

**EMIÇÃO E PRODUÇÃO DE METANO EM UM RESERVATÓRIO
TROPICAL: VARIABILIDADE ESPACIAL NO RESERVATÓRIO DE
JUTURNAÍBA**

ANDREA FERREIRA MONTE NOVO

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE - UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

SETEMBRO/2015

**EMIÇÃO E PRODUÇÃO DE METANO EM UM RESERVATÓRIO
TROPICAL: VARIABILIDADE ESPACIAL NO RESERVATÓRIO DE
JUTURNAÍBA**

ANDREA FERREIRA MONTE NOVO

“Dissertação apresentada ao Centro de
Biotecnologia e Biotecnologia, da Universidade
Estadual do Norte Fluminense, como parte
das exigências para obtenção do título de
Mestre em Ecologia e Recursos Naturais”

ORIENTADOR: ALEX ENRICH PRAST

**CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
SETEMBRO DE 2015**

FICHA CATALOGRÁFICA
Preparada pela Biblioteca do Centro de Biociências e Biotecnologia
da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

621 / 2016

Novo, Andrea Ferreira Monte

Emissão e produção de metano em um reservatório tropical:
variabilidade espacial no reservatório de Juturnaíba. / Andrea Ferreira
Monte Novo. -- Campos dos Goytacazes, 2015.
xii, 40, [1] f. : il.

Dissertação (Mestrado em Ecologia e Recursos Naturais) – Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Biociências e
Biotecnologia. Laboratório de Ciências Ambientais.

Área de concentração: Ecologia de ecossistemas

Orientador: Prast, Alex Enrich

Bibliografia: f. 32-40

1. Metano 2. Emissão 3. Produção 4. Reservatórios tropicais
5. Juturnaíba I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy
Ribeiro II. Título

577.27
N935e

EMIÇÃO E PRODUÇÃO DE METANO EM UM RESERVATÓRIO TROPICAL:
VARIABILIDADE ESPACIAL NO RESERVATÓRIO DE JUTURNAÍBA

ANDREA FERREIRA MONTE NOVO

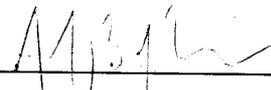
“Dissertação apresentada ao Centro de
Biotecnologia e Biociências, da Universidade
Estadual do Norte Fluminense, como parte
das exigências para obtenção do título de
Mestre em Ecologia e Recursos Naturais”.

Aprovada em 25 de setembro de 2015.

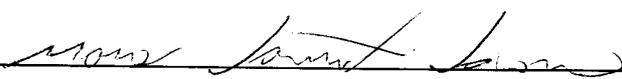
Comissão Examinadora:



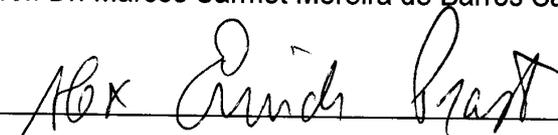
Prof. Dr. Humberto Marotta Ribeiro (Doutor em Ecologia) – UFF.



Dr. André Breves Ramos (Doutor em Ciências Biológicas) – UFRJ.



Prof. Dr. Marcos Sarmet Moreira de Barros Salomão (Doutor em Ciências) – UENF.



Prof. Dr. Alex Enrich Prast (Doutor em Ecologia) – UFRJ (Orientador).

A imaginação é mais importante que a ciência, porque a ciência é limitada, ao passo que a imaginação abrange o mundo inteiro” (Albert Einstein).

“Tenho a impressão de ter sido uma criança brincando à beira-mar, divertindo-me em descobrir uma pedrinha mais lisa ou uma concha mais bonita que as outras, enquanto o imenso oceano da verdade continua misterioso diante de meus olhos”. (Isaac Newton)

Agradecimentos:

Primeiramente agradeço à Deus, por minha vida, por ter me permitido vivenciar esse momento e por ter me dado saúde e forças para superar todas as dificuldades encontradas pelo caminho.

Um agradecimento em especial à D. Maria Genoveva, em memória, por toda confiança e apoio em todos os momentos enquanto esteve presente entre nós.

À cada pessoa que participou direta e indiretamente desse momento da minha vida, minha sincera gratidão:

Alex, meu orientador, por todos os ensinamentos, confiança e oportunidades durante minha trajetória. Foi um período de grande crescimento e aprendizagens. Obrigada por toda paciência, apoio e preciosos conhecimentos transmitidos para que pudesse fazer o melhor possível.

Todos que fazem parte do Laboratório de Biogeoquímica, por toda a amizade, por todo apoio em todos os momentos, que vai além da parte profissional e científica, constituindo uma grande família. Em especial ao Ricardo Pollery, por toda confiança que sempre teve em mim e no meu trabalho. Ângela, por sempre me receber com seu melhor sorriso. Professor Humberto Marotta, por sempre encontrar um tempo, dentro de sua agenda para me ajudar no que era possível. Leveson, pelo apoio na coleta. Camille, pela confiança e amizade sempre. Camila, Maylla, Dani (equipe do laboratório), por todo apoio em todos os momentos em que precisei. Roberta e Vini, por estarem sempre dispostos a ajudar no meu trabalho. André, por toda ajuda e apoio nessa fase final, grande amizade solidificada na amazônia. Lia, Laura, Luana, por sua amizade. Cris, Livia, João, pelo carinho. Muito obrigada a todos sem exceção.

Ao Programa de Pós Graduação em Ecologia e Recursos Naturais da UENF, ao Coordenador, equipe de professores, sem exceção, sempre dispostos a nos atender. Beth, em especial, por toda ajuda, incentivo e paciência, não só comigo, mas com todos os alunos do programa.

A UFRJ, instituição na qual eu trabalho, e ao meu chefe, Prof. Alex Prast, por me proporcionar essa oportunidade de aprimorar meus conhecimentos.

Minha linda e amada família, sem ela eu não estaria aqui. Meus pais, por serem sempre meu alicerce e força. Minha irmã, Mônica, pelas palavras de incentivo e por ter me dado meus maiores presentes (Natália, Bruno e Manoela). Meus sobrinhos amados, por estarem sempre me incentivando em todos os momentos. Minha

pequena Paola, por todos seus sorrisinhos. Minhas tias, primas e primos. Fátima e Geraldo, por terem me acolhido todas as vezes em sua casa.

Meu namorado, por todas as palavras de incentivo e por todo apoio.

Todos os meus amigos, que sempre estiveram ao meu lado. Ju Guedes, por todo apoio e paciência. Eliana, por sempre me incentivar nessa caminhada. Ao Luiz Fernando Martins e Ana Paula Santana Musse, por todo apoio. Jana (amigas desde que nascemos) e Grazi, pelo carinho de sempre. Karina e João, em especial, pela paciência, disponibilidade de sempre e amizade sincera.

A todos que estiveram presentes junto comigo nesse caminho, meu muito obrigado.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS E ESQUEMAS	IX
LISTA DE FIGURAS	X
RESUMO.....	XI
ABSTRACT.....	XII
INTRODUÇÃO	1
A METANOGÊNESE	3
EMISSÃO EM ÁGUAS DOCES.....	6
A EMISSÃO DE METANO EM RESERVATÓRIOS	8
OBJETIVOS:.....	11
OBJETIVO GERAL	11
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
HIPÓTESE	12
METODOLOGIA	12
ÁREA DE ESTUDO.....	12
TRABALHO DE CAMPO.....	14
LABORATÓRIO	17
ANÁLISES ESTATÍSTICAS:	18
RESULTADOS.....	18
PRODUÇÃO DE CH ₄ E CO ₂ :.....	18
DISCUSSÃO	26
CONCLUSÃO	30
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

LISTA DE TABELAS E ESQUEMAS

Tabela 01: Número de réplicas por região de coleta, nos grupos controle (sem inibidor) e tratamento (com inibidor).

Tabela 02: Análises espaciais da emissão e produção de CH₄ e CO₂ no reservatório de Juturnaíba por tipo de transecto.

Tabela 03: Análise da produção de CH₄ com e sem inibidor no reservatório de Juturnaíba por região amostrada.

Tabela 04: Análise da produção de CO₂ com e sem inibidor no reservatório de Juturnaíba por região amostrada.

Esquema 01: Ciclagem do metano em ambiente aquático.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Fluxo de carbono em ambientes alagados.

Figura 02 : Vias de emissão e dinâmica do metano em um lago estratificado.

Figura 03: Mapa da Região Hidrográfica Lagos São João no Estado do Rio de Janeiro com a indicação dos limites da APA da Bacia do Rio São João/Mico-Leão-Dourado e da represa de Juturnaíba.

Figura 04: Disposição das câmaras de coleta no Reservatório de Juturnaíba em quatro distintas regiões: margem; região próxima às macrófitas; região central e região da desembocadura do Rio São João.

Figura 05: Fotos das câmaras flutuantes –(região próxima às macrófitas), momento da coleta final.

Figura 06: Produção de CH_4 ($\text{mmol. m}^{-2}. \text{d}^{-1}$) no reservatório de Juturnaíba nas quatro regiões de coleta: margem, centro, com influência fluvial e com presença de macrófitas.

Figura 07: Emissão de CH_4 no reservatório de Juturnaíba por tipo de transecto: região próxima às macrófitas, margem, central e região sob influência fluvial, ($\text{mmol.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$).

Figura 08: Produção de CO_2 ($\text{mmol. m}^{-2}. \text{d}^{-1}$) no reservatório de Juturnaíba nas quatro regiões de coleta: margem, centro, com influência fluvial e com presença de macrófitas.

Figura 09: Emissão de CO_2 no reservatório de Juturnaíba por tipo de transecto: região próxima às macrófitas, margem, central e região sob influência fluvial, ($\text{mmol.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$).

Figura 10: Razão $\text{CO}_2:\text{CH}_4$ no reservatório de Juturnaíba por região amostrada: margem, centro, rio e região próxima às macrófitas.

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo quantificar a produção e a emissão de metano em um reservatório tropical, bem como a contribuição de cada área de coleta. O trabalho tem a perspectiva de encontrar uma variabilidade na emissão e na produção nos diferentes pontos, confirmando assim a heterogeneidade do local em termos de emissão e produção de metano. A coleta foi realizada no mês de julho do ano de 2013 no reservatório de Juturnaíba, situado entre o município de Araruama e Silva Jardim, no Estado do Rio de Janeiro. Este reservatório é parte integrante da bacia do rio São João. Para quantificar a emissão do metano da água para a atmosfera foram dispostas 40 câmaras de policloreto de vinila (PVC) sobre a água em quatro diferentes regiões do reservatório (região próxima as macrófitas, margem, centro, desembocadura do rio São João) perfazendo oito transectos ao longo do reservatório. Para os ensaios de produção foram coletados testemunhos de sedimentos (6 cm de diâmetro e 40 cm de comprimento) nesses mesmos pontos de coleta e analisados posteriormente no Laboratório de Biogeoquímica da UFRJ. Em parte das amostras (n=5 por região amostrada) adicionou-se fluorometano (CH_3F) 2.0%, inibidor da metanogênese acetoclástica. e os frascos foram incubados por 25 dias a 25°C. As amostras geradas no ensaio para emissão de CH_4 para atmosfera; e de produção de CH_4 e de CO_2 foram lidas posteriormente por difração a laser com o Greenhouse Gas Analyzer (CH_4 , CO_2 , H_2O), Los Gatos®, modelo 911-0010. O presente estudo comprovou a variabilidade na produção e na emissão do metano nos quatro pontos amostrados (margem, região próxima à macrófitas, centro e região sob influência fluvial). As maiores taxas de produção de metano foram registradas nas regiões próximas às macrófitas e sob influência do aporte de matéria orgânica proveniente das macrófitas e de sedimentos oriundos do rio. Quanto à emissão, maiores valores foram registrados nas regiões da margem da desembocadura do rio São João. O reservatório de Juturnaíba apresenta um fluxo médio de $33,3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, podendo ser considerado com uma fonte de metano para a atmosfera comparando com estudos anteriores em diversas áreas alagadas e lagos que mostram uma emissão média de metano de 11 a $189 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$.

Palavras-chave: Metano, emissão, produção, reservatórios tropicais, Juturnaíba.

ABSTRACT

This study aims to quantify the methane (CH₄) production and emission in a tropical reservoir as well as the contribution of each sampling plot. It has the purpose of evaluatea variability in emissions and production in different portions and confirmit heterogeneity throughout the reservoir. Sampling was conducted in July 2013 in the Juturnaíba reservoir, São João drainage basin, located between Araruama and Silva Jardim cities, Rio de Janeiro state. In order to quantify methanewater emission to the atmosphere 40 polyvinyl chloride (PVC) chambers were placed on the water surface, in four different regions of the reservoir (region near macrophytes, margin, center, São João river region), accounting eight transects along the reservoir. For the production tests sediment cores were collected (6cm diameter; 40cm height) in those same sampling sites, that were later analyzed in Biogeochemistry Laboratory UFRJ. In some samples (n= 5 per sampling site) was added fluoromethane (CH₃F) 2.0% acetoclasticmethanogenesis inhibitor and wereincubated for 25 days at 25 °C. All samples collected were subsequently read by laser diffraction with the Greenhouse Gas Analyzer (CH₄, CO₂, H₂O), Los Gatos® modelo 911-0010. This study found variability in the methane production and emission in the four sampling points. Larger methane production rates were found in regions close to macrophytesand under the influence of the São João river contribution, confirming the effect of input of organic matter, from macrophytes and sediments coming from the river. Higher values of methane emission were observed in the margin and the region of the São João river. The reservoir Juturnaíba has an average flow of 33.3 mg.m⁻².d⁻¹ and can be considered a source of methane to the atmosphere compared to previous studies in various lakes and flooded areas, that show an average methane emission ranging 11-189 mg.m⁻². d⁻¹.

Keywords: methane, emission, production, tropical reservoir, Juturnaiba.

INTRODUÇÃO

O metano (CH_4) é o hidrocarboneto mais simples e abundante existente na atmosfera, sendo o segundo mais importante gás de efeito estufa, depois do dióxido de carbono. Contribui com cerca de 30% da forçante antropogênica líquida (efeito do aquecimento sobre o clima por atividades humanas) e sua concentração atmosférica tem aumentado desde o período pré-industrial de 715 ppbv para cerca de 1770 ppbv (Conrad, 2009). Cerca de 25% de todas as fontes de metano estão relacionadas com a mineração, queima de combustíveis fósseis e de biomassa; 69% são provenientes de mecanismos microbiológicos e 6% do material vegetal (Conrad, 2009).

O metano é um gás traço, com baixa solubilidade, que possui a propriedade de absorver a radiação infravermelha. A sua degradação na atmosfera ocorre pelos processos de fotoxidação e pelo radical hidroxila (OH^\cdot), possui um tempo de residência na atmosfera estimado de 8 a 12 anos, e seu potencial de efeito estufa é cerca de 23 vezes maior que o CO_2 (Bastviken, 2009). O metano contribui com cerca de 20% para o processo de aquecimento global e possui um importante papel no ciclo do carbono (IPCC, 2007), figura 1.

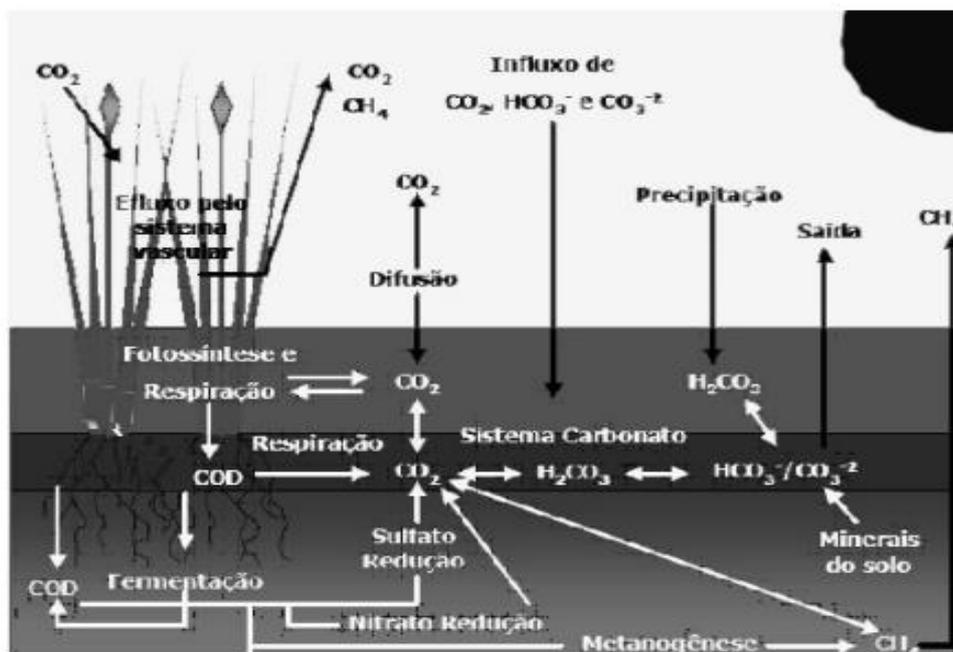


Figura 01 – Fluxo do carbono em ambientes alagados. COD significa carbono orgânico dissolvido. Adaptado de *Fenchel et al*, 1998.

Ecosistemas aquáticos continentais, comolagos, rios e reservatórios, são considerados componentes importantes na análise do ciclo global do carbono e, segundo os estudos realizados por Wuebbles e Hayhoe (2002) e Lima (2005), as áreas alagadas correspondem à 30% das emissões naturais de CH₄. Sua contribuição para o efeito estufa tem sido alterada em decorrência de atividades antrópicas, que podem afetar consideravelmente o balanço entre as fontes e sumidouros de gases de efeito estufa. A produção de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) estão intimamente ligadas à disponibilidade de matéria orgânica e aceptores de elétrons (oxigênio, nitrato e sulfato), que são usados nos processos de obtenção de energia por microrganismos Wuebbles e Hayhoe (2002).

A maior parte do metano presente na atmosfera é de origem biogênica, proveniente do processo de metanogênese realizado pelas arqueias metanogênicas, sendo o principal produto da decomposição da matéria orgânica em ambientes tropicais (Bastviken, 2009). Sua concentração atmosférica é principalmente controlada pelas atividades de produção (metanogênese) e consumo por microrganismos metanotróficos (Borrelet *et al.*, 2011).

A degradação da matéria orgânica pelos microrganismos é termodinamicamente favorecida nas reações oxidativas (respiração aeróbia – na presença de oxigênio, utilização do nitrato e sulfato na ausência de oxigênio – desnitrificação e redução do sulfato respectivamente) sendo o CO₂ um dos produtos dessas reações. Na ausência desses elementos oxidantes, a matéria orgânica é decomposta por outros processos fermentativos e pela metanogênese, produzindo CH₄ e CO₂ (Liikanen, 2002).

O metano é produzido nos sedimentos anóxicos (Bartlett *et al.*, 1988; Rud & Hamilton, 1978) e pode representar uma significativa fonte de carbono para as cadeias aquáticas em ambientes óxicos (Sanseverino *et al.*, 2012). Em presença de oxigênio, o metano pode ser oxidado a dióxido de carbono (CO₂), pela ação das bactérias metanotróficas (*aerobic methane-oxidizing bacteria* - MOB), que utilizam o metano como fonte de carbono e energia e o oxigênio comoceptor de elétrons. Essas bactérias estão presentes na coluna d'água e nas camadas superficiais dos sedimentos, onde há presença de O₂ (Bastviken, 2009; King & Blackburn, 1996; Freeman *et al.*, 2002). Como esse consumo não é completo, o excedente é liberado

para a atmosfera. Esse metano, então liberado para a atmosfera, é dependente da forma como a dinâmica do metano é afetada pela variação da concentração de oxigênio na coluna d'água, que por sua vez é dependente da temperatura. Em águas mais frias a quantidade de oxigênio dissolvido é maior, e a metanogênese é desfavorecida (Bastviken, 2009; Heyere Berger, 2000).

O balanço global do metano na atmosfera é dado pelo equilíbrio entre essas vias de fontes e sumidouros do gás (Conrad, 2009), representando o fluxo entre a superfície e a atmosfera. O processo de oxidação anaeróbica do metano produzido leva a uma taxa de consumo de 70–300 Tg CH₄/ano (Reeburgh, 2007), e sem essa atividade o seu balanço atmosférico global seria cerca de 10 a 60% maior (Conrad, 2009).

A Metanogênese

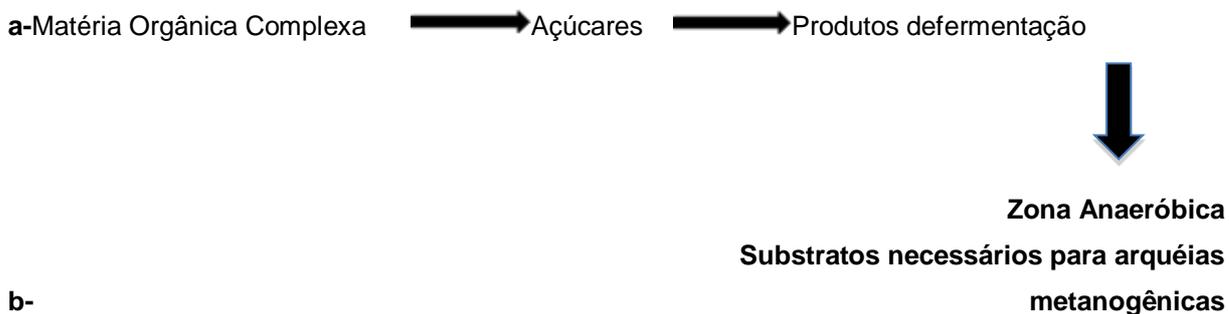
A produção de metano, metanogênese, é a etapa final do processo de mineralização da matéria orgânica em ambientes anaeróbios – sedimentos, solos alagados, ambientes geotermiais e trato gastrointestinal de animais (Zinder, 1993; Schink, 1997). Na superfície do sedimento ocorrem processos aeróbicos e em seguida, conforme o oxigênio vai se extinguindo, os processos anaeróbicos, como a desnitrificação, redução de metais, sulfato redução e por fim a metanogênese se iniciam.

O processo de formação do metano é específico de ambientes em que outros aceptores de elétrons, como O₂, NO₃⁻, Mn⁺⁴, Fe⁺³, SO₄⁻², estejam em baixa concentração, não oferecendo concorrência, e também de uma quantidade de substrato suficiente para que a reação ocorra (Bastviken, 2009). Portanto, as arqueíasmetanogênicas são desfavorecidas frente a outros organismos que utilizam os íons oxidantes citados acima como fonte de elétrons. O processo de degradação da matéria orgânica a metano em anaerobiose é realizado por arqueíasmetanogênicas e corresponde a cerca de 75% do total de metano emitido para a atmosfera, sendo os outros 25% provenientes de atividades antrópicas (Whitman *et al*, 2006). Entre os processos metabólicos que levam a mineralização da matéria orgânica em anaerobiose, como desnitrificação, redução do ferro e do sulfato, a metanogênese é a que apresenta menor rendimento energético, devido ao fato do CO₂ não ser um aceptor de elétrons tão eficiente, e a reação menos

favorável que a redução dos compostos iônicos oxidantes (Jugnia *et al.*, 2005; Liu e Whitman, 2008).

As arqueias metanogênicas são anaeróbicas restritas e necessitam de um potencial de oxidação-redução muito baixo, cerca de $-0,3$ v (Zinder, 1993) para crescerem. Essas bactérias podem habitar em uma variedade de ambientes e têm representantes em várias faixas de temperatura, mas os substratos utilizados para a metanogênese são extremamente reduzidos (Widdel, 1986; Zellner e Winter, 1987). Uma característica importante das arqueias metanogênicas é a especificidade metabólica, sendo a maioria capaz de metabolizar apenas compostos de um ou dois carbonos ($H_2:CO_2$, acetato e metanol, por exemplo). Essas arqueias são classificadas em função do tipo de substrato que consomem, podendo ser: hidrogenotróficas (que utilizam como substrato o $H_2:CO_2$ e/ou formiato); acetotróficas (que utilizam o acetato como substrato) e as metilotróficas, que metabolizam compostos metilados (Madigan *et al.*, 2005).

Existem duas principais vias de metanogênese: a hidrogeno dependente – ou hidrogenotrófica; e a acetato dependente – ou acetotrófica, conforme mostra o esquema a seguir:



$\text{CH}_3\text{COOH} \longrightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$ -via acetoclástica / Acetato dependente.

$4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \longrightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ -via hidrogenotrófica / Hidrogênio dependente.

Esquema 01: Ciclagem do metano em ambiente aquático. a- Degradação da matéria orgânica (zona aeróbica e anaeróbica); b- Principais vias de metanogênese (acetato dependente e hidrogênio dependente).
MODIFICADO DE BASTVIKEN, 2009.

Os dois processos ocorrem simultaneamente, com a contribuição de 20 à 80% referente a cada uma das vias, hidrogenotrófica e acetoclástica, respectivamente (Bastviken, 2009). Estudos realizados por Conrad (1999) demonstram que a via hidrogenotrófica contribui com a produção de metano em diversos ambientes, inclusive em águas doces, contribuindo com até 30%; e em ambientes frios e temperados a via acetoclástica tem uma maior contribuição que nos ambientes tropicais .

A via acetoclástica consiste na clivagem do acetato (CH_3COO^-) em um grupo metil e CO. O monóxido de carbono é oxidado e então atua como doador de elétrons, e o grupamento metil é reduzido a metano. Na via hidrogenotrófica a molécula de hidrogênio (H_2) atua como doador de elétrons reduzindo a molécula de dióxido de carbono (CO_2), formando metano e água.

O processo de metanogênese tem relação direta com a concentração de oxigênio, competição pelo substrato, qualidade da matéria orgânica e temperatura (Borrelet *al*, 2011). A metanogênese em sedimentos rasos é mais sensível à variação de temperatura que sedimentos profundos, desde que essa variação diminua com a profundidade do lago (Zeikus e Winfrey, 1976). A temperatura exerce influência sob o processo de metanogênese limitando o mesmo diretamente, no sentido que existe uma temperatura dita ótima para que o processo aconteça e

indiretamente, devido ao fato de baixas temperaturas limitarem o processo hidrogenotrófico, e considerando esses aspectos, os sedimentos mais rasos vão sofrer uma maior influência (Borrelet *et al.*, 2011).

Emissão em Águas Doces

Ecossistemas aquáticos continentais (lagos, rios e reservatórios) são considerados componentes importantes na análise do ciclo global do carbono, quanto aos processos de emissão e produção de metano para a atmosfera. A produção de CH₄ em sedimentos aquáticos é comum; primeiro o gás é produzido em zona anaeróbica, sendo a maior parte oxidada na coluna d'água pelas bactérias metanotróficas e somente uma pequena parte é emitida para atmosfera (Rudd & Taylor, 1980). Então podemos considerar que a maior parte da produção primária pode assim retornar para o corpo d'água servindo de suporte energético tanto para as bactérias metanotróficas quanto para toda cadeia trófica dependente – zooplâncton e larvas insetívoras (Fallon *et al.*, 1980; Bastviken *et al.*, 2002; Deines *et al.*, 2007; Jones *et al.*, 2008).

O CH₄ presente na coluna d'água após degradação da matéria orgânica pode ser incorporado ao sedimento, ser emitido para atmosfera ou permanecer na coluna d'água. O estado de eutrofização do corpo hídrico em questão, e a presença ou não de macrófitas aquáticas, que caracterizam o aumento da produção primária, e esse aporte de material orgânico e elevar o consumo de oxigênio e favorecer a ocorrência da metanogênese (Casper, 1992; Minello, 2004; Marinho *et al.*, 2004).

Na realidade é um balanço entre as fontes e perdas de metano, representados pelo fluxo de produção pelo sedimento e oxidação pela coluna d'água, que vão determinar se o corpo d'água em questão pode ser considerado ou não uma fonte de CH₄ para a atmosfera (Bastviken, 2004). Logo, os processos de metanogênese e metanotrofia fazem o controle da emissão para a atmosfera, ou seja, a relação entre produção e consumo de CH₄ define sua taxa de emissão atmosférica.

O fluxo ebulitivo através de bolhas é um processo rápido, as bolhas de metano passam rapidamente através da coluna d'água, evitando assim a oxidação (Ferdinger *et al.*, 1992, Matson & Likens, 1990). Este processo depende da

profundidade esedimentos mais rasos sofrem uma ebulição mais intensa, devido a uma menor pressão hidrostática (Bastviken, 2009); reflete a produção primária e indiretamente a ciclagem total do corpo d'água em estudo (Bastviken *et al.*, 2004). O fluxo difusivo pela coluna d'água é um processo mais lento, onde o metano produzido sofre oxidação ao longo do transporte - na água ou na superfície do sedimento, onde há presença de oxigênio, o que resulta em uma baixa concentração na superfície (Bastviken *et al.*, 2002). A taxa difusiva é dada pela diferença de concentração entre o ar atmosférico e a água, que mesmo com a baixa concentração na superfície, devido à fraca solubilidade do gás, fica com uma concentração muito superior à do ar atmosférico, o que possibilita a troca na interface ar-água (Bastviken, 2009). Um caso particular do processo difusivo é o fluxo estocado no hipolímínio, que ocorre quando corpos d'água estratificados são misturados e as águas, provenientes de camadas estratificadas, ricas em metano entram em contato com a superfície, sendo liberadas por ebulição. Algumas plantas emergentes enraizadas realizam trocas gasosas das folhas para as raízes e vice-versa visando o suprimento de oxigênio, e com isso ocorre o transporte de outros gases, inclusive o metano. Também é um processo rápido, portanto, assim como na ebulição, a oxidação é evitada; porém o fluxo mediado por plantas é dependente do tipo de vegetação, taxa de oxidação do sedimento e taxa de produção de metano (Bastviken, 2009).

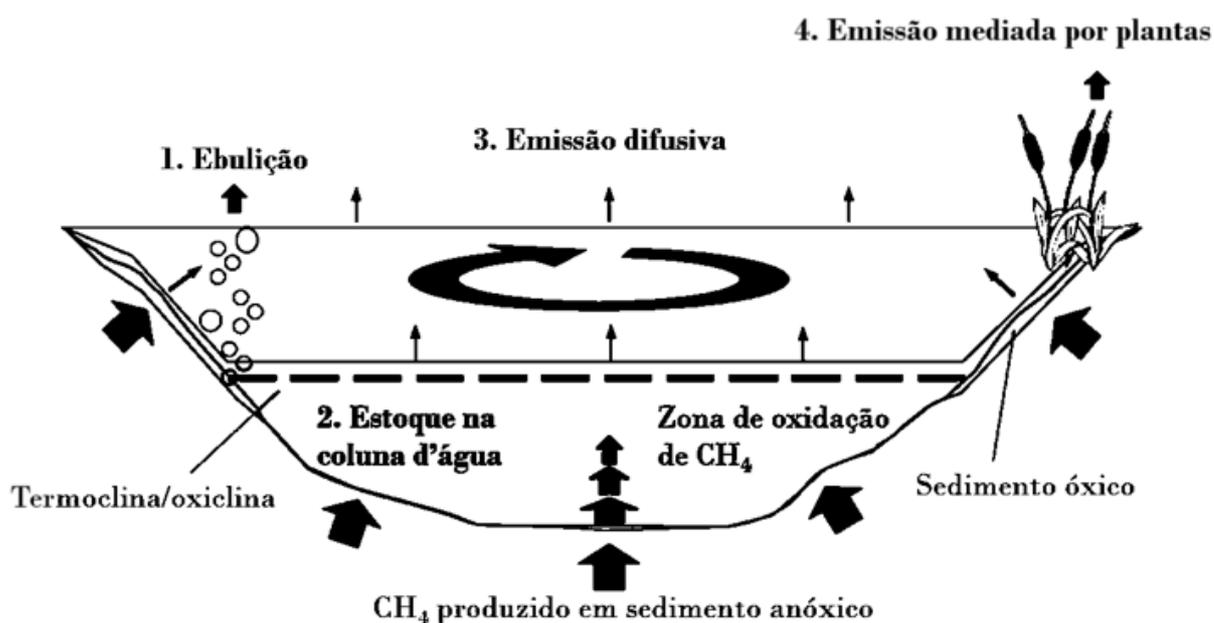


Figura 02 - Vias de emissão e dinâmica do metano em um lago estratificado. Modificado de Bastviken, 2009.

A ebulição contribui com 40-60% do total de emissões, sem considerar o fluxo mediado por plantas. O metano armazenado no hipolíminio contribui com cerca de 45% em ambientes pequenos, a difusão está relacionada com o tamanho do corpo d'água (Bastviken *et al.*, 2004). Podemos considerar então que as emissões provenientes de lagos podem estar relacionadas à sua área e forma e ao aporte de matéria orgânica que chega até o mesmo e que lagos estratificados podem formar camadas anóxicas e com isso aumento da produção de metano.

As emissões em áreas alagadas são dominadas pelo fluxo mediado por plantas e dependem diretamente do sedimento (quantidade e qualidade de matéria orgânica no mesmo, caracterizando maior ou menor labilidade), temperatura, profundidade, composição e biomassa das plantas. (Segers, 1998).

A Emissão de Metano em Reservatórios

Lagos e reservatórios são importantes no balanço global de carbono, pois recebem grande aporte de carbono alóctone (Cole *et al.*, 2007), tem elevado tempo de residência hidráulica comparado a rios, representando área de deposição de carbono particulado (Downing *et al.*, 2009). Os processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem são dependentes da circulação de massas na coluna d'água (Serra *et al.*, 2007).

De acordo com Straskraba & Tundisi (2000), reservatórios são corpos de água que preenchem vales de rios que foram barrados pelo homem para fins específicos. Esses corpos d'água diferem dos lagos, pois em geral possuem bacias hidrográficas maiores, com hidrodinâmica e flutuação variáveis de nível controladas pelo homem. Os sedimentos do fundo são provenientes do rio barrado e da vegetação local que foi inundada, indicando a influência da bacia hidrográfica e das atividades antrópicas na quantidade e qualidade do sedimento. Possuem processos microbiológicos de produção e consumo de gases de efeito estufa semelhantes aos lagos devido à estrutura física (Straskraba & Tundisi, 2000).

O procedimento de barragem de um rio para construção de um reservatório provoca inúmeras mudanças no uso da superfície da terra. A cobertura vegetal que foi submersa pela inundação, se decompõe liberando CO₂, e esse intenso processo de decomposição gera uma condição anóxica no fundo do reservatório, favorecendo a metanogênese. O metano então produzido pode ser transportado para a superfície, ser oxidado ao longo desse transporte e emitido para a atmosfera ou ser emitido diretamente para atmosfera (Galy-Lacaux *et al.*, 1997; Galy-Lacaux *et al.*,

1999; Rosa e Santos, 2000; Abril *et al.*, 2005; Soumis *et al.*, 2005; Duchemin *et al.*, 2006; Guérin *et al.*, 2006; Lima *et al.*, 2008).

Estudos realizados no Brasil demonstraram que reservatórios mais eutrofizados apresentam um maior fluxo de difusão de gases de efeito estufa e também verificaram a influência sazonal nos fluxos na interface sedimento-água. Valores máximos de fluxo foram observados durante o período chuvoso, e menores valores, no período de seca, o que pode ser explicado devido ao maior aporte de matéria orgânica das bacias hidrográficas para os reservatórios (Sidagis-Galliet *et al.*, 2008).

Dentre os fatores que influenciam as emissões de gases de efeito estufa em reservatórios estão: a temperatura e o clima, a topografia, a quantidade de biomassa submersa, a natureza da vegetação e da área alagada e a idade do reservatório (Martin & McCutcheon, 1999). Devemos também considerar a diferença entre as densidades das águas do rio e do reservatório formado. Dependendo da diferença entre a temperatura das águas, a água do rio pode alcançar o reservatório superficialmente (*overflow*), intermediariamente (*interflow*) ou profundamente (*underflow*), o que determinará onde ocorrerá a incorporação da matéria orgânica proveniente da bacia hidrográfica do rio (Martin & McCutcheon, 1999).

Os reservatórios recebem as consequências de todos os impactos do uso da bacia (Tundisi *et al.*, 2004). A quantidade de carbono orgânico que entra no sistema do reservatório proveniente do solo e biomassa vegetal (material alóctone) durante a inundação pode contribuir potencialmente para as emissões de gases de efeito estufa, principalmente nos primeiros anos, onde a decomposição dessa matéria orgânica é mais intensa (Rudd *et al.*, 1993; Kelly *et al.*, 1997; Tranvik *et al.*, 2009; Teodoru *et al.*, 2010). Reservatórios recentes podem emitir quantidades muito maiores de CH₄, enquanto reservatórios antigos emitem taxas de CH₄ similares as de rios (Bastviken, 2009).

A área ocupada pelo reservatório pode variar, sendo sempre consideravelmente maiores que o lago natural original, mas essa dimensão é importante para estimar o fluxo de gases de efeito estufa emitido pelos reservatórios, uma vez que possuem relação direta na medida que refletem a fração de área alagada. Áreas maiores apresentam maiores taxas de emissão (St. Louis *et al.*, 2000; Lehner & Doll, 2004; Downing *et al.*, 2006). A emissão de gases de efeito estufa nos reservatórios é consequência dos processos de respiração e decomposição da

matéria orgânica inundada (Tremblay *et al.*, 2004), além da contribuição da bacia hidrográfica de drenagem e da operação da barragem.

Uma das questões que muitas vezes não é considerada nos cálculos das estimativas de emissões antrópicas se refere as emissões naturais, anteriores à construção da barragem para o reservatório. Essa taxa deve ser descontada das futuras emissões após a barragem, embora muitas vezes sejam consideradas como parte das emissões líquidas do reservatório. As diferentes formas de fluxo de carbono em escala espacial e temporal, ou seja, antes e depois da inundação são fundamentais para a compreensão real do reservatório na emissão de gases estufa (dos Santos *et al.*, 2008).

Devido ao fato da temperatura das águas serem mais elevadas, a taxa de decomposição em reservatórios tropicais é alta, quando comparada com sistemas temperados, conforme descrito na literatura (Abril *et al.*, 2005; Kemenes *et al.*, 2007). Em consequência ao incremento da decomposição ocorre a metanogênese. Esta então é menos intensa em ambientes boreais, segundo Tremblay & Schetagne (2006), que ressaltaram que ocorre limitação da extensão das águas anóxicas nesses ambientes.

A literatura científica sobre emissão de gases estufa em reservatórios ainda é incompleta. Existem alguns estudos de grande escala referente ao alagamento de áreas florestadas que apenas fazem a extrapolação de estudos de um único ponto ou de alguns pontos, sem considerar a influência ecológica, hidrológica e climática da área de estudo. Estudos realizados por Bartlett & Harriss (1993) já descreveram variações no fluxo de metano em ambientes tropicais de acordo com o tipo de local onde é feita a medida, verificando diferenças entre áreas abertas e próximas à vegetação.

Estudos prévios em três reservatórios tropicais revelou que os fluxos de CO₂ e CH₄ podem ser significativamente subestimados ou superestimados ao não se considerar a variabilidade espacial desde os rios à jusante das barragens (Guerin *et al.*, 2006).

A intensidade do fluxo de emissão varia de acordo com a temperatura, regime de ventos, exposição ao sol e fatores físico, químico e biológicos da água, conferindo uma variabilidade significativa no fluxo de gases. No caso dos reservatórios, essa variação espacial é muito difícil de se extrapolar (Santos *et al.*, 2008). De acordo com os autores, existem duas fases distintas na emissão de gases

em reservatórios; uma primeira fase que representa o estágio inicial do reservatório até os primeiros anos, onde as emissões atingem um pico em curto prazo; e uma segunda fase, representando as emissões permanentes do reservatório, oriundas da biomassa formada no próprio reservatório, que provém dos afluentes da bacia de drenagem e da biomassa residual. Assim, ressaltando a variabilidade dos fluxos de emissão já descrito no trabalho de Santos *et al.*(2006).

No levantamento feito por Santos *et al.*, em 2006, em vários reservatórios pelo mundo, foi verificado uma maior emissão nas regiões próximas aos trópicos. Em trabalhos realizados no Brasil, observou-se uma menor emissão em reservatórios na região de clima subtropical (Segredo, no Paraná) e maiores emissões na zona de clima tropical de altitude, região sudeste (Miranda, em Minas Gerais).

O trabalho realizado em Juturnaíba visa além de estudar as emissões em um reservatório tropical, medir essa variação entre os diversos pontos e mostrar que essas variações não devem ser negligenciadas.

OBJETIVOS:

Objetivo Geral

Avaliar a variabilidade espacial das taxas de produção e emissão de metano em um reservatório tropical de pequeno porte.

Objetivos Específicos

- 1) Avaliar as diferenças das taxas de produção e emissão de metano e dióxido de carbono em quatro regiões distintas de um reservatório tropical: região sob influência do aporte de um rio, regiões marginal com e sem macrófitas e região central;
- 2) Avaliar a contribuição das vias metanogênicas acetoclástica e hidrogenotrófica para a produção de metano em um reservatório tropical;

HIPÓTESE

1) As taxas emissão de metano se relacionam com as taxas de produção de metano;

METODOLOGIA

Área de Estudo

a) A bacia do Rio São João

O rio São João nasce a 800 m de altitude, na Serra do Sambê, município de Cachoeiras de Macacu, no Estado do Rio de Janeiro, e percorre cerca de 120 Km até desaguar no oceano junto à cidades de Barra de São João (CILSJ, 2006). Sua bacia de drenagem abrange integralmente o município de Silva Jardim e parcialmente os municípios de Cachoeira de Macacu, Rio Bonito, Casimiro de Abreu, Araruama, Cabo Frio e Rio das Ostras. Encontra a bacia da baía de Guanabara ao norte, a bacia dos rios Macaé e das Ostras a nordeste, e ao sul faz limite com a bacia das lagoas de Araruama e Saquarema, chegando a uma área de cerca de 2.160 Km² (CILSJ, 2006). A Bacia Hidrográfica do Rio São João se encontra inserida na Região das Baixadas Litorâneas (CIDE, 2005), englobando o Lago de Juturnaíba, e ainda dispõe de ecossistemas muito bem preservados, fazendo parte da Área de Proteção Ambiental da Bacia do Rio São João. Grande parte dessa região foi transformada em junho de 2002 na APA do Rio São João/Mico Leão Dourado (CILSJ, 2006), figura 3.

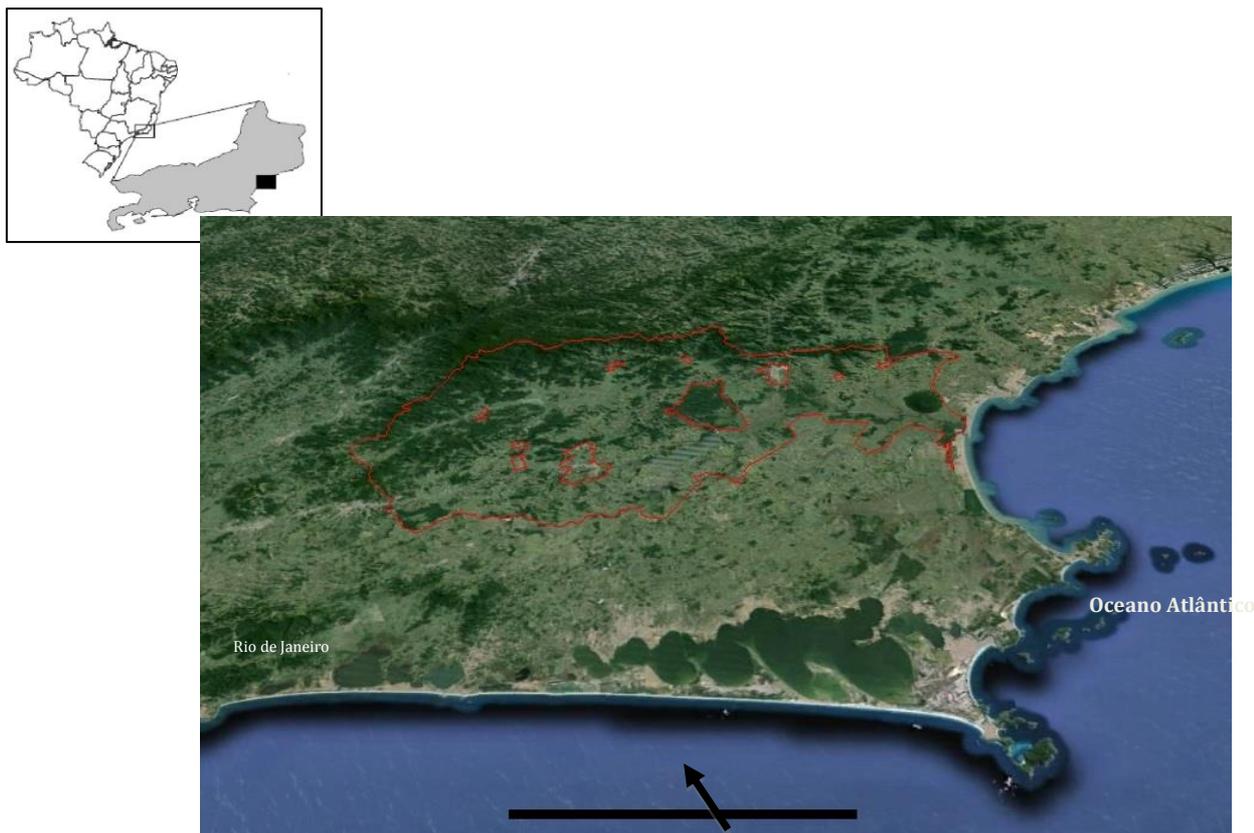


Figura 3 – Mapa da Região Hidrográfica Lagos São João no Estado do Rio de Janeiro com a indicação dos limites da APA da Bacia do Rio São João/Mico-Leão-Dourado (contorno em vermelho) e da represa de Juturnaíba (seta preta).

A bacia é de grande importância para a manutenção dos recursos hídricos e o bioma da Mata Atlântica, mas é constantemente afetada pelas atividades humanas. As alterações no uso da terra, o crescimento urbano acelerado e às grandes áreas utilizadas como pastagens tem ocasionado uma degradação intensa dos recursos naturais da região (INEA, 2011 e 2012).

Uma antigaparticularidade da bacia era a existência de uma lagoa formada pelas águas do rio Capivari e Bacaxá, a lagoa de Juturnaíba, que contava com uma profundidade de 4 metros e área de 6 Km², chegando a atingir 8 Km² em períodos chuvosos (CILSJ, 2006). Na década de 70, a região passou por mudanças profundas em seus processos hidrológicos para a construção da represa de Juturnaíba, a jusante da confluência do rio Bacaxá, cobrindo a antiga lagoa e criando um novo ecossistema (INEA, 2011 e 2012; CILSJ, 2006).

b) O Reservatório

A represa de Juturnaíba está localizada nos limites entre aos municípios de Silva Jardim e Araruama (22°33'S; 42°18'W), e é parte da Bacia Hidrográfica do Rio São João e possui 43 Km² de área alagada. Possui 10 milhões de m³ de volume de água, 8 m de profundidade máxima e é responsável pelo abastecimento dos principais municípios da Região dos Lagos (Primo e Volcker 1995). A represa está situada em área de clima tropical quente e úmido, com variações de temperatura entre 18 e 24°C, em área de Mata Atlântica, cujo regime pluviométrico anual médio é de 2000 mm (Seabra et al, 2010; ICMBIO, 2005). A vegetação da zona litorânea é composta de gramíneas, espécies isoladas de ingá (*Ingaingoide*, *I. affinis* e *I. fagifolia*) e plantas como piri-piri (*Cyperus giganteus*), tabuas (*Typhadominguensis*) e outras como *Scirpus cubensis*, *Bacopasp* e *Hydromystia sp.* As plantas flutuantes no reservatório são aguapés (*Eichornia crassipes* e *E. azurea*) e na região mais afastada da margem encontram-se submersas cabombas (*Cabombasp*) e *Myriophyllum brasiliense* (Primo e Volcker 1995).

A construção da barragem da represa de Juturnaíba entre 1980 e 1984, (figura 04), promoveu o represamento do Lago de Juturnaíba, além das águas dos rios Capivari e Bacaxá, a água do rio São João, e aumento da área de 8 km² para 43 km², com um comprimento de 4,75 km (Noronha, 2009). Durante a formação da represa e nos primeiros anos seguintes, ocorreu aumento de plantas aquáticas, que formaram ilhas flutuantes, ocasionando um decréscimo na concentração de oxigênio na água (Primo e Volcker 1995).

O reservatório se encontra em um estágio de eutrofização avançada (Huszar 1989, Marinho & Huszar (1990, Marinho et al., 1993), com frequentes florações de cianobactérias. O uso inadequado e ocupação do solo da bacia de drenagem estão contribuindo para o aumento da concentração de algas, indicando graves consequências para o abastecimento da região, com a perda da qualidade e dificuldade no tratamento da mesma. Dessa forma, é preciso medidas para mitigar esses impactos e permitir o funcionamento do sistema (INEA, 2011 e 2012).

Trabalho de Campo

A coleta no reservatório de Juturnaíba foi realizada no período de 04 a 07 de julho de 2013. Para a avaliação das emissões de metano do ar para atmosfera,

segiu-se a metodologia descrita por Batsviken *et al.* (2010). Câmaras de policloreto de vinila (PVC) foram dispostas sobre a água em quatro diferentes regiões do reservatório: região próximas as macrófitas emergentes (n=10), margem (n=5), centro (n=10) e na desembocadura do Rio São João (n=15), totalizando oito transectos ao longo do reservatório, conformemostrado na Figura 4.

O espaçamento entre as câmaras foi de 1,5m, perfazendo uma área de aproximadamente 15m na região com macrófitas, 7,5m na região da margem, 15m no centro e 22,5m na região de desembocadura do rio São João.

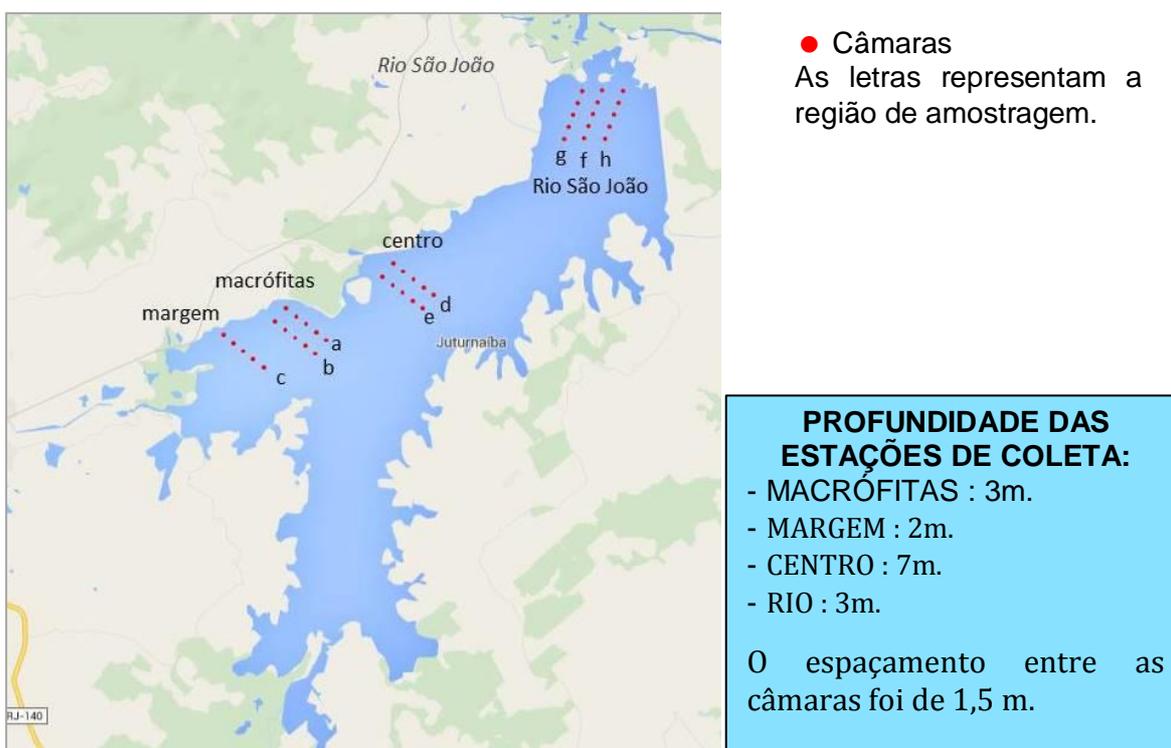


Figura4 -Disposição das câmaras de coleta no Reservatório de Juturnaíba em quatro distintas regiões: margem (n=5); região próxima às macrófitas (n=10); região central (n=10) e região da desembocadura do Rio São João (n=15).

As câmaras cilíndricas de PVC de aproximadamente 8 litros, acopladas com flutuadores de espuma, possuíam um dispositivo com um tubo de PVC, em cuja extremidadesuperior aérea, havia uma válvula com três aberturas para permitir a remoção do gás no interior da câmara flutuante sem contato com o ar externo (Figura 5).



Figura 5: Fotos das câmaras flutuantes – momento da coleta final – Fonte : Arquivo pessoal. Jul/2013.

As câmaras foram mantidas fechadas por seis períodos de incubação de 24 horas, após os quais 20 mL das amostras de ar eram retiradas, com o auxílio de uma seringa plástica de polipropileno de 60 mL, e a seguir transferidas para frascos de vidro de 60 mL contendo solução salina saturada (350 g/L NaCl). Para a transferência para os frascos foram utilizadas duas agulhas (0.6 x 25 mm), uma para transferir o gás coletado e outra para permitir a ejeção da solução salina, de modo a equilibrar a pressão dentro do frasco à medida que o ar fosse inserido. O gás metano é pouco solúvel em água e a solução salina supersaturada no frasco de vidro diminui ainda mais sua solubilidade, concentrando o gás no *headspace* formado.

Os frascos foram lacrados e devidamente identificados. As amostras geradas no ensaio para emissão de CH₄ foram analisadas posteriormente por difração a laser com o GreenhouseGasAnalyzer (CH₄, CO₂, H₂O), Los Gatos® , modelo 911-0010.

Para as análises de produção de metano seguiu-se a metodologia descrita por Conrad *et al.* (2014). Foram coletados testemunhos de sedimentos (6cm de diâmetro, 40cm comprimento) nos quatro pontos do reservatório de Juturnaíba: margem, centro, área com macrófitas e desembocadura do Rio São João,

totalizando seguindo o mesmo desenho amostral anterior, que posteriormente foram fracionados conforme descrito na tabela 01 .

Laboratório

Os primeiros 10 cm das amostras de sedimento foram armazenados em uma garrafa plástica, sem contato com a ar externo, e essas foram transportadas para análise até o Laboratório de Biogeoquímica da UFRJ. As amostras foram homogeneizadas, depois fracionadas e 30 mL das mesmas foram colocadas em frascos de vidro transparentes de 100 mL (tabela 01). Para eliminação do oxigênio, foi feito um fluxo de nitrogênio dentro dos frascos de vidro e estes foram fechados com rolhas de borracha e lacres, e incubados por 25 dias a 25°C.

Em parte das amostras (n=5 por região amostrada) adicionou-se fluorometano (CH₃F) 2,0%, inibidor da metanogênese acetoclástica, para testar a contribuição das duas principais vias metanogênicas (Janssen e Frenzel, 1997), conforme esquema apresentado na tabela 1. As amostras gasosas referentes à produção de metano foram analisadas seis vezes, no período de 19/07 à 13/08/13, ao longo do experimento de incubação. Também foram analisadas as concentrações de CO₂ de cada frasco, para avaliar a produção ou consumo do mesmo nas vias acetoclástica e hidrogenotrófica, respectivamente. As amostras de CH₄ e CO₂ geradas nesse experimento foram analisadas posteriormente por difração a laser com o Greenhouse Gas Analyzer (CH₄, CO₂, H₂O) Los Gatos®, modelo 911-0010.

Tabela 1: Número de réplicas por região de coleta, nos grupos controle (sem inibidor) e tratamento (com inibidor).

Local	Número de amostras	
	Controle (25°C)	CH ₃ F (25°C)
Áreas		
Macrófitas	5	5
Margem	5	5
Centro	5	5
Desembocadura Rio	5	5

Análises Estatísticas:

Todos os dados foram enquadrados na distribuição Gaussiana (Kolmogorov-Smirnov, $p > 0.05$). Para verificar a diferença de emissão e produção de CH_4 entre os pontos de coleta no reservatório (região marginal, central, área com macrófitas e área sob influência do aporte do Rio São João) foi realizada uma ANOVA unifatorial ($p < 0,05$) seguida do teste de Tukey, utilizando-se o programa GraphpadPrism 5.

Além disso, para se testar a influência do inibidor da etapa acetoclástica da metanogênese (CH_3F), foi realizado o teste t de Student ($p < 0,05$) entre os dados de produção obtidos em cada região de amostragem com e sem inibidor.

RESULTADOS

Produção de CH_4 e CO_2 :

A taxa de produção de CH_4 apresentou diferenças significativas entre as regiões estudadas (figura 6 e tabela 2). As maiores taxas foram encontradas nas região próxima às macrófitas, com valores entre 3672,4 e 4336 $\text{mmol. m}^{-2}. \text{d}^{-1}$. A região que sofre influência fluvial e a região marginal apresentaram taxas com valores variando entre 2991,3 e 2220,7 e entre 1355,3 e 1587,1 $\text{mmol. m}^{-2}. \text{d}^{-1}$ respectivamente. As menores taxas foram registradas na região central do reservatório, variando entre 494,4 e 1215,5 $\text{mmol. m}^{-2}. \text{d}^{-1}$.

Em relação as taxas de produção de CO_2 , não foi observada diferença significativa entre as regiões central e com influência do rio, com valores entre 7752,7 e 13101,4 $\text{mmol. m}^{-2}. \text{d}^{-1}$ respectivamente. As maiores taxas foram encontradas na região próxima às macrófitas, com valores entre 47395,8 e 57889,7 $\text{mmol. m}^{-2}. \text{d}^{-1}$, seguida da região marginal que, apresentou valores entre 21700,6 e 23889,9 $\text{mmol. m}^{-2}. \text{d}^{-1}$ (figura 8 e tabela 2).

O tratamento com o inibidor da fase acetoclástica da metanogênese provocou uma queda na produção de metano entre as regiões amostradas apresentando valores entre 2452,7 e 3478,5 $\text{mmol. m}^{-2}. \text{d}^{-1}$ na região próxima às macrófitas; seguido da região de influência do rio, com valores entre 1828,0 e 2536,6 $\text{mmol. m}^{-2}. \text{d}^{-1}$; valores entre 1181,7 e 1181,7 $\text{mmol. m}^{-2}. \text{d}^{-1}$ na região marginal e valores de taxa entre 640,2 e 1079,5 $\text{mmol. m}^{-2}. \text{d}^{-1}$ e taxas de produção de CH_4 variando entre

640,2 e 1079,5 mmol. m⁻². d⁻¹ na região central (figura 6 – tabela 2). A redução foi de aproximadamente 38% para a região próxima às macrófitas, 24% para a região marginal, 11% para a região central e 32% para a região sob influência fluvial.

Ainda sobre a inibição da fase acetoclástica da metanogênese, observou uma diferença significativa na taxa de produção de metano entre a região marginal (com e sem inibidor). As demais regiões não apresentaram diferenças significativas no que se refere ao tratamento com CH₃F, fluorometano (figura 6 e tabela 3).

Com referência ao tratamento com inibidor, a produção anaeróbica de CO₂ não mostrou diferenças significativas entre as regiões de coleta. Somente a região próxima às macrófitas (valores entre 45299,2 e 52599,2 mmol. m⁻². d⁻¹ de CO₂) apresentou uma diferença significativa com relação à taxa de produção (figura 8 e tabela 2). A redução foi de aproximadamente 25% para a região próxima às macrófitas, 11% para a região marginal, 32% para a região central e 25% para a região sob influência do Rio São João. Observou-se também que nas regiões marginal e central ocorre uma diferença significativa na taxa de produção anaeróbica de CO₂ (com e sem inibidor), enquanto nas regiões próxima às macrófitas e do rio não foi apresentada diferença estatística significativa com relação ao tratamento com CH₃F (figura 8 e tabela 4).

Com relação à emissão de CO₂, não foram observadas diferenças significativas nas regiões da margem, centro e rio São João (apresentando taxas máximas entre 17,24 a 20,23 mmol. m⁻². d⁻¹ de CO₂). A diferença significativa foi encontrada na região próxima às macrófitas, atingindo valores máximos de 12,28 mmol. m⁻². d⁻¹ de CO₂ (figura 09 e tabela 02).

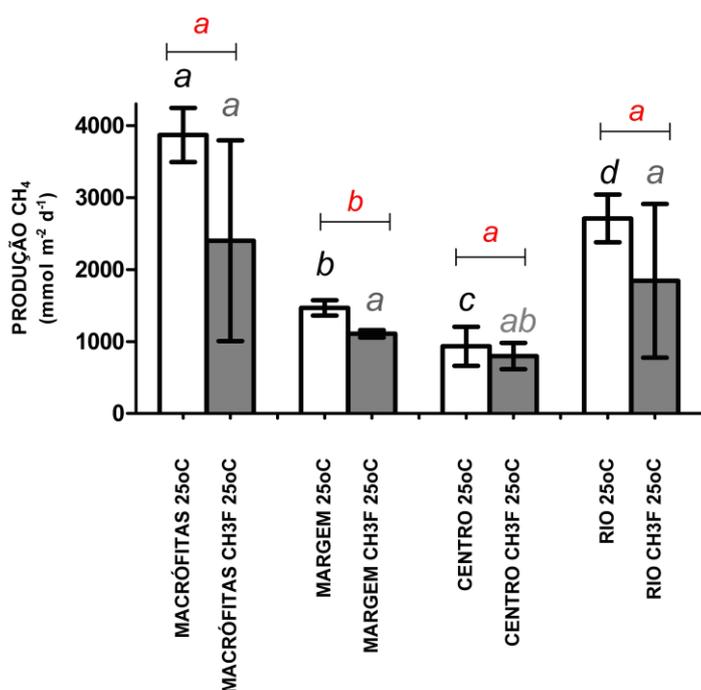


Figura 6 – Produção de CH₄ (mmol.m⁻².d⁻¹) nas quatro regiões de coleta: margem com macrófitas, margem, centro e rio. Barras brancas representam incubações sem a presença de CH₃F. Barras cinzas representam incubações com a presença de CH₃F. As letras mais escuras representam as médias estatísticas entre as regiões amostradas e as letras em cinza claro representam as médias estatísticas entre as regiões na presença de CH₃F (tabela 2). A letra a em vermelho representam regiões que não apresentaram diferença estatística significativa pelo efeito da presença do inibidor. A letra b em vermelho representa a região que apresentou diferença estatística significativa pelo efeito da presença do inibidor (tabela 3).

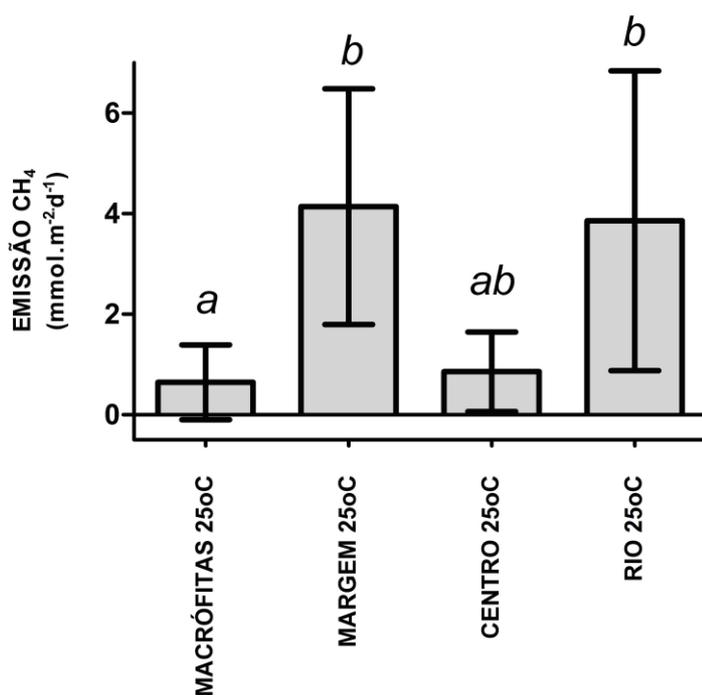


Figura 7 – Emissão de CH₄ (mmol.m⁻².d⁻¹) no reservatório de Juturnaíba por tipo de região: margem com macrófitas, margem, centro e rio. As letras representam as médias estatísticas entre as regiões amostradas (tabela 2).

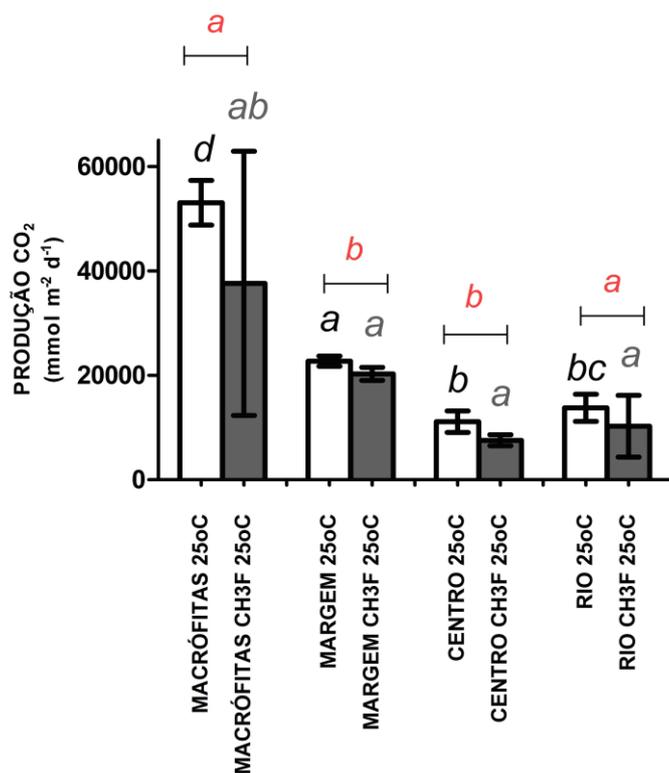


Figura 8 – Produção anaeróbica de CO₂ (mmol.m⁻².d⁻¹) nas quatro regiões de coleta: margem com macrófitas, margem, centro e rio.

Barras brancas representam incubações sem a presença de CH₃F. Barras cinzas representam incubações na presença de CH₃F. As letras mais escuras representam as médias estatísticas entre as regiões amostradas e as letras em cinza claro representam as médias estatísticas entre as regiões na presença de CH₃F (tabela 2). A letra *a* em vermelho representam regiões que *não apresentaram* diferença estatística significativa pelo efeito da presença do inibidor. A letra *b* em vermelho representa regiões que apresentaram diferença estatística significativa pelo efeito da presença do inibidor (tabela 4).

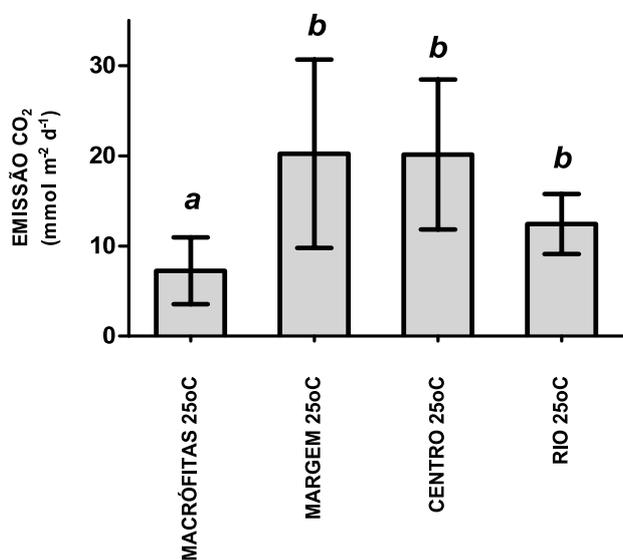


Figura 9 – Emissão de CO₂ (mmol.m⁻².d⁻¹) no reservatório de Juturnaíba por tipo de região: margem com macrófitas, margem, centro e rio. As letras representam as médias estatísticas entre as regiões amostradas (tabela 2).

Tabela 02: Análises espaciais da emissão e produção de CH₄ e produção de CO₂ no reservatório de Juturnaíba por tipo de transecto.

	Pergunta	Resposta	p	Razão F
Emissão	Existe diferença na emissão de CH ₄ entre as regiões amostradas	Sim	0,0004	8,785
Produção de CH₄	Existe diferença na produção de CH ₄ entre as regiões amostradas	Sim	<0.0001	102,2
Produção de CH₄ com inibidor	Existe diferença na produção de CH ₄ com o tratamento com CH ₃ F	Sim	<0.0001	62,72
Produção de CO₂	Existe diferença na produção de CO ₂ entre as regiões amostradas	Sim	<0.0001	245,9
Emissão	Existe diferença na emissão de CO ₂ entre as regiões amostradas	Sim	0.0061	5,64
Produção de CO₂ com inibidor	Existe diferença na produção de CO ₂ com o tratamento com CH ₃ F	Sim	<0.0001	369,6

Tabela 03: Análise da produção de CH₄ com e sem inibidor no reservatório de Juturnaíba por região amostrada.

	Pergunta	Resposta	Teste	Valor de p
Margem	Existe diferença entre a taxa de produção de CH ₄ com o tratamento com CH ₃ F	Sim	Teste t	0.0023
Centro	Existe diferença entre a taxa de produção de CH ₄ com o tratamento com CH ₃ F	Não	Teste t	0.2207
Rio São João	Existe diferença entre a taxa de produção de CH ₄ com o tratamento com CH ₃ F	Não	Teste t	0.0883
Macrófitas	Existe diferença entre a taxa de produção de CH ₄ com o tratamento com CH ₃ F	Não	Teste t	0.1212

Tabela 04: Análise da produção de CO₂ com e sem inibidor no reservatório de Juturnaíba por região amostrada

	Pergunta	Resposta	Teste	Valor de p
Margem	Existe diferença entre a taxa de produção de CO ₂ com o tratamento com CH ₃ F	Sim	Teste t	0.0479
Centro	Existe diferença entre a taxa de produção de CO ₂ com o tratamento com CH ₃ F	Sim	Teste t	0.0291
Rio São João	Existe diferença entre a taxa de produção de CO ₂ com o tratamento com CH ₃ F	Não	Teste t	0.2919
Macrófitas	Existe diferença entre a taxa de produção de CO ₂ com o tratamento com CH ₃ F	Não	Teste t	0.3128

Quanto à emissão de metano, foi observado também uma diferença significativa entre as regiões avaliadas (Figura 7 e tabela 2), com maiores emissões sendo registradas nas regiões da margem (valores variando entre 2,8 e 18 mmol.m⁻¹

$^2.d^{-1}$) e da desembocadura do rio São João (entre 2,1 e 11,4 $mmol.m^{-2}.d^{-1}$), e menor taxa de emissão na região central do reservatório (entre 0,3 e 2,0 $mmol.m^{-2}.d^{-1}$).

A região com macrófitas apresentou uma taxa de emissão mais baixa em relação à margem, com valores variando entre 0,2 e 2,23 $mmol.m^{-2}.d^{-1}$, conforme figura 7 e tabela 2. Devemos ressaltar que a medida foi feita na região situada próxima às macrófitas, não podendo considerar a taxa de emissão como proveniente da vegetação aquática do reservatório.

Comparando a produção e a emissão de CH_4 , observa-se que existe um comportamento semelhante nas regiões da margem (sem a presença de macrófitas), central e na região que sofre influência fluvial. O comportamento difere na região próxima às macrófitas (figuras 6 e 7) A região da desembocadura do rio tem uma alta taxa de produção de CH_4 , comparando-se com a taxa de CO_2 , anaeróbico, que não é tão elevada (figuras 6 e 8). Com relação à razão $CO_2:CH_4$, houve uma diferença significativa entre todas as regiões, conforme apresentado na figura 10, abaixo. Os maiores valores foram encontrados na região da margem (razões entre 15 e 16), seguidos pela região próxima as macrófitas (entre 13,2 e 15), centro (razões entre 11 e 15,7), e com influência fluvial (razões entre 4,5 e 6).

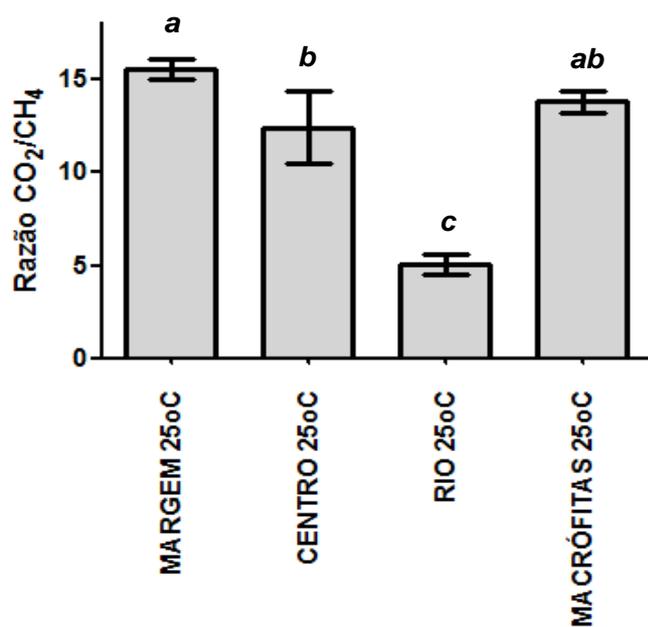


Figura 10- Razão CO₂:CH₄ no reservatório de Juturnaíba por região amostrada: margem, centro, rio e região próxima às macrófitas. Letras diferentes representam médias estatísticas significativamente diferentes ($p < 0.0001$).

DISCUSSÃO

As maiores taxas de produção de metano observadas na região mais próxima às macrófitas aquáticas podem estar relacionadas ao maior incremento da matéria orgânica proveniente das próprias plantas nessa área. Esse fato poderia aumentar a produção primária e o decorrente acúmulo de matéria orgânica no sedimento, aumentando a decomposição e, conseqüentemente, a produção de metano (Marinho *et al.*, 2004).

Nas regiões marginais e na região sob influência do aporte do rio também foi observado uma alta taxa de produção de metano. Tais dados corroboram os encontrados por Murase & Sugimoto. (2005), que mostram que o sedimento do litoral apresenta uma atividade metanogênica maior que sedimentos mais profundos. Uma maior taxa de produção pode estar associada ao influxo de sedimentos provenientes do rio e da vegetação inundada (que representa a região marginal do reservatório).

Durante a formação do reservatório de Juturnaíba e nos primeiros anos subsequentes, ocorreu um aumento no número de plantas aquáticas, chegando a formar ilhas flutuantes. Decorridos mais de vinte anos, esse problema ainda preocupa, sendo causado principalmente pelo lançamento de esgotos nos rios da bacia, que atingem a represa e acarretam eutrofização desse corpo hídrico e conseqüente decréscimo na concentração de oxigênio da água, favorecendo o processo de metanogênese (Primo e Volcker, 1995; Bidegain e Vollcker, 2003).

As análises dos diferentes pontos de coleta no reservatório mostram um fluxo de emissão de metano maior nas regiões da margem e da desembocadura do Rio São João, enquanto a região do centro da represa apresenta uma menor emissão de metano. Segundo Bastviken (2009), sedimentos mais próximos da região da margem tem uma menor chance de sofrer oxidação ao longo da coluna de água, que é menor, e, portanto, podem ser emitidos para atmosfera por ebulição, o que não acontece na região central. Na região da desembocadura do rio pode ainda ocorrer a suspensão de matéria orgânica na coluna de água, devido à turbulência, o que também pode provocar uma maior emissão, uma vez que nesse caso o tempo para oxidação do metano produzido seria reduzido (Bussmann, 2005; Murase e Sugimoto, 2005). Mais de 90% do total de metano produzido pode ser oxidado na coluna de água pelas bactérias metanotróficas (Kuivila *et al.*, 1988; Frenzelet *et al.*, 1990; Kiene, 1991; Liikanen *et al.*, 2002).

Com respeito à região com a influência de macrófitas, a menor taxa de emissão apresentada sugere que o fluxo mediado por plantas pode estar sendo preferencial, em relação a ebulição, uma vez que estudos reconhecem que em regiões marginais de lagos a maior parte do metano produzido nos sedimentos anóxicos provém dessas duas vias, ebulição e fluxo mediado por plantas (Bastviken, 2009).

Estabelecendo uma comparação com outros estudos realizados em reservatórios existentes na literatura, verificamos um fluxo médio de emissão variando de 823,9 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ de CH_4 no reservatório de Petit Saut, na Guiana Francesa (Galy-Lacaux *et al.*, 1997) a 10,7 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ de CH_4 no reservatório de Itaipú, no Brasil, estado do Paraná (Rosa *et al.*, 2002a) para ambientes tropicais. O reservatório de Juturnaíba se insere neste intervalo, com um fluxo médio de 33,3 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ de CH_4 , ressaltando que esses estudos anteriores em reservatórios foram realizados a partir da extrapolação dos dados de alguns pontos. Entretanto, o presente trabalho demonstrou que tais extrapolações poderiam provocar estimativas pouco precisas da contribuição desses ambientes na produção e emissão de metano.

Comparando-se as taxas de produção e emissão de metano de cada ponto amostrado, observa-se uma variação positiva entre todos os pontos, exceto na região com presença de macrófitas. Tal discrepância pode ter sido provocada por se considerar, nas medidas de produção, todo o aporte de matéria proveniente da própria vegetação e do sedimento, mas na avaliação da emissão apenas a emissão por ebulição, excluindo o fluxo mediado pelas macrófitas aquáticas. Nessa região, portanto, a emissão pode estar acontecendo pelas duas vias preferenciais em sedimentos de regiões próximas da margem (Bastviken, 2009).

O metano produzido no sedimento pode ser consumido (oxidado) ainda na coluna d'água, e não chegar a ser emitido para a atmosfera (Duchemin *et al.*, 1995; Huttunen *et al.*, 2006). Abe e colaboradores (2005) quantificaram o fluxo difusivo no reservatório do Lobo-Broa, em São Paulo, Brasil, verificando um fluxo de 54,4 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ de CH_4 na interface água-sedimento e 4,96 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ na interface água-atmosfera, o que levou os autores a concluir que 90% do metano produzido é consumido na interface sedimento-água e na coluna d'água. Comparando as taxas de produção e emissão de CH_4 do presente estudo, é possível verificar que mais de

90% do metano produzido no reservatório de Juturnaíba foi consumido na coluna d'água ou no próprio sedimento.

Com respeito as vias de metanogênese, segundo estudos de Conrad (1999), a via hidrogenotrófica contribui com grande parte da produção em ambientes tropicais, com cerca de 30%, enquanto em ambientes temperados e frios essa via tem uma menor contribuição. No presente estudo, ao tratarmos as amostras com o inibidor da fase acetoclástica da metanogênese (CH_3F – fluorometano), verificamos que houve uma inibição de aproximadamente 18% na produção de metano nas regiões da margem, influenciada pelo rio e próxima às macrófitas; e de aproximadamente 14% na produção de CO_2 nos mesmos pontos de coleta. A variação não foi significativa na região central para a produção de metano e na região de aporte fluvial para produção de CO_2 . Esses valores foram próximos aos encontrados em sedimentos dos lagos amazônicos Batata e Mussura, cuja adição do inibidor provocou uma redução de 12% na produção de metano e CO_2 (Conrad *et al.*, 2010). Segundo o autor, ao inibirmos a via acetoclástica com CH_3F , a via hidrogenotrófica também sofre uma inibição, o que poderia explicar o resultado encontrado no presente estudo.

Maiores razões de $\text{CO}_2:\text{CH}_4$ foram registradas na região marginal, próxima às macrófitas e central. De acordo com estudos feito por Yavitt e Seidmann-Zager (2006) e Conrad *et al* (2010), as maiores razões $\text{CO}_2:\text{CH}_4$ são apresentadas na ausência de aceptores de elétrons, como nitrato, sulfato ou ferro III. Condições adversas à metanogênese acarretam um incremento da taxa de produção anaeróbica de CO_2 , que no caso do presente estudo pode ser atribuída a respiração anaeróbica envolvendo aceptores de elétrons citados acima, que podem ter carreados para o reservatório pelo rio, o que poderia justificar a menor razão $\text{CO}_2:\text{CH}_4$. Esses aceptores podem ter sido carreados para o reservatório pela ação das águas pluviais e utilizados na degradação da matéria orgânica, elevando a produção de CO_2 , o que é observado nas regiões marginal, próxima às macrófitas e central; já na área da desembocadura do rio, esse decréscimo não é tão observado.

Em ambientes tropicais, áreas alagadas são grandes emissores de metano para atmosfera, alcançando taxas máximas de $3.561 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (áreas alagadas da Amazônia/Brasil, Melacket *et al.*, 2004) e $6.821 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, no Pantanal/Brasil (Hamilton *et al.*, 1995), enquanto rios, lagos e lagoas representam pequenos

emissores CH_4 com taxas de $22 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Melack *et al.*, 2004) a $520 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Melack e Forsberg (2001)). Já em ambientes temperados, fluxos menores de metano são apresentados ($-3 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, Virginia/EUA, e $390 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, Louisiana/EUA) para áreas alagadas, segundo estudos de Harris *et al.* (1988b) e Whiting e Chanton (2001).

Segundo levantamento feito por Santos (2006), verificou-se um fluxo de emissão em áreas alagadas variando de $0,6 \text{ mg.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ de CH_4 , em Campana Cocha, no Equador, à $230 \text{ mg.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ de CH_4 , na Amazônia, Brasil; em rios da Amazônia, Brasil, variando de $16,72$ à $74 \text{ mg.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ de CH_4 ; um fluxo de $163 \text{ mg.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ e $67,5 \text{ mg.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ de CH_4 em lagos e lagoas respectivamente. Estabelecendo uma comparação entre esses dados existentes na literatura, o reservatório de Juturnaíba, com uma emissão de aproximadamente $33 \text{ mg.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ de CH_4 , pode ser considerado uma importante fonte de emissão de CH_4 para a atmosfera, semelhante à rios, lagos e lagoas.

CONCLUSÃO

Áreas alagadas possuem um importante papel na produção e emissão de metano, contribuindo com 30% das emissões naturais para a atmosfera. Nesse estudo foi possível avaliar a contribuição de cada região amostrada para produção e emissão de CH₄ para a atmosfera. As maiores taxas de produção foram encontradas na região próxima às macrófitas e na margem enquanto as maiores taxas de emissão ocorreram na margem sem macrófitas e na região sob influência do rio São João. Também foi possível identificar a diferença da contribuição das principais vias metanogênicas, e a importância da via hidrogenotrófica em um reservatório tropical.

A hipótese da relação direta entre as taxas de produção e emissão não pôde ser confirmada nesse estudo, pois as taxas de produção e emissão na região da margem com macrófitas não mostraram o mesmo comportamento.

O estudo, apesar de ter sido pontual, pode destacar a importância de se considerar a variabilidade e heterogeneidade do corpo hídrico em estudo, e não apenas extrapolar a medida para todo o sistema, como a maioria dos estudos anteriores.

A perspectiva de estudos posteriores, quantificando o fluxo de emissão mediado pelas macrófitas, assim como a análise do teor de matéria orgânica e análises físico-químicas no sedimento, seria importante na confirmação da hipótese em questão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRIL, G.; GUERIN, F.; RICHARD, S.; DELMAS R.; GALY-LACAU, C.; GOOSE, P.; TREMBLAY, A.; VARFALVY, L.; SANTOS, M.; MATVIENKO, B. (2005). Carbon dioxide and methane emissions and the carbon budget of a 10-year old tropical reservoir (Petit Saut, French Guiana). *Glob. Biogeochem. Cycles* 19, GB4007.
- BARTLETT, K. B.; HARRISS, R. C. (1993). Review and assessment of methane emissions from wetlands. *Chemosphere*, v. 26, n. 1, p. 261-320.
- BARTLETT, K. B.; CRILL, P. M.; SEBACHER, D. I.; HARRISS, R. C.; WILSON J. O., and MELACK, J. M. (1988), *Methane flux from the central Amazon floodplain*, *J. Geophys. Res.*, 93, 1571 – 1582.
- BASTVIKEN, D. (2009). *Methane*. In Likens G. (Ed.), *Encyclopedia of Inland Waters*, Oxford, Elsevier, pages 783-805. *Invited review*.
- BASTVIKEN, D; COLE, J; PACE, M; TRANVIK, L. (2004). *Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate*. *GLOBAL BIOGEOCHEMICAL CYCLES*, VOL. 18, GB4009, doi:10.1029/2004GB002238.
- BASTVIKEN, D.; EJLERTSSON, J., and TRANVIK, L. (2002), *Measurement of methane oxidation in lakes—A comparison of methods*, *Environ. Sci. Technol.*, 36, 3354 – 3361.
- BIDEGAIN, PP & VÖLCKER, CM. (2003). *Bacias hidrográficas dos rios São João e das Ostras: águas, terras e conservação ambiental*. www.riolagos.com.br/calsj/publicacoes.htm. Acessado em 1-3-2010.
- BORREL et al. (2011). *Production and consumption of methane in freshwater lakes ecosystems*. *Research in Microbiology* 162, 832 e847.
- BUSSMANN, I. (2005), *Methane release through resuspension of littoral sediment*, *Biogeochemistry*, 74, 283–302, doi:10.1007/s10533-004-2223-2
- CASPER, P. (1992), *Methane production in lakes of different trophic state*, *Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol.*, 37, 149–154.
- CIDE (2005). *Anuário Estatístico do Rio Janeiro*. Rio de Janeiro: Fundação Centro de Informações e Dados do Rio de Janeiro.
- COLE, J. J.; PRAIRIE, Y.T.; CARACO, N. F.; McDOWELL, W.H.; TRANVIK, L.J.; STRIEGL, R.G.; DUARTE, C.M.; KORTELAJINEN, P.; DOWNING, J.A.; MIDDELBURG, J.J.; MELACK, J. (2007). *Plumbing the global carbon cycle:*

- Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget*. *Ecosystems* 10, 171–184.
- CONRAD, R. (2009). The global methane cycle: recent advances in understanding the microbial processes involved. *Environmental Microbiology Reports*, v. 1, n. 5, p. 285-292.
- CONRAD, R., JI, Y., NOLL, M., KLOSE, M., CLAUS, P., & ENRICH - PRAST, A. (2014). *Response of the methanogenic microbial communities in Amazonian oxbow lake sediments to desiccation stress*. *Environmental microbiology*, 16(6), 1682-1694.
- CONRAD, R., KLOSE, M., CLAUS, P., ENRICH-PRAST, A., (2010). *Methanogenic pathway, C-13 isotope fractionation, and archaeal community composition in the sediment of two clear-water lakes of Amazonia*. *Limnol. Oceanogr.* 55, 689e702.
- CONSÓRCIO INTERMUNICIPAL LAGOS SÃO JOÃO. Relatório de situação 2011–2012. Disponível em : www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/@inter.../inea_026172.pdf. Acesso em junho 2015.
- DEINES, P., GREY, J., RICHNOW, H.H., ELLER, G. (2007). *Linking larval chironomids to methane: seasonal variation of the microbial methane cycle and chironomid delta C-13*. *Aquat. Microb. Ecol.* 46, 273-282.
- dos SANTOS, M. A., ROSA, L. P., MATVIENKO, B., dos SANTOS, E. O., ROCHA, C. H. E. D. A., SIKAR, E., SILVA, M.B., Junior, A. M. P. (2008). *Emissões de gases de efeito estufa por reservatórios de hidrelétricas*. *Oecologia Brasiliensis*, 12(1), 12.
- DOWNING, J. A. & C. M. DUARTE.(2009). *Abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments*. In: *Encyclopedia of Inland Waters*, G. E. Likens (ed.): 469-478. Elsevier, Oxford, U.K.
- DOWNING, J.A., PRAIRIE, Y.T., COLE, J.J., DUARTE, C.M., TRANVIK, L.J., STRIEGL, R. G., MCDOWELL, W.H., KORTELAJINEN, P., CARACO, N.F., MELACK, J.M., MIDDELBURG, J.J.(2006). *The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments*. *Limnol.Oceanogr.*51, 2388-2397.
- DUCHEMIN, É., LUCOTTE, M., CANUEL, R., & SOUMIS, N. (2006). *First assessment of methane and carbon dioxide emissions from shallow and deep*

- zones of boreal reservoirs upon ice break - up. Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 11(1), 9-19.
- DUCHEMIN, E.; LUCOTTE, M.; CANUEL, R.; CHAMBERLAND, A. (1995). *Production of the greenhouse gases CH₄ e CO₂ by hydroelectric reservoirs of the boreal region*. *Global Biogeochemical Cycles* 9: 529-540.
- FALLON, R. D; S. HARRIS, R. S HANSON; and T. D. BROCK (1980). *The role of methane in internal carbon cycling in Lake Mendota during summer stratification*, *Limnol. Oceanogr.*, 25, 357–360.
- FENDINGER, N. J.; ADAMS D. D. and GLOTFELTY, D. E. (1992), *The role of gas ebullition in the transport of organic contaminants from sediments*, *Sci. Total Environ.*, 112, 189 – 201.
- FREEMAN C, NEVISON GB, KANG H, HUGHES S, REYNOLDS B, HUDSON JA. (2002). *Contrasted effects of simulated drought on the production and oxidation of methane in a mid-Wales wetland*. *Soil BiolBiochem* 34: 61–67.
- FRENZEL, P; THEBRATH, B; CONRAD, R. (1990). *Oxidation of methane in the oxic surface layer of a deep lake sediment (Lake Constance)*. *FEMS MicrobiolEcol* 73:149–158.
- GALY-LACAUX, C., DELMAS, R., KOUADIO, G., RICHARD, S. & GOSSE, P. (1999). *Long-term greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs in tropical forest regions*. *Glob. Biogeochem. Cycles* 13, 503–517.
- GALY-LACAUX, C., DELMAS, R., JAMBERT, C., DUMESTRE, J. F., LABROUE, L., RICHARD, S., & GOSSE, P. (1997). *Gaseous emissions and oxygen consumption in hydroelectric dams: A case study in French Guyana*. *Global Biogeochemical Cycles*, 11(4), 471-483.
- GUERIN, F; ABRIL, G; RICHARD, S; BURBAN, B; REYNOUARD, C; SEYLER, P; and DELMAS, R. (2006). *Methane and carbon dioxide emissions from tropical reservoirs: Significance of downstream rivers*. *Geophys. Res. Letters*. 33, L21407.
- HAMILTON, S.K., SIPPEL, S.J., MELACK, J.M. (1995), "Oxygen Depletion and Carbon Dioxide and Methane Production in Waters of the Pantanal Wetland of Brazil", *Biogeochemistry*, v. 30, pp. 115–141.
- HARRISS, R., SEBACHER, D., BARTLETT, K. et al., 1988b, "Sources of Atmospheric Methane in the South Florida Environment", *Global Biogeochemical Cycles*, v. 2 (3), 231-243.

- HEYER, J.; BERGER, U. (2000). *Methane emission from the coastal area in the southern Baltic Sea*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, v. 51, n. 1, p. 13-30,
- HUTTUNEN, J. T., VÄISÄNEN, T. S., HELLSTEN, S. K., & MARTIKAINEN, P. J. (2006). *Methane fluxes at the sediment-water interface in some boreal lakes and reservoirs*. Boreal environment research, 11(1), 27-34.
- HUSZAR, V.L.M. (1989): *Considerações sobre o fitoplâncton da Lagoa de Juturnaíba, Araruama, Estado do Rio de Janeiro, Brasil*. - Revista Brasileira de Biologia 49: 107-123.
- ICMBIO. Instituto Chico Mendes de Biodiversidade. Unidades de Conservação – Encarte 2. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/imgs-unidades-coservacao/ENCARTE%202_p.pdf>. 2005. 210p.
- IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.).Cambridge University Press, Cambridge.
- JANSSEN, P. H. & FRENZEL, P. (1997) *Inhibition of methanogenesis by methyl fluoride – studies of pure and defined mixed cultures of anaerobic bacteria and archaea*. Appl. Environ. Microbiol., 63, 4552–4557.
- JONES, R.I., CARTER, C.E., KELLY, A., WARD, S., KELLY, D.J., AND GREY, J. (2008) Widespread contribution of methane-cycle bacteria to the diets of lake profundalchironomid larvae. Ecology 89: 857–864.
- JUGNIA, L-B; ROY, R; PLANAS, D; LUCOTTE, M; & GREER, CW (2005) *Activité potentielle de méthanogènes dans les sols, tourbères, sédiments lacustres et du réservoir hydroélectrique Robert-Bourassa dans le moyen Nord-Canadien*. Canadian Journal of Microbiology 51: 79-84. Doi: 10.1139/W04-112.
- KELLY, C.A., RUDD, J.W.M., BODALY, R.A., ROULET, N.P., ST. LOUIS, V.L., HEYES, A., MOORE, T.R., SCHIFF, S.L., ARAVENA, R.O., SCOTT, K.J., DYCK, B., HARRIS, R., WARNER, B.G., EDWARDS, G., 1997. *Increases in fluxes of greenhouse gases and methyl mercury following flooding of an experimental reservoir*. Environ. Sci. Technol. 31, 1334– 1344.

- KEMENES, A., FORSBERG, B. R. & MELACK, J. M. (2007). *Methane release below a tropical hydroelectric dam*. *Geophys. Res. Lett.* 34, L12809.
- KIENE, R. P. (1991), *Production and consumption of methane in aquatic systems*, in *Microbial Production and Consumption of Greenhouse Gases: Methane, Nitrogen Oxides, and Halomethanes*, edited by J. E. Rogers and W. B. Whitman, pp. 111–145, Am. Soc. for Microbiol., Washington, D. C.
- KING, G. M.; BLACKBURN, T. H. (1996). *Controls of methane oxidation in sediments*. *Mitt Internat Verein Limnol*, v. 25, p. 25-38.
- KUIVILA, K. M., J. W. MURRAY, A. H. DEVOL, M. E. LIDSTROM, AND C. E. REIMERS (1988), *Methane cycling in the sediments of Lake Washington*, *Limnol. Oceanogr.*, 33, 571–581.
- LEHNER, B., & DÖLL, P. (2004). *Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands*. *Journal of Hydrology*, 296(1), 1-22.
- LIIKANEN, A. (2002). *Greenhouse gas and nutrient dynamics in lake sediment and water column in changing environment*. Doctoral dissertation, University of Kupio, Kupio, 604p.
- LIMA, I. B. T. (2005). *Biogeochemical distinction of methane releases from two Amazon hydroreservoirs*. *Chemosphere*, 59(11), 1697-1702.
- LIMA, I. B., RAMOS, F. M., BAMBACE, L. A., & ROSA, R. R. (2008). *Methane emissions from large dams as renewable energy resources: a developing nation perspective*. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 13(2), 193-206.
- LIU, Y., & WHITMAN, W. B. (2008) *Metabolic, Phylogenetic, and Ecological Diversity of the Methanogenic Archaea*. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1125:171-189. Doi: 10.1196/annals. 1419.019.
- MADIGAN, M. T.; MARTINKO, J. M.; PARKER, J. (2005) *Brock Biology of Microorganisms*. 10th ed, Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
- MARINHO, C.; FONSECA, A.L.S.; MINELLO, M.; ESTEVES, F.A. (2004). *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: Rima (Eds). *Pesquisas de longa duração na restinga de Jurubatiba – Ecologia, história natural e conservação*. pp. 273 – 294.
- MARINHO, M.M. & HUSZAR, V.L.M. (1990): *Estrutura da comunidade fitoplanctônica da Lagoa de Juturnaíba, Araruama, RJ, Brasil: uma comparação entre o centro*

- da regiãoolimnética, tributários e canal de drenagem.* - Revista Brasileira de Biologia 50: 313-325.
- MARINHO, M.M., HUSZAR, V.L.M.& SAMPAIO-PINTO, G.F. (1993): *Estrutura da comunidade fitoplânctônica da Lagoa de Juturnaíba, Araruama, RJ, Brasil: uma comparação entre os períodos anterior e posterior à construção da barragem no Rio São João.* – Revista Brasileira de Biologia 53: 453-467.
- MARTIN, J.L., MCCUTCHEON, S.C., 1999. *Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling.* CRC Press, Inc., 794 pp.
- MELACK, J.M., FORSBERG, B.(2001), “Biogeochemistry of Amazon Floodplain Lakes and Associated Wetlands”. In: McClain, M.E., Victoria, R.L., Richey, J.E. (eds), *The Biogeochemistry of the Amazon Basin and its Role in a Changing World*, pp. 235-276, Oxford University Press.
- MELACK, J.M., HESS, L.L, GASTIL, M. et al. (2004), “Regionalization of Methane Emissions in the Amazon Basin with Microwave Remote Sensing”, *Global Change Biology*, v. 10, pp. 530–544.
- MINELLO, M. (2004). *Metanogênese sob a variação de salinidade em lagoas costeiras do norte do estado do Rio de Janeiro (Brasil): Implicações nas condições osmóticas e na competição por substratos (Dissertação, Dissertação.UFRJ, RJ, Brazil).*
- MURASE, J., SUGIMOTO, A. (2005). *Inhibitory effect of light on methane oxidation in the pelagic water column of a mesotrophic lake (Lake Biwa, Japan).* *Limnol. Oceanogr.* 50, 1339e1343.
- NORONHA, G. C. (2009). *Avaliação Hídrica do Lago de Juturnaíba como Alternativa de Abastecimento de Água do Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro - COMPERJ.* Latic. Universidade Federal Fluminense. Niterói. RJ.
- PRIMO, P. B. d. S. and C. M. Volcker (1995). *Bacias hidrográficas dos rios São João e das Ostras: águas, terras e conservação ambiental.* Rio de Janeiro.
- REEBURG, W.S. (2007), *Oceanic methane biogeochemical.* *Chem. Rev.* 107, 486 – 513.
- ROSA, L.P., SANTOS, M.A. (2000). *Certainty and uncertainty in the science of greenhouse Gas emissions from power dams—a report on the state of the art for the World Commission on Dams.* WCD, March 2000, Final Report.
- ROSA, L.P., MATVIENKO, B., SANTOS, M.A. et al., 2002a, *Emissões de Dióxido de Carbono e de Metano pelos Reservatórios Hidrelétricos Brasileiros.* In: Relatório

- de Referência, Projeto BRA/95/G31, UNDP/ELETROBRÁS/MCT.
- RUDD, J. W. M., and hu,R. D. (1978), *Methane cycling in a eutrophic shield lake and its effects on whole lake metabolism*, *Limnol. Oceanogr.*, 23, 337 – 348
- RUDD, J. W. M., HARRIS, R., KELLY, C. A. & HECKY, R. E.(1993). *Are hydroelectric reservoirs significant sources of greenhouse gases?**Ambio* 22, 246–248.
- RUDD, J.W.M., AND TAYLOR, C.D. (1980) *Methane cycling in aquatic environments*.*AdvAquatMicrobiol* 2: 77–150.
- SANSEVERINO, A. M., BASTVIKEN, D., SUNDH, I., PICKOVA, J., & ENRICH-PRAST, A. (2012). *Methane carbon supports aquatic food webs to the fish level*.*Plos One* 7(8):e42723.doi:10.1371/journal.pone.0042723.
- SANTOS,M.A., ROSA, L.P., MATIVIENKO,B., SANTOS, E.O. (2008). *Emissões de gases de efeitoestufaporreservatórios de hidrelétricas*. *Oecol.Bras.*,12(1): 116-129.
- SANTOS, M.A., ROSA, L.P., SIKAR,B, SIKAR,E., SANTOS,E.O. (2006). *Gross greenhouse gas emissions from hydro-power reservoir comparedto thermo-power plants*. *Energy Policy* 34: 481-488
- SCHINK, B. (1997) *Energetics of Syntrophic Cooperation in Methanogenic Degradation*. *Microbiologyand Molecular BiologyReviews* 61: 262-280.
- SEABRA, V.S.; CRUZ, C.B.M.; VICENS, R.S.(2010).*Mapeamento dos sistemas de relevo da bacia hidrográfica do Rio São João*. In: *Anais do III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação*, Recife. p. 1-4.
- SEGERS, R. (1998), *Methane production and methane consumption: A re- view of processes underlying wetland methane fluxes*, *Biogeochemistry*,41, 23–51.
- SERRA, T., VIDAL, J., CASAMITJANA, X., SOLER, M., AND COLOMER, J. (2007). *The role of surface vertical mixing in phytoplankton distribution in a stratified reservoir*, *Limnol. Oceanogr.*, 52, 620–634.
- SIDAGIS-GALLI, C.; ABE, D.S.; TUNDISI, J.G.; ADAMS, D.D.; MATSUMURA TUNDISI, T.; TUNDISI, J.E.; BRUM, P.R. & CIMBLERIS, A.C.P. (2008). *Greenhouse gas concentrations and diffusive flux at the sediment-water interface from two reservoirs*. *Verhandlungen – InternationaleVereinigungfurTheoretischeandAngewandteLimnologie* 30.

- SOUMIS, N., LUCOTTE, M., CANUEL, R., WEISSENBERGER, S., HOUEL, S., LAROSE, C., & DUCHEMIN, É. (2005). *Hydroelectric reservoirs as anthropogenic sources of greenhouse gases*. Water encyclopedia.
- STRASKRABA, M. & TUNDISI, J.G. (2000). *Diretrizes para o gerenciamento de lagos – Volume 9: Gerenciamento da qualidade da água de represas*. Fundação do Comitê Internacional do Meio Ambiente Lacustre (ILEC). Instituto Internacional de Ecologia, São Carlos, 300p.
- TEODORU, C., PRAIRIE, Y. & DEL GIORGIO, P. (2010). *Spatial heterogeneity of surface CO₂ fluxes in a newly created Eastmain-1 reservoir in Northern Quebec, Canada*. *Ecosystems* 14, 28–46.
- TRANVIK, L.J.; DOWNING, J.A.; COTNER, J.B.; LOISELLE, S.A.; STRIEGL, R.G.; BALLATORE, T. J.; DILLON, P.; FINLAY, K.; FORTINO, K.; KNOLL, L.B.; KORTELAINEEN, P. L.; KUTSER, T.; LARSEN, S.; LAURION, I.; LEECH, D.M.; MCCALLISTER, S. L.; MCKNIGHT, D. M.; MELACK, J. M.; OVERHOLT, E.; PORTER, J.A.; PRAIRIE, Y.; RENWICK, W.H.; ROLAND, F.; SHERMAN, B.S.; SCHINDLER, D.W.; SOBEK, S.; TREMBLAY, A.; VANNI, M.J.; VERSCHOOR, A.M.; VON WACHENFELDT, E.; AND WEYHENMEYER, G.A. (2009). *Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate*. *Limnol. Oceanogr.* 54, 2298–2314.
- TREMBLAY, A., LAMBERT, M. & GAGNON, L. (2004). *Do hydroelectric reservoirs emit greenhouse gases?* *Environ. Manage.* 33, S509–S517.
- TREMBLAY, A.; SCHETAGNE, R. (2006). *The relationship between water quality and GHG emissions in reservoirs*. *International journal on hydropower & dams*, n. 1, p. 103-107.
- TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T.; ARANTES JÚNIOR, J. D.; TUNDISI, J. E. M.; MANZINI, N. F.; DUCROT, R. (2004). The response of Carlos Botelho (Lobo, Broa) reservoir to the passage of cold fronts as reflected by physical, chemical, and biological variables. *Brazilian Journal of Biology*, São Carlos, v.64, n.1, p.177-186.
- WHITING, G.J., CHANTON, J.P.(2001), “Greenhouse Carbon Balance of Wetlands: Methane Emission versus Carbon Sequestration”, *Tellus B*, v. 53, pp. 521-528.
- WHITMAN, WB; BOWEN, TL; & BOONE, DR (2006). *The Methanogenic Bacteria*. In M.Dworkin, S. Falkow, E. Rosenberg, K. H. Schleifer, & E. Stackebrandt (Eds.),

- The Prokaryotes – A Handbook on the Biology of Bacteria (3rd ed., pp. 165-207). Singapore: Springer. Doi: 10.1007/0-387-30743-5_9.
- WIDDEL, F. (1986). Growth of methanogenic bacteria in pure culture with 2-propanol and other alcohols as hydrogen donors. *Applied and Environmental Microbiology*, 51(5), 1056-1062.
- WUEBBLES, D. J., and K. Hayhoe (2002), Atmospheric methane and global change, *Earth Sci. Rev.*, 57(3–4), 177–210.
- YAVITT, J.B., SEIDMANN-ZAGER, M. (2006). Methanogenic conditions in northern peat soils. *Geomicrobiology Journal* 23, 119e127.
- ZEIKUS, J.G; WINFREY, M.R. (1976). *Temperature limitation of methanogenesis in aquatic sediments*. *Appl. Environ. Microbiol.* January, vol. 31 no. 1 ,**99-107**.
- ZELLNER, G; WINTER, J. (1987). *Analysis of a highly efficient methanogenic consortium producing biogas from whey*. *Science direct*, vol 9, 284-292.
- ZINDER, SH (1993) *Physiological ecology of methanogens*. In : *Methanogens: Ecology, Physiology Biochemistry and Genetics* editadopor James G. Ferry. Ed. Chapman & Hall, EUA, 1993. p. 128-206.