

Impactos antrópicos nas lagoas costeiras do norte do estado do Rio de Janeiro: uma revisão sobre a eutrofização artificial e gases de efeito estufa

Anthropic impacts in the northern coastal lagoons of the state of Rio de Janeiro: a review of artificial eutrophication and greenhouse gases

Impactos humanos en las lagunas costeras del norte del estado de Rio de Janeiro: una revisión sobre la eutrofización artificial y los gases de efecto invernadero

<http://dx.doi.org/10.21713/2358-2332.2016.v13.986>

Claudio Cardoso Marinho, doutor em Ciências Biológicas (Biofísica) pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), técnico de laboratório da UFRJ e professor da Universidade Estácio de Sá, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. E-mail: clcamar@biologia.ufrj.br.

André Luiz dos Santos Fonseca, doutor em Ciências pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) e professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro (IFRJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil. E-mail: andre.fonseca@ifrj.edu.br.

Francisco de Assis Esteves, doutor em Limnologia pelo Max-Planck Institut für Limnologie – Universität Kiel (Christian-Albrechts), Alemanha, e diretor geral do Núcleo em Ecologia e Desenvolvimento Socioambiental de Macaé (NUPEM), Macaé, RJ, Brasil. E-mail: festeves@globo.com.

Resumo

A eutrofização artificial é uma ação antrópica que altera o metabolismo dos ecossistemas aquáticos continentais, potencializando

a incorporação ou a emissão de carbono para a atmosfera, na forma de gases de efeito estufa (CO_2 e CH_4). Neste artigo, avalia-se a contribuição de diversos estudos para a compreensão da relação entre a eutrofização artificial e a dinâmica do CO_2 e do CH_4 em lagoas costeiras. Alguns dos fatores controladores da dinâmica dos gases de efeito estufa foram identificados. De modo geral, observou-se que a eutrofização artificial potencializa a emissão de CO_2 e de CH_4 para a atmosfera. Os estudos foram conduzidos de forma segmentada ao invés de uma abordagem integrada sobre os principais fatores controladores. Os estudos foram realizados em diferentes programas de pós-graduação no estado do Rio de Janeiro. Destaca-se a importância desses programas, uma vez que os profissionais formados continuam desenvolvendo pesquisas em diversas instituições pelo Brasil.

Palavras-chave: Lagoas Costeiras. Eutrofização Artificial. Aquecimento Global. Pós-Graduação. Metano. Dióxido de Carbono.

Abstract

Artificial eutrophication is an anthropic action that alters the metabolism of freshwater ecosystems, increasing carbon incorporation from or emission into the atmosphere in the form of greenhouse gases (CO_2 and CH_4). In this paper, we evaluated the contribution of several studies for the understanding of the relationship between the artificial eutrophication and the dynamics of CO_2 and CH_4 in coastal lagoons. Some controlling factors of the dynamics of greenhouse gases were identified. In general, it was observed that artificial eutrophication enhances the emission of CO_2 and CH_4 into the atmosphere. The studies were conducted in a segmented rather than on an integrated approach to the main controlling factors. The studies were conducted in different graduate programs in the State of Rio de Janeiro. We highlight the importance of such graduate programs, since graduated professionals continue to develop research in various institutions in Brazil.

Keywords: Coastal Lagoons. Artificial Eutrophication. Global Warming. Graduate Studies. Methane. Carbon Dioxide.

Resumen

La eutrofización artificial es una acción humana que altera el metabolismo de los ecosistemas de agua dulce, causando el aumento de la incorporación o de las emisiones de carbono a la atmósfera en forma de gases de efecto invernadero (CO_2 y CH_4). En este trabajo se evaluó la contribución de varios estudios para comprender la relación entre la eutrofización artificial y la dinámica de CO_2 y CH_4 en las lagunas costeras. Algunos de los factores que controlan la dinámica de gases de efecto invernadero fueron identificados. En general, se observó que la eutrofización artificial aumenta la emisión de CO_2 y CH_4 a la atmósfera. Los estudios se realizaron de una manera segmentada en lugar de un enfoque integrado de los principales factores de control. Los estudios fueron llevados a cabo en diferentes programas de postgrado en el estado de Rio de Janeiro. Se destaca la importancia de estos programas de postgrado, ya que los graduados continúan desarrollando la investigación en diversas instituciones de Brasil.

Palabras clave: Lagoas Costeras. Eutrofización Artificial. Calentamiento Global. Postgrado. Metano. Dióxido de Carbono.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Lagoas costeiras

As lagoas costeiras são ecossistemas que apresentam grande importância para o ser humano em função de uma série de serviços proporcionados, entre os quais: lazer, controle de inundações, recepção de esgoto doméstico e rejeito industrial, beleza cênica e harmonia paisagística; podendo valorizar a região geográfica em que se encontra (ESTEVES, 1998). Apesar de serem encontradas em toda costa brasileira, sua presença se destaca nos estados do Rio de Janeiro e do Rio Grande do Sul.

Quanto à dimensão, esses ecossistemas podem variar de pequenos corpos d'água temporários a ecossistemas de grande extensão (ESTEVES,

1998). Podem-se destacar as lagoas: Feia e a dos Patos, duas das maiores representantes desses ecossistemas no país, localizadas no Rio de Janeiro e no Rio Grande do Sul, respectivamente. Mas, em geral, as lagoas costeiras são ecossistemas rasos, o que possibilita uma intensa interação da coluna d'água com o sedimento, além da presença de consideráveis estandes de macrófitas aquáticas. Além disso, em função de sua localização geográfica, podem-se destacar dois aspectos interessantes: (1) estão sujeitas a maior ou menor influência do mar em função de *spray* marinho, percolação da água ou pela presença de canal de comunicação direto; (2) em função da forte presença humana, por situarem-se, normalmente, em área urbanizada entre o mar e o continente (SOFFIATI, 1998), as lagoas costeiras sofrem uma série de impactos antrópicos, como ocupação de suas margens, alteração da bacia de drenagem e lançamento de esgoto sem tratamento.

Essas características conferem às lagoas costeiras importância socioeconômica e ecológica bastante relevante, tornando-as importantes laboratórios para estudos ecológicos e biogeoquímicos. Estes estudos possibilitam o entendimento de diversas alterações em processos naturais sujeitos às ações antrópicas (ESTEVES, 1998; LOPES-FERREIRA, 1998). Essas ações podem modificar esses ecossistemas, acarretando consideráveis perdas quanto às questões ecológicas, sanitárias, sociais e econômicas.

Um exemplo são as lagoas costeiras do litoral norte do estado do Rio de Janeiro. Essas lagoas apresentam um impressionante espectro de variação dos valores de salinidade, além da quantidade e qualidade de matéria orgânica (MO). Outra questão relevante sobre esses ecossistemas é que, enquanto alguns ecossistemas se encontram muito bem preservados, outros apresentam avançado estágio de degradação.

Esses ecossistemas aquáticos são estudados de forma sistemática desde o início da década de 1980 (BOZELLI et al., 1990; ESTEVES et al., 1988). Mas a partir do final da década de 1990, iniciaram-se os primeiros trabalhos voltados para a temática dos gases causadores do efeito estufa (FONSECA et al., 2004; FURTADO; CASPER; ESTEVES, 2002; MARINHO et al., 2004). Desde então, produziu-se uma série de artigos científicos,

em revistas nacionais e internacionais, além de teses de doutorado e dissertações de mestrado, defendidas e em andamento, no âmbito de vários programas de pós-graduação de diferentes instituições no Brasil (Quadro 1), além de projetos financiados por diferentes agências de fomento (CAPES, CNPq, Finep, FAPERJ) e empresas (Petrobras, LLX).

Quadro 1 – Programas de pós-graduação que apresentam teses e dissertações relacionadas ao tema de gases de efeito estufa (CO₂ e CH₄)

Programas de pós-graduação	Unidade	Instituição ***
Pós-Graduação em Ciências Biológicas ^a	Instituto de Biofísica Carlos Chagas Filho	UFRJ
Pós-Graduação em Ecologia ^b	Departamento de Ecologia/IB*	UFRJ
Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Conservação ^c	NUPEM**	UFRJ
Pós-Graduação em Ecologia e Evolução ^d	Instituto de Biologia	UERJ
Pós-Graduação em Ecologia ^e	Instituto de Ciências Biológicas	UFJF
Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais ^f	Centro de Biociências e Biotecnologia	UENF

Fonte: Elaboração própria.

Legenda: ^a MARINHO, 2004; MARINHO, 2012; ^b FURTADO, 2000; MINELLO, 2004; FONSECA, 2005; MAROTTA, 2005; FIGUEIREDO-BARROS, 2008; MAROTTA, 2009; PETRUZZELLA, 2015; ^c BELARMINO, 2013; GONÇALVES, 2013; FELIX, 2014; ^d JACQUES, em andamento; ^e JACQUES, 2011; ^f LANNES, 2004; NEVES, 2007.

Legenda: * IB = Instituto de Biologia; ** NUPEM = Núcleo em Ecologia e Desenvolvimento Socioambiental de Macaé; *** UFRJ = Universidade Federal do Rio de Janeiro; UERJ = Universidade do Estado do Rio de Janeiro; UFJF = Universidade Federal de Juiz de Fora; UENF = Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.

1.2 Eutrofização artificial

Dentre os impactos a que esses ecossistemas estão sujeitos, um dos mais relevantes quanto à alteração da qualidade da água e perda de qualidade ecológica é o lançamento de esgoto sem tratamento. Com o aporte de nutrientes em grandes quantidades, principalmente de nitrogênio (N) e de fósforo (P), provenientes do esgoto, frequentemente se observa a ocorrência do processo de eutrofização artificial. Nessas condições, tende a ocorrer quebra relativa da estabilidade do ecossistema (ESTEVEZ, 2011). Em decorrência desse processo, o ecossistema aquático passa da condição de oligotrófico ou mesotrófico para eutrófico ou mesmo hipereutrófico, na qual começa a produzir mais matéria orgânica do que é

capaz de consumir ou decompor. Profundas mudanças no metabolismo de todo o ecossistema acompanham esse desequilíbrio ecológico.

O processo de eutrofização tende a provocar de imediato um efeito sobre a densidade da comunidade fitoplanctônica e o consequente aumento em sua produtividade (ESTEVES; MEIRELES-PEREIRA, 2011). Nos ambientes tropicais, esse efeito se potencializa, pois não existe limitação de luz ou temperatura o ano todo. No caso de ambientes rasos, como as lagoas costeiras, além da comunidade de fitoplâncton, pode-se observar considerável efeito sobre a comunidade de macrófitas aquáticas. Nos estágios iniciais, esse efeito é positivo, pois o enriquecimento com nutrientes tende a aumentar a produtividade dessa comunidade. Mas, nos estágios avançados, a produção de algas filamentosas pode reduzir a penetração de luz, limitando o crescimento das macrófitas aquáticas.

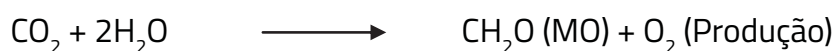
Os detritos, tanto de origem fitoplanctônica – principalmente as filamentosas – como das macrófitas aquáticas, alteram a composição do sedimento, tornando esse compartimento de constituição mais orgânica (MARINHO et al., 2010). O aumento da concentração dos detritos orgânicos, além de mudar a estrutura e a composição do sedimento, provoca alterações biológicas consideráveis. Estas mudanças promovem uma intensificação dos processos redutores, ou seja, com a extinção do oxigênio (O_2), por meio da decomposição da matéria orgânica originada dos detritos, começam a ocorrer os processos anaeróbicos. Nessas condições, aumentam as concentrações de gases como o metano (CH_4) e o gás sulfídrico (H_2S) na interface sedimento-água. Assim, as populações mais suscetíveis às baixas concentrações de O_2 são geralmente substituídas pelas mais tolerantes, ou mesmo pelas que atuam em anaerobiose, como as bactérias desnitrificantes ou sulfato-redutoras.

1.3 Metabolismo dos ecossistemas aquáticos

O metabolismo de um ecossistema aquático (Figura 1) se estabelece pelo balanço entre os processos de (1) incorporação (produção) e (2) formação de dióxido de carbono (CO_2) (respiração). No primeiro caso, temos a produção de matéria orgânica (MO) via incorporação de

CO₂, reconhecido como processo autotrófico. No segundo, ocorrem os processos de consumo de MO com a formação de CO₂, por intermédio dos processos de respiração e decomposição, denominados processos heterotróficos. Sendo assim, podem-se definir os ecossistemas aquáticos quanto ao seu metabolismo como autotróficos, aqueles que incorporam mais CO₂ do que emitem para a atmosfera e, heterotróficos, os que apresentam maior consumo de MO, e, conseqüentemente, emitem mais CO₂ para a atmosfera do que o incorporam.

As equações a seguir apresentam as etapas de produção e de consumo de MO do modelo do metabolismo dos ecossistemas aquáticos:



Esse modelo se aplica satisfatoriamente a ecossistemas com metabolismo aeróbico. Em condições de intensa atividade decompositora, ocorre consumo de O₂ dissolvido. Assim, ganham importância os processos anaeróbicos, como a metanogênese, ou seja, a produção de metano (CH₄) via organismos metanogênicos (cf. reação a seguir). Para a ocorrência desse processo são necessárias anaerobiose e a presença de determinados substratos (acetato, metanol, etanol, CO₂/H₂, entre outros), cuja presença depende de uma prévia decomposição de MO por outros organismos, que metabolizam estruturas mais complexas de carbono, liberando compostos com até três átomos de carbono, que são utilizados pelos metanogênicos.

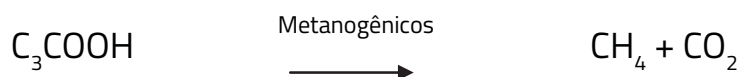
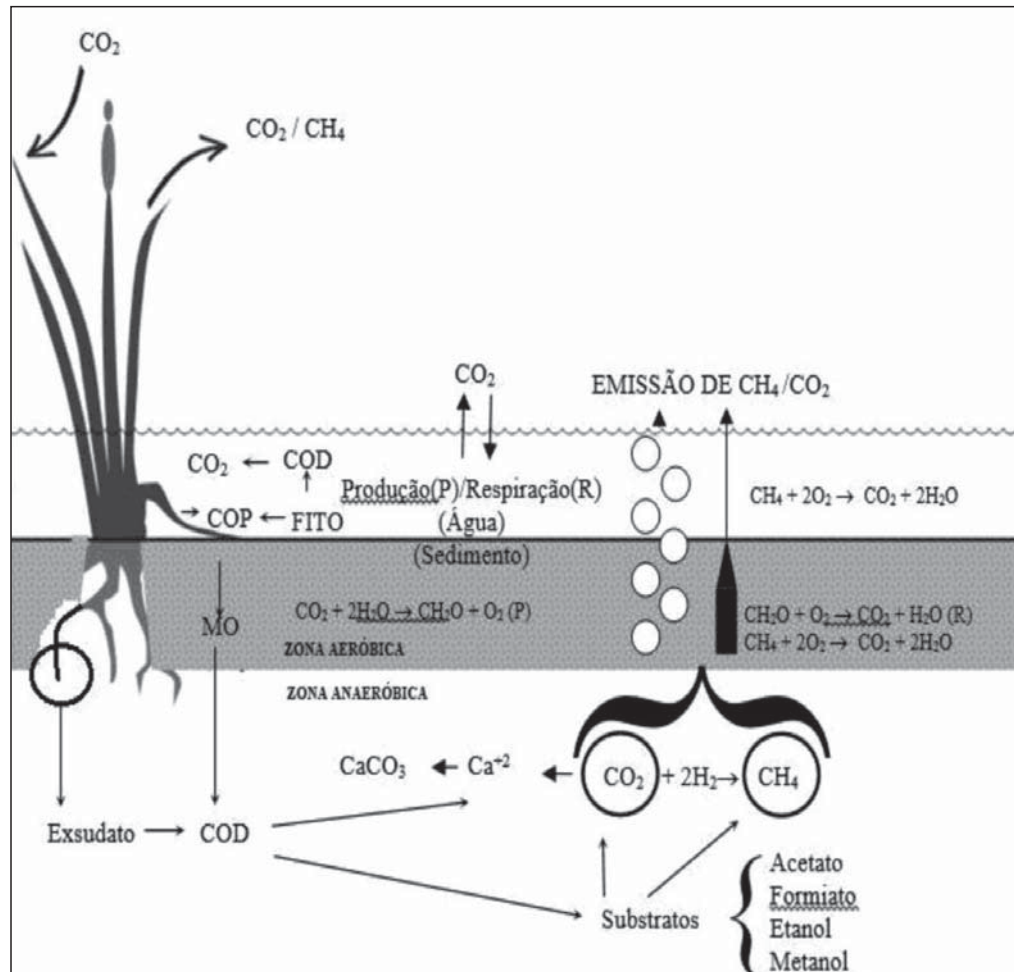


Figura 1 – Balanço entre a incorporação e a emissão de CO₂ e CH₄ em ecossistemas aquáticos continentais



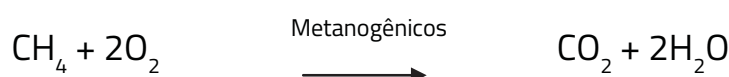
Fonte: Elaboração própria.

Nessas condições, a perda de CH₄ pelos ecossistemas aquáticos, via fluxo água-ar, pode ser importante para o balanço entre os processos de incorporação e emissão de carbono, para fins de determinação da atividade auto ou heterotrófica do sistema. Whiting e Chanton (1993) propõem que a produção primária e a emissão do metano são processos correlacionados e os denominam como variáveis integradoras de outras variáveis. Isso porque diversas variáveis regulam os processos envolvidos na dinâmica do metano, assim como diversas variáveis regulam o processo de produção primária dos vegetais, sendo algumas dessas variáveis reguladoras em comum de ambos os processos.

Outra questão relevante é a oxidação do metano, ou seja, a metanotrofia, realizada pelas bactérias metanotróficas (cf. equação a

seguir). O metano, produzido nas áreas anaeróbicas, ao atingir regiões aeróbicas, pode ser oxidado a CO_2 (Figura 1). Vários estudos discutem sobre o balanço entre a produção e consumo de metano em ambientes aquáticos, no entanto, divergem quanto ao percentual de metano oxidado a CO_2 (FREEMAN et al., 2002; KING; BLACKBURN, 1996;).

Quanto à emissão de metano para atmosfera, a quantidade emitida se relaciona com o balanço entre sua produção e oxidação. O efeito da metanotrofia se minimiza por meio da emissão ebuliente. Nesse caso, a ação das bactérias metanotróficas não é tão efetiva em função da passagem do metano pela coluna d'água mediante a formação de bolhas que, nas lagoas costeiras, favorece-se em função de sua reduzida profundidade, diminuindo o efeito da pressão hidrostática sobre o sedimento. Além disso, boa parte do metano se emite via sistema lacunar das macrófitas aquáticas (TYLER, 1991), o que tende a minimizar o efeito de oxidação do metano. As macrófitas aquáticas atuam também no consumo de metano pelo sistema radicular, o qual o oxigênio na rizosfera atenua a emissão de metano diretamente por meio da sua oxidação (KING, 1994; VAN DER NAT; MIDDELBURG, 1998) e indiretamente por intermédio da supressão de metanogênese (RODEN; WETZEL 1996; VAN DER NAT; MIDDELBURG, 1998).



1.4 Efeito da eutrofização sobre o metabolismo aquático

Um exemplo típico do efeito do processo de eutrofização sobre o metabolismo dos ecossistemas aquáticos ocorre nos ecossistemas das áreas urbanas, onde o lançamento de esgoto sem tratamento leva quantidades consideráveis de MO e nutrientes. Na água, o aporte de MO e nutrientes (N e P) potencializam tanto a produção primária como a respiração (Figura 1). Inicialmente, a comunidade fitoplanctônica se favorece, promovendo aumento do consumo de CO_2 ; no entanto, com o desenvolvimento exagerado desses organismos, pode ocorrer limitação de nutrientes na sua forma assimilável (ex.: amônia e fosfato) e/ou bloqueio da luz pelo aumento da turbidez na coluna d'água. Esses efeitos levam

à diminuição da produção primária e à intensificação dos processos heterotróficos, ou seja, ao aumento da produção de CO_2 , principalmente em função da atividade bacteriana.

A intensificação da atividade bacteriana, em função da decomposição de MO lábil de origem fitoplanctônica, promove o consumo do oxigênio, podendo levar à anaerobiose, principalmente na região próxima ao sedimento. No próprio sedimento, a ocorrência dos processos anaeróbios está associada não apenas à disponibilidade e qualidade da MO, mas também à presença de outros aceptores de elétrons, como nitrato, sulfato e CO_2 . Os processos anaeróbios influenciam diretamente a dinâmica de O_2 e do CO_2 nesses ecossistemas, pois o consumo e a produção desses gases estão diretamente relacionados com os processos de produção, respiração e decomposição.

A potencialização dos processos anaeróbios pela eutrofização é um dos seus principais efeitos nos ecossistemas aquáticos, principalmente no sedimento. Em condições eutróficas, o sedimento tende a ser um importante compartimento desses ecossistemas, funcionando não apenas como estoque de carbono, mas também como sítio de degradação da MO lábil. A degradação da MO lábil, que é mais facilmente decomposta, libera carbono para a coluna d'água não apenas sob a forma de carbono orgânico dissolvido (COD), mas também na forma de gases causadores do efeito estufa, como CO_2 e CH_4 (Figura 1). Ecossistemas eutrofizados disponibilizam grandes quantidades de substratos para processos de produção destes gases, diminuindo a competição entre os processos.

Sendo assim, os conhecimentos sobre o balanço entre a produção e o consumo de CO_2 e CH_4 e sobre a emissão desses gases para a atmosfera são fundamentais para a compreensão do funcionamento dos ecossistemas aquáticos continentais, principalmente no cenário atual de mudanças climáticas globais. Com relação aos ambientes submetidos ao processo de eutrofização artificial, essa questão se torna ainda mais relevante, pois nessa situação, o metabolismo é mais intenso, o que potencializa as taxas de incorporação ou emissão de carbono. Além disso, considera-se que o CH_4 apresenta uma capacidade de absorção da radiação infravermelha cerca de 25 vezes maior que a mesma quantidade de massa

de CO₂.

Nas seções seguintes, analisa-se a relação entre a eutrofização artificial e a dinâmica dos gases de efeito estufa em diferentes estudos experimentais ou de campo realizados em ecossistemas aquáticos continentais localizados na região norte do estado do Rio de Janeiro, notadamente nas lagoas costeiras. Nesta análise, ressaltam-se como os estudos se relacionam e quais as lacunas existentes no conhecimento desenvolvido.

2 ESTUDOS SOBRE A RELAÇÃO ENTRE A EUTROFIZAÇÃO E A DINÂMICA DO METANO

O primeiro estudo sobre a dinâmica do metano nas lagoas costeiras do norte do estado do Rio de Janeiro foi realizado por Furtado, Casper e Esteves (2002) e analisou a metanogênese em uma lagoa eutrófica – a Lagoa Imboacica (na grafia atual Imboassica), localizada na região urbana da cidade de Macaé –, e em duas lagoas costeiras oligotróficas, a Lagoa Cabiúnas e a Lagoa Comprida, localizadas no Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba (Parna Jurubatiba). Surpreendentemente, este estudo não detectou metanogênese no sedimento das lagoas estudadas, apesar de não haver limitação por nutrientes, seja pela presença de macrófitas aquáticas como fontes de detritos nas lagoas, seja – no caso da lagoa eutrofizada – pelo aporte de esgoto *in natura*. O estudo de Zink et al. (2004), nas mesmas três lagoas costeiras, não encontrou quantidades significativas de biomarcadores da metanogênese, corroborando o resultado da ausência do processo do estudo anterior. Os autores sugeriram que uma comunidade especial de micro-organismos prevalece nas lagoas estudadas, diferentemente das comunidades que normalmente as colonizam. Os resultados atípicos observados nesses estudos tornariam as lagoas estudadas sítios de exceção em relação ao que normalmente se observa em estudos do ciclo do metano em lagoas costeiras, e necessitariam de estudos complementares para ampliar a compreensão dos processos microbiológicos que ocorrem no sedimento desses ecossistemas. No entanto, o estudo de Fonseca et al. (2004), mostrou a presença de metano no sedimento de uma das lagoas costeiras oligotróficas estudadas anteriormente (Lagoa Cabiúnas),

indicando a existência de metanogênese. Notadamente, as concentrações de metano no sedimento das regiões colonizadas por macrófitas aquáticas foram significativamente maiores que na região limnética. Esse primeiro estudo identificou a presença do metano e foi um contraponto aos estudos anteriores, significando que aqueles apresentaram apenas resultados atípicos momentâneos, ou que algum problema metodológico pode ter ocorrido.

Os estudos anteriores foram os primeiros publicados sobre o ciclo do metano nas lagoas costeiras do norte do estado do Rio de Janeiro e envolveram a participação de docentes e discentes do Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas – Biofísica e do Programa de Pós-Graduação em Ecologia, ambos da UFRJ. Além desses estudos, diversos outros sobre o ciclo do metano foram realizados, enfocando diferentes aspectos relacionados ao ciclo do metano em lagos e lagoas costeiras.

A dissertação de Minello (2004), realizada no Programa de Pós-Graduação em Ecologia da UFRJ, abordou o estudo da influência da salinidade sobre a metanogênese em dez lagoas costeiras do norte do estado do Rio de Janeiro. As lagoas costeiras são ecossistemas sujeitos à entrada de água do mar devido à sua proximidade com o ecossistema marinho, alterando sua salinidade, o que pode submeter os micro-organismos lagunares a um estresse osmótico (HERRERA-SILVEIRA, 1996). No entanto, os micro-organismos metanogênicos são capazes de colonizar desde ambientes de água doce até os hipersalinos (FERRY, 1993). Essa capacidade de colonização de ambientes com grande variedade de salinidade é decorrente de estratégias de osmorregulação, como o acúmulo intracelular de íons inorgânicos e de moléculas orgânicas e da evolução de enzimas tolerantes às elevadas concentrações de sal (MARTIN; CIULLA; ROBERTS, 1999). O trabalho de Minello (2004) não discutiu a questão da eutrofização, apesar de analisar três lagoas eutrofizadas: Lagoa Iriry, localizada na área urbana do município de Rio das Ostras; e Imboassica e Carapebus, localizadas no Parna Jurubatiba. Entretanto, observou-se que a produção de metano nas três lagoas eutrofizadas apresentou valores que variaram de intermediários a pequenos, contrariando a premissa de que ambientes eutrofizados apresentam valores elevados de produção de metano devido ao aporte de matéria orgânica presente no esgoto não

tratado. O trabalho do autor foi revisto e publicado por Petruzzella et al. (2013).

Um fator que altera bruscamente a salinidade nas lagoas costeiras é a abertura artificial da barra de areia que separa a lagoa do mar (MELO, 2001). Essas aberturas geralmente ocorrem no período chuvoso, quando o aumento do nível d'água da lagoa provoca o alagamento das vias públicas e residências localizadas em suas margens. A abertura da barra ocasiona a exportação da água da lagoa para o mar e, posteriormente, a entrada de água marinha na lagoa. O estudo de Marinho (2004), realizado no Programa de Pós-Graduação em Ecologia da UFRJ, observou que a abertura da barra da Lagoa Imboassica, em fevereiro de 2001, ocasionou uma diminuição nas concentrações de metano de 96% no sedimento e de 78% na água. O autor concluiu que o aumento súbito da salinidade diminuiu a solubilidade do metano na água e afetou negativamente a produção de metano no sedimento. Essa pode ser a explicação para a baixa produção de metano obtida por Minello (2004), uma vez que as lagoas Carapebus e Imboassica apresentaram valores de salinidade relativamente elevados ao longo de seu estudo. Além disso, a água do mar, rica em sulfatos, pode ter favorecido o processo de sulfato-redução, um processo que compete por substratos utilizados em comum com as *Archaea* metanogênicas. Nessas condições, a metanogênese pode ser desfavorecida, pois a sulfato-redução é energeticamente mais favorável que a metanogênese (FERRY, 1993).

No estudo de Marinho (2004), a importância da eutrofização como "potencializadora" da metanogênese se evidenciou pelos valores elevados de concentração de metano no sedimento e na água antes da abertura de barra. A importância da eutrofização foi ainda reforçada pela ausência de metanotrofia (consumo aeróbico do metano) no sedimento, tanto antes quanto depois da abertura de barra. O autor atribuiu o resultado às elevadas concentrações de nutrientes e de clorofila a na coluna d'água, que representam uma sedimentação de matéria orgânica lábil no sedimento, conseqüentemente, um rápido consumo de oxigênio, inibindo as atividades aeróbicas.

Em outro estudo, realizado por Neves, Aragon e Silva Filho (2011), em uma lagoa mesotrófica – a Lagoa de Cima – e em uma lagoa urbana

eutrófica – a Lagoa do Vigário –, localizadas no município de Campos dos Goytacazes, observou-se que a eutrofização causada pelo aporte de esgoto doméstico promoveu as maiores concentrações de metano na lagoa eutrófica, demonstrando também o efeito positivo da descarga de esgoto sobre a metanogênese. Os autores destacaram que, apesar de a ocorrência de sulfato-redução na Lagoa do Vigário (LANNES, 2004), a metanogênese também deve ser um importante processo de degradação da matéria orgânica no local. Provavelmente, a quantidade de matéria orgânica que aporta na lagoa é suficiente para atender aos dois processos¹.

O problema ambiental relacionado ao gás metano é o seu papel no aquecimento global, devido à intensificação de sua emissão para a atmosfera como consequência das atividades humanas, causando o aumento da temperatura média da Terra. O primeiro estudo nas lagoas do norte do estado do Rio de Janeiro relacionado à emissão do gás metano para a atmosfera em um ecossistema eutrofizado foi a tese de Marinho (2012), realizada no Programa de Pós- Graduação em Ciências Biológicas – Biofísica, da UFRJ. Nesse estudo, o autor analisou a emissão difusiva de metano na interface água-ar na Lagoa Imboassica, além da concentração de metano na água. As concentrações de metano na água da Lagoa Imboassica apresentaram valores intermediários se comparados aos obtidos nas lagoas oligotróficas e mesotróficas estudadas (lagoas: Cabiúnas, Comprida, Carapebus e Piripiri localizadas no Parna Jurubatiba), tanto na estação seca quanto na estação chuvosa dos anos avaliados (2002 a 2009). O fluxo difusivo do metano também apresentou valores intermediários aos observados nas lagoas oligotróficas e mesotróficas. Marinho não encontrou um padrão que explique a dinâmica do metano na Lagoa Imboassica. Entretanto, esse ambiente foi submetido a três aberturas artificiais da barra de areia que separa a lagoa do mar durante o período de estudo. O referido autor concluiu que os efeitos antagônicos da abertura artificial da barra de areia e da eutrofização sobre a metanogênese devem ter sido responsáveis pela ausência de um padrão na dinâmica do metano na Lagoa Imboassica.

Outro fator que pode influenciar a dinâmica do metano nos ecossistemas aquáticos continentais é a bioturbação no sedimento, realizada por organismos bentônicos. A bioturbação é um processo que

¹ O trabalho de Neves, Aragon e Silva Filho (2011) envolveu discente do Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais da UENF.

pode alterar a estrutura de comunidades microbiológicas e o gradiente geoquímico nos sedimentos, além de regenerar os nutrientes na interface bentônico-pelágica (KRISTENSEN et al., 2012). Em relação ao ciclo do metano, observou-se, em um estudo experimental, que a presença de organismos bioturbadores bentônicos (*Heteromastus similis*, Polychaeta) na Lagoa Imboassica aumentou a concentração de metano na água e na atmosfera de microcosmos em relação ao tratamento controle, sem a presença do organismo (FIGUEIREDO-BARROS et al., 2009). A diversidade de organismos bioturbadores bentônicos foi outro fator que influenciou a concentração de metano no sedimento da Lagoa Imboassica, segundo o estudo de Caliman et al., 2013. Observou-se que as diferentes composições de espécies de organismos tiveram efeitos distintos nos padrões de redução da concentração de metano no sedimento. Ressaltou-se que a bioturbação pode ser um fator importante para a redução das emissões de metano para a atmosfera, uma vez que promove a difusão do metano na coluna d'água, diminuindo a formação de bolhas de gases no sedimento. As bolhas de gases passam diretamente pela coluna d'água sem sofrer oxidação, enquanto o metano dissolvido na água pode ser oxidado².

A partir da análise dos estudos realizados nas lagoas do norte do estado do Rio de Janeiro, é possível observar alguns fatores que influenciam a metanogênese e a emissão de metano para a atmosfera e que foram estudados em ecossistemas eutrofizados, tais como: variação de nível d'água, salinidade, bioturbação e o efeito da própria eutrofização. Entretanto, o ciclo do metano apresenta diversos outros fatores controladores, além dos estudados anteriormente, dentre os quais se destacam a qualidade e a quantidade da matéria orgânica, a temperatura, a presença de macrófitas aquáticas, o potencial redox e o pH.

Os estudos pioneiros nos ecossistemas aquáticos do norte do estado do Rio de Janeiro apresentaram questões e respostas muito importantes sobre o ciclo do metano nesses ambientes. No entanto, constata-se um tratamento segmentado das questões. Isso seria natural de se esperar, considerando-se o caráter inicial das pesquisas nesses ambientes tropicais, ainda muito pouco estudados. No entanto, estudos futuros necessitam de uma abordagem integradora e mais aprofundada

² Os estudos de Caliman et al. (2013) e de Figueiredo-Barros et al. (2009) foram realizados envolvendo discentes e docentes do Programa de Pós-graduação em Ecologia, da UFRJ

das questões já levantadas e de outras ainda não abordadas. Pode-se constatar, também, que os fatores estudados anteriormente apresentam relação clara entre si, na medida em que a variação do nível d'água ocorre naturalmente, em função dos períodos seco e chuvoso, ocasionando variações na salinidade e na concentração de nutrientes oriundos da eutrofização. Na estação chuvosa, espera-se diminuição da salinidade e menor concentração de nutrientes, em função da diluição em maior volume de água, sendo o contrário esperado na estação seca. Além disso, os estandes de macrófitas aquáticas também apresentam avanços e retrações em sua área de ocupação, em função da variação do nível d'água (PALMA-SILVA, 1998). Dessa forma, é necessário pensar em estudos que integrem essas diversas variáveis para obter respostas mais conclusivas e sínteses sobre o funcionamento dos ecossistemas da região em relação ao ciclo do metano.

3 ESTUDOS SOBRE A RELAÇÃO ENTRE A EUTROFIZAÇÃO E A DINÂMICA DO DIÓXIDO DE CARBONO

A dinâmica do dióxido de carbono, o principal gás causador do efeito estufa, também foi analisada em diversos estudos nos ecossistemas aquáticos continentais no norte do estado do Rio de Janeiro. De modo geral, a água de lagos e lagoas tende a ser supersaturada em CO_2 (COLE et al., 1994), tornando esses ecossistemas importantes fontes de CO_2 para a atmosfera (COLE et al., 2007). A eutrofização afeta a concentração de CO_2 na água tanto pelo aumento da remoção autotrófica de CO_2 (PRAIRIE; BIRD; COLE, 2002) quanto pelo aumento da produção de CO_2 pela respiração heterotrófica (RANTAKARI; KORTELAJINEN, 2005). A química do carbono inorgânico também é muito dependente das mudanças no pH da água, portanto, alterações na entrada de bases (RAYMOND; COLE, 2003) e de ácidos (RAM; NAIR; CHANDRAMOHAN, 2003) podem afetar a dinâmica do CO_2 em águas naturais. Um estudo de longo prazo (com 13 anos de abrangência) na Lagoa Imboassica e na Lagoa Cabiúnas observou que os ambientes estudados atuam como fontes consistentes de CO_2 para a atmosfera, uma vez que 99% das medições da pressão parcial de CO_2 ($p\text{CO}_2$) estiveram acima do equilíbrio atmosférico (MAROTTA et al., 2010). Entretanto, esses ecossistemas apresentaram grande variação na $p\text{CO}_2$

ao longo dos 13 anos de estudo, em função do maior ou menor grau de eutrofização e acidificação das águas. A variação no grau de eutrofização e acidificação decorreram da variação do nível d'água das lagoas, seja em função da abertura artificial da barra de areia ou em função dos períodos de estiagem e chuva. Nos períodos de maior eutrofização, os ecossistemas se comportaram como sumidouros do CO₂ atmosférico e, nos períodos de acidificação, como grandes fontes de CO₂ para a atmosfera. Ainda é necessário analisar se a grande variação na dinâmica do CO₂ é característica de lagoas tropicais ou se é específica para essas lagoas em particular. É importante destacar que essa variação pode ter consequências relevantes para o balanço regional de carbono.

Na tentativa de compreender as razões da variação na dinâmica do CO₂, Marotta et al. (2012) realizaram um estudo na Lagoa Cabiúnas, adicionando nutrientes – nitrogênio (N) e fósforo (P) – e peixes (*Hyphessobrycon bifasciatus* Ellis) em um experimento fatorial realizado em mesocosmos construídos dentro da lagoa. Os autores observaram que a emissão de CO₂ persiste depois da eutrofização artificial, mas que a magnitude da emissão depende da estrutura da cadeia trófica. A adição de nutrientes e peixes separadamente resultou na emissão de CO₂ similar aos tratamentos de controle. No entanto, nos tratamentos com adição de nutrientes e peixes em conjunto, o resultado foi uma grande biomassa de algas e autotrofia líquida diurna, reduzindo a emissão de CO₂ em 35%. O estudo demonstrou que os nutrientes e os peixes podem agir de forma sinérgica para modular a emissão persistente de CO₂ depois da eutrofização. Seus autores ressaltaram que a remoção ou a introdução de uma simples espécie pode alterar o funcionamento de um ecossistema, e por isso, necessita de novas abordagens na literatura. Em outro estudo experimental (PEIXOTO; MAROTTA; ENRICH-PRAST, 2013), buscando compreender o efeito da eutrofização sobre a dinâmica do CO₂ em lagoas costeiras, adicionaram-se nutrientes (N e P) em microcosmos e se observou a redução do pCO₂ na água das lagoas Carapebus e Comprida. A adição de uma grande concentração de P e de diferentes concentrações de N foi para avaliar o controle do N sobre a pCO₂. Os resultados mostraram que os tratamentos com maior concentração de N apresentaram redução substancial na pCO₂ nas duas lagoas, demonstrando que o N pode modular a pCO₂ em ecossistemas ricos em P.

Os estudos relacionados ao CO_2 nos ecossistemas aquáticos continentais no norte do estado do Rio de Janeiro demonstraram que esses ambientes são heterotróficos na maior parte do tempo e que existe grande variação sazonal e interanual nos valores de $p\text{CO}_2$ de emissão de CO_2 . Os estudos experimentais enfocaram a busca pelo entendimento dos fatores controladores da variação observada e algumas respostas foram encontradas. No entanto, a dinâmica do CO_2 nos ecossistemas aquáticos continentais é bastante complexa. Novos estudos são necessários para a melhor compreensão de seus fatores controladores ³.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os ecossistemas aquáticos continentais do norte do Rio de Janeiro, especialmente as lagoas costeiras localizadas no Parna Jurubatiba, aglutinam as pesquisas ecológicas de alguns programas de pós-graduação localizados no estado. Uma razão para essa aglutinação é o amplo espectro de variação nas características limnológicas das lagoas analisadas, apresentando águas claras e escuras, de águas doces a hipersalinas, com maior ou menor grau de colonização por macrófitas aquáticas, preservadas ou sujeitas a impactos antrópicos etc. Esse amplo espectro de variação em ecossistemas muito próximos entre si torna a região um laboratório natural para a realização de pesquisas ecológicas sobre os mais diferentes aspectos relacionados aos ciclos do CH_4 e do CO_2 . Outra razão foi a criação do Parna Jurubatiba, em 29 de abril de 1998 (ESTEVES et al., 2005), que permitiu a preservação de diversas lagoas costeiras em sua área e diminuiu a incidência de atividades antrópicas no ecossistema de restinga da região, permitindo a realização de pesquisas em ambientes com características o mais próximo possível das naturais.

A convergência das pesquisas em torno de temas centrais relacionados aos ciclos dos gases causadores do efeito estufa poderia ser uma consequência dessa aglutinação, ao invés de pesquisas segmentadas em temas diversos. Por outro lado, a falta de maior integração entre os programas de pós-graduação – ou mesmo dentro de um programa de pós-graduação – tem ocasionado pesquisas dissociadas entre docentes e discentes. Uma melhor compreensão sobre a importância dos

³ É importante ressaltar que os estudos realizados tiveram a participação de discentes e docentes do Programa de Pós-graduação em Ecologia da UFRJ.

ecossistemas aquáticos continentais tropicais no ciclo global dos gases causadores do efeito estufa é, sem dúvida, dependente dessa integração ao redor de temas centrais, com uma abordagem interdisciplinar.

Independentemente da questão da integração entre e dentro dos programas de pós-graduação, as pesquisas realizadas sobre os ciclos do CH₄ e do CO₂ nos ecossistemas do norte do estado do Rio de Janeiro permitiram a identificação da eutrofização artificial, da salinidade e da presença de macrófitas aquáticas como alguns dos fatores determinantes da dinâmica desses ciclos. O ideal é que pesquisas futuras sejam realizadas tendo como base temas centrais já identificados, a fim de aprofundar o conhecimento sobre eles. Cabe destacar que, dentre os três fatores determinantes identificados, a eutrofização artificial é um aspecto antrópico relacionado com atividades não condizentes com o desenvolvimento sustentável.

Além das diversas pesquisas realizadas, os programas de pós-graduação contribuíram sobremaneira para a formação de recursos humanos qualificados. Muitos dos profissionais formados continuam desenvolvendo pesquisas sobre aquecimento global nas próprias instituições em que realizaram seus estudos ou mesmo em outras instituições pelo Brasil.

Espera-se que a abordagem desses profissionais seja interdisciplinar ao redor de temas centrais, não esquecendo que esse tipo de abordagem leva em conta o saber daqueles que vivem no entorno dos ecossistemas estudados. Assim, essa integração torna possível a construção de um saber mais completo, na medida em que associa os diversos conhecimentos sobre um mesmo tema. Ao desenvolver pesquisas interdisciplinares, os programas de pós-graduação estarão contribuindo para a construção de uma universidade que não seja hermética, mas que irradie o saber e seja um espaço de mudança social e econômica para um planeta mais sustentável.

Referências

BELARMINO, M. G. **Sequestro de carbono por *Typha domingensis* Pers. (*Typhaceae*): um caminho para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Conservação) – Núcleo em Ecologia e Desenvolvimento Socioambiental de Macaé, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Macaé, 2013.

BOZELLI, R. L. et al. Dinâmica nictemeral dos principais nutrientes inorgânicos e clorofila a em duas lagoas costeiras fluminenses. **Acta Limnologica Brasiliensia**, Rio Claro, v. 3, n. 1, p. 319-346, 1990.

CALIMAN, A. et al. Biodiversity effects of benthic ecosystem engineers on the spatial patterns of sediment CH₄ concentration in an urban Neotropical coastal lagoon. **Acta Limnologica Brasiliensia**, Rio Claro, v. 25, n. 3, p. 302-314, 2013.

COLE, J. J. et al. Carbon-dioxide supersaturation in the surface waters of lakes. **Science**, New York, v. 265, p. 1568-1570, 1994.

COLE, J. J. et al. Plumbing the global carbon cycle: integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. **Ecosystems**, Verona, v. 10, p. 171-184, 2007.

ESTEVES, F. A. **Fundamentos de limnologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.

ESTEVES, F. A. Lagoas costeiras: origem, funcionamento e possibilidades de manejo. In: ESTEVES, F. A. (Ed.). **Ecologia das lagoas costeiras do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba e do Município de Macaé (RJ)**. Rio de Janeiro: NUPEM; UFRJ, 1998. cap. 2, p. 63-87.

ESTEVES, F. A. et al. 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 Limnologica Brasiliensia**, Rio Claro, v. 2, n. 1, p. 99-127, 1988.

ESTEVES, F. A. et al. Projeto ECOLagoas: um modelo de pesquisa, educação e cidadania. In: ROLAND, F.; CESAR, D.; MARINHO, M. (Eds.). **Lições de limnologia**. São Carlos: RiMa, 2005. p. 115-125.

ESTEVES, F. A.; MEIRELLES-PEREIRA, F. Eutrofização artificial. In: ESTEVES, F. A. (Org.). **Fundamentos de Limnologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2011. p. 625-655.

FELIX, R. W. **Fluxos de carbono e dióxido de carbono em lagoas costeiras húmicas**: uma abordagem espaço-temporal. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Conservação) – Núcleo em Ecologia e Desenvolvimento Socioambiental de Macaé, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Macaé, 2014.

FERRY, J. G. **Methanogenesis**: ecology, physiology, biochemistry & genetics. New York: Springer, 1993. (Chapman & Hall Microbiology series).

FIGUEIREDO-BARROS, M. P. **Efeito da variabilidade espaço-temporal e bioturbação por invertebrados bentônicos na concentração e emissão de metano (CH₄) em ecossistemas aquáticos continentais**. 2008. Tese (Doutorado em Ecologia) - Instituto de Biologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

FIGUEIREDO-BARROS, M. P. et al. Benthic bioturbator enhances CH₄ fluxes among aquatic compartments and atmosphere in experimental microcosms. **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences**, Ottawa, v. 66, p. 1649-1657, 2009.

FONSECA, A. L. S. et al. Methane concentration in water column and in pore water of a coastal lagoon (Cabiúnas lagoon, Macaé, RJ, Brazil). **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 47, n. 2, p. 301-308, 2004.

FONSECA, A. L. S. **Metanogênese em uma lagoa costeira tropical colonizada por macrófitas aquáticas e sua regulação pela disponibilidade de acetato e sulfato**. 2005. Dissertação (Mestrado em Ecologia) - Instituto de Biologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

FREEMAN, C. et al. Contrasted effects of simulated drought on the production and oxidation of methane in a mid-Wales wetland. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 34, n. 1, p. 61-67, 2002.

FURTADO, A. L. S. **Atividade microbiana em ecossistemas aquáticos continentais e temperados**. 2000. Tese (Doutorado em Ecologia) - Instituto de Biologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

FURTADO, A. L. S.; CASPER, P.; ESTEVES, F. A. Methanogenesis in an impacted and two dystrophic coastal lagoons (Macaé, Brazil). **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 45, n. 2, p. 195-202, 2002.

GONÇALVES, F. A. **Efeito do biorrevolvimento por macroinvertebrados bentônicos sobre a concentração de metano (CH₄) na interface sedimento-água-atmosfera**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Conservação) – Núcleo em Ecologia e Desenvolvimento Socioambiental de Macaé, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Macaé, 2013.

HERRERA-SILVEIRA, J. A. Salinity and nutrients in a tropical coastal lagoon with ground water discharges to the Gulf of Mexico. **Hydrobiologia**, The Hague, v. 321, n. 2, p. 165-176, 1996.

JACQUES, S. M. S. **Influência de fatores ascendentes sobre a produção bacteriana em ecossistemas aquáticos continentais tropicais**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ecologia) – Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.

JACQUES, S. M. S. **Efeitos de alterações no padrão de precipitação sobre a estrutura e o metabolismo de microrganismos aquáticos**. Em andamento. Tese (Doutorado em Ecologia e Evolução) – Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

KING, G. M. Associations of methanotrophs with the roots and rhizomes of aquatic vegetation. **Applied and Environmental Microbiology**, Washington, v. 60, p. 3220-3227, 1994.

KING, G. M.; BLACKBURN, T. H. Controls of methane oxidation in sediments. **Mitteilungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie**, Stuttgart, v. 25, p. 1-14, 1996.

KRISTENSEN, E. et al. What is bioturbation? The need for a precise definition for fauna in aquatic sciences. **Marine Ecology-Progress Series**, Oldendorf, v. 446, p. 285-302, 2012.

LANNES, L. S. **Avaliação de pequenos alagados artificiais na modificação da qualidade de água utilizando a macrófita aquática *Typha domingensis* Pers.** 2004. Dissertação (Mestrado em Biociência e Biotecnologia) – Centro de Biociências e Biotecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Rio de Janeiro, 2004.

LOPES-FERREIRA, C. A importância da região colonizada por macrófitas aquáticas na mitigação da degradação sanitária da Lagoa Imboassica. In: ESTEVES, F. A. (Org.). **Ecologia das Lagoas Costeiras do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba e do Município de Macaé (RJ)**. Rio de Janeiro: NUPEM; UFRJ, 1998. cap. 6, p. 391-399.

MARINHO, C. C. **Dinâmica do metano nas lagoas costeiras do litoral Norte do Rio de Janeiro.** 2012. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Biofísica Carlos Chagas Filho, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

MARINHO, C. C. **Metanogênese regulada por macrófitas aquáticas e pela alteração brusca do nível d'água e salinidade em duas lagoas costeiras da Região Norte Fluminense, Macaé/RJ.** 2004. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas [Biofísica]) – Instituto de Biofísica Carlos Chagas Filho, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

MARINHO, C. C. et al. Resultados e perspectivas sobre o estudo do metano nas lagoas costeiras da restinga de Jurubatiba e na Lagoa Imboassica na Região Norte do Estado do Rio de Janeiro. In: ROCHA, C. F. D.; ESTEVES, F. A.; SCARANO, F. R. (Orgs.). **Pesquisas de longa duração na restinga de Jurubatiba: ecologia, história natural e conservação.** São Carlos: RiMa, 2004. cap. 16, p. 273-294.

MARINHO, C. C. et al. Aquatic macrophytes drive sediment stoichiometry and the suspended particulate organic carbon composition of a tropical coastal lagoon. **Acta Limnologica Brasiliensia**, Rio Claro, v. 22, n. 2, p. 208-217, 2010.

MAROTTA, H. **O aporte de carbono orgânico dissolvido e a eutrofização: processos direcionadores do metabolismo das lagoas costeiras tropicais.** 2005. Dissertação (Mestrado em Ecologia) - Instituto de Biologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MAROTTA, H. **Dióxido de carbono nos lagos tropicais: de controles locais a padrões globais.** 2009. Tese (Doutorado em Ecologia) - Instituto de Biologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

MAROTTA, H. et al. Synergistic control of CO₂ emissions by fish and nutrients in a humic tropical lake. **Oecologia**, Berlin, v. 168, p. 839-847, 2012.

MAROTTA, H. et al. Long-term CO₂ variability in two shallow tropical lakes experiencing episodic eutrophication and acidification events. **Ecosystems**, New York, v. 13, p. 382-392, 2010.

MARTIN, D. D.; CIULLA, R. A.; ROBERTS, M. F. Osmoadaptation in Archaea. **Applied and Environmental Microbiology**, Washington, v. 65, n. 5, p. 1815-1825, 1999.

MELO, S. **Fitoplâncton da Lagoa Imboassica (Macaé, RJ, Brazil):** flora, estrutura da comunidade e variações espaciais e temporais. 2001. Tese (Doutorado em Ecologia) – Instituto de Biologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

MINELLO, M. **Metanogênese sob a variação de salinidade em lagoas costeiras do Norte Fluminense:** implicações nas condições osmóticas e na competição por substratos. 2004. Dissertação (Mestrado em Ecologia) – Instituto de Biologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

NEVES, J. M. C. O. S. **Avaliação das concentrações de metano em pequenos alagados construídos**. 2007. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Recursos Naturais) – Centro de Biociências e Biotecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2007.

NEVES, J. M. C. O. S.; ARAGON, G. T.; SILVA FILHO, E. V. Effects of eutrophication and *Typha domingensis* Pers. on methanogenesis in tropical constructed wetland. **Acta Limnologica Brasiliensia**, Rio Claro, v. 23, n. 2, p. 145-153, 2011.

PALMA-SILVA, C. **Crescimento e produção de *Typha domingensis* Pers. na Lagoa Imboassica**. In: ESTEVES, F. A. (Ed.). Ecologia das lagoas costeiras do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba e do Município de Macaé. Rio de Janeiro: NUPEM; UFRJ; CNPq, 1998. cap. 4, p. 205-220.

PEIXOTO, R. B.; MAROTTA, H.; ENRICH-PRAST, A. Experimental evidence of nitrogen control on $p\text{CO}_2$ in phosphorus-enriched humic and clear coastal lagoon waters. **Frontiers in Microbiology**, Lausana, v. 4, n. 11, 2013.

PETRUZZELLA, A. et al. Magnitude and variability of methane production and concentration in tropical coastal lagoons sediments. **Acta Limnologica Brasiliensia**, Rio Claro, v. 25, n. 3, p. 341-351, 2013.

PETRUZZELLA, A. **Influence of herbivore damage on methane emission from emergent aquatic macrophytes**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ecologia) - Instituto de Biologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

PRAIRIE, Y. T.; BIRD, D. F.; COLE, J. J. The summer metabolic balance in the epilimnion of southeastern Quebec lakes. **Limnology and Oceanography**, Waco, v. 47, p. 316-321, 2002.

RAM, A. S. P.; NAIR, S.; CHANDRAMOHAN, D. Seasonal shift in net ecosystem production in a tropical estuary. **Limnology and Oceanography**, Waco, v. 48, p. 1601-1607, 2003.

RANTAKARI, M.; KORTELAINEN, P. Interannual variation and climatic regulation of the CO_2 emission from large boreal lakes. **Global Change Biology**, Urbana, v. 11, p. 1368-1380, 2005.

RAYMOND, P. A.; COLE, J. J. Increase in the export of alkalinity from North America's largest river. **Science**, New York, v. 301, p. 88-91, 2003.

RODEN, E. E.; WETZEL, R. G. Organic carbon oxidation and suppression of methane production by microbial Fe(III) oxide reduction in vegetated and unvegetated freshwater wetland sediments. **Limnology and Oceanography**, Waco, v. 41, n. 8, p. 1733-1748, 1996.

SOFFIATI, A. Aspectos históricos das lagoas do Norte do Estado do Rio de Janeiro. In: ESTEVES, F. A. (Ed.). **Ecologia das lagoas costeiras do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba e do Município de Macaé (RJ)**. Rio de Janeiro: NUPEM; UFRJ, 1998. cap. 1, p. 1-35.

TYLER, S. C. The global methane budget. In: ROGERS, J. E.; WHITMAN, W. B. (Eds.). **Microbial production and consumption of greenhouse gases: methane, nitrogen oxides, and halomethanes**. Washington, DC: American Society of Microbiology, 1991. p. 7-38.

VAN DER NAT, F. J.; MIDDELBURG, J. J. Seasonal variation in methane oxidation by the rhizosphere of *Phragmites australis* and *Scirpus lacustris*. **Aquatic Botany**, Amsterdam, v. 61, n. 2, p. 95-110, 1998.

WHITING, G. J.; CHANTON, J. P. Primary production control of methane emission from wetlands. **Nature**, London, v. 364, p. 794-795, 1993.

ZINK, K. et al. Organic matter composition in the sediment of three Brazilian coastal lagoons – District of Macaé, Rio de Janeiro (Brazil). **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 76, n. 1, p. 29-47, 2004.

Recebido em 29/04/2016

Aprovado em 03/10/2016