrato de cerca de 1,5m. Nela, os teores variaram entre 40 a 80% de saturação. No rio os valores foram menores e relativamente constantes em torno 50% de saturação, semelhantes aos verificados na cheia.

Varição Nictemeral

O estudo de variação nictemeral na coluna de água em ambientes aquáticos pode esclarecer fenômenos não perfeitamente entendidos em análise sazonal. Em lagos equatoriais como o Tupé, alterações diárias de variáveis ambientais podem ser de fundamental importância para o entendimento do comportamento de comunidades aquáticas. Nesta região,



onde o fotoperíodo tende à uniformidade durante o ano, com amplas variações diárias de luz e temperatura, permite supor a existência de uma grande amplitude de variação no teor de variáveis como o oxigênio dissolvido na coluna de água.

A análise de variações diárias do O_2 na região mais profunda e de maior área livre do lago Tupé, Estação ET10, mostrou a existência de acentuação da estratificação no teor de saturação desse gás durante um ciclo hidrológico (Figs. 8 a 11). Nesse período, as concentrações variaram da supersaturação no epilímnio, a teores consideravelmente reduzidos e, às vezes, à anoxia na camada mais inferior do hipolímnio. No metalímnio o gradiente foi sempre acentuado, freqüentemente partindo da supersaturação, no limite inferior do epilímnio, à valores abaixo de 5% de saturação, no limite superior de hipolímnio.

Durante as águas baixas (Fig. 8) as maiores concentrações foram registradas à tarde (entre 15 e 18h) no primeiro metro de profundidade. Desse horário até às 6h, houve diminuição, com aumento lento até às 12h. Nota-se, entretanto, que a coluna d'água permanece estratificada ao longo de 24h, e praticamente anóxica entre 3m e a profundidade máxima (5m). Vale salientar que mesmo durante o período noturno todo o epilímnio, formado por uma camada em torno de 1,5m, manteve-se com teores de O_2 acima de 80% de saturação, até mesmo às 6h (88%). A diminuição no teor de oxigênio nas camadas mais superficiais no período

noturno parece estar mais associada à perda de O_2 por difusão para a atmosfera, do que pelo consumo em atividades respiratórias e de decomposição de matéria orgânica. Isto porque foi muito mais intensa a diminuição da saturação no início da noite (até às 21h), quando o epilímnio estava supersaturado, do que no restante do período no escuro. Nas primeiras horas a saturação foi reduzida de 140% a cerca de 100%. Nos horários seguintes a perda foi em torno de apenas 10% e esta sim, pode ser atribuída à respiração e oxidação. Por outro lado, a decomposição certamente é mais intensa nas camadas mais profundas, visto que, após as 21h a metade inferior da coluna de água do lago encontrava-se com menos de 1% de saturação de oxigênio. Ressalta-se ainda, que a variação do O_2 no epilímnio sugere circulação apenas nessa camada e intensa produtividade na zona eufótica do lago, principalmente em sua região mais superficial. Dela, o O_2 pode estar alcançando, por difusão, camadas mais abaixo em direção à zona afótica, em especial nos horários com maiores concentrações de oxigênio.

A migração de O_2 para o hipolímnio em outras fases do ciclo deve estar também favorecida pela afluência, uma vez que os dados de temperatura mostraram ser o lago Tupé um ambiente de difícil circulação (Darwich *et al.*, 2003). Esses autores registraram, na seca, amplitudes de variação da temperatura de até 6°C com menores valores em torno de 27°C. Nessa faixa de temperatura a diferença de densidade é consideravelmente grande quando comparada às diferenças de temperaturas em regiões temperadas ou mesmo subtropicais e tropicais. Além disso, e visto que o lago Tupé apresenta-se com margens íngremes e floresta que protegem dos ventos, a estratificação, tanto térmica quanto do O_2 , parece ser bastante estável e duradoura. No entanto, é uma estratificação compatível com atividades biológicas no meio hídrico, o que pode ser comprovado pela presença de animais planctônicos na coluna d'água. A evidência dos fluxos laminares no lago deve proporcionar condições vitais nas camadas mais profundas, ainda que seja com baixos valores de pH e reduzidas concentrações de oxigênio. Logo, a estratificação no Tupé não significa

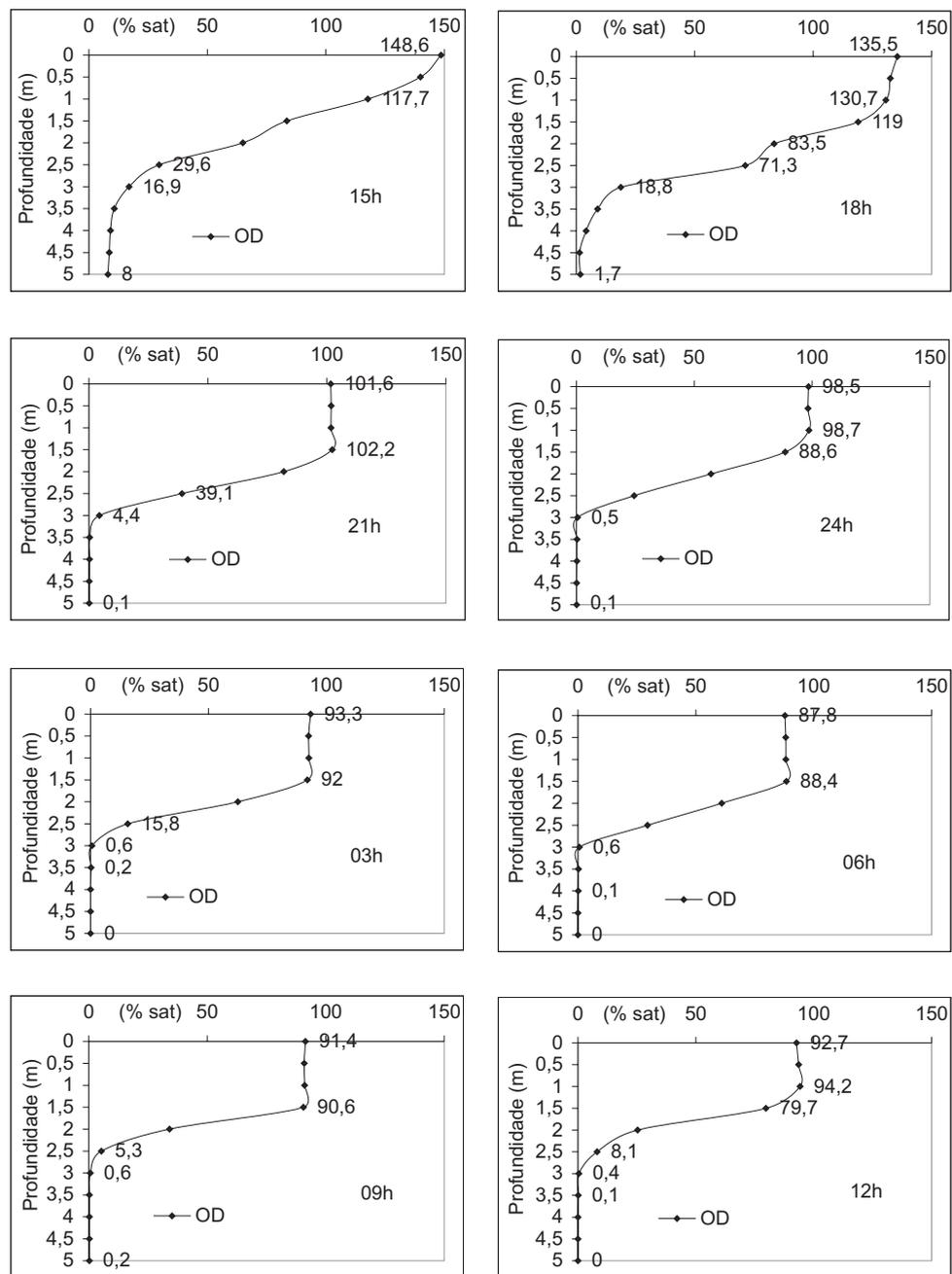


Figura 8. Variação nictemeral da concentração de oxigênio dissolvido (OD) em percentagem de saturação (%sat). Estação Central (ET10), Lago Tupé, margem esquerda do Rio Negro (Manaus-AM). Período de seca: 20-21.novembro.2001 (de 15 às 12h).

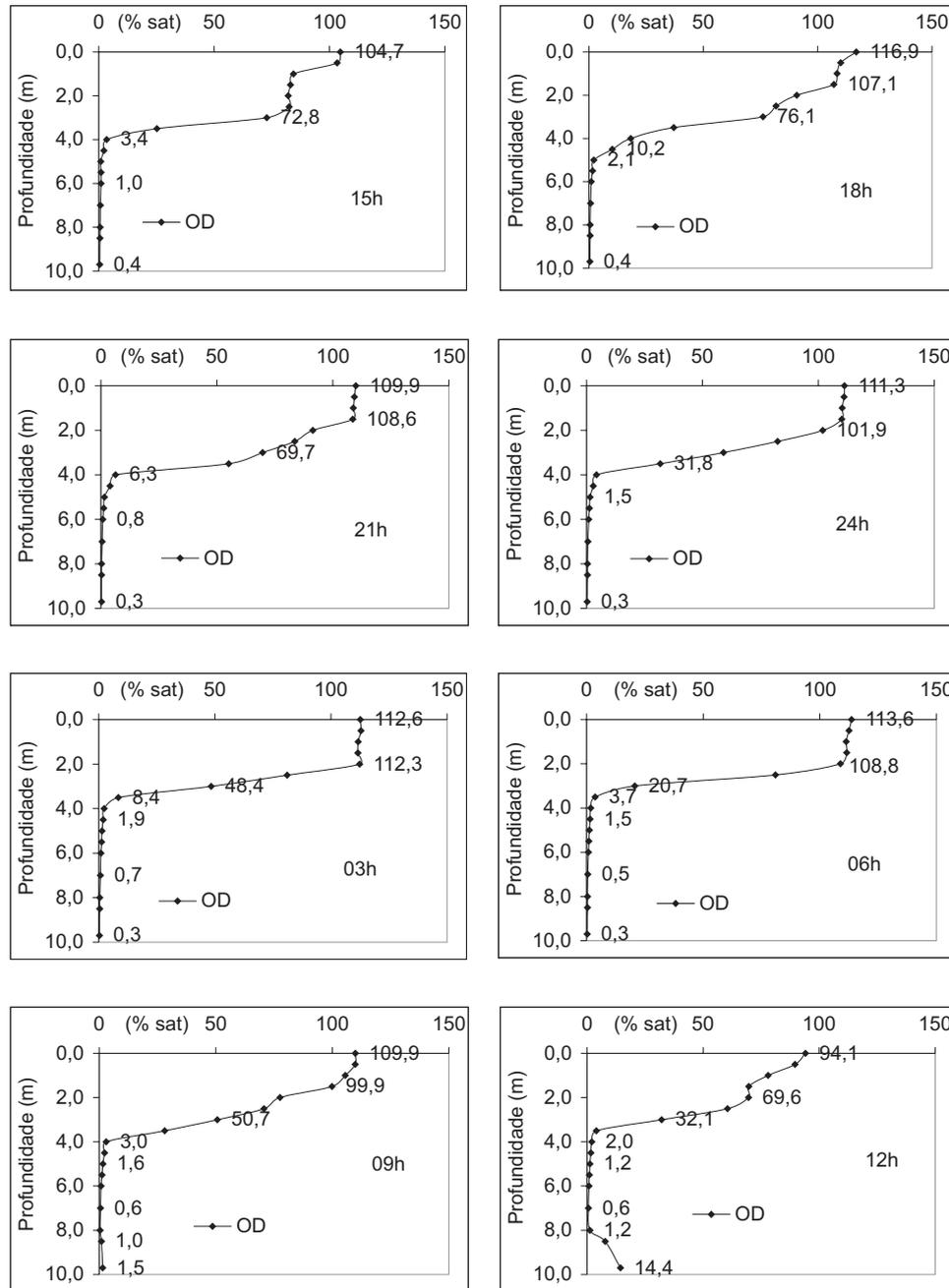
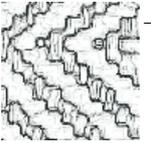


Figura 9. Variação nictemeral da concentração de oxigênio dissolvido (OD) em percentagem de saturação (%sat). Estação Central (ET10), Lago Tupé, margem esquerda do Rio Negro (Manaus-AM). Período de enchente: 07-08.março.2002 (de 15 às 12h).

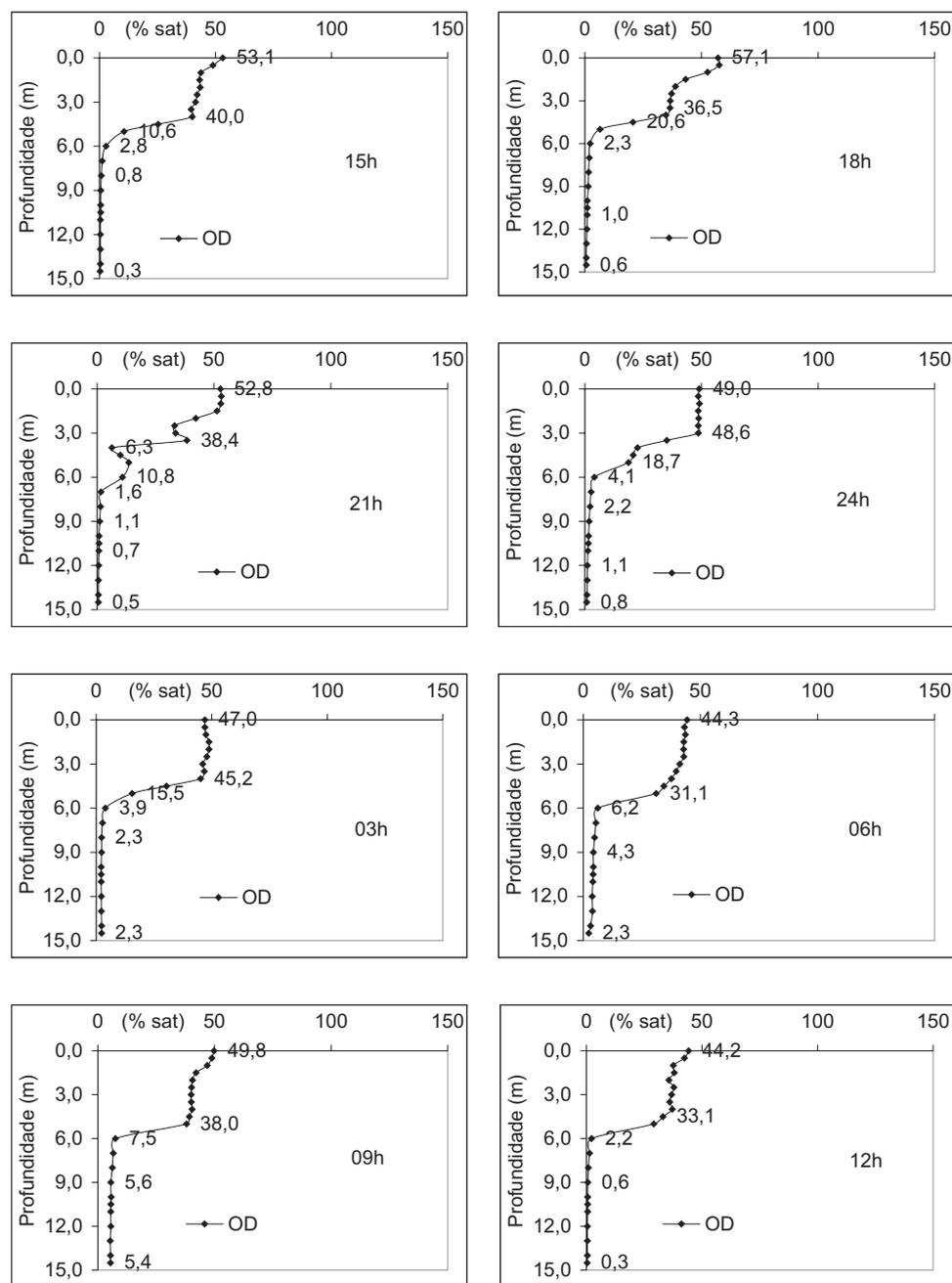


Figura 10. Variação nictemeral da concentração de oxigênio dissolvido (OD) em percentagem de saturação (% sat). Estação Central (ET10), Lago Tupé, margem esquerda do Rio Negro (Manaus-AM). Período de cheia: 08-09.junho.2002 (de 15 às 12h).

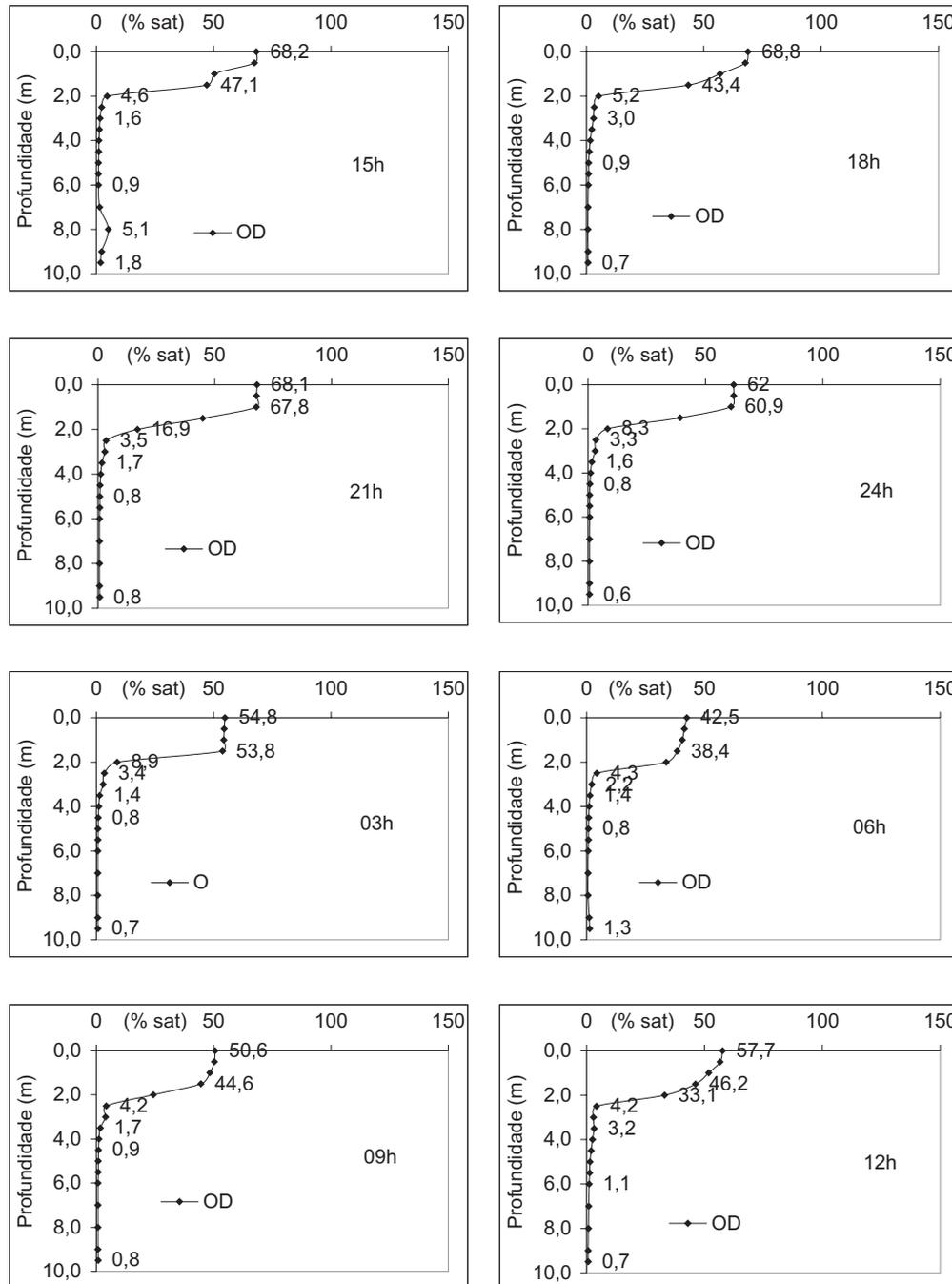
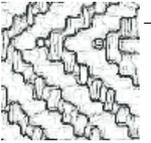


Figura 11. Variação nictemeral da concentração de oxigênio dissolvido (OD) em percentagem de saturação (% sat). Estação Central (ET10), Lago Tupé, margem esquerda do Rio Negro (Manaus-AM). Período de vazante: 27-28.setembro.2002 (de 15 às 12h).



necessariamente estagnação da coluna de água.

No período de cheia (Fig. 10), assim como na seca, a oxiclina na coluna de água foi bastante estável, porém com concentrações de oxigênio bem menores nas camadas mais superficiais, do que àquelas do período de águas baixas. Além dos menores teores de O_2 no epilímnio, a diferença marcante entre essas duas fases do ciclo hidrológico está na amplitude percentual das zonas eufótica e afótica e a localização, do metalímnio. Desta forma, verifica-se que enquanto no período de águas baixas a zona eufótica representava cerca de 60% da coluna de água, na cheia essa região era de apenas 20%. Em ambos os períodos a amplitude dessa zona oscilou em torno de 3m, maior na seca. A transparência de Secchi foi sempre um pouco menor no rio. Na seca o metalímnio aparece dentro da zona eufótica e, na cheia, abaixo dessa zona. A conseqüência mais óbvia dessas observações é a elevada concentração de O_2 na fase de águas baixas e, provavelmente, o maior consumo de oxigênio no fundo. Esta constatação pode ser o resultado do próprio aumento da produtividade primária do local em conseqüência da maior disponibilidade de luz, ainda que os nutrientes fossem igualmente disponíveis em ambos os períodos. Vale notar que, independente da análise iônica nas águas do rio Negro e do lago, essas verificações corroboram a afirmação de que no período de cheia o rio invade o lago. Nessa fase a influência fluvial pode ser marcante, mas não o suficiente para quebrar a oxiclina no lago (Fig. 6).

Nos períodos de enchente e vazante que são as fases intermediárias do ciclo hidrológico, as modificações na distribuição do oxigênio na coluna de água também foram relacionadas com a oscilação no nível da água. Em ambos os períodos as profundidades máximas do lago oscilaram em torno de 10m, com o nível do rio em cerca de 23,5m a.n.m. Durante essas fases do ciclo, manteve-se a estratificação do O_2 , porém com variação na amplitude do epilímnio, bem oxigenado, e do hipolímnio com reduzidas concentrações de O_2 . O metalímnio variou em localização na coluna d'água. Foram também registrados os fluxos longitudinais detectados em diferentes horários da análise nictemeral (Figs. 9 e 11).

Na enchente (Fig. 9), com exceção das medidas às 12h com valores entre 80 e 94% de saturação nas camadas mais superficiais, a água esteve supersaturada de O_2 , principalmente durante o período noturno com teores acima de 100% até 2m de profundidade. Verifica-se que a quantidade medida às 6h (114%) foi apenas um pouco menor do que a maior concentração de oxigênio nesse período, registrada às 18h (117%). Ao contrário do que pode ter ocorrido na seca, não é possível falar em grandes perdas de O_2 para a atmosfera durante a noite na enchente, uma vez que nesse horário a concentração de oxigênio foi sempre maior com valores acima da saturação (em torno de 110%). Pelas concentrações registradas não se pode afirmar que houve redução de oxigênio em conseqüência do maior consumo por respiração e oxidação da matéria orgânica na fase escura. Certamente esses processos continuaram ocorrendo em toda a coluna de água e durante todo o ciclo nictemeral, sendo a explicação mais provável para a manutenção dos altos níveis de O_2 no lago, a entrada de água do rio pelo canal. Nesse período foram registradas elevadas concentrações de O_2 no rio Negro (120%) e no canal (140%) de ligação do lago ao rio. Além disso, não se pode excluir a possibilidade de produção de O_2 no escuro por microorganismos nesses ambientes. Durante esta pesquisa, experimentos com demanda bioquímica de oxigênio em água do rio Negro, mostraram, com certa freqüência, maiores concentra-



ções de O_2 após cinco dias de incubação no escuro. Afora estas constatações, deve-se ressaltar que no lago, em todos os momentos, as concentrações de O_2 na enchente estiveram acima da saturação nas camadas mais superficiais, porém menores do que no rio e canal.

Em qualquer época do ciclo hidrológico o canal e o rio apresentam características lóxicas, um ambiente pouco propício à supersaturação. Por isso, devem ser ressaltadas as elevadas concentrações de O_2 registradas na enchente e a localização da estação de medidas no rio. Esta estação encontra-se cerca de 40km acima de sua foz e à montante dela não há acidentes geográficos (e.g., cachoeiras) que possam provocar aeração mecânica no rio. Considerando que acima e abaixo do ponto de coleta, o rio apresenta-se em alguns trechos com larguras acima de 10km, o acréscimo ou perda de O_2 poderia ocorrer por ondas em consequência de ventos temporários na área. Dessa forma, esses eventos poderiam contribuir para aumentar discretamente o teor de O_2 na água, mas a supersaturação mais evidente deve ser esperada somente como resultado de produção por fotossíntese. Assim sendo, toda a área do curso inferior do rio Negro deve estar funcionando como um imenso lago com produtividade primária fitoplanctônica característica, pelo menos no período de enchente. Medidas isoladas nesta área no início da vazante (18.08.2002) mostraram teores de oxigênio praticamente constantes

(39% saturação = 3mg.L^{-1}), nos primeiros 20m de uma coluna de água em torno de 40m. Nesse período, os valores de pH foram consideravelmente reduzidos nas maiores profundidades o que reforça a idéia de um grande lago com uma zona afótica extremamente redutora e variável de acordo com a fase do ciclo hidrológico. É possível que essa região seja habitada por uma comunidade característica e perfeitamente bem adaptada à elevadas concentrações de substâncias húmicas.

Na vazante a profundidade da coluna de água do lago e o perfil da distribuição do O_2 durante 24 horas foram semelhantes aos valores registrados na enchente, no entanto, a amplitude das concentrações de oxigênio nas camadas mais superficiais foi menor (Fig. 11). Da comparação entre essas fases verifica-se também que nelas o metalímnio ficou limitado à cerca de 1m de espessura, em torno de 10% da coluna de água. No entanto, enquanto na enchente o metalímnio localizou-se na zona afótica (entre 3m e 4m), na vazante esteve no meio da zona com luz fotossinteticamente ativa (entre 1m e 2m). A importância dessa verificação é mostrar a maior ou menor participação da água do rio na bacia lacustre e a influência do pulso de inundação sobre o teor de oxigênio no lago. Assim, os valores de O_2 nas camadas mais superficiais do lago durante a enchente parecem mais indicar a entrada de água do rio, do que representarem uma produção lacustre. Isto porque as concentrações lacustres são semelhantes às do rio, mesmo no período noturno quando poderia ser registrada queda acentuada no teor de oxigênio na coluna d'água. Por outro lado, na vazante, ainda que com menores concentrações, a zona eufótica estava maior (em torno de 35% da coluna de água) parecendo indicar a maior participação de águas da aflúncia dos igarapés da bacia e da precipitação pluviométrica com maior transparência. Assim, nessa época, o hipolímnio com cerca de 80% da coluna de água ocupou o terço inferior da zona eufótica e toda a zona afótica do lago. Nesse estágio do ciclo, no qual o lago "caminha" para o isolamento do rio, a zona eufótica vai ampliando-se e as concentrações de oxigênio vão aumentando. Este



comportamento parece estar relacionado ao aumento da produtividade primária do fitoplâncton como resposta ao aumento da transparência da água do lago, e certamente da disponibilidade de nutrientes. Desta forma, a amplitude das variações sazonal, espaciais e nictemerais da concentração de oxigênio dissolvido demonstram responder claramente à entrada e saída de água no lago. De um lado, durante a enchente, cheia e vazante, a concentração de oxigênio pode estar intimamente ligada à variação do pulso de inundação do rio Negro e, de outro, à maior contribuição da água dos igarapés durante o período de águas baixas, ainda que o nível do rio não esteja abaixo da cota 19m acima do nível do mar.

A variação nictemeral média da concentração de O_2 na coluna de água na região central do lago e os teores médios para a coluna d'água em todo o ambiente evidenciam a amplitude das curvas, a variação com o período de observação e o padrão fixo de estratificação durante um ciclo hidrológico (Figs. 12 à 14). Na seca, ainda que tenha sido registrada concentrações em torno de 150% de saturação durante o dia, o teor médio por profundidade aparece ligeiramente menor do que na enchente. Verifica-se desta forma, que os desvios na seca são bem maiores no epilímnio o que demonstra a existência de picos de produção durante à tarde e menores concentrações ao final do período noturno (Fig. 8). Por outro lado, os teores registrados nas camadas mais superficiais durante a enchente, como já descrito, apresentaram menores variações em 24 horas. Este fato associado à ocorrência de maiores concentrações, mesmo ao final do período noturno, corrobora a afirmação de que o oxigênio medido no lago nesse período tenha origem principalmente fluvial, como também está apresentado na Figura 13, maior concentração média na enchente e menor na cheia. Da mesma forma, na cheia, com menores concentrações, parece ser importante a influência do rio sobre o lago, no entanto, é possível perceber um discreto declínio das concentrações de O_2 nas camadas mais superficiais, ao final do período noturno (Fig. 12). Esse declínio é muito mais evidente na vazante, período no qual são maiores as concentrações durante a tarde e o decréscimo noturno

muito maior do que no período anterior. Os desvios nas camadas mais superficiais e mais produtivas são também maiores, mostrando que o lago começa a funcionar independente da contribuição do rio. É importante salientar que durante todo o ciclo hidrológico a concentração média de O_2 no hipolímnio do lago foi muito baixa (Figs. 12 e 14). Os elevados desvios (e coeficientes de variação) das concentrações diárias por profundidade, mostram maiores alterações no teor de oxigênio das camadas mais profundas. Essas variações, certamente, são o resultado dos fluxos longitudinais, nos eixos principal e secundário do lago, transportando maiores teores da afluência à montante da estação central.

O resfriamento noturno registrado em muitos lagos tropicais e equatoriais, responsável por inversão de massas de água e a conseqüente influência sobre a distribuição de nutrientes e organismos planctônicos nesses ambientes, não foi detectado no lago Tupé (Darwich *et al.*, 2003). Em um ciclo nictemeral esses autores registraram as maiores variações ($2,3^\circ C$) nas camadas mais superficiais durante o período de águas baixas. Essa diferença de temperatura (máxima de $33,1^\circ C$) não foi suficiente para provocar homotermia na coluna d'água com amplitude de variação máxima de $5,8^\circ C$ no perfil. Nem mesmo no período de cheia quando as diferenças foram as menores, certamente como conseqüência da elevada diferença de densidade, entre

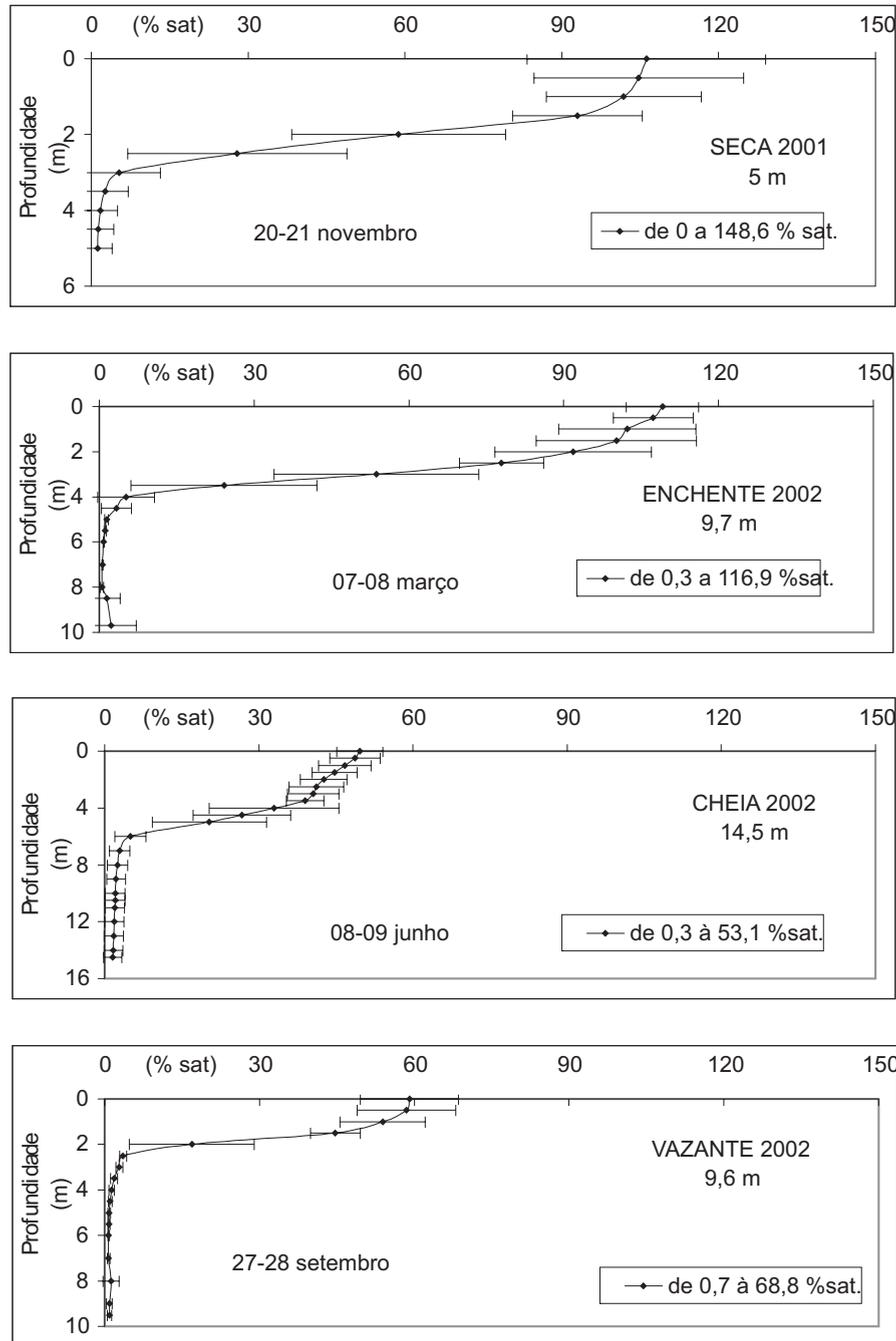


Figura 12: Variação da concentração média de oxigênio dissolvido (% sat.) na coluna de água na Estação Central (ET10) do lago Tupé para o ciclo hidrológico 2001/2002. Medidas de 3/3 horas das 15 às 12h.

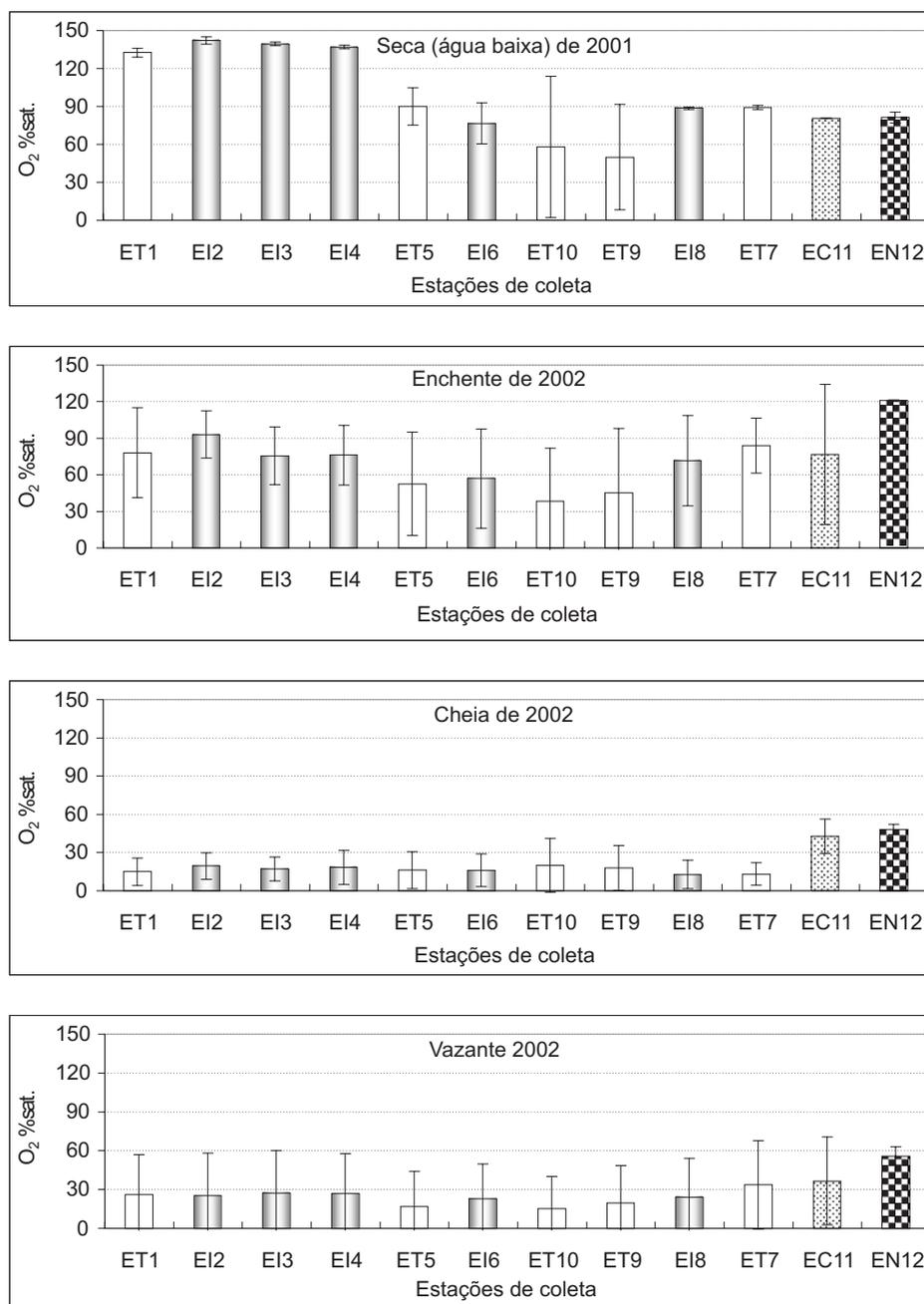
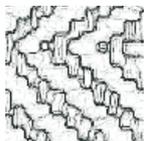


Figura 13. Variação da concentração média de oxigênio dissolvido (% sat.) na coluna de água de estações de coleta no lago Tupé (ET), nos principais igarapés (EI) da bacia do lago, no canal de ligação do lago ao rio (EC11) e no rio Negro (EN12). Períodos de seca de 2001 e enchente, cheia e vazante de 2002.

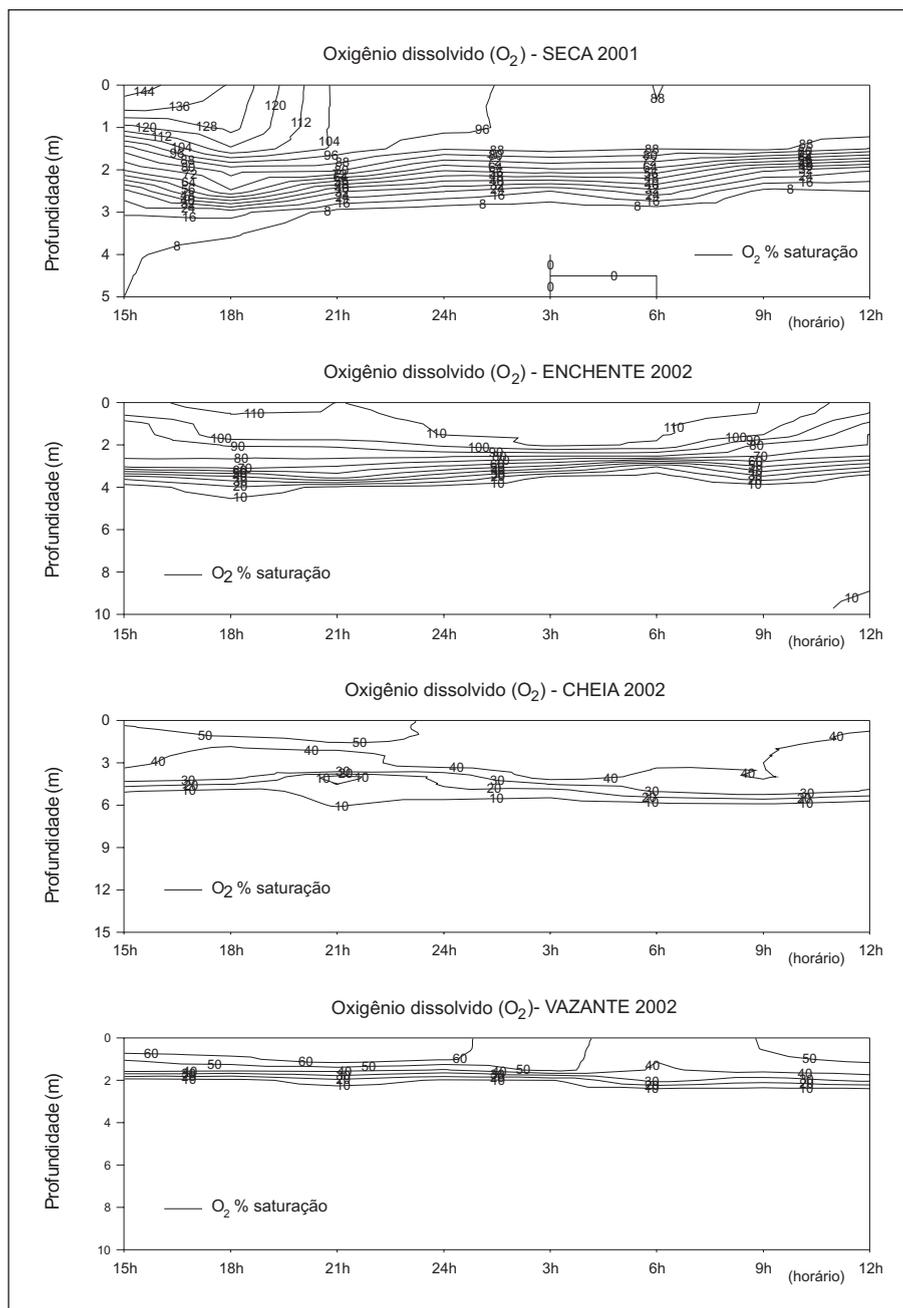


Figura 14. Variação nicotemeral da concentração de oxigênio dissolvido. Coluna de água da Estação Central (ET10), lago Tupé, margem esquerda do rio Negro. Períodos: seca de 2001 (20-21.novembro) e enchente (07-08.março), cheia (08-09.junho) e vazante (27-28.setembro) de 2002.



Darwich *et al.*

graus, em temperaturas acima de 27°C. Estas temperaturas foram as menores registradas no lago Tupé. As concentrações de oxigênio medidas no Tupé durante o período dessa pesquisa confirmaram estas observações. Durante as fases, como descrito, as concentrações de O₂ no hipolímnio do lago foram sempre reduzidas. Deve-se ressaltar, todavia, que embora o perfil seja estratificado quanto ao teor de oxigênio, a presença dos fluxos laminares no sentido cabeceira-foz do lago, em decorrência da afluência, deve garantir condições vitais à comunidade aquática no estrato mais inferior da coluna de água, ainda que seja com baixas concentrações de oxigênio. Além disso, a liberação e circulação de nutrientes dos sedimentos para a coluna de água deve ocorrer por diferenças de concentração; fluxos mais superficiais da afluência devem garantir o suprimento de nutrientes para a produtividade primária ou, dependendo da fase do ciclo, do suprimento direto de nutrientes e O₂ por meio do rio. Dessa forma, a investigação sobre a disponibilidade e dinâmica do oxigênio no Tupé confirma as conclusões de Darwich *et al.* (2003) em apresentá-lo como um lago de difícil circulação, com evidências de misturas apenas nas camadas mais superficiais em todas as fases do ciclo hidrológico pesquisado, o que o caracteriza, sob esse aspecto, como um tipo de lago meromítico, com estratificação térmica e química permanente, diferente de muitos lagos polimíticos amazônicos.

Bibliografia Citada

- Aprile, F. M., Darwich, A. J. 2005a. Modelos geomorfológicos para o lago Tupé In: Santos-Silva, E. N.; Aprile, F. M.; Scudeller, V. V.; Melo, S. (Orgs.), *BioTupé: Meio Físico, Diversidade Biológica e Sociocultural*. Editora INPA, Manaus, AM.
- Aprile, F. M., Darwich, A. J.; Raposo, J. C. 2005b. Considerações sobre a geoquímica e dinâmica sedimentar do lago Tupé. In: Santos-Silva, E. N.; Aprile, F. M.; Scudeller, V. V.; Melo, S. (Orgs.), *BioTupé: Meio Físico, Diversidade Biológica e Sociocultural*. Editora INPA, Manaus, AM.
- Darwich, A. J. 1995. *Processos de decomposição de Echinochloa polystachya (H. B. K.) Hitchcock (Gramineae = Poaceae), capim semi-aquático da várzea amazônica*. Tese de Doutorado. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia/ Universidade do Amazonas (INPA/UA), Manaus (AM). 327pp.
- Darwich, A. J.; Aprile, F. M.; Robertson, B. A. 2003. Estratificação térmica em um lago de água preta amazônico: uma questão equatorial. *IX Congresso Brasileiro de Limnologia - CBL 2003*. Universidade Federal de Juiz de Fora UFJF. Juiz de Fora (MG), 20-25.julho.2003. CD-ROM, N.39.
- Darwich, A. J.; Aprile, F. M., Robertson, B. A. 2005. Variáveis limnológicas: contribuição ao estudo espaço-temporal de águas pretas amazônicas. In: Santos-Silva, E. N.; Aprile, F. M.; Scudeller, V. V.; Melo, S. (Orgs.), *BioTupé: Meio Físico, Diversidade Biológica e Sociocultural*. Editora INPA, Manaus, AM.
- Darwich, A.; Kern, J.; Robertson, B.; Souza, E. O. 2001. Decomposition of *Echinochloa polystachya* and its contribution to nutrient cycling in a Central Amazonian floodplain lake. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 27 (Part 5):2611-2614.
- Esteves, F. A.; Bozelli, R. L.; Camargo, A. F. M.; Roland, F.; Thomaz, S. M. 1988. Variação diária (24 horas) de temperatura, O₂ dissolvido, pH e alcalinidade em duas lagoas costeiras do Estado do Rio de Janeiro e suas implicações no metabolismo destes ecossistemas. *Acta Limnol. Brasil*, 2:99-127.
- Furch, K.; Junk, W. J.; Dieterich, J.; Kochert, N. 1983.



- Seasonal variation in the major cation (Na, K, Mg and Ca) content of the Water of Lago Camaleão, in Amazonian floodplain-Lake near Manaus, Brazil. *Amazoniana*, 8(1):75-89.
- Golterman, H. L., 1975. Chemistry. In: Whitton, B. A. (ed.). *River Ecology*. University of California Press, Berkeley and Los Angeles, 39-80p
- Golterman, H. L.; Clymo, R. S.; Ohnstad, M. A. 1978. *Methods for physical and chemical analysis of fresh waters*. 2nd ed. IBP Handbook, n° 8. Blackwell Scientific Publications, Oxford, Edinburgh, London, Melbourne. 214pp.
- Hutchinson, G. E. 1967. *A treatise on limnology*. II. Introduction to lake biology and the limnoplankton. New York, John Wiley & Sons Inc. 1115p.
- Hutchinson, G. E. 1975a. *A treatise on limnology*. V. I: Geography, physics, and Chemistry. Part 1: Geography and Physics of Lakes. John Wiley & Sons. New York. 540pp.
- Hutchinson, G. E. 1975b. *A treatise on limnology*. V. I: Geography, physics, and Chemistry. Part 2: Chemistry of Lakes. John Wiley & Sons. New York. 1015pp.
- Junk, W. J. 1973. Investigations on the ecology and production-biology of the "floating meadows" (Paspalo-Echinochloetum) on the Middle Amazon. II. The aquatic fauna in the root zone of floating vegetation. *Amazoniana*, 4(1):9-102.
- Junk, W. J. 1980. Áreas inundáveis - um desafio para Limnologia. *Acta Amazonica*, 10(4):775-795.
- Kern, J.; Darwich, A. J. 1997. Nitrogen turnover in the várzea. In: Junk, W. J. (ed). *The Central Amazon Floodplain: Ecology of a Pulsing System*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. Ecological Studies, Vol. 126. Cap. 6; p119-135.
- Kern, J.; Darwich, A. J. 1999. Studies on the role of N₂ fixation and denitrification on the Amazon floodplain. In: Lieberei, R.; Vo, K. & Bianchi, H. (eds). *Proceedings of the Third SHIFT-Studies on Humam Impact on Forests and Floodplains in the Tropics - Workshop*, December 1998, 275-282pp.
- Lampert, W.; Sommer, U. 1997. *Limnoecology: the ecology of lakes and streams*. Published by Oxford University Press, Inc. Oxford, New York. 382p.
- Likens, G. E.; Ragotzkie, R. A. 1965. Vertical water motions in a small icecovered lake. *J. Geophys. Res.*, 70:2333-2344.
- Likens, G. E.; Ragotzkie, R. A. 1966. Rotary circulation of water in an icecovered lake. *Verh. Int. Ver. Limnol.*, 16:126-133.
- Mackereth, F. J. H.; Heron, J.; Talling, J. F. 1978. Water analysis: some revised methods for limnologists. Freshwater Biological Association, *Scientific Publication* n° 8. Windermere Laboratory, Cumbria. 121pp.
- Margalef, R. 1983. *Limnología*. Ediciones Omega, Barcelona. 1010pp.
- Margalef, R. 1986. *Ecologia*. Ediciones Omega. Barcelona. 951pp.
- Schmidt, G. W. 1972a. Seasonal changes in water chemistry of a tropical lake (Lago do Castanho, Amazonia, South America). *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 18:613-621.
- Schmidt, G. W. 1972b. Chemical properties of some waters in the tropical rain-forest region of Central Amazonia along the new road Manaus-Caracaraí. *Amazoniana*, 3(2):199-207.
- Stumm, W.; Morgan, J. J. 1981. *Aquatic chemistry: an introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters*. 2 ed. John Wiley & Sons, New York, 780 pp.
- Wetzel, R. G.; Likens, G. E. 2000. *Limnological Analysis*. W. B. Saunders Co. Philadelphia. 357pp.
- Wetzel, R. G. 1993. *Limnologia*. Serviço de Educação Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa. 919pp.