



Estudos integrados em ecossistema. Estação Ecológica de Jataí

Organizado por:

José Eduardo dos Santos, José Salatiel Rodrigues Pires, Luiz Eduardo Moschini.

São Carlos : EdUFSCar, 2006. 4 volume.

ISBN: 85-7600-083-0

Palavras Chave: 1. Ecossistema. 2. Estação Ecológica de Jataí (SP). I. Título.

Cinéticas da mineralização anaeróbica de *Cyperus giganteus* da Lagoa do Óleo

Romeiro, F.¹ & Bianchini Jr., I.¹

Abstract – Kinetics of anaerobic mineralization of *Cyperus giganteus* from Óleo Lake

– This study aimed to describe the carbon dioxide and methane formations in anaerobic decomposition of *Cyperus giganteus* from Óleo Lake (21°36'S e 47°49'W). Assays were performed to describe the decomposition of plant fragments and also its fractions leached and particulate separately. It was observed, after 125 days, the decomposition of 20.5% of the *C. giganteus* fragments, 79.5% and 9.7% of its leached and particulate fractions, respectively. The yields of decomposition indicate the refractability of particulate detritus of *C. giganteus*. The CO₂ was the most produced gas, representing 16.5% of the detritus conversion. Its production began in the first day and was observed until the end in all treatments. For those incubations that contained particulate detritus, it can be identified three phases in the CO₂ production: the first (approx 5 days) had the highest rates observed, mainly because of the labile-soluble organic matter; the second phase (from the 5th to 30th day) had lower rates than the first one, having, probably, as main substrata, the labile-particulate material of the detritus and the incorporated microbial biomass in the first phase; in the third phase (until the end of the experiment) the rates were low because of the refractability of the available detritus. In the incubations, that had only leached material, it was identified two phases in the mineralization: the first one had high rates of CO₂ production, possibly because of the labile nature of the substratum and the high nutrients available; the second phase was characterized for low rates, indicating the refractory nature of remaining dissolved organic carbon. The methanogenesis occurred only in the incubations with whole detritus (not submitted to the extraction). This fact can indicate the presence of components complementary to methanogenesis, found in the leached and particulate fractions. Methanogenesis had began in 37th day, probably when the conditions of pH, potential of oxide-reduction and substratum availability were adequate. After 16 days of high rates, the CH₄ production was attenuated; however it continued until the end of the experiment. Its production represented the decomposition of 3.6% of the detritus.

Keywords: *anaerobic mineralization; methanogenesis; Óleo Lake.*

Resumo – Foram descritas as formações de dióxido de carbono e metano na decomposição anaeróbica de *Cyperus giganteus* da Lagoa do Óleo (21°36'S e 47°49'W). Os ensaios foram preparados de modo a considerar, em separado, a decomposição de fragmentos da planta e de

¹ Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de São Carlos.
e-mail: <romeiro@rockmail.com>.

suas frações lixiviadas e particuladas. Após 125 dias, observou-se a mineralização de 20,5% dos fragmentos de *C. giganteus*, de 79,5% e de 9,7% de suas frações lixiviada e particulada, respectivamente. Os rendimentos da decomposição indicaram o elevado grau de refratabilidade dos detritos particulados de *C. giganteus*. O gás mais produzido foi o CO₂, representando a conversão de 16,5% dos detritos integrais; sua produção teve início no primeiro dia e foi sempre observada, em todos os tratamentos. Para as incubações que continham detritos particulados, foram identificadas três fases na produção de CO₂: a primeira (5 dias) apresentou as taxas de formação mais elevadas, provavelmente por causa da presença de compostos orgânicos lábeis-solúveis; na segunda fase (do 6º ao 35º dia), as taxas de produção foram menores, tendo provavelmente como principais recursos o material lábil-particulado dos detritos e a biomassa microbiana formada na primeira fase; na terceira fase (após o 35º dia até o final), as taxas foram baixas, em decorrência da refratabilidade dos recursos disponíveis. Nas incubações com apenas lixiviado, identificaram-se apenas duas fases na mineralização: a primeira teve taxas de produção de CO₂ elevadas, possivelmente por causa da natureza lábil do substrato e da grande disponibilidade de nutrientes; a segunda foi caracterizada por apresentar taxas mais baixas, refletindo a natureza refratária do carbono orgânico dissolvido remanescente. A metanogênese ocorreu apenas nas incubações que continham os fragmentos não submetidos à extração; esse fato sugere que as frações lixiviadas possuam componentes importantes para os processos envolvidos com a formação do metano. A metanogênese teve início no 37º dia, provavelmente quando as condições de pH, potencial de oxido-redução e disponibilidade de substratos foram atendidas. Após 16 dias de taxas elevadas, a produção de CH₄ foi atenuada, porém prosseguiu até o término do experimento; sua produção representou a conversão de 3,6% dos detritos.

Palavras-chave: *decomposição anaeróbia; metanogênese; Lagoa do Óleo.*

Introdução

A distribuição e a abundância das macrófitas aquáticas são determinadas, entre outros fatores, pela: composição dos sedimentos, turbidez das águas, disponibilidade de nutrientes e ação dos herbívoros. Nos ambientes aquáticos tropicais, as condições climáticas predominantes tendem a beneficiar o crescimento dessas plantas; além desse fato, são frequentes também nesses ambientes intervenções antrópicas (por exemplo, eutrofização) que favorecem o desenvolvimento desses vegetais. Os estandes de macrófitas aquáticas emergentes encontram-se entre os tipos de vegetação mais produtivos (WETZEL, 1983). Considerando que uma substancial parcela de matéria orgânica por elas produzida é incorporada ao ambiente, os detritos procedentes dessas plantas representam importante fonte de carbono e energia aos sistemas aquáticos (KUEHN et al., 1999).

A lixiviação é um dos primeiros eventos a que os detritos são submetidos. O enfraquecimento das paredes celulares, aliado à rápida hidratação dos tecidos, conduz ao rompimento das membranas citoplasmáticas. Dessa forma, são liberados para a coluna d'água os compostos orgânicos e os nutrientes contidos no interior das células dos tecidos vegetais (WETZEL, 1995). Os tipos de matéria orgânica dissolvida (MOD) provenientes das macrófitas aquáticas, no geral, caracterizam-se pela decomposição rápida, sendo reconhecidos como as frações lábeis dos detritos. Os lixiviados são constituídos por compostos solúveis, como açúcares,

aminoácidos e ácidos alifáticos (CUNHA & BIANCHINI JR., 1998), além de nutrientes, como nitrogênio, fósforo, potássio e cálcio (GUPTA et al., 1996; MUN et al., 2001). Podem também possuir fatores acessórios de crescimento, como: vitaminas e co-fatores (GOLTERMAN, 1975). Após a lixiviação, as frações remanescentes dos detritos caracterizam-se por se constituir por polímeros estruturais das paredes celulares dos tecidos vegetais. Em tais detritos, os principais polímeros são: celulose, hemicelulose e lignina, que, coletivamente, são designados por fibras de lignocelulose (BENNER et al., 1986). Essas fibras são reconhecidas como as frações refratárias dos detritos, uma vez que são de difícil decomposição. Rice & Tenore (1981) destacaram que a natureza do detrito e, principalmente, o conteúdo de seus compostos refratários influenciam na velocidade da decomposição; com o consumo das frações lábeis, os compostos refratários tendem a se acumular nos sedimentos (MÜNSTER & CHRÓST, 1990).

Nos sistemas aquáticos, os processos anaeróbios de ciclagem dos detritos geram vários gases (por exemplo, CO_2 , H_2S , N_2 , CH_4 e mercaptans) como produtos finais da mineralização. A produção de cada um dos gases depende de vários fatores bióticos e abióticos. Entre os fatores bióticos, citam-se a composição qualitativa da comunidade e o número de bacterioplâncton. A temperatura, as concentrações de nutrientes, o potencial de óxido-redução (POR), o pH e a composição química do detrito constituem-se como os principais fatores abióticos, responsáveis pelo condicionamento dos processos de decomposição (GAUDY & GAUDY, 1980; WETZEL, 1983; THURMAN, 1985). Dependendo do tipo de gás e de suas concentrações, esses processos podem gerar profundas alterações na qualidade da água, com possibilidades de restrição do potencial de uso dos recursos hídricos e da manutenção de várias espécies. Os estabelecimentos de anoxia e de anaerobiose são comuns em vários ambientes aquáticos tropicais.

Nesse contexto, alguns trabalhos relataram as ocorrências desses eventos em lagoas marginais do Rio Mogi-Guaçu (Estado de São Paulo, Brasil), entre os quais os realizados nas lagoas situadas no trecho da planície de inundação contida na Estação Ecológica de Jataí (NOGUEIRA, 1989; BALLESTER, 1994; FREITAS-LIMA & GODINHO, 2000; GODINHO, 2000). Esses estudos mostraram que as condições de baixa oxigenação são comuns nessas lagoas. Durante o verão (estação chuvosa), freqüentemente os surgimentos de anaerobiose foram relatados, principalmente nos extratos próximos aos sedimentos.

Nos ambientes aquáticos, a anaerobiose surge como decorrência do rápido consumo de oxigênio, durante a oxidação da matéria orgânica (autóctone e alóctone) pela biota; a este evento associa-se à baixa difusão de oxigênio nas regiões de consumo (ZEHNDER & STUMM, 1988). Ambientes anaeróbios estáveis e com grandes extensões freqüentemente desenvolvem-se nos estratos próximos aos sedimentos, por se situarem em região de grande acúmulo de detritos orgânicos. Uma vez esgotado o oxigênio, os microrganismos utilizam outros aceptores de elétrons na oxidação da matéria orgânica. De acordo com Stumm & Morgan (1981), nessas condições (POR 250 mv), acoplada à oxidação da matéria orgânica, ocorre a redução do nitrato (NO_3^-) a nitrogênio molecular (desnitrificação) e a amônia (amonificação). Nos processos de redução do NO_3^- e do SO_4^{2-} , o carbono orgânico é convertido em CO_2 . Após a desnitrificação, pode ocorrer a redução do MnO_2 (POR 225 mv). Nessas circunstâncias, a redução do $\text{Fe}(\text{OH})_3$ a Fe^{2+} também sucede a amonificação do nitrato (POR 120 mv). Quando são alcançados potenciais de óxido-redução suficientemente negativos (por exemplo, POR -75 a -50 mv), as reações de fermentação, as reduções do SO_4^{2-} e do CO_2 podem ocorrer quase simultaneamente (MITSCH & GOSSELINK, 1993). As reduções do CO_2 a CH_4 ocorrem quando são estabelecidas

as condições mais redutoras (por exemplo, POR -250 a -350 mv). De acordo com Zehnder & Stumm (1988), as fermentações são processos em que, em geral, parte da molécula orgânica age como aceptora de elétrons, sendo liberados compostos orgânicos intermediários, como ácidos (por exemplo, lactato, acetato, succinato, propionato) e álcoois (por exemplo, etanol, butanol, isopropanol).

O processo de redução do CO₂ é realizado por um grupo de microrganismos chamados metanogênicos, uma vez que geram como produto final o metano (CH₄). Segundo Woese et al. (1990), os microrganismos metanogênicos são agrupados no Domínio Archaea (arqueas). Utilizam um número muito reduzido de substratos, sendo o CO₂ e o ácido acético os principais (ZEHNDER et al., 1981). Moléculas com mais de dois átomos de carbono, exceto o isopropanol, não podem ser convertidas em metano e nem podem ter seus elétrons utilizados na redução do dióxido de carbono em metano (WIDDEL, 1986). Estima-se que cerca de 1% da biomassa formada pela fotossíntese seja degradada por rotas que envolvem a formação do metano, o que corresponde a um valor anual de liberação desse gás próximo a 10⁹ toneladas (THAUER, 1998). As concentrações de metano atmosférico têm aumentado continuamente nos últimos 300 anos (CONRAD, 1989); esse aumento tem sido visto com preocupação, uma vez que, juntamente ao CO₂, o CH₄ é um dos gases que contribuem para o efeito estufa.

Diante da importância das macrófitas aquáticas como fonte de detritos nos sistemas aquáticos lânticos e da ocorrência de anaerobiose habitualmente registrada no sistema de lagoas marginais do Rio Mogi-Guaçu, propôs-se neste estudo a descrição das cinéticas envolvidas na mineralização anaeróbia da macrófita aquática *Cyperus giganteus*, bem como as de suas frações lixiviada e particulada.

Materiais e Métodos

Local das coletas

As amostras de água e de macrófitas foram coletadas na Lagoa do Óleo (21°36'S e 47°49'W), situada no município de Luiz Antônio (SP). Essa lagoa faz parte de um conjunto de lagoas marginais do Rio Mogi-Guaçu que recebe proteção oficial da Estação Ecológica de Jataí (EEJ). Essa lagoa é rasa ($Z_{\text{máx}}$ 4,5 m) e intensamente colonizada por macrófitas aquáticas; porém as composições qualitativa e quantitativa dessa comunidade variam sazonalmente; os principais gêneros registrados foram: *Utricularia*, *Salvinia*, *Egeria*, *Eichhornia*, *Ceratophyllum*, *Cyperus*, *Ludwigia*, *Scirpus*, *Ricciocarpus*, *Cabomba* (CUNHA-SANTINO, 2003). O clima da região apresenta duas estações distintas, uma chuvosa (de novembro a abril) e outra seca (de maio a outubro). Seus valores anuais médios de precipitação e temperatura são de 1.550 mm e 21,7°C, respectivamente (BALLESTER & SANTOS, 2001).

O sistema de lagoas da Estação Ecológica é formado por ambientes de origem primariamente meândrica, que se caracterizam por pouca profundidade e grande abundância de macrófitas associadas ao ciclo hidrológico (NOGUEIRA, 1989). Estudos na Lagoa do Óleo foram iniciados recentemente; entre eles, o efetuado por Godinho (2000) destacou as baixas concentrações de oxigênio dissolvido, encontradas principalmente nos meses de verão; o realizado por Cunha-Santino (2003) tratou principalmente da atividade enzimática relacionada aos processos degradativos das macrófitas aquáticas; o desenvolvido por Peret & Bianchini Jr. (2004) abordou os consumos de oxigênio envolvidos na decomposição das frações lixiviadas

das macrófitas aquáticas; e o realizado por Petracco (em preparação) tem destacado características físicas e químicas da lagoa e suas implicações nas taxas de produção primária de macrófitas aquáticas submersas.

Atividades experimentais

Para a realização do experimento foi utilizada a macrófita aquática emergente *Cyperus giganteus* Vahl, que é uma espécie perene e geralmente ocupa as regiões alagadas. Possui caule e raiz finos, e as folhas são ausentes, sendo o caule a estrutura fotossinteticamente ativa (RODRIGUES & ESTELITA, 2002). Essa espécie é encontrada também na região do Pantanal do Mato Grosso do Sul, sendo conhecida popularmente como “piri”, e seus estandes, como “pirizal” (ALLEM & VALLS, 1987). Uma vez coletadas, as plantas foram levadas ao laboratório e lavadas com água corrente para que fossem retirados os materiais aderidos. Em seguida, foram secas em estufa (50°C) até peso constante, sendo então trituradas em moinho com peneira de 1,41 mm de malha. Os teores de carbono dos fragmentos foram determinados com analisador elementar (Carlo Erba, mod. EA 1110).

No dia da preparação do experimento (3/2002), amostras de água foram coletadas na lagoa com garrafa de Van Dorn, na superfície e nas profundidades de 1,5 e 3,0 m; depois das coletas, volumes iguais das amostras foram misturados. Em laboratório, a amostra integrada foi filtrada em lâ de vidro, e as concentrações de carbono (orgânico e inorgânico) foram determinadas por combustão (TOC Analyzer Shimadzu, mod. 5000A).

As separações das frações dissolvidas e particuladas dos fragmentos decorreram da adição de 100 g (PS) de fragmentos de *C. giganteus* em 1 L de água destilada e autoclavada (121°C, 15 min e 1 atm). A mistura foi mantida em geladeira (4°C) por 24 h, sob constante agitação magnética. Em seguida, a mistura foi filtrada em rede de náilon, com malha de 0,4 mm, da qual se obteve uma separação grosseira do material particulado e solúvel. O material orgânico particulado (MOP) retido na filtração foi exaustivamente lavado (primeiro em água corrente e depois com água destilada) para a remoção de material solúvel aderido. Para concluir a separação, o filtrado foi submetido à centrifugação (978,25 g por 40 min), da qual o sobrenadante constituiu na fração lixiviada (MOD), sendo o centrifugado acrescido ao conjunto da MOP. Após esses procedimentos, a MOP foi seca em estufa (50°C) e teve seu conteúdo de carbono determinado com analisador elementar (Carlo Erba, mod. EA 1110). Depois da extração, o lixiviado foi mantido congelado, e a MOP foi armazenada em frasco de vidro até o início do experimento. Na elaboração do experimento, o lixiviado foi descongelado e diluído com água da lagoa até que fossem atingidas as concentrações de 280 mgC.L⁻¹. As concentrações de carbono das soluções foram determinadas com analisador específico (TOC Analyzer Shimadzu, mod. 5.000A).

As incubações foram preparadas em frascos de vidro (vol: 1,15 L) (Figura 1). Montaram-se três câmaras com fragmentos de *C. giganteus* (8,0 gPS), três com MOP (fibras: 7,0 gPS) e outras duas com MOD (lixiviado: 279,2 mgC.L⁻¹). Duas incubações receberam apenas amostras de água da lagoa (controle). Para as obtenções de ambientes anaeróbios no início do experimento, o oxigênio dissolvido foi expurgado das incubações por borbulhamentos com nitrogênio gasoso (10 min).

Periodicamente, as produções de CO₂ e CH₄ foram determinadas com a amostragem dos gases contidos nos volumes livres das incubações (*head-spaces*). Utilizou-se seringa de

1,0 ml, sendo as amostras de gás retiradas usando septos de silicone acoplados às tampas dos frascos (Figura 1). As amostras foram analisadas em cromatógrafo a gás (CG Construmaq, mod. 370), com coluna do tipo recheada analítica, PORAPAQ (N), com 1,8 m de comprimento e 118 mm de diâmetro. Os valores obtidos foram comparados com as curvas-padrão previamente elaboradas com CO₂ e CH₄. Os valores de CO₂ foram corrigidos, pois os dados obtidos por cromatografia gasosa referiram-se apenas às frações dos gases contidos nos *head-spaces*, não sendo amostradas, portanto, as frações dissolvidas.

Dessa forma, ao final do experimento, as determinações de fatores de correção (FC) foram necessárias para que os valores das frações dissolvidas dos gases fossem também considerados (Equação 1). Para cada frasco, os fatores de correção foram aplicados aos valores acumulados de carbono dos gases produzidos (em mg de carbono); depois de corrigidos, os valores foram derivados para as estimativas das taxas diárias de formação de CO₂ e CH₄.

$$FC = \frac{(COT_i - COT_f) - (CID_f - CID_i)}{C_{Det}} \quad (1)$$

em que: COT = carbono orgânico total (inicial ou final); CID = carbono inorgânico dissolvido (inicial ou final); C_{Det} = carbono determinado por cromatografia.

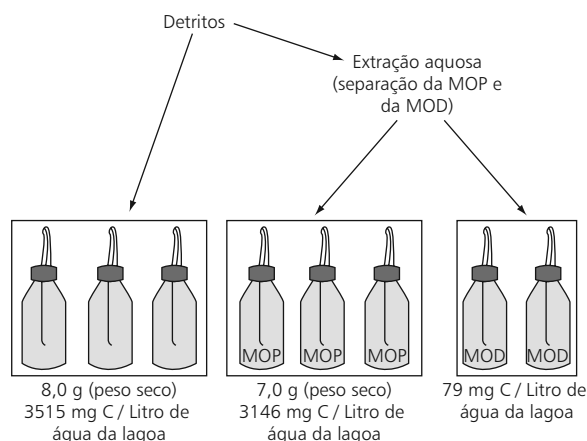


Figura 1 Diagrama esquemático dos procedimentos de preparação do experimento.

Depois de 125 dias, as câmaras foram desmontadas; inicialmente, as misturas foram submetidas à filtração em rede de náilon (malha 0,4 mm). Em seguida, foram centrifugadas por 40 min (978,25 g), sendo os materiais particulados (retido na filtração e o centrifugado) secos em estufa (50°C) até peso constante. Determinaram-se, dos sobrenadantes, as concentrações de carbono orgânico (COD_f) e inorgânico (CID_f) dissolvidos, por combustão (TOC Analyzer Shimadzu, mod. 5.000A). Após tais determinações, alíquotas das soluções foram filtradas (membranas de 0,22 µm) e novamente as concentrações de carbono (orgânico e inorgânico) foram determinadas. Das diferenças entre as concentrações obtidas antes e depois das filtrações, estimaram-se as concentrações de carbono contido em partículas menores que 0,4 µm e maiores que 0,22 µm. Admitiu-se que essa fração de carbono orgânico correspondesse à biomassa dos microrganismos, sendo os valores obtidos somados aos dos remanescentes particulados.

(COP_f). Após secos, os detritos particulados foram pesados, e os conteúdos de carbono foram determinados com analisador elementar (Carlo Erba, mod. EA 1110).

Resultados

Após 125 dias de decomposição, 79,5% dos detritos não foram decompostos; 77,6% permaneceram na forma particulada (COP_f); e 1,87% na forma dissolvida (COD_f). Observou-se que, em média, 20,5% dos fragmentos adicionados nas incubações foram mineralizados; dos quais, no final do experimento, 0,36% encontrava-se na forma dissolvida (CID_f) e 20,14% foram liberados na forma de gases (C-gases) (Tabela 1). As produções de CO₂ e de CH₄ foram registradas; o CO₂ foi o destino da mineralização de 16,54% dos detritos (581,3 mgC), enquanto a metanogênese foi resultante da decomposição de 3,60% (126,77 mgC).

Tabela 1 Balanço de massa da decomposição anaeróbia de *Cyperus giganteus*. COT_i (carbono orgânico total inicial); COT_f (carbono orgânico total final); COP_f (carbono orgânico particulado final); COD_f (carbono orgânico dissolvido final); CM (carbono mineralizado); CID_f (carbono inorgânico final); C-gases (carbono mineralizado na forma de gases); C-CO₂ (carbono liberado na forma de CO₂); C-CH₄ (carbono liberado na forma de CH₄); ND (não detectado).

	COT _i	COT _f	COP _f	COD _f	CM	CID _f	C-gases	C-CO ₂	C-CH ₄	CH ₄ - início
	(mg)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(dia)
Detritos	3515,27	79,5	77,6	1,87	20,5	0,36	20,14	16,5	3,6	37º dia
MOP	3146,13	90,3	88,9	1,41	9,7	0,45	9,25	9,25	ND	ND
Lixiviado	279,2	24,1	7,5	16,6	75,9	4,82	71,08	71,1	ND	ND

Nas incubações contendo detritos de *C. giganteus*, as gerações de CO₂ foram detectadas do primeiro ao último dia (Figura 2). Apresentaram taxa média de produção de 4,61 mgC dia⁻¹, o que corresponde a 0,58 mg de carbono mineralizado por grama de detrito (PS) por dia (mgC g⁻¹ dia⁻¹). Sua produção pôde ser diferenciada em três fases: a primeira, delimitada nos cinco primeiros dias, distinguiu-se pelas taxas elevadas (média de 1,77 mgC g⁻¹ dia⁻¹), tendo no segundo dia alcançado 25,6 mgC (3,2 mgC g⁻¹ dia⁻¹), o valor mais alto do processo; a segunda fase (do 6º até o 28º dia) caracterizou-se por apresentar taxas de produção mais baixas que a primeira (0,77 mgC g⁻¹ dia⁻¹); a terceira fase foi a mais longa (do 29º ao 125º dia) e apresentou as taxas de mineralização mais baixas (média de 0,47 mgC g⁻¹ dia⁻¹) (Tabela 2).

A produção de CH₄ foi detectada do 37º ao último dia (Figura 2). Em relação à metanogênese, na decomposição dos detritos de *C. giganteus* pôde-se identificar três fases: a primeira compreendeu do início até o 36º dia, período em que o CH₄ não foi produzido; a segunda compreendeu do 37º ao 50º dia, nesse momento a metanogênese iniciou-se e alcançou taxas elevadas (média: 2,68 mgC dia⁻¹; 0,33 mgC g⁻¹ dia⁻¹), tendo como pico o valor 4,976 mgC (0,622 mgC g⁻¹ dia⁻¹) no 47º dia; na terceira fase, as taxas de produção de CH₄ mantiveram-se com valores mais baixos (média: 1,19 mgC dia⁻¹; 0,15 mgC g⁻¹ dia⁻¹), observando-se uma tendência de queda até o 125º dia. A taxa média de geração de CH₄ (do 37º ao 125º dia) foi de 1,44 mgC dia⁻¹ (0,180 mgC g⁻¹ dia⁻¹). Dos 708,04 mgC convertidos em gases (CO₂ + CH₄) durante os 125 dias: 31,90% foram produzidos no primeiro mês;

27,07%, no segundo mês; 21,55%, no terceiro mês; e 19,48% foram produzidos no quarto mês de experimento (Tabela 3).

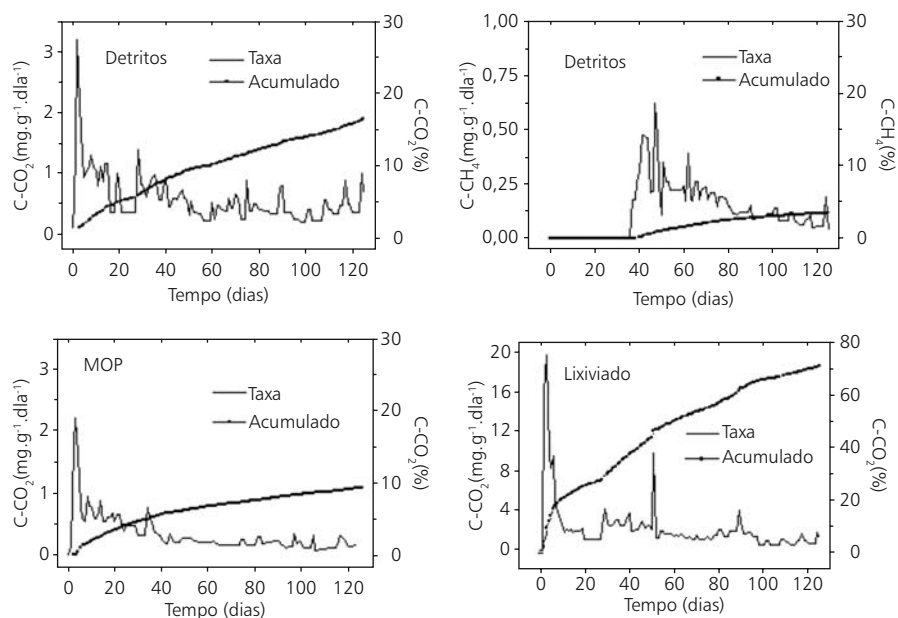


Figura 2 Produção de CO_2 e de CH_4 na decomposição anaeróbica de *Cyperus giganteus* e de suas frações particulada (MOP) e lixiviada.

Tabela 2 Fases de produção de CO_2 na decomposição de *C. giganteus* e de suas frações particulada e lixiviada.

Duração (dias)	1ª fase	2ª fase	3ª fase
Detritos	1-5	06-28	29-125
MOP	1-8	9-37	38-125
Lixiviado	1-7	8-125	-
Taxas ($\text{mgC.g}^{-1}.\text{dia}^{-1}$)			
Detritos	1,77	0,77	0,475
MOP	1,07	0,55	0,192
Lixiviado	9,72	1,68	-

Ao término do experimento, verificou-se que a MOP (fibras dos detritos de *C. giganteus*) foi o recurso mais refratário à decomposição, visto que 90,3% de sua massa inicial não foi decomposta; 88,9% permaneceu na forma de COP; e 1,40% como COD (Tabela 1). 9,7% da

MOP foi mineralizada. Nessas incubações, as gerações de CH_4 não foram observadas e, no final, os teores de COD_f e CO_2 corresponderam, respectivamente, a 0,45% e 9,25% do carbono orgânico inicialmente adicionado.

Nas incubações com MOP, as produções de CO_2 foram registradas do primeiro ao último dia (Figura 2), a uma taxa média de $2,33 \text{ mgC dia}^{-1}$ ($0,332 \text{ mgC g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$). Sua produção apresentou dinâmica semelhante à verificada na decomposição dos detritos integrais, sendo também verificadas três fases: a primeira, na qual as taxas foram mais elevadas ($1,07 \text{ mgC g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$), ocorreu até aproximadamente o 8º dia, tendo um pico de produção no 3º dia, chegando a $15,44 \text{ mgC}$ ($2,20 \text{ mgC g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$); a segunda fase (do 9º até o 37º dia) caracterizou-se pela tendência de decréscimo das taxas, demonstrando atenuação do processo de mineralização (taxa média = $0,33 \text{ mgC g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$); a terceira fase foi alcançada no período entre o 38º e o 125º dia; as taxas observadas nessa fase foram as mais baixas de todo o processo de mineralização da MOP (média: $0,192 \text{ mgC g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) (Tabela 2). O aparecimento do CH_4 não foi detectado nessas incubações; dos 291,08 mgC convertidos de CO_2 em 4 meses, 51,53% foram gerados no primeiro mês; 21,36% foram produzidos no segundo mês; 13,70%, no terceiro mês; e 13,41% foram produzidos no último mês (Tabela 3).

Tabela 3 O rendimento mensal (%) das formações de CO_2 na decomposição dos detritos de *C. giganteus*, da MOP (fibras) e das frações lixiviadas.

	Detritos	MOP	Lixiviado
1º mês	31,90	51,53	42,36
2º mês	27,07	21,36	28,15
3º mês	21,55	13,70	17,36
4º mês	19,48	13,41	12,13

Entre os recursos considerados, a MOD lixiviada de *C. giganteus* foi o recurso mais facilmente decomposto. Em 125 dias, 24,10% de seu carbono inicial permaneceu na forma orgânica, sendo 16,6% como COD_f e 7,50% na forma de COP_f (Tabela 1). Observou-se a mineralização de 75,90% do lixiviado; 4,82% do carbono inorgânico foi mantido nas formas inorgânicas (CID_f) e 71,08% foi transformado em CO_2 . A produção de CO_2 foi detectada do primeiro ao último dia (Figura 2), a uma taxa média de $1,59 \text{ mgC}$ ($2,126 \text{ mgC g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$). A dinâmica de produção de CO_2 apresentou comportamento distinto do verificado nas demais incubações (detritos integrais e MOP); nesse caso, foram identificadas apenas duas fases: a primeira ocorreu do início até o 7º dia, na qual as taxas de produção foram as mais elevadas ($9,72 \text{ mgC g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$), tendo um pico de produção no 3º dia ($15,44 \text{ mgC g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$); a segunda fase (do 7º até o 125º dia) caracterizou-se pela tendência de decréscimo das taxas, demonstrando atenuação da decomposição (taxa média = $1,68 \text{ mgC g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) (Tabela 2). Assim como o verificado na decomposição da MOP, não foi detectada a geração de CH_4 . Nos quatro meses de experimento, dos 291,08 mgC convertidos em CO_2 , 51,53% foram produzidos no primeiro mês; 21,36%, no segundo mês; 13,70%, no terceiro mês; e 13,41%, no quarto mês (Tabela 3).

Discussão

Após 125 dias, o rendimento médio da mineralização anaeróbia dos detritos de *Cyperus giganteus* chegou a 20,5%; esse valor pode ser considerado baixo quando comparado com os registrados em experimentos de decomposição anaeróbia que utilizaram espécies de macrófitas aquáticas submersas, como *Egeria najas* (BITAR, 2003) e *Cabomba piauhyensis* (CAMPOS JR., 1998), que, após 120 dias, tiveram 50% e 44% de seus detritos decompostos, respectivamente. A decomposição de *C. giganteus* foi lenta mesmo se comparada a de outras espécies de macrófitas emergentes, como *Scirpus cubensis* (CUNHA & BIANCHINI JR., 1999; CAMPOS JR., 1998) e *Montrichardia arborescens* (BIANCHINI JR. et al., 2002), que tiveram, respectivamente, 37% e 40% de seus detritos consumidos em 120 dias.

Em estudos realizados por Peret (2002) e Peret & Bianchini Jr. (2004), em que as degradações aeróbias das frações particuladas e lixiviadas de *C. giganteus* foram descritas, observou-se o consumo de 12,72% e 88,84% das respectivas frações (120 dias), valores mais elevados que os encontrados neste estudo (9,7% e 75,9%, respectivamente). A baixa degradabilidade de *C. giganteus* foi também relatada por Villar et al. (2001), com base em incubações efetuadas com *litter bags* em laboratório e *in situ*; esses autores destacaram a refratibilidade dessa espécie ao registrar a decomposição de 50% dos detritos após 400 dias. Em geral, a baixa degradabilidade dos detritos de macrófitas emergentes pode ser atribuída à natureza química desses recursos. De acordo com Wetzel (1979), o processo de decomposição é muito dependente da espécie de planta que originou os detritos, sendo seus conteúdos de nitrogênio e de fibras importantes variáveis para o rendimento do processo; dessa forma, as plantas com relações N/C mais elevadas são as mais facilmente degradadas. Ainda segundo Wetzel (1979), as macrófitas aquáticas com folhas flutuantes apresentam decomposição rápida; em relação a elas, as degradações das espécies submersas são mais lentas, e as plantas emergentes são as que se decompõem mais vagarosamente, visto que normalmente possuem muitas fibras e pouco nitrogênio.

A macrófita *Cyperus giganteus* é uma espécie que apresenta produtividade elevada e rápido crescimento (VILLAR et al., 1996). Contudo, estudos evidenciaram que essa espécie apresenta baixas taxas de decomposição, tanto em ensaios aeróbios (PERET, 2002) e anaeróbios (presente estudo) quanto *in situ* (VILLAR et al., 2001). A alta produtividade, aliada à decomposição lenta, torna essa macrófita aquática importante fonte de detritos para os sistemas. Na Lagoa do Óleo, é possível que a refratibilidade de *C. giganteus* faça com que seus detritos sejam acumulados nos sedimentos e decompostos principalmente por vias anaeróbias, tendo em vista que os sedimentos das lagoas marginais do Rio Mogi-Guaçu caracterizam-se pela baixa disponibilidade de oxigênio (GODINHO, 2000).

De acordo com Peret & Bianchini Jr. (2004), do conteúdo de carbono dos fragmentos de *C. giganteus*, 87,9% encontra-se na forma particulada e 12,1%, como compostos lixiviáveis. Supondo que essas frações foram decompostas da mesma maneira que nas incubações em que foram separadas (9,7% da MOP e 75,9% do lixiviado), seria esperada a mineralização de 17,72% dos detritos de *C. giganteus*. No entanto, verificou-se o consumo de 20,5% dos detritos, sendo 2,78% a diferença entre os valores esperado e observado experimentalmente. Esse resultado sugere que a decomposição apresentou maior rendimento quando ambas as frações foram mantidas juntas. Em estudo de McArthur & Richardson (2002) com partículas de diferentes tamanhos que constituem os lixiviados, surpreendentemente, observou-se

que partículas de maior tamanho subsidiaram mais o crescimento bacteriano. Analogamente, os resultados obtidos no presente estudo podem indicar que a fração de parede celular seja importante matriz de carbono para as populações decompositoras. Nesse contexto, a fração lixiviada pode ser importante no suprimento de compostos orgânicos, minerais, vitaminas e outros elementos necessários ao crescimento microbiano.

O incremento da mineralização decorrente da presença conjunta das frações particuladas e dissolvidas pôde ser observado também pela produção mensal de CO₂ (Tabela 3). Nas incubações que continham fragmentos que não foram previamente submetidos à lixiviação, o processo de mineralização apresentou taxas médias de formação de CO₂ que variaram menos no tempo do que naquelas que continham as frações separadas. O primeiro mês foi quando as mineralizações foram mais evidentes, observando-se, em seguida, sensíveis quedas nas taxas de produção de gases e compostos inorgânicos. Nas incubações com somente MOP (fibras), as quedas das taxas de produção de CO₂ podem ter decorrido da escassez de nutrientes, ao passo que nas com lixiviado podem ser relacionadas à baixa disponibilidade de compostos de carbono e à sua natureza mais refratária.

No início da decomposição, grandes quantidades de compostos orgânicos e de nutrientes são liberados dos detritos vegetais (CUMMINS et al., 1972; CAMPOS JR., 1998; CUNHA & BIANCHINI JR., 1999); a matéria orgânica lixiviada passa a ser então importante recurso disponível para os microrganismos. Em geral, os estudos que trataram do processo de lixiviação encontraram rápidos aumentos de concentração de COD no período entre 24 e 48 horas (CUMMINS et al., 1972; WETZEL & MANNY, 1972; BLUM & MILLS, 1991). Cabe destacar que a secagem e trituração das plantas favorecem o incremento das taxas de lixiviação, pois interferem na integridade das paredes celulares (GESSNER & SCHWOERBEL, 1989). Godshalk & Wetzel (1978) destacaram que as lixiviações de detritos previamente secos, em geral, completam-se em minutos ou, no máximo, em poucos dias, enquanto, em condições naturais, esses processos normalmente podem perdurar por alguns dias.

Nas incubações contendo somente MOD, houve a mineralização de apenas 20% do COD, nos primeiros dez dias. Observou-se que nem todo o carbono lixiviado apresentou decomposição rápida, possuindo, portanto, uma fração refratária. Assim, as taxas elevadas de produção de CO₂, observadas nos primeiros dias, seriam devidas, principalmente, à presença de substratos lábeis solúveis. Nesse caso, conforme mencionado, os decréscimos das taxas de mineralização podem ter decorrido do grau de refratabilidade do recurso remanescente e, ainda, da formação de compostos húmicos que predominantemente apresentam frações resistentes à degradação (CUNHA & BIANCHINI JR., 2002). Deve-se considerar, também, que no início do experimento houve maior disponibilidade de nutrientes. É possível, ainda, que as elevadas taxas verificadas na primeira fase da decomposição da MOP sejam decorrentes da presença de material lábil solúvel aderido aos detritos, remanescentes da extração aquosa; contudo, supõe-se que, por causa da natureza residual, esses compostos não tenham interferido decisivamente para a ocorrência das elevadas taxas iniciais de mineralização da MOP. A meia-vida da perda de massa dos compostos lixiviados tem sido estimada em 1,92 dias (WETZEL & MANNY, 1972). Mann & Wetzel (1996) observaram grande utilização do lixiviado pelos microrganismos nas primeiras 24 horas de incubação, fornecendo subsídio ao crescimento e acúmulo de biomassa da microbiota; destacaram também que os compostos lixiviados de macrófitas emergentes têm menor capacidade de subsídio aos microrganismos do que recursos mais lábeis, como

algas, macrófitas com folhas flutuantes e submersas. Cabe ressaltar que, além do catabolismo microbiano, nos primeiros dias de decomposição, são importantes também os processos estritamente químicos na mineralização de compostos orgânicos (BIANCHINI JR., 1985).

Passados os primeiros sete dias de mineralização da MOD, as taxas de produção de CO_2 decresceram; porém, na decomposição dos detritos e da MOP, foram observadas ainda taxas elevadas pelo período aproximado de 25 dias. Godshalk & Wetzel (1978) observaram aumentos da atividade microbiana no período que sucedeu a lixiviação, encontrando elevações dos conteúdos de ATP e nitrogênio nos detritos. De maneira geral, pode-se atribuir a decomposição nessa segunda fase como sendo decorrente da colonização e da ação metabólica dos microorganismos sobre os detritos.

Nas incubações com apenas a fração lixiviada (MOD), observou-se que, após uma primeira fase de intensa mineralização, houve queda abrupta das taxas de produção de CO_2 . A menor intensidade de decomposição dos detritos de *C. giganteus* caracterizou o período compreendido entre o 7º e 125º dia. A utilização de material particulado lábil como substrato microbiano talvez possa explicar a ausência de uma fase intermediária nas incubações que continham apenas os compostos lixiviados.

Por ser a primeira fase também marcada pelo acúmulo de biomassa microbiana, deve-se considerar, no rendimento da mineralização, a remineralização do carbono que foi incorporado pelos microrganismos (WETZEL, 1984). Sendo a segunda fase muito relacionada ao catabolismo microbiano, fatores controladores ambientais (por exemplo, disponibilidade de oxigênio, temperatura, pH) têm grande influência nas taxas de mineralização, que são relativamente altas nessa fase, provavelmente por causa do uso de material particulado-lábil como substrato microbiano. Por esse recurso ser insolúvel, sua utilização pode não ser tão rápida quanto a de compostos lábeis solúveis. A terceira fase, caracterizada pelas baixas taxas de mineralização, pode ser decorrente da escassez de nutrientes, sendo, portanto, influenciada por mudanças físicas e pela reposição de nutrientes; no entanto, supõe-se que essa fase seja ainda limitada pelo elevado grau de refratibilidade dos detritos (dissolvidos e particulados) remanescentes. Muitos dos detritos incorporados aos sedimentos encontram-se nessa fase de decomposição (GODSHALK & WETZEL, 1978). A degradação de compostos orgânicos complexos, como as fibras de lignocelulose, exige o estabelecimento de comunidades decompositoras especializadas que degradam os compostos por mecanismos primariamente enzimáticos.

A metanogênese somente foi registrada nas incubações que no início continham detritos integrais de *C. giganteus*. O tempo transcorrido desde o início até o 37º dia, quando o CH_4 passou a ser detectado, foi necessário para que as condições se tornassem favoráveis à produção do CH_4 . Para o estabelecimento das arqueas, o meio deve reunir condições específicas como pH 7, potencial de oxido-redução baixo ($\text{POR} < -250 \text{ mV}$), além da disponibilidade de substratos, como o ácido acético (ZEHNDER & STUMM, 1988; OREMLAND, 1988). As taxas mais elevadas verificadas no início da metanogênese são, possivelmente, devidas à maior disponibilidade de substratos orgânicos e nutrientes. Sobre esse aspecto, pôde-se identificar uma depreciação das taxas de produção de CO_2 quando do surgimento do CH_4 , sendo até mesmo coincidentes os picos de alta produção de CH_4 com os de baixa de CO_2 . Essas observações podem ser explicadas pelo fato de o CO_2 ser um dos principais substratos da metanogênese. Dessa forma, parte do carbono convertido em CO_2 passaria a ser reduzida pelas arqueas e transformada em CH_4 .

Em experimentos de decomposição anaeróbia realizados por Campos Jr. (1998) e Bitar (2003), as incubações constituíram-se como meios ácidos durante, aproximadamente, os primeiros 40 dias; as observações verificadas por esses autores permitiram inferir que o pH inicialmente baixo possa ter agido como fator inibidor na metanogênese no primeiro mês. Sobre isso, no inventário realizado por Cunha-Santino (2003), observou-se que os valores de pH da Lagoa do Óleo variaram entre 4,2 e 5,8, o que sugere que nesse ambiente a formação de CH₄ seja preterida entre os processos de decomposição.

As comunidades decompositoras precedentes têm papel essencial no estabelecimento das condições requeridas pelas arqueas, sobretudo tornando o ambiente redutor e convertendo as moléculas complexas nos substratos utilizados por elas (ZEHNDER & STUMM, 1988). Ferry & Wolf (1976) propuseram o termo “consórcio” para o grupo de organismos envolvidos na degradação de compostos. Provavelmente uma descontinuidade nessa intrincada relação de sucessão impediu o surgimento de condições favoráveis à produção de metano nas câmaras que só continham lixiviado e fibras (MOP) como fontes primárias de carbono. Somente a decomposição dos detritos integrais possibilitou o estabelecimento de todas as condições necessárias à sucessão de comunidades que culminaria na produção de CH₄, sugerindo que as frações lixiviada e particulada dessa macrófita são essenciais, em conjunto, para o processo de metanogênese. Isso pode ser devido ao fato de o lixiviado ser um recurso rico em nutrientes, vitaminas e elementos traços de que os microrganismos necessitam, ao mesmo tempo em que a fração particulada representaria um recurso rico em compostos orgânicos e pobre em nutrientes. Visto que grande parcela dos detritos incorporados aos sedimentos é constituída principalmente por material particulado, a produção de CH₄ a partir da decomposição de *C. giganteus* na Lagoa do Óleo seria um processo dependente de aportes de nutrientes do ambiente.

Conclusões

Com base nos procedimentos metodológicos adotados, nesse estudo concluiu-se que: 1. o tipo de recurso influenciou o processo de mineralização; 2. três fases na mineralização de detritos particulados puderam ser identificadas: um processo rápido nos primeiros dias, que envolveu, provavelmente, a mineralização de compostos lábeis-solúveis; uma segunda fase de aproximadamente 25 dias, na qual supôs-se que foram degradados os compostos particulados-lábeis; e uma terceira fase de atenuação das taxas de produção de CO₂, provavelmente devida à escassez de nutrientes e à refratibilidade dos substratos; 3. as frações lixiviáveis foram mais facilmente degradadas que as frações particuladas dos detritos; 4. a presença da fração lixiviável aumentou o rendimento da decomposição da fração particulada dos detritos, contribuindo também para a ocorrência da metanogênese.

Agradecimentos

Agradecimento à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento deste estudo (Processo n. 00/09297-6).

Referências Bibliográficas

- ALLEM, A. C.; VALLS, J. F. M. Informação geral sobre o Pantanal. In: RECURSOS forrageiros nativos do Pantanal Mato-grossense. Brasília: Embrapa, CENARGEN, 1987. 339 p.
- BALLESTER, M. V. R. *Dinâmica de gases biogênicos (CH₄, O₂ e CO₂) em ecossistemas aquáticos da planície de inundação do Rio Mogi-Guaçu (Estação Ecológica de Jataí, São Paulo)*. 1994. 172 p. Tese (Doutorado) – PPG-ERN, UFSCar, São Carlos.
- BALLESTER, M. V. R.; SANTOS, J. E. Biogenic gases (CH₄, CO₂ e O₂) distribution in a riverine wetland system. *Oecol. Brasil*, pp. 21-32, 2001.
- BENNER, R. B.; MORAN, M. A.; HODSON, R. E. Biogeochemical cycling of lignocellulosic carbon in marine and freshwater ecosystems: Relative contribution of procaryotes and eucaryotes. *Limnol. Oceanogr.*, v. 31, pp. 89-100, 1986.
- BIANCHINI JR., I. *Estudo dos processos de humificação de Nymphoides indica (L.) O. Kuntze*. 1985. 285 P. Tese (Doutorado) – PPG-ERN, UFSCar, São Carlos.
- BIANCHINI JR., I.; PACOBAHYBA, L. D.; CUNHA-SANTINO, M. B. Aerobic and anaerobic decomposition of *Montrichardia arborescens* (L.) Schott. *Acta Limnol. Bras.*, v. 14, n. 3, pp. 27-34, 2002.
- BITAR, A. L. *Mineralização e formação de gases da degradação de Eichhornia azurea Kunth e Egeria najas Planch. da lagoa do Óleo (SP-Brasil)*. 2003. 118 p. Tese (Doutorado) – PPG-ERN, UFSCar, São Carlos.
- BLUM, L. K.; MILLS, A. L. Microbial growth and activity during the initial stages of seagrass decomposition. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, v. 70, pp. 73-82, 1991.
- CAMPOS JR., J. J. F. *Contribuição ao estudo da decomposição de macrófitas aquáticas da Lagoa do Infernã: processo anaeróbio*. 1998. 130 p. Dissertação (Mestrado) – PPG-ERN, UFSCar, São Carlos.
- CONRAD, R. Control of methane production in terrestrial ecosystems. In: ANDRAE, M. O.; SCHIMMEL, D. S. (Eds.). *Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere*. New York: John Wiley & Sons, 1989. pp. 39-58.
- CUMMINS, K. W.; KLUG, J. J.; WETZEL, R. G.; PETERSEN, R. C.; SUBERKROPP, K. F.; MANNY, B. A.; WUYCHECK, J. C.; HOWARD, F. O. Organic enrichment with leaf leachate in experimental lotic ecosystems. *BioScience*, v. 22, pp. 719-722, 1972.
- CUNHA, M. B.; BIANCHINI JR., I. Cinéticas de mineralização de carboidratos na degradação de duas espécies de macrófitas aquáticas. In: SEMINÁRIO REGIONAL DE ECOLOGIA, 1996. *Anais...* UFSCar, São Carlos, v. 3, pp. 1301-1314, 1998.
- CUNHA, M. B.; BIANCHINI JR., I. Degradação anaeróbia de *Cabomba piauhyensis* e *Scirpus cubensis*: cinéticas de formação de gases. *Acta Limnol. Brasil.*, v. 11, n. 1, pp. 15-26, 1999.
- CUNHA, M. B.; BIANCHINI JR., I. Humic substance mineralization in a tropical oxbow lake (São Paulo, Brazil). *Hydrobiol.*, v. 468, pp. 33-43, 2002.

- CUNHA-SANTINO, M. B. *Atividade enzimática, cinética e modelagem matemática da decomposição de Utricularia breviscapa da Lagoa do Óleo (Estação Ecológica de Jataí, Luiz Antônio - SP)*. 2003. 140 P. Tese (Doutorado) – PPG-ERN, UFSCar, São Carlos.
- FERRY, J. G.; WOLF, R. S. Anaerobic degradation of benzoate to methane by a microbial consortium. *Arch. Microbiol.*, v. 107, pp. 33-40, 1976.
- FREITAS-LIMA, E. A. C.; GODINHO, M. J. L. Bactérias no sedimento de uma lagoa marginal na Estação Ecológica de Jataí. In: SANTOS, J. E.; PIRES, J. S. R. (Eds.). *Estudos integrados em ecossistemas. Estação Ecológica de Jataí*. v. 2. São Carlos: Rima, 2000. pp. 497-508.
- GAUDY JR., A. F.; GAUDY, E. T. *Microbiology for environmental scientists and engineers*. New York: McGraw Hill, 1980. 736 p.
- GESSNER, M. O.; SCHWOERBEL, J. Leaching kinetics of fresh leaf-litter with implications for the current concept of leaf processing in streams. *Arch. Hydrobiol.*, v. 115, pp. 81-90, 1989.
- GODINHO, M. J. L. (Org.). *Relatório da disciplina de ecologia de microrganismos lacustres*. 2000. 52 p. PPG-ERN, UFSCar, São Carlos, SP.
- GODSHALK, L. G.; WETZEL, R. G. Decomposition of aquatic angiosperms. I. Dissolved components. *Aquat. Bot.*, v. 5, pp. 281-300, 1978.
- GOLTERMAN, H. L. *Physiological limnology*. Amsterdam: Elsevier, 1975. 489 p.
- GUPTA, M. K.; SHRIVASTAVA, P.; SINGHAL, P. K. Decomposition of young water hyacinth leaves in lake water. *Hydrobiol.*, v. 335, pp. 33-41, 1996.
- KUEHN, K. A.; GESSNER, M. O.; WETZEL, R. G.; SUBERKROPP, K. Decomposition and CO₂ evolution from standing litter of the emergent macrophyte *Erianthus giganteus*. *Microb. Ecol.*, v. 38, pp. 50-57, 1999.
- MANN, C. J.; WETZEL, R. G. Loading and utilization of dissolved organic carbon from emergent macrophytes. *Aquat. Bot.*, v. 53, pp. 61-72, 1996.
- MCCARTHER, M. D.; RICHARDSON, J. S. Microbial utilization of dissolved organic carbon leached from riparian litterfall. *Can. J. Fish. Aquatic. Sci.*, v. 59, pp. 1668-1676, 2002.
- MITSCH, W. J.; GOSSELINK, J. G. *Wetlands*. 2. ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1993. 722 p.
- MUN, H. T.; NAMGUNG, J.; KIM, J. H. Decay rate and changes of nutrients during the decomposition of *Zizania latifolia*. *Korean J. Ecol.*, v. 24, pp. 81-85, 2001.
- MÜNSTER, U.; CHRÓST, R. J. Origin, composition, and microbial utilization of dissolved organic matter. In: OVERBECK, J.; CHRÓST, R. J. (Eds.). *Aquatic microbial ecology*. New York: Springer-Verlag, 1990. pp. 8-46.
- NOGUEIRA, F. M. B. *Importância das macrófitas aquáticas Eichhornia azurea e Scirpus cubensis na ciclagem de nutrientes e nas principais características limnológicas da Lagoa do Infernã (SP)*. 1989. 147 p. Dissertação (Mestrado) – PPG-ERN, UFSCar, São Carlos, SP.
- OREMLAND, R. S. Biogeochemistry of methanogenic bacteria. In: ZEHNDER, A. J. B. (Ed.). *Biology of anaerobic microorganisms*. New York: John Wiley & Sons, 1988. pp. 641-705.

PETRACCO, P. *Efeitos dos pulsos de inundação do Rio Mogi-Guaçu sobre as produções primárias de macrófitas aquáticas submersas da lagoa do Óleo*. (Em preparação.) Tese (Doutorado) – PPG-ERN, UFSCar, São Carlos.

PERET, A. M. *Contribuição para o estudo da estequiometria da mineralização de macrófitas aquáticas*. 2002. 129 p. Monografia – UFSCar, São Carlos, SP.

PERET, A. M.; BIANCHINI JR., I. Stoichiometry of aerobic mineralization (O/C) of aquatic macrophytes leached from a tropical lagoon (São Paulo - Brazil). *Hydrobiol.*, no prelo, 2004.

RICE, D. L.; TENORE, K. R. Dynamics of carbon and nitrogen during the decomposition of detritus derived from estuarine macrophytes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 13, pp. 681-690, 1981.

RODRIGUES, A. C.; ESTELITA, M. E. M. Primary and secondary development of *Cyperus giganteus* Vahl. rhizome (Cyperaceae). *Rev. Bras. Bot.*, v. 25, pp. 251-258, 2002.

STUMM, W.; MORGAN, J. J. *Aquatic chemistry: an introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters*. 2. ed. New York: Wiley & Sons, 1981. 780 p.

THAUER, R. K. Biochemistry of methanogenesis: a tribute to Marjory Stephenson. *Microbiol.*, v. 144, pp. 2377-2406, 1998.

THURMAN, E. M. *Organic geochemistry of natural waters*. Netherlands: Nijhoff/Junk Po., 1985. 497 p.

VILLAR, C. A.; CABO, L. de; BONETTO, C. Macrophytic primary production and nutrient concentrations in a deltic floodplain marsh of the Lower Paraná River. *Hydrobiol.*, v. 330, pp. 59-66, 1996.

VILLAR, C. A.; CABO, L. de; VAITHIYANATHAN, P.; BONETTO, C. Litter decomposition of emergent macrophytes in a floodplain marsh of the Lower Paraná River. *Aquat. Bot.*, v. 70, pp. 105-116, 2001.

WETZEL, R. G. The role of the littoral zone and detritus in lake metabolism. In: LIKENS, G. E.; RODHE, W.; SERRUYA, C. (Eds.). Symposium on lake metabolism and lake management. *Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebnisse Limnol.*, v. 13, pp. 145-161, 1979.

WETZEL, R. G. *Limnology*. 2. ed. Philadelphia, PA: Saunders College, 1983. 860 p.

WETZEL, R. G. Detrital dissolved and particulate organic carbon functions in aquatic ecosystems. *Bull. Mar. Sci.*, v. 35, pp. 503-509, 1984.

WETZEL, R. G. Death, detritus and energy flow in aquatic ecosystems. *Freshwater Biol.*, v. 33, pp. 83-89, 1995.

WETZEL, R. G.; MANNY, B. A. Secretion of dissolved organic carbon and nitrogen by aquatic macrophytes. *Verh. Int. Ver. Limnol.*, v. 18, pp. 162-170, 1972.

WIDDEL, F. Growth of methanogenic bacteria in pure culture with 2-propanol and others alcohols as hydrogen donor. *Appl. Environ. Microbiol.*, v. 51, pp. 1056-1062, 1986.

WOESE, C. R.; KANDLER, O.; WHEELIS, M. L. Towards a natural system of organisms: proposal for the domains Archea, Bacteria e Eucarya. *Proc. Nati. Acad. Sci.*, USA, v. 87, pp. 4576-4579, 1990.

ZEHNDER, A. J. B.; STUMM, W. Geochemistry and biochemistry of anaerobic habitats. In: ZEHNDER, A. J. B. (Ed.). *Biology of anaerobic microorganisms*. New York: John Wiley & Sons, 1988. pp. 1-38.

ZEHNDER, A. J. B.; INGVORSEN, K.; MARTI, T. Microbiology of methane bacteria. In: HUGHES, D. E. et al. (Eds.). *Anaerobic Digestion*. Amsterdam: Elsevier, 1981.