

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”
Centro de Energia Nuclear na Agricultura**

**Estimativa de emissão de gases de efeito estufa por lagoas salinas no
pantanal da Nhecolândia, MS**

Rosângela Rodrigues Braz Machado

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em
Ciências. Área de concentração: Ecologia Aplicada

**Piracicaba
2016**

Rosângela Rodrigues Braz Machado
Licenciatura Plena em Ciências Biológicas

**Estimativa de emissão de gases de efeito estufa por lagoas salinas no pantanal da
Nhecolândia, MS**

Orientador:
Prof. Dr. **PLÍNIO BARBOSA DE CAMARGO**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em
Ciências. Área de concentração: Ecologia Aplicada

Piracicaba
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Machado, Rosângela Rodrigues Braz

Estimativa de emissão de gases de efeito estufa por lagoas salinas no pantanal da Nhecolândia, MS/ Rosângela Rodrigues Braz Machado - - Piracicaba, 2016.

45 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.
Centro de Energia Nuclear na Agricultura.

1. Áreas úmidas 2. Pantanal 3. Metano 4. Gás carbônico 5. Fitoplâncton 6. Óxido nitroso 7. Fixação biológica 8. Desnitrificação 9. Balanço de carbono I. Título

DEDICATÓRIA

Ao meu melhor amigo, irmão, companheiro e eterno namorado. Você me fez acreditar quando perdi a fé, foi minha força quando fraquejei, minha esperança quando me perdi, meu riso quando chorei. Você supera a alegria de qualquer conquista.

À minha mãe, razão de eu ir tão longe. Gratidão eterna a Deus por ser sua filha.

Aos amigos que tornaram esta trajetória suportável. Se eu tivesse que refazer meus passos, apenas para conhecê-los, eu viveria tudo de novo. Gratidão a Deus por me cercar de tanto afeto e companheirismo. Aprendi e devo muito a todos.

Àquela moça simples e brejeira que superou-se, condeu-se e partiu, para que nova pessoa começasse a surgir.
Resiliência a todo custo.

EPÍGRAFE

Ele perdeu todos os filhos de uma única vez. Perdeu todos os bens no mesmo momento e tempos depois adquiriu a pior doença de sua época. Tudo o que ele não perdeu foi a esperança de que Ds não o perdera de vista. Sua amada esposa, afetada pelo luto, desejou que ele morresse. Seus amigos acusaram-no de merecer o que lhe aconteceu. Tudo o que ele não perdeu foi a esperança de um dia poder descansar nos braços do Eterno.

A história dele me inspirou a suportar, superar e permanecer. A história dele me fez ser grata pelo meu melhor companheiro e meus grandes amigos, sem os quais, minha história jamais seria a mesma. A D's, que no fim mostrou-se melhor do que ele entendia, devoto minha eterna e profunda gratidão, seja qual for o fim da minha história. Eu aprendi, entendi e cresci, o que jamais poderia, sem esta experiência.

Quando eu temer, hei de confiar em Ti

“Eu penso renovar o homem usando borboletas”
Manoel de Barros

SUMÁRIO

RESUMO.....	6
ABSTRACT.....	7
1.INTRODUÇÃO.....	9
Referências.....	11
2 BALANÇO DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM LAGOAS SALINAS NO PANTANAL.....	15
Resumo.....	15
Abstract.....	15
2.1 Introdução.....	16
2.2 Material e Métodos.....	17
2.3 Resultados.....	19
2.4 Discussão.....	22
Referências.....	23
3 VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL NA EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM LAGOAS SALINAS NO PANTANAL DA NHECOLÂNDIA, MS.....	27
Resumo.....	27
Abstract.....	27
3.1 Introdução.....	28
3.2 Material e Métodos.....	29
3.3 Resultados.....	32
3.4 Discussão.....	35
Referências.....	38
4 CONCLUSÃO FINAL.....	45

RESUMO

Estimativa de emissão de gases de efeito estufa por lagoas salinas no pantanal da Nhecolândia, MS

O Pantanal é a maior área úmida do planeta e considerada uma das maiores fontes naturais de gases de efeito estufa (GEE). A sub-região da Nhecolândia, um dos maiores ecossistemas do Pantanal, possui o sistema lântico mais diverso, onde lagoas de água doce coexistem com salinas, apesar das condições climáticas regionais não explicarem totalmente esta alta salinidade. As salinas são permanentes e funcionam de maneira diversa, sendo assim, subdivididas em tipologias verde e preta. As salinas verdes e pretas diferem tanto pela composição e funcionamento biogeoquímico, quanto pela abundância de espécies extremófilas. Tal distinção pode afetar o balanço regional de GEE, e assim, reduzir a confiabilidade das estimativas regionais das emissões gasosas. As estimativas de emissões de GEE obtidas anteriormente no Pantanal representaram principalmente ecossistemas de água doce, desconsiderando, portanto, a transferência de massa a partir das lagoas salinas. As lagoas de água doce, porém, podem ser permanentes ou temporárias, dependendo da intensidade das inundações anuais. Estas lagoas concentram grande quantidade de matéria orgânica e vegetação aquática que aumenta este aporte orgânico. Devido a diversidade química das águas superiores na Nhecolândia, buscou-se quantificar os fluxos de GEE em lagoas salinas dos tipos verde e preta, e lagoas de água doce. O monitoramento destes corpos d'água ocorreram nas duas estações climáticas comuns do Pantanal, seca e úmida, quando as alterações climáticas e químicas das águas são marcantes. Deste modo, foi possível retratar o efeito das variáveis abióticas sobre o balanço de massa no sistema água-atmosfera da segunda maior sub-região pantaneira. Duas metodologias distintas foram utilizadas para indicar a variabilidade espacial entre lagoas análogas, como as salinas, e variações específicas em cada lagoa. Os resultados indicaram que houve grande variabilidade espaço-temporal na dinâmica dos GEE entre os ecossistemas estudados, de maneira que, uma mesma lagoa que atuou como fonte em uma estação, comportou-se como sumidouro em outro período. Houve intensa variabilidade espacial, ainda, entre salinas de mesma tipologia, quando no mesmo período, umas podem ser fonte e outras sumidouros para determinados gases. As maiores emissões de metano e gás carbônico ocorreram na lagoa de água doce, porém, salinas verdes apresentaram valores próximos na mesma estação. Isto aponta a necessidade de aumentar as amostragens diretas visando incorporar a variabilidade espacial e temporal aos modelos climáticos regionais. As medidas *in situ* podem, assim, caracterizar as contribuições individuais no sistema lântico e aumentar a confiança nas estimativas de emissões gasosas atribuídas ao Pantanal.

Palavras-chave: Metano; Dióxido de carbono; Fitoplancton; Óxido nitroso.

ABSTRACT

Estimation of greenhouse gas emissions by saline lagoons in the Nhecolândia wetlands, MS

The Pantanal is the largest wetland on the planet and considered one of the largest natural sources of greenhouse gases (GHG). The sub-region of Nhecolândia, one of the largest ecosystems in the Pantanal, has the most diverse lentic system, where freshwater lagoons coexist with saline, although regional climatic conditions do not fully explain this high salinity. The salinas are permanent and function in a different way, being thus subdivided into green and black typologies. The green and black salinas differ as much by the composition and biogeochemical functioning, as by the abundance of extremófilas species. Such a distinction may affect the regional GHG balance sheet, and thus reduce the reliability of regional estimates of gaseous emissions. Estimates of GHG emissions previously obtained in the Pantanal represented mainly freshwater ecosystems, thus disregarding the mass transfer from saline lagoons. Freshwater ponds, however, can be permanent or temporary depending on the intensity of annual floods. These ponds concentrate a great amount of organic matter and aquatic vegetation that increases this organic contribution. Due to the chemical diversity of the upper waters in Nhecolândia, it was sought to quantify GHG flows in saline lagoons of the green and black types, and freshwater lagoons. The monitoring of these bodies of water occurred in the two common wetland climate seasons, when the climatic and chemical changes of the waters are remarkable. In this way, it was possible to portray the effect of the abiotic variables on the mass balance in the water-atmosphere system of the second largest sub-region of the Pantanal. Two different methodologies were used to indicate the spatial variability between analogous lagoons, such as salinas, and specific variations in each lagoon. The results indicated that there was great space-time variability in the GHG dynamics among the studied ecosystems, so that the same lagoon that acted as a source in one season, behaved as a sink in another period. There was intense spatial variability, also, between salinas of the same typology, when in the same period, some can be source and other sinks for certain gases. The highest emissions of methane and carbon dioxide occurred in the freshwater lagoon, however, green salinas presented close values in the same season. This points to the need to increase direct sampling to incorporate spatial and temporal variability into regional climate models. *In situ* measurements can thus characterize individual contributions in the lentic system and increase confidence in the gaseous emissions estimates attributed to the Pantanal.

Keywords: Methane; Carbon dioxide; Phytoplankton; Nitrous oxide

1 INTRODUÇÃO

Áreas úmidas são ecótonos que conectam sistemas terrestres e aquáticos, com saturação hídrica superficial, permanente ou temporária (Gardner et al., 2015; Russi et al., 2013). Considerados um dos ecossistemas mais produtivos do planeta (Sahagian; Melack, 1988), estes ambientes disponibilizam serviços ecossistêmicos essenciais como conservação da qualidade da água e ciclagem de carbono (C) (Russi et al., 2013). Nestas áreas há significativo estoque de C ($118 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$) (Mitsch et al., 2013), capaz de torná-las fontes ou sumidouros potenciais de gases de efeito estufa (GEE) como metano (CH_4) e gás carbônico (CO_2) (Mitsch et al., 2013; Kayranli et al., 2010; IPCC, 2006; Chen; LU, 2003).

O Pantanal é a maior área úmida continental do planeta, uma extensa planície caracterizada tanto pela diversidade biológica quanto pelos sistemas lacustres particulares (Medina-Júnior, Rietzler, 2005; ANA, 2004; Assine, 2003). O pulso de inundação periódico provê a recarga de nutrientes e define a paisagem regional (ANA, 2004; ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2003; Abdon, 1998). A retenção de matéria orgânica reduz a concentração de oxigênio (O_2) e pH da água, condição ideal para produção de GEE (Kayranli et al.; 2010; Bergamaschi et al., 2007; ANA, 2004; Cunha, 1980). As estimativas globais de emissão natural de CH_4 indicam que o Pantanal, com 150 mil Km^2 , emite aproximadamente $510\text{-}1033 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, enquanto que, a Amazônia com 4 milhões de Km^2 contribui com 54 a $1341 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (IPCC, 2013).

A segunda maior sub-região do Pantanal, a Nhecolândia, possui sistema lântico composto por mais de dezesseis mil lagoas oligosalinas (Oliveira et al., 2011), abastecidas regularmente abastecidas pela drenagem superficial com baixa condutividade elétrica ($\geq 200 \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$) e pH (5 – 7) (Mourão, 1989). Estas lagoas são ocupadas por macrófitas aquáticas e microalgas que as equipara aos sistemas mais produtivos do mundo (Santos 2013; 2008; Pott et al., 1989).

Na Nhecolândia existem, ainda, cerca de seicentas lagoas salinas (Oliveira et al., 2011), com ampla gama de salinidade, retratada principalmente pela alta condutividade elétrica e pH ($> 8.000 \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$) e pH ($\geq 9\text{-}11$) (Furian et al., 2013; Almeida et al, 2011). Estas salinas são ocupadas organismos extremófilos que participam da ciclagem de nutrientes como carbono (C) e nitrogênio (N) (Costa, 2015; Silva, 2015; Santos; Sant'anna, 2010; Medina-Júnior; Rietzler, 2005). A atividade biológica regula o funcionamento destas lagoas e, associadas às condições físico-químicas, discrimina as salinas em tipologias verde e preta (Martins et al., 2012). As salinas verdes apresentam sedimento orgânico profundo,

variabilidade química diária e fitoplâncton especializado na fixação de N, enquanto que, salinas do tipo pretas têm sedimento arenoso com estreita cobertura orgânica, maior profundidade, menor variabilidade química e atuam predominantemente na mineralização de desnitrificação (Silva, 2015). Em salinas como estas ocorrem, também, comunidade metanogênica e metanotrófica, que participa da degradação da matéria orgânica, com consequente produção de CH₄ e CO₂ (Bergier et al., 2016). As oscilações interanuais de precipitação, com efeito sobre a intensidade e duração das inundações (Rodela, Queiroz Neto, 2006), contribui também para redução da quantidade de lagoas oligosalinas e aumento do número de salinas (Bergier et al., 2016). Isto ressalta a necessidade de incluir a contribuição destes ecossistemas no balanço regional de GEE, porém, grande parte das estimativas de emissão de GEE no Pantanal restringe-se a ecossistemas de água doce (Silva et al., 2016; Rust, 2015; Peixoto et al., 2015; Bastviken et al., 2010).

Há, ainda, limitada compreensão sobre a dinâmica de carbono em lagos salinos tropicais (Duarte et al., 2008). Associada a este desconhecimento, a variabilidade espaço-temporal comum em ecossistemas aquáticos, e observada nas lagoas da Nhecolândia (Silva, 2015; Furian et al., 2013), aumentam as incertezas dos modelos climáticos globais (Kirschke et al., 2013; Bousquet et al., 2011). Considera-se que medidas pontuais frequentes podem aumentar a precisão das estimativas (Kirschke et al., 2013), visto que, os fatores abióticos que regulam os fluxos de GEE podem ser descritos, assim como, a relação entre estas variáveis e o balanço dos gases (Duc et al., 2010). Sendo assim, este estudo buscou caracterizar as emissões de CH₄, CO₂ e N₂O em ecossistemas aquáticos salinos e de água doce, com funcionamento biogeoquímico diverso e sob condições climáticas distintas. Para isto, utilizou-se duas metodologias, apresentadas separadamente. No primeiro momento, câmaras estáticas foram distribuídas aleatoriamente na superfície de salinas tipo verde e tipo preta para coleta de GEE transportados por difusão na interface água-atmosfera. Este método foi proposto para descrever, inicialmente, a variabilidade espacial entre lagoas estritamente relacionadas e em condições climáticas parecidas. A segunda metodologia tem sido utilizada em estudos semelhantes (Peixoto et al., 2015; Schilder et al., 2013) e descrevem a variabilidade espacial dentro de cada lagoa. Assim, os GEE, transportados por difusão, foram coletados em salinas verdes, distintas pela abundância da comunidade fitoplanctônica, salina preta e lagoa de água doce. Alido a isto, testou-se a variabilidade temporal, medindo as emissões gasosas na mesma lagoa em períodos climáticos distintos, apesar da semelhança entre as condições atmosféricas no período estudado. Os resultados obtidos permitiram caracterizar a dinâmica de GEE em diferentes ecossistemas aquáticos e retratam nitidamente a variabilidade espaço-temporal.

Com isto, elaborou-se dois artigos distintos para descrever, com maior detalhamento, o trabalho realizado.

Referências

- Abdon MM, Silva JSV, Galdino S (1997) Extensão da área alagada no período de cheia em parte da sub-região da Nhecolândia, no Pantanal, Brasil. In: **Simpósio Latino Americano de Percepção Remota, 8**. Anais, Mérida, Venezuela.
- Almeida TIR, Calijuri MC, Falco PB et al. (2011) Biogeochemical processes and the diversity of Nhecolândia lakes, Brazil. **An Acad Bras Ciênc** 83(2): 391-407.
- ANA (Agência Nacional de Águas) (2004) **Implementação de Práticas de Gerenciamento Integrado de Bacia Hidrográfica para o Pantanal e Bacia do Alto Paraguai**. Programa de Ações Estratégicas para o Gerenciamento Integrado do Pantanal e Bacia do Alto Paraguai. Relatório Final. Brasília, Brasília: TODA Desenho & Arte Ltda, Brasil.
- ANA (GEF/PNUMA/OEA) (2003) **Implementação de Práticas de Gerenciamento Integrado de Bacia Hidrográfica para o Pantanal e Bacia do Alto Paraguai**. Elaboração do Diagnóstico Analítico do Pantanal e Bacia do Alto Paraguai – DAB. Relatório Final. Brasília: TODA Desenho & Arte Ltda, Brasil.
- Assine, M.L. 2003. **Sedimentação na Bacia do Pantanal MatoGrossense, Centro-Oeste do Brasil**. Tese de Livre Docência, Universidade Estadual Paulista, Brasil.
- Bastviken D, Santoro AL, Marotta H *et al.* 2010. Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: toward more comprehensive sampling. **Environmental Science & Technology**, 44(14):5450-5455.
- Bergamaschi PC, Frankenberg C, Meirink JF et al (2007) Satellite cartography of atmospheric methane from SCIAMACHY on board ENVISAT: 2. Evaluation based on inverse model simulations. **J Geophys Res** 112: D02304.
- Bergier I, Silva APS, Monteiro H et al. (2016) Methane and Carbon Dioxide Dynamics in the Paraguay River Floodplain (Pantanal) in Episodic Anoxia Events. (eds. Bergier I, Assine

ML), pp. 145-161. In: **Dynamics of the Pantanal Wetland in South America**, The Handbook of Environmental Chemistry, Springer International Publishing Switzerland.

Bousquet P, Ringeval B, Pison I et al. (2011) Source attribution of the changes in atmospheric methane for 2006–2008. **Atmos Chem Phys** 11, 3689-3700.

Chen Y, Lu X (2003) The Wetland Function and Research Tendency of Wetland Science **J Wetland Sci** 1(1): 7-11.

Costa NB, Kolman MA, Giani A (2016) Cyanobacteria diversity in alkaline saline lakes in the Brazilian Pantanal wetland: a polyphasic approach. **J Plankton Res** sn: 1–15.

Cunha NG da (1980) **Considerações sobre os solos da sub-região da Nhecolândia, Pantanal Mato-Grossense**. Corumbá: EMBRAPA-UEPAE, Corumbá, 45p.

Duarte CM, Prairie YT, Montes C et al. (2008) CO₂ emissions from saline lakes: A global estimate of a surprisingly large flux. **J Geophys Res Biogeosci.** 113:G04041.

Duc N, Crill P, Bastviken D (2010) Implications of temperature and sediment characteristics on methane formation and oxidation in lake sediments. **Biogeochemistry** 100: 185–196.

Furian S, Martins ERC, Parizotto TM et al (2013) Chemical diversity and spatial variability in myriad lakes in Nhecolândia in the Pantanal wetlands of Brazil. **Limnol Oceanogr** 58(6): 2249–2261.

Gardner RC, Barchiesi S, Beltrame C et al (2015) State of the World's Wetlands and their Services to People: A compilation of recent analyses. **Ramsar Briefing Note no. 7**. Gland, Switzerland: Ramsar Convention Secretariat.

IPCC (2008) **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – A primer**, The National Greenhouse Gas Inventories Programme, (eds Eggleston HS, Miwa K, Srivastava N, Tanabe K). IGES, Japan.

IPCC (2014) 2013 **Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands** (eds Hiraishi T, Krug T, Tanabe K, Srivastava N, Baasansuren J, Fukuda M, Troxler TG). IPCC, Switzerland.

- Kayranli B, Scholz M, Mustafa A. et al. (2010) Carbon Storage and Fluxes within Freshwater Wetlands: a Critical Review. **Wetlands** 30: 111.
- Kirschke S, Bousquet P, Ciais P et al. (2013). Three decades of global methane sources and sinks. **Nat Geosc** 6(10), 813-823.
- Martins ERC (2012) **Tipologia de lagoas salinas no pantanal da Nhecolândia (MS)**. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo, Brasil.
- Medina-Júnior PB, Rietzeler AC (2005) Limnological study of a Pantanal saline lake. **Braz J Bio** 65: 651–659.
- Mitsch WJ, Bernal B, Nahlik AM et al. (2013) Wetlands, carbon, and climate change **Landscape Ecol** 28(4): 583.
- Mourão GM (1989) **Limnologia comparativa de três lagoas (duas “baías” e uma “salina”)** do Pantanal da Nhecolândia, MS. Dissertação. São Carlos, Brasil.
- Oliveira APG, Ribeiro AA, Wassouf Junior ER, Souza GF de, Bernadi I, Penatti NC, Almeida TIR de, Paranhos Filho AC. (2011). Uso de Sensoriamento Remoto na quantificação das lagoas do Pantanal da Nhecolândia, Mato Grosso do Sul. **XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 3695-3702
- Peixoto RB, Machado-Silva F, Marotta H *et al.* 2015. Spatial versus Day-To-Day Within-Lake Variability in Tropical Floodplain Lake CH₄ Emissions–Developing Optimized Approaches to Representative Flux Measurements. **PloS One**, 10(4):e0123319.
- Pott VJ, Bueno NC, Pereira RAC et al (1989). Distribuição de macrófitas aquáticas numa lagoa na fazenda Nhumirim, Nhecolândia, Pantanal, MS. **Acta Bot Bras** 3(2): 135-168.
- Rodela LG (2006) Unidades de Vegetação e Pastagens Nativas no Pantanal da Nhecolândia, Mato Grosso do Sul. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, Brasil.
- Rust F (2015). **Fluxo de CO₂ e CH₄ em uma lagoa tropical (Pantanal, Brasil) com gradiente de turbidez**. Dissertação, Juiz de Fora, Brasil.

- Russi D, Ten Brink P, Farmer A et al. (2013) **The Economics of Ecosystems and Biodiversity for Water and Wetlands**. IEEP, London and Brussels; Ramsar Secretariat, Gland.
- Sahagian, D., and J. Melack, Global wetland distribution and functional characterization: Trace gases and the hydrologic cycle, **IGBP Rep. 46**, Intl. Geosphere Biosphere Programme Secretariat, Stockholm, 1988.
- Santos KR de S (2013) **Estudos de desenvolvimento, moleculares e do potencial biotecnológico em cepas de cianobactérias provenientes de lagoas salinas do Pantanal da Nhecolândia, MS, Brasil: Anabaenopsis elenkinii (Nostocales) e Arthrospira platensis (Oscillatoriales)**. Tese de Doutorado, Instituto de Botânica da Secretaria de Estado do Meio Ambiente, Brasil.
- Santos KR de S, Sant'anna CL (2010) Cianobactérias de diferentes tipos de lagoas ("salina", "salitrada" e "baía") representativas do Pantanal da Nhecolândia, MS, Brasil. **Rev Bras Bot**, 33(1): 61-83.
- Santos KRS (2008) **Biodiversidade de algas e cianobactérias de três lagoas ("salina", "salitrada" e "baía") do Pantanal da Nhecolândia, MS, Brasil**. Dissertação de mestrado. Instituto de Botânica, São Paulo.
- Silva GM da (2015) **Diversidade taxonômica e funcional de comunidades microbianas em lagoas salino-alcálicas do Pantanal brasileiro**. Dissertação de mestrado, Piracicaba, Brasil.
- Schilder, J., Bastviken, D., Hardenbroek, M., Kankaala, P., Rinta, P., Stötter, T., & Heiri, O. (2013). Spatial heterogeneity and lake morphology affect diffusive greenhouse gas emission estimates of lakes. **Geophysical Research Letters**, 40(21), 5752-5756.

2 BALANÇO DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM LAGOAS SALINAS NO PANTANAL

Resumo

Emissões de gases de efeito estufa (GEE) foram medidas em lagoas salinas exclusivas da sub-região da Nhecolândia no Pantanal. A pedologia local promove o isolamento destas lagoas, impedindo que ocorra recarga hídrica na estação úmida. As salinas têm alta concentração iônica e são ocupadas por organismos extremófilos que regulam e discriminam tipologias entre estas lagoas. Os fluxos difusivos de metano, gás carbônico e óxido nitroso foram coletados durante dois anos consecutivos, no período seco, quando há intensa redução de precipitação, e conseqüentemente, aumento de eletrólitos dissolvidos nas salinas. Apesar de ecossistemas aquáticos salinos serem considerados fontes naturais de gás carbônico, a contribuição do sistema lântico salino da Nhecolândia não foi quantificada e integrada às estimativas de emissões de GEE atribuídas ao Pantanal. Buscou-se, por isto, caracterizar os fluxos de GEE e os possíveis fatores relacionados a eles. Os resultados indicaram que apesar destes ecossistemas estarem estritamente relacionados, as condições físico-químicas que regulam os fluxos de GEE são diferentes para cada salina. Observou-se ainda, que possivelmente a comunidade fitoplanctônica, distinta em cada tipologia de salina, seja um dos maiores reguladores da dinâmica de GEE. A variabilidade espacial observada entre as salinas indica que novos estudos devem ser conduzidos para descrever os aspectos condicionantes destas variações e o efeito disto sobre o balanço regional de GEE. A redução destas incertezas aumentará a robustez dos modelos climáticos regionais e globais.

Palavras-chave: Metano; Dióxido de carbono; Fitoplâncton; Óxido nitroso

Abstract

Greenhouse gas emissions (GHG) were measured in exclusive saline lagoons of the Nhecolândia sub-region of the Pantanal. The local pedology promotes the isolation of these lagoons, preventing water recharge in the wet season. The salinas have high ionic concentration and are occupied by extremophile organisms that regulate and discriminate typologies between these lagoons. The diffusive fluxes of methane, carbon dioxide and nitrous oxide were collected during two consecutive years in the dry period, when there is intense reduction of precipitation, and, consequently, increase of dissolved electrolytes in the saline. Although saline aquatic ecosystems are considered natural sources of carbon dioxide, the contribution of the Nhecolândia salt saline system has not been quantified and integrated with the GHG emission estimates attributed to the Pantanal. It was therefore sought to characterize GHG flows and the possible factors related to them. The results indicated that although these ecosystems are strictly related, the physico-chemical conditions that regulate GHG fluxes are different for each saline. It was also observed that possibly the phytoplankton community, distinct in each saline typology, is one of the major regulators of GHG dynamics. The spatial variability observed between the salinas indicates that further studies should be conducted to describe the conditioning aspects of these variations and the effect of this on the regional balance of GHG. Reducing these uncertainties will increase the robustness of regional and global climate models.

Keywords: Methane; Carbon dioxide; Phytoplankton; Nitrous oxide

2.1 Introdução

As maiores emissões naturais de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) e óxido nitroso (N_2O), importantes gases de efeito estufa (GEE), ocorrem em áreas úmidas (IPCC, 2007), especialmente em regiões tropicais (Sjögersten et al., 2014; Christensen, 2011; Guérin et al., 2006). Estas áreas podem, ao longo do tempo, atuarem como sumidouros desses GEE (Mitsch et al., 2013; 2010). O Pantanal é a maior área úmida continental do planeta (ANA, 2004) e umas das maiores fontes de CH_4 global, superando ecossistemas semelhantes como a Amazônia (IPCC, 2013). A grande diversidade no relevo, ocupação biológica e pulsos de inundação delimitam o Pantanal em sub-regiões, das quais se destaca a Nhecolândia, dada a maior diversidade química das águas superficiais (Martins, 2012; Almeida et al., 2011; Mourão, 1989).

Na Nhecolândia existem aproximadamente 600 lagoas com alta concentração iônica, condutividade elétrica ($1500 - 65.000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) e pH (> 9), denominadas “salinas” (Oliveira, 2011). Estas lagoas coexistem com milhares de ecossistemas de água doce, porém estão isoladas da recarga hídrica superficial (Furian et al., 2013). As salinas divergem quanto a abundância biológica e a ciclagem de nutrientes (Costa et al., 2015; Almeida, 2011) e distinguem-se em tipologia verde e preta (Martins, 2012). As salinas verdes têm a maior abundância de fitoplâncton, especialmente cianobactérias fixadoras de nitrogênio (N), e grande variabilidade diária no metabolismo aquático. Em salinas pretas a abundância biológica é menor, as condições físico-químicas são menos variáveis e os processos de mineralização e desnitrificação de N são predominantes, condições estas, opostas às observadas nas salinas verdes. (Silva, 2015; Martins, 2012).

Os lagos salinos globais são fontes significativas de CO_2 (Duarte et al., 2008), e potenciais sumidouros de carbono (C) (Mitsch et al., 2013). Estes ecossistemas podem, ainda, atuarem como sumidouros de N, dada frequente conversão de amônia (NH_3^+) a nitrato (NO_2) (Joye et al., 1999), processos intermediários na produção e emissões de N_2O . Medida isolada de emissão de CH_4 e CO_2 em uma lagoa salina do tipo verde na Nhecolândia indicou que há grande produção de CH_4 no sedimento destas lagoas (Bergier et al., 2016). Ainda segundo o autor, o CH_4 é transportado para a atmosfera principalmente através de bolhas. Esse mecanismo é considerado os maiores responsáveis pela liberação de CH_4 a partir de ecossistemas aquáticos (Bastviken et al., 2004). A medida pontual realizada nesta salina indicou também que estes ecossistemas podem atuar como significativos sumidouros de CO_2 , com apreensões líquidas de aproximadamente $900 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Diante disto, este estudo foi proposto para medir emissões de CH_4 , CO_2 e N_2O , por difusão, na interface água-

atmosfera, em duas lagoas salinas, representantes das tipologias verde e preta. Espera-se com isto caracterizar o balanço de GEE em ecossistemas diversos da região e indicar se o funcionamento biogeoquímico destas lagoas afeta a dinâmica dos gases em sistema aquático semelhantes.

2.2 Material e Métodos

Os fluxos difusivos de CH₄, CO₂ e N₂O foram medidos em lagoa salina do tipo verde (SV) (19°28'13"S, 56° 3'22"W) e do tipo preta (SP) (19°26'56"S, 56°7'55"W), localizadas na região da Nhecolândia, Pantanal, MS. As coletas ocorreram na estação seca, durante dois anos consecutivos (2012/2013), quando as precipitações são escassas e há frequente efloração de fitoplâncton nas salinas do tipo verde. As principais características destas lagoas estão descritas na tabela 1.

Tabela 1. Características físicas das salinas verde e preta

Salina	Área (m ²)	Profundidade	Sedimento	Condutividade elétrica (µS.cm ⁻¹)
Verde	150	0,5 – 1,0 m	Espessa camada escura de matéria orgânica	1980 - 2395
Preta	90	2,0 – 2,5 m	Arenoso com estreita camada de sedimento orgânico	1128 -4750

Fonte: Martins, 2012

As dificuldades no transpote de material até às áreas de estudo condicionaram o uso de uma metodologia experimental, em que, duas câmaras flutuantes, de 0,081 m² e 0,029 m³, equipadas com válvula para equilibrar a pressão, foram instaladas na superfície de cada lagoa. A instalação das câmaras na região central das lagoas foi feita através de um pequeno bote inflável, visando assim, evitar turbulência artificial e promover liberação acidental dos GEE. As amostragens ocorreram durante dezesseis horas seguidas (6h – 0h), com intervalos de duas horas entre as coletas. Deste modo, buscou-se representar as principais alterações climáticas diárias e possível efeito desta variabilidade temporal na dinâmica dos GEE.

A partir da instalação dos equipamentos no tempo zero (t₀), os gases foram retirados da superfície interna da câmara, em intervalos de cinco minutos, durante 20 minutos. Isto

permitiu que se calculasse as emissões de CH₄, CO₂ e N₂O em função do tempo. As amostras foram retiradas com seringas (100 mL) e acondicionadas em frascos (60 mL) para análise posterior. A concentração dos gases foi determinada em cromatógrafo Shimadzu (GC-2014) equipado com detector de captura de elétrons para analisar N₂O e de ionização de chama para quantificar CO₂ e CH₄ (Varner et al., 2002). Os fluxos dos gases foram obtidos a partir da taxa de emissão, decorrente da concentração do gás em função do tempo, e indicada por uma curva acumulada em cada horário amostrado (Lambert and Fréchette, 2005; IHA, 2010). O valor destas curvas relacionados à pressão, volume e temperatura, em cada horário, indicou a transferência de massa na interface água-atmosfera em área conhecida.

A variabilidade temporal foi observada através das variáveis ambientais, como temperatura (°C), pH, condutividade elétrica (CE) ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), oxigênio dissolvido (OD) (%), turbidez (NTU), obtidas diretamente de cada lagoa nos horários de coletas dos gases. Amostras de água foram coletadas para determinação de carbono orgânico dissolvido (DOC), carbono inorgânico dissolvido (DIC) e nitrogênio total (TN). Estas amostras foram centrifugadas no campo e preservadas sob refrigeração para análise no laboratório de Ecologia Isotópica (CENA/USP) (Tabela 2).

Tabela 2. Variáveis médias físico-químicas das salinas verde e preta

Lagoa	Temperatura (°C)	CE ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	pH	OD (%)	Turb (NTU)	DOC	DIC	TN
						$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		
SV	29,3	2573	9,4	144	833	130	388	12,88
SP	25,9	1653	9,1	91	113	34	403	2,28

CE: condutividade elétrica; OD: oxigênio dissolvido; Turb: Turbidez da água; DOC: carbono orgânico dissolvido; DIC: carbono inorgânico dissolvido; TN: nitrogênio total.

Para determinação de DOC foi utilizado 20 mL de água de cada lagoa. Estas amostras foram filtradas em membranas de fibra de vidro e reservadas em frasco de vidro sob refrigeração. A concentração de DOC foi obtida por detecção em infravermelho, através de analisador SHIMATZU TOC 5000A (Total Organic Carbon Analyser). A precisão das análises foi confirmada por curva de calibração ($R^2 = 1$). Para quantificar DIC uma alíquota de 30 mL das amostras foi filtrada em membrana de acetato de celulose (0,45 μm), para então, ser determinada por detecção em infravermelho por analisador SHIMATZU TOC 5000A (Total Organic Carbon Analyser). O mesmo volume de água das lagoas e processo de filtração foi realizado para determinação de TN, porém, adicionou às amostras 0,6 mL de ácido sulfúrico, e posterior congelamento. As análises foram realizadas em

SHIMATZU TOC- V_{CSH} com unidade de medida de nitrogênio total (NTM-1). A precisão da análise foi verificada através de uma curva de calibração com alto coeficiente de correlação ($R^2 = 0,99$).

O teste de Tukey foi realizado para avaliar as diferenças entre os fluxos de GEE de cada lagoa e os parâmetros ambientais. Para testar a relação entre os fluxos de GEE e as condições abióticas foi realizada Análise de Componentes principais (ACP). Deste modo, foi possível agrupar as variáveis em eixos não correlacionados, definidos como componentes principais 1 e 2 (CP). Estes componentes são combinações lineares das variáveis, de maneira que, as maiores variações são descritas na componente principal 1. Análise de regressão stepwise foi utilizada para selecionar as variáveis preditoras, ou seja, aquelas que no conjunto de todas as variáveis independentes, estão mais associadas às variáveis dependentes. Após determinação de correlação canônica, onde as associações mais importantes são observadas, esta análise hierarquiza, a partir da variável com maior correspondência, as demais variáveis influentes. A classificação destas associações é ranqueada pelo valor de F e sua significância ($Pr > F$).

2.3 Resultados

Os fluxos de CH_4 , CO_2 e N_2O diferiram entre as lagoas SV e SP ($p < 0,005$). A maior emissão de CH_4 ocorreu na SV, com média de $3 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, enquanto que na SP a perda líquida deste gás foi de aproximadamente $0,2 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Em relação ao fluxo de CO_2 , houve apreensão líquida média de $-0,67 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ na SV e emissão média de $7,6 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ na SP. As maiores emissões e apreensões de CO_2 ocorrerem nos períodos de maior temperatura, porém, não foi possível determinar a associação direta desta variável com os fluxos de CO_2 em ambas as salinas. Houve influxo de N_2O na SV e na SP, porém, nesta última lagoa, as apreensões ocorreram nos horários extremos, enquanto que, em grande parte dia (10h -18h) ocorreu emissão deste gás (Figura 1).

A variabilidade e magnitude dos fluxos de GEE não foram explicadas por uma variável abiótica exclusiva, apesar das diferentes visíveis entre estes parâmetros físico-químicos ($p < 0,005$). Os fluxos de GEE e as variáveis abióticas em cada lagoa foram agrupados pela Análise de Componentes Principais (ACP) (figura 2). Foi possível observar que, a variabilidade foi maior na SV do que na SP. O CP 1 (59,6%) indicou relação inversa entre os gases CO_2 e N_2O e as variáveis oxigênio dissolvido (O_2p) e temperatura (Temp), enquanto que o CH_4 esteve diretamente relacionado com grande parte das variáveis abióticas (CP 2).

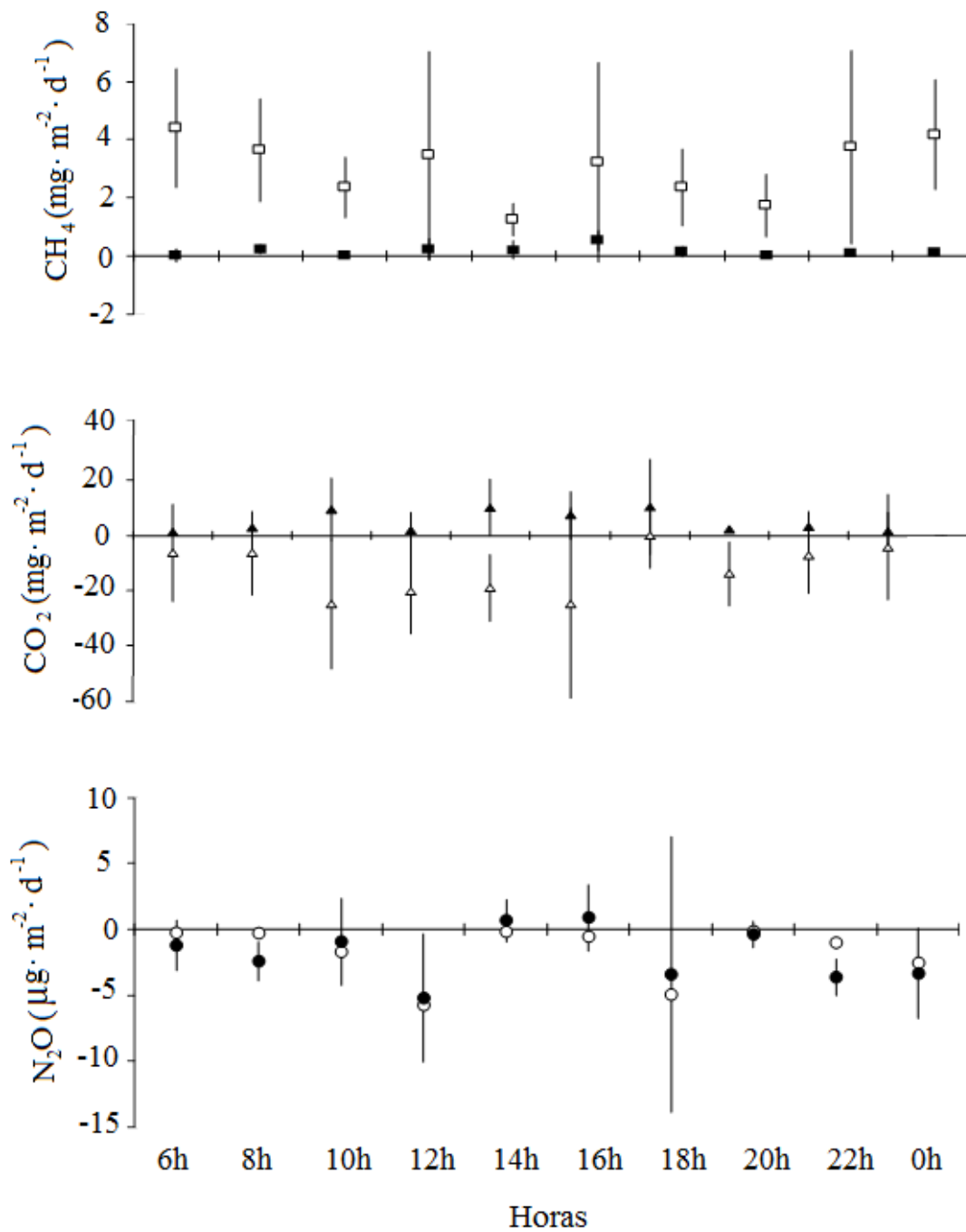


Figura 1. Fluxos de CH_4 na SP (■) e SV (□); CO_2 na SP (▲) e SV (△); N_2O na SP (●) e SV (○), durante estação seca.

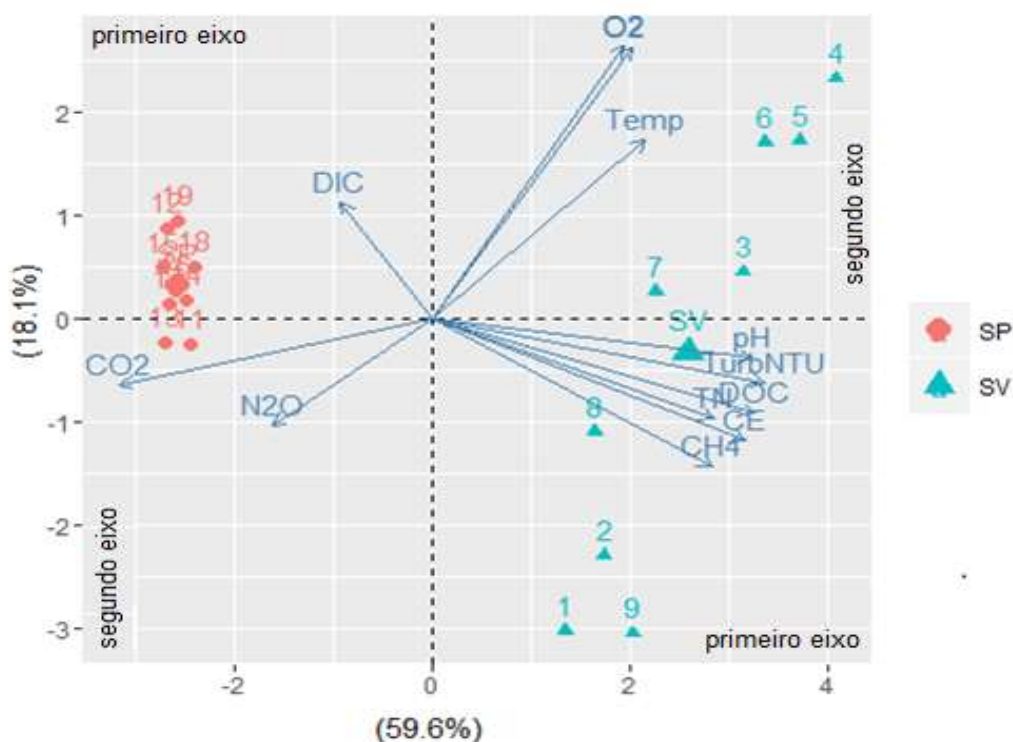


Figura 2. Ordenação por ACP das variáveis dependentes (CH_4 , CO_2 , N_2O) e das variáveis independentes (parâmetros abióticos). Os parâmetros abióticos foram temperatura (Temp), turbidez (TurbNTU), condutividade elétrica (CE), pH, oxigênio dissolvido em porcentagem (O_2p). Os conjuntos de dados foram observados nas salinas verde (SV), preta (SP).

A combinação linear entre o conjunto de dados de todos os GEE e todas as variáveis abióticas, analisada por correlação canônica, indicou que as maiores ocorreram entre CH_4 e pH (0,96) na SP, enquanto que, na SV, o pH correlacionou com todos os GEE (0,99). A hierarquização das variáveis abióticas, realizada por regressão stepwise, indicou que os parâmetros físico-químicos mais influentes sobre os GEE não são os mesmos (tab 3).

Tabela 3. Hierarquização das variáveis predictoras no balanço de GEE de lagoas salinas

Lagoa	Gás	Variável abiótica	Pr > F	Valor de F
Salina Preta	CH_4	Nitrogênio total	0,0280	7,63
	CO_2	n.s.	-	-
	N_2O	Oxigênio dissolvido (O_2)	0,0015	7,69
		Carbono orgânico dissolvido (DOC)	0,0095	14,06
Salina Verde	CH_4	Temperatura	0,0280	2,86
		Oxigênio dissolvido (O_2)	0,1127	4,11
		Nitrogênio total	0,1106	14,16
		Turbidez da água (NTU)	0,0749	5,03
		Condutividade elétrica (CE)	0,0012	149,79
	N_2O	n.s.	-	-

Não significativa (n.s.).

2.4 Discussão

O aumento da salinidade, com conseqüente elevação do pH, afeta atividades biológicas como a metanogênese em ecossistemas aquáticos (Nolla-Ardèvol et al., 2012). Em ambas as salinas o fluxo de CH₄ foi influenciado principalmente pelo pH ($p < 0,66$), porém, a emissão máxima (0,5 mg CH₄ m⁻² d⁻¹) observada na SP foi menor do que na SV (4,4 mg CH₄ m⁻² d⁻¹). Estes fluxos foram observados mesmo sob condição óxica (10,4 mg · L⁻¹), assim como foi descrito para lagoa salina semelhante na mesma região (Bergier et al., 2016), onde ocorreu perda líquida (26 mg CH₄ m⁻² d⁻¹) independente da concentração de oxigênio, comum nesta lagoa (6,8 mg · L⁻¹) (Santos; Sant'anna, 2010). A profundidade reduzida em ecossistemas aquáticos continentais favorece emissão de CH₄ por ebulição, através da qual, a maior parte de CH₄ é transferida no sistema água-atmosfera (Bastviken et al., 2004; Joyce; Jewell, 2003). Altas temperaturas e concentração de matéria orgânica, comuns nas lagoas estudadas, são importantes para os processos de produção de CH₄ (Bastviken et al., 2010), porém, não foi possível determinar os fatores que dirigem diretamente o balanço deste gás nestas salinas. Estimativas globais indicam que as transferências de CH₄ para a atmosfera a partir de ecossistemas salinos são menores do que o volume emitido por águas doces (Poffenbarger et al., 2011). A precisão destas estimativas, porém, é limitada pela reduzida quantidade de dados de águas continentais tropicais (Ortiz-Llorente; Alvarez-Cobelas, 2012), e ainda mais, de lagos salinos.

Lagoas salinas podem atuar como sumidouros significativos de CO₂, condicionado, porém, à intensidade de inundação e padrão climático local (Mitsch et al., 2013; 2010). Estes ecossistemas, além disto, apresentam altas taxas de produtividade primária (≤ 19.000 mg C m⁻² d⁻¹) (Hammer et al., 1981). Na SV há abundante população de produtores primários, como cianobactérias (Santos; Sant'anna, 2010), altas temperaturas e saturação de oxigênio. Estas condições indicam intensa atividade fotossintética e poderiam explicar a apreensão de CO₂ nesta lagoa, porém, medidas limnológicas que confirmariam este processo não foram realizadas neste estudo. Por outro lado, as emissões de CO₂ na SP indicaram que, ecossistemas estritamente relacionados como as salinas, podem atuar de maneira distinta. Os lagos salinos globais, de metabolismo heterotrófico, são fontes de GEE (Duarte et al., 2008). A SP tem comunidade microbiana mais estruturada, sem predomínio de cianobactérias (Silva, 2015), como observado na tipologia verde, porém, não foi possível determinar se estas características favorecem as emissões observadas.

O fluxo de N₂O foi o menor entre os GEE estimados. A amplitude reduzida de emissões e apreensões não revelou a contribuição específica destas lagoas para o balanço

deste gás. A produção de N₂O ocorre sob anoxia durante o processo de desnitrificação (Santoro, 2010), contudo, esta condição foi oposto ao observado nas salinas estudadas. Organismos anaeróbios facultativos, dos domínios Bactéria, Archae e Eukaria participam da ciclagem de nitrogênio em ecossistemas aquáticos (Francis et al., 2007) e possuem representantes nas lagoas salinas (Silva, 2015). Ainda assim, não foi possível assumir que a população anaróbias facultativas conduza a dinâmica de N₂O na SV e SP.

Referências

- Almeida TIR, Calijuri MDC, Falco PB *et al.* 2011. Biogeochemical processes and the diversity of Nhecolândia lakes, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **83**(2):391-407.
- ANA. 2004. Programa de Ações Estratégicas para o Gerenciamento Integrado do Pantanal e Bacia do Alto Paraguai. Relatório Final. TODA Desenho & Arte Ltda, Brasília, Brasil.
- Bastviken D, Cole J, Pace M *et al.* 2004. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate. *Global biogeochemical cycles*, **18**(4):1-12.
- Bastviken D, Santoro AL, Marotta H *et al.* 2010. Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: toward more comprehensive sampling. *Environmental Science & Technology*, **44**(14):5450-5455.
- Bergier I, Krusche A, Guérin F. 2016. Alkaline lake dynamics in the Nhecolândia landscape. In: *Dynamics of the Pantanal Wetland in South America* (eds Bergier I, Assine ML), pp. 145-161. Springer International Publishing, Cham, Alemanha.
- Christensen TR. 2011. Wetlands. In: *Methane and Climate Change* (eds Reay D, Smith P, van Amstel A) PP. 27-42. Earthscan Ltd, London, UK.
- Costa M, Telmer KH, Evans TL *et al.* 2015. The lakes of the Pantanal: inventory, distribution, geochemistry, and surrounding landscape. *Wetlands Ecology and Management*, **23**:19–39.

- Duarte CM, Prairie YT, Montes C *et al.* 2008. CO₂ emissions from saline lakes: A global estimate of a surprisingly large flux. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, **113**(G04):1-7.
- Francis CA, Beman JM, Kuypers MM. 2007. New processes and players in the nitrogen cycle: the microbial ecology of anaerobic and archaeal ammonia oxidation. *The ISME Journal*, **1**(1):19-27.
- Furian S, Curti ERM, Parizotto TM *et al.* 2013. Chemical diversity and spatial variability in myriad lakes in Nhecolandia in the Pantanal wetlands of Brazil. *Limnology and Oceanography*, **58**(6):2249-2261
- Guérin F, Abril G, Burban, B *et al.* 2006. Methane and carbon dioxide emissions from tropical reservoirs: Significance of downstream rivers. *Geophysical Research Letters*, **33**(21):1-6.
- Hammer UT. 1981. Comparative Study of Primary Production and Related Factors in Four Saline Lakes in Victoria, Australia. *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie*, **66**(5):701–743.
- IHA. 2010. GHG Measurement Guidelines for Freshwater Reservoirs. Association (IHA), London, United Kingdom.
- IPCC. 2014. 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands (eds Hiraishi T, Krug T, Tanabe K, Srivastava N, Baasansuren J, Fukuda M, Troxler TG). IPCC, Switzerland.
- Joyce J, Jewell PW. 2003. Physical Controls on Methane Ebullition from Reservoirs and Lakes. *Environmental & Engineering Geoscience*, **IX** (2): 167–178.
- Joye SB, Connell TL, Miller LG *et al.* 1999. Oxidation of ammonia and methane in an alkaline, saline lake. *Limnology and Oceanography*, **44**(1):178–188.
- Lambert M, Fréchette JL. 2005. Analytical techniques for measuring fluxes of CO₂ and CH₄ from hydroelectric reservoirs and natural water bodies. In: *Greenhouse Gas Emissions—Fluxes and Processes* (eds Tremblay A, Varfalvy L, Roehm C, Garneau M). pp. 37-60. Springer, Berlin, Alemanha.

- Martins ERC. 2012. Tipologia de lagoas salinas no pantanal da Nhecolândia (MS). Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, Brasil.
- Mitsch WJ, Bernal B, Nahlik AM *et al.* 2013. Wetlands, carbon, and climate change. *Landscape Ecology*, **28**(4):583-597.
- Mitsch WJ, Nahlik A, Wolski P *et al.* 2010. Tropical wetlands: seasonal hydrologic pulsing, carbon sequestration, and methane emissions. *Wetlands Ecology and Management*, **18**(5):573-586.
- Mourão GM. 1989. Limnologia comparativa de três lagoas (duas “baías” e uma “salina”) do Pantanal da Nhecolândia, MS. Dissertação. Universidade Federal de São Carlos, Brasil.
- Nolla-Ardèvol V, Strous M, Sorokin DY *et al.* 2012. Activity and diversity of haloalkaliphilic methanogens in Central Asian soda lakes. *Journal of Biotechnology*, **161**(2):167-173.
- Oliveira APG, Ribeiro AA, Wassouf Junior ER, Souza GF de, Bernadi I, Penatti NC, Almeida TIR de, Paranhos Filho AC. (2011). Uso de Sensoriamento Remoto na quantificação das lagoas do Pantanal da Nhecolândia, Mato Grosso do Sul. **XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 3695-3702
- Ortiz-Llorente MJ, Alvarez-Cobelas M. 2012. Comparison of biogenic methane emissions from unmanaged estuaries, lakes, oceans, rivers and wetlands. *Atmospheric Environment*, **59**:328-337.
- Poffenbarger HJ, Needelman BA, Megonigal JP. 2011. Salinity Influence on Methane Emissions from Tidal Marshes. *Wetlands*, **31**(5):831–842.
- Santoro AL. 2010. Nitrificação e Desnitrificação em Lagoas Costeiras Tropicais. Dissertação. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.
- Santos KRDS, Sant'anna CL. 2010. Cyanobacteria from different types of lakes ("salina", "salitrada" and "baía") representative of the Pantanal da Nhecolândia, MS, Brazil. *Brazilian Journal of Botany*, **33**(1):61-83.
- Silva GM. 2015. Diversidade taxonômica e funcional de comunidades microbianas em lagoas salino-alcálinas do Pantanal brasileiro. Dissertação. Universidade de São Paulo, Brasil.

Sjögersten S, Black CR, Evers S *et al.* 2014. Tropical wetlands: A missing link in the global carbon cycle? *Global Biogeochemical Cycle*, **28**:1371–1386.

Varner RK, Keller M, Robertson JR *et al.* 2002. Experimentally induced root mortality increased nitrous oxide emission from tropical soil. *Geophysical Research Letters*, **29**(3):1–7.

3 VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL NA EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM LAGOAS SALINAS NO PANTANAL DA NHECOLÂNDIA, MS

Resumo

Estimativas climáticas globais indicam que o Pantanal é uma das maiores fontes de metano (CH₄) do planeta, porém, o balanço de carbono (C) em diferentes ecossistemas aquáticos desta região não foi inteiramente descrito. Na sub-região da Nhecolândia ocorre o maior número de lagoas de água doce e, exclusivamente, lagoas salinas, com extensa gama de concentração iônica e diversidade microbológica. As salinas são discriminadas em tipologia verde e preta devido suas diferenças de composição e o funcionamento. Visando integrar as medidas de GEE, provenientes destes ecossistemas, ao balanço regional de C, propôs-se quantificar os fluxos de metano, gás carbônico e óxido nitroso em diferentes salinas verdes, salina preta e lagoa de água doce. Estas estimativas representaram a variabilidade espacial da região. As coletas ocorreram em diferentes estações climáticas para descrever o efeito das variações temporais sobre o balanço regional de GEE. As salinas verdes, onde há maior abundância de fitoplâncton, apresentaram as maiores e mais variáveis emissões de GEE entre as salinas estudadas. Observou-se também variabilidade temporal, entre salinas intimamente relacionadas. Isto aponta a complexidade destes ecossistemas e a necessidade de medidas pontuais frequentes para identificar os fatores que regulam as emissões e apreensões líquidas de GEE observadas nestas lagoas.

Palavras-chave: Fixação biológica; Desnitrificação; Balanço de carbono, Áreas úmidas

Abstract

Global climate estimates indicate that the Pantanal is one of the largest sources of methane (CH₄) on the planet, but the carbon balance (C) in different aquatic ecosystems in this region has not been fully described. In the Nhecolândia sub-region there are the largest number of freshwater lagoons and exclusively saline lagoons with an extensive range of ionic concentration and microbiological diversity. The salinas are discriminated in green and black typology due to their differences in composition and functioning. Aiming to integrate GHG measures from these ecosystems, the C regional balance was proposed to quantify methane, carbon dioxide and nitrous oxide fluxes in different green saline, black saline and freshwater lagoons. These estimates represented the spatial variability of the region. The collections occurred in different climatic seasons to describe the effect of temporal variations on the regional balance of GHG. The green salinas, where there is greater abundance of phytoplankton, presented the largest and most variable GHG emissions among the studied salt flats. Temporal variability was also observed, among closely related salinas. This points to the complexity of these ecosystems and the need for frequent timely measures to identify the factors that regulate GHG emissions and net seizures observed in these lagoons.

Keywords: Biological fixation; Denitrification; Carbon balance, Wetlands

3.1 Introdução

Áreas úmidas tropicais emitem grande quantidade de gases de efeito estufa (GEE) (Panneer *et al.*, 2014). Há, porém, grandes incertezas, nestes ecossistemas, sobre o volume destas emissões e os fatores que as regulam, devido ausência de medidas diretas e sistemáticas (Sjögersten *et al.*, 2014; Kirschke, 2013). O Pantanal é a maior área úmida tropical do planeta e uma das maiores fontes de CH₄ global (IPCC, 2013; POR, 1995). Apesar disto, suas contribuições para o balanço regional de carbono (C) não estão plenamente descritas (Bergier *et al.*, 2016; Peixoto *et al.*, 2015).

A Nhecolândia é uma das maiores e mais diversas sub-regiões do Pantanal (ANA, 2003). Possui águas superficiais com intensa concentração iônica, alta condutividade elétrica (500 – 71.400 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) e pH (7 – 10) (Furian *et al.*, 2013; Almeida *et al.*, 2011). O sistema lêntico nesta região é composto por lagoas rasas (≤ 2 m) ocupadas por espécies extremófilas, especialmente cianobactérias. O fitoplâncton abundante em salinas do tipo verde altera a composição destas águas, principalmente no período seco, quando ocorre frequente eflorescência (Costa *et al.*, 2015; Santos, 2013; Santos; Sant'anna, 2010). Esta condição distingue as salinas em tipologia verde, onde há predominância de cianobactérias diazotróficas e metabolismo aquáticos variável e preta, onde a comunidade microbológica tem maior similitude e a variabilidade diurna é reduzida (Martins *et al.*, 2012).

As lagoas salinas, aparentemente, produzem mais CH₄ do que ecossistemas de água doce (Bergier *et al.*, 2016). Apesar disto, as estimativas de emissão destas lagoas podem ser limitadas pela grande variabilidade espaço-temporal observada entre as salinas (Silva, 2015; Medina-Júnior; Rietzler, 2005). O limitado conhecido sobre o balanço de CH₄ e gás carbônico (CO₂) é ainda maior para a dinâmica de óxido nitroso (N₂O), dada a ausência de estimativas das emissões deste gás.

Os modelos climáticos são limitados em mensurar emissão de GEE a partir de pequenas superfícies e topografias irregulares, como as lagoas na Nhecolândia, aumentando assim, as incertezas no balanço global de carbono (C) (Dai *et al.*, 2012; Poffenbarger *et al.*, 2011). Ademais, há grande desconhecimento sobre a participação de lagos salinos globais como fontes ou sumidouros de GEE, dificultando, inclusive, as tomadas de decisões para preservação de áreas úmidas (IPCC, 2013). As indefinições sobre balanço de C em áreas úmidas e a efetiva contribuição destas áreas ao cenário climático terrestre revelam este desconhecimento (Raymond *et al.*, 2013; Jennerjah, 2012; Joyce; Jewell, 2003; Casper *et al.*, 2000). Considerando este complexo cenário e visando aumentar a compreensão sobre o papel de pequenos ecossistemas aquáticos para o balanço regional de GEE, este trabalho foi

proposto, assumindo que, em regiões tropicais, a transferência de massa no sistema água-atmosfera é mais complexa e variável do que tem sido considerado. Espera-se assim que, a caracterização da variabilidade e as medidas da contribuição de ambientes específicos aumente a precisão de modelos climáticos regionais e globais (Kirschke, 2013). Assim, mediu-se emissões difusivas de CH₄, gás carbônico (CO₂) e óxido nitroso (N₂O) em lagoas salinas de tipologia verde e preta e em ecossistema de água doce. Os fluxos foram obtidos em períodos de seca e cheia para descrever as possíveis alterações na dinâmica dos GEE na região.

3.2 Material e Métodos

Este estudo foi conduzido na sub-região da Nhecolândia, Pantanal, MS, Brasil. Os fluxos de CH₄, CO₂ e N₂O foram obtidos em duas lagoas salinas do tipo verde (salina do meio – SM e salina grande – SG), uma salina preta (SP) e uma lagoa de água doce (baía). As coletas ocorreram na estação úmida (SM) e seca (SM, SG, SP, baía) durante dois anos consecutivos (2014, 2015). Assim, pode-se representar os possíveis efeitos climáticos sobre o funcionamento destas lagoas (Fig. 1).

A estação seca habitualmente ocorre entre junho e outubro, com precipitação média de 776 mm, enquanto que, a estação úmida acontece entre novembro e maio com precipitação aproximada de 1175 mm (Rodela; Queiroz Neto, 2006). Houve pouca variação de precipitação diária, velocidade do vento e radiação solar, em ambas as estações, durante os períodos de coletas (INMET, 2016). As medidas de variáveis abióticas indicaram as alterações químicas das águas e foram realizadas em cada lagoa simultaneamente às coletas dos GEE, com medidores portáteis de pH (Hanna Instruments, modelo HI 98140), condutividade elétrica (CE) e temperatura (°C) ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$) (Hanna Instruments, modelo HI 9838), turbidez da água (Hanna Instruments, modelo HI 98703) e oxigênio dissolvido (Hanna Instruments, modelo HI 9148).

As coletas no período úmido (dezembro de 2014) ocorreram sob condições de menor frequência de precipitação local (INMET, 2016). A menor oferta de chuvas mantém as concentrações iônicas das salinas altas. As medidas na estação seca ocorreram em julho (SM e baía) e setembro (SG e SP). A SM apresentou moderada concentração de fitoplâncton, enquanto que a baía estava com o volume de água reduzido (< 0,3 m) e com grande abundância de plantas aquáticas e pequenos vertebrados (não identificados). O monitoramento nas SP e SG ocorreu sob intensas chuvas, porém, na SG houve intensa efloração de fitoplâncton. Oposto ao observado na SP, onde as condições físico-químicas permaneceram semelhantes a outros períodos. As

condições químicas das águas descrevem a diversidade química das lagoas, nas duas estações, durante o estudo (Tab. 1).

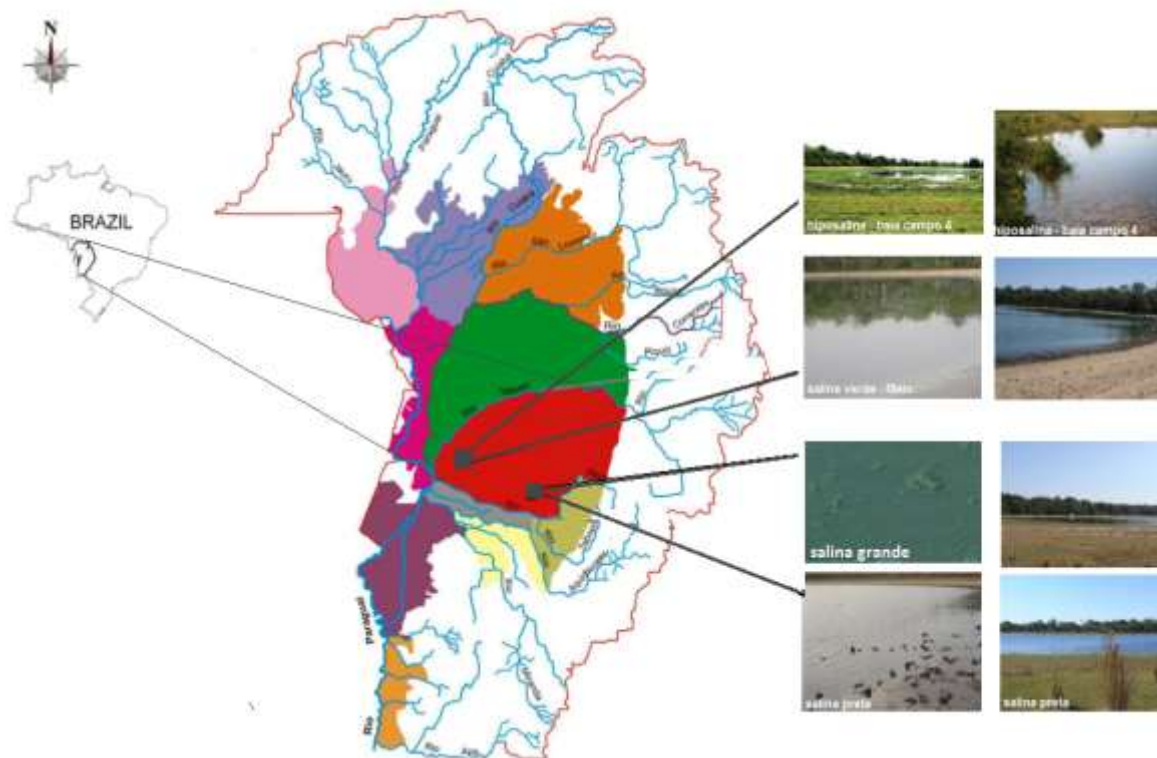


Figura 1. Localização das áreas estudadas, em ordem de cima para baixo – baía, salina do meio, salina grande, salina preta, no período seco (esquerda) e úmido (direita).

Tabela 1. Caracterização das salinas do Meio (SM), grande (SG), preta (SP) e baía.

Estações	Úmido		Seco		
	SM ^b	SM ^b	SG ^a	SP ^a	Baía
Localização	18°58'29"S; 56°38'47"W	19°27'3"S; 56°7'42"W	19°26'56"S; 56°7'55"W	18°19'S; 56°39'W	
Área (m ²)	100	320	90	Indeterminado	
†Profund Máx. (m)	1,10	0,8 – 1,0	2,5	Indeterminado	
*CE (µS·cm ⁻¹)	2.131	7.575	31.533	1.417	594
*pH	9,4	9,4	10,3	9,3	7,6

Fontes: ^aMOURÃO, 1989; ^bMARTINS, 2012; *Os dados representam valores médios de cada variável durante as coletas. CE: condutividade elétrica. †Profundidade máxima.

Os fluxos difusivos dos GEE foram coletados com seis câmaras ($0,081 \text{ m}^2$ e $0,029 \text{ m}^3$) equipadas com flutuadores e saída para equilibrar a pressão interna (IHA, 2010). Estes equipamentos foram distribuídos sobre a superfície das lagoas como transecto, visando retratar possível variabilidade espacial dentro de cada lagoa (Peixoto *et al.*, 2015; Casper, 2000) (Fig. 2).



Figura 2. Delineamento amostral para coleta de gases nas lagoas do pantanal da Nhecolândia

As câmaras flutuantes foram movimentadas lentamente sobre a superfície das lagoas para evitar desprendimento de gás a partir do sedimento. Os gases acumulados na superfície interna de cada câmara foram retirados com seringa (100 mL) e injetados com agulha em frascos (60 mL) evacuados previamente. As amostras foram analisadas em cromatógrafo Shimadzu (GC-2014) equipado com detector de captura de elétrons e de ionização de chama para análise de CH_4 , CO_2 e N_2O (Varner *et al.*, 2002). As taxas de emissão foram determinadas pela a concentração do gás em função de tempo determinado (minutos), representada por uma curva linear. Os fluxos dos GEE foram calculados, então, a partir desta taxa de emissão em área e volume e temperatura conhecidos (Abril *et al.* 2005; IHA, 2010).

Os fluxos de GEE foram considerados como variáveis dependentes dos parâmetros abióticos. Para descrever as associações entre os atributos dependentes e independentes utilizou-se Análise de Componentes Principais (ACP). Apesar do objetivo principal desta ferramenta estatística ser a redução da perda de informações importantes, o reduzido número de amostras comprometeu parte das análises. A correlação canônica entre os fluxos de GEE e os parâmetros foi testada para indicar as maiores associações entre estes conjuntos de dados. Análise de regressão stepwise foi utilizada para classificar as variáveis que, no conjunto total de atributos, estivessem mais associadas aos gases. A significância destas associações é indicada pelos valores de F e $\text{Pr} > F$.

3.3 Resultados

Entre as salinas, houve maior efloração (Eflor.) de fitoplâncton na SG. A lagoa de água doce, porém, intensamente ocupada por macrófitas aquáticas (m.a.), apresentou maior concentração de DOC do que em a salina (SM) monitorada no mesmo período (Tab. 2).

Tabela 2. Valores médios das variáveis bióticas e abióticas nos períodos secos e úmido.

Lagoas	SM*	SM	SG	SP	Baía
Ocupação	Eflor. Moderada	Eflor.Intensa	Indistinta	m.a. Intensa	
Temperatura (°C)	29,5	27,5	30,4	20,6	28,8
CE ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	2.131	7.575	31.533	1.417	594
pH	9,4	9,4	10,3	9,3	7,6
OD (%)	82	48	136	59	21
Turbidez (NTU)	16	*	2.475	130	-
DOC (mg·L ⁻¹)	*	16,5	*	*	43,5
DIC (mg·L ⁻¹)	*	96,7	*	*	50,8
TN (mg·L ⁻¹)	*	6,9	*	*	4,1

*Amostragem no período úmido apenas na SM; demais medidas foram obtidas no período seco. DOC: carbono orgânico dissolvido; DIC: carbono inorgânico dissolvidos; NT: nitrogênio total.

O balanço de CH₄, CO₂ e N₂O variou grandemente entre as lagoas (p<0,005). Entre todas as lagoas, as maiores emissões de CH₄ ocorreram em água doce (baía) comparada às salinas, independente das estações climáticas. Entre as salinas, os maiores fluxos de CH₄ foram observados na SG, apesar da grande concentração de oxigênio dissolvido na água, possivelmente decorrente da efloração de fitoplâncton. A SP, por outro lado, foi o ecossistema com menor variabilidade química diária e menor emissão de CH₄. Apesar dos maiores fluxos deste gás ocorrerem nas lagoas com as maiores concentrações de DOC e TN, não foi possível determinar relação direta entre o fluxo do gás e estas variáveis (Tab 2; Tab. 3). As emissões de CO₂ ocorreram na baía. Entre as salinas, a SM emitiu oito vezes mais do que a SP na mesma estação. Inverso às demais salinas, a SG atuou como sumidouro de CO₂, mesmo exposta às condições climáticas semelhantes às demais, provavelmente devido atividade fotossintética mais intensa. Este resultado sugere que ecossistemas estritamente relacionados, como as salinas, podem divergir na contribuição para o balanço regional de GEE. Os fatores que podem ter dirigido distintamente estas lagoas, porém, não foram determinados. A SM que foi fonte de CO₂ na

estação seca, tornou-se sumidouro no período úmido, apesar de não haver diferenças climáticas marcantes que respondessem por esta mudança na dinâmica do gás. As variáveis OD e CE, assim como o CO₂, também variaram visivelmente entre os períodos climáticos, apesar da semelhança entre as condições ambientais.

Tabela 3. Fluxos médios diários de CH₄, CO₂, N₂O em salinas do tipo verde (meio, grande) e preta, e lagoa de água doce (baía) nas estações úmida e seca

Lagoas	CH ₄ (mg m ⁻² d ⁻¹)	CO ₂ (mg m ⁻² d ⁻¹)	N ₂ O (µg m ⁻² d ⁻¹)
Salina do Meio [†]	0,49	-3,59	-2,9
Salina do Meio**	1,0	176	-
Salina Grande**	335	-28,6	-9,3
Salina Preta**	0,05	21,4	4,3
Baía**	476	363	-

[†]Estação úmida; ** Estação seca.

O fluxo de N₂O foi divergente entre as salinas, visto que, houve apreensões líquidas nas lagoas do tipo verde e emissão na salina do tipo preta (Tab. 3). Nestas lagoas foram identificados diferentes genes que participam do ciclo do N, de maneira que, nas salinas verdes há predominância de fixação de N atmosférico (N₂) e nas salinas pretas os principais processos são mineralização e desnitrificação. Apesar da aparente relação entre os processos de ciclagem do N e o fluxo de N₂O, não foi possível confirmar se a fixação biológica de N e os processos decorrentes responderam pela emissão e apreensão do gás (Fig. 3).

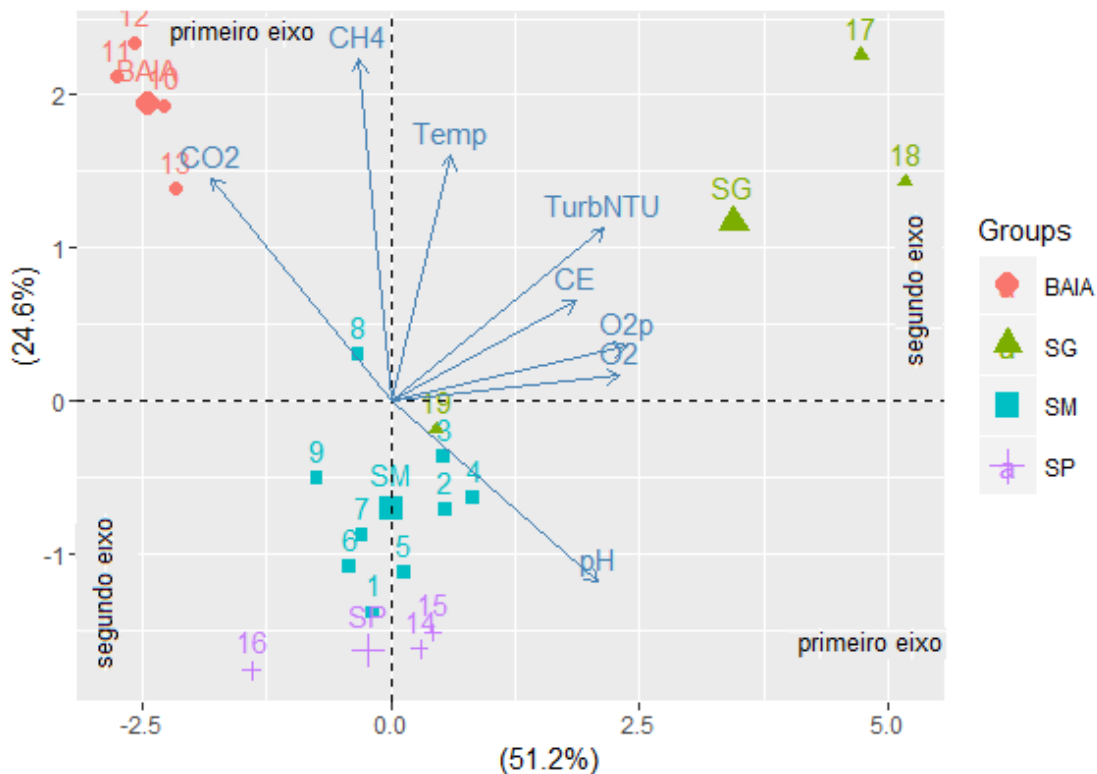


Figura 3. Ordenação por ACP das variáveis dependentes (CH_4 , CO_2 , N_2O) e das variáveis independentes (parâmetros abióticos). Os parâmetros abióticos foram temperatura (Temp), turbidez (TurbNTU), condutividade elétrica (CE), pH, oxigênio dissolvido em mg/ L (O_2) e porcentagem (O_2p). Os conjuntos de dados foram observados nas salinas grande (SG), meio (SM), preta (SP) e lagoa de água doce (baia)

A análise de correlação canônica indicou que a variável independente mais associada aos fluxos de GEE foi o pH (0,99). A partir desta variável preditora, aplicou-se a análise de regressão stepwise para hierarquizar as maiores associações entre os fluxos de GEE e as condições abióticas, em todas as lagoas (Tab 4).

Tabela 4. Hierarquização das variáveis abióticas no balanço de GEE de lagoas salinas e de água doce

Gás	Variável abiótica	Pr > F	Valor de F
CH_4	pH	0,0249	6,05
	Condutividade elétrica (CE)	0,0001	54,53
	Turbidez da água (NTU)	0,0965	3,15
CO_2	pH	0,0001	34,09
	Condutividade elétrica (CE)	0,1172	2,74
N_2O	Temperatura	0,0022	17,85
	Turbidez da água (NTU)	0,0720	4,29
	pH	0,0030	19,77

3.4 Discussão

Os maiores fluxos de CH₄ e CO₂ foram obtidos na baía. Ecossistemas de água doce do Pantanal, temporários e permanentes, com recarga hídrica periódica, foram apontados como significativas fontes de CH₄ e CO₂ para a atmosfera (Silva *et al.*, 2016; Bergier *et al.*, 2016; Peixoto *et al.*, 2015; Bastviken *et al.*, 2010; Marani; Alvalá, 2007). Os fluxos, porém, nestes ecossistemas são menores do que os observados na baía estudada. A emissão de CH₄ na SM variou entre 0,49 e 1 mg·m⁻²·d⁻¹, porém, medidas anteriores nesta mesma lagoa indicaram emissões entre 0 - 26 mg·m⁻²·d⁻¹ (Bergier *et al.*, 2016) (Tab. 5).

Tabela 5. Emissões médias diárias de metano (CH₄) em lagoas salinas e baía comparadas às estimativas descritas em estudos anteriores em ecossistemas semelhantes na Nhecolândia e outras regiões do Pantanal

Estação	Tipologia	Lagoa	Transporte	CH ₄ (mg·m ⁻² ·d ⁻¹)		
Úmida	Verde	SM	Difusivo	0,49	Estudo atual	
				1,0	Estudo atual	
		13		Bergier <i>et al.</i> , 2016		
		335		Estudo atual		
	Preta	SP		0,05	Estudo atual	
		Água doce		Água doce	Difusivo	476
	16,3					Silva <i>et al.</i> , 2016
	53,0					Bergier <i>et al.</i> , 2016
	2,3					Peixoto <i>et al.</i> , 2015
	Água doce	Água doce		Ebulitivo	11,8	Bastviken <i>et al.</i> , 2010
5,0			Marani; Alvalá, 2007*			
149			Silva <i>et al.</i> , 2016*			
				118	Bastviken <i>et al.</i> , 2010	
				153 ^a	Marani & Alvalá, 2007	

*Lagoas permanentes e temporárias no pantanal do Abobral com água no período úmido e vegetação rasteira no período seco.

Os sedimentos de lagoas do Pantanal têm significativo potencial para produção de CH₄, devido, principalmente o aporte de material orgânico e o caráter químico destes ambientes (Conrad *et al.*, 2011; Medina-Júnior; Rietzler, 2005). As principais características atribuídas às fontes de CH₄ global, tais como reduzida profundidade, pH básico, altas

temperaturas e microbiota especializada (Dadheech *et al.*, 2013; Jennerjahn, 2012; Bastviken *et al.*, 2004), descrevem os principais aspectos das lagoas estudadas, especialmente as salinas. Apesar das áreas de estudo apresentarem os mesmos atributos de reconhecidas fontes de GEE, não foi possível determinar quais destes fatores foram responsáveis pelo balanço dos GEE em todas as lagoas.

O fluxo total de CH₄ é composto principalmente por gases transportados do sedimento para a atmosfera na forma ebulitiva (Joyce; Jewell, 2003; Casper *et al.*, 2000). Este mecanismo de transferência de massa da água para a atmosfera responde pelas maiores variações nas medidas do gás (Bastviken *et al.*, 2004). No Pantanal, os fluxos ebulitivos foram considerados os maiores responsáveis pelas emissões de CH₄ e variabilidade espacial, em água doce e salina (Silva *et al.*, 2016; Peixoto *et al.*, 2015; Bergier *et al.*, 2016). Durante o transporte de CH₄, através da coluna d'água, há perda do gás, apesar de grande parte ser preservada e atingir a atmosfera (Delsontro *et al.*, 2011). O volume dissolvido na água sofre oxidação aeróbia (Keller; Stallard, 1994). Sugere-se que este processo pode ter favorecido as altas emissões de CH₄ nas lagoas com saturação de oxigênio.

A produtividade primária líquida e a concentração de clorofila *a* são consideradas parâmetros reguladores da emissão de CH₄ (Xing *et al.*, 2005). A produtividade do sistema é favorecida por altas temperaturas, insolação e disponibilidade de nutrientes (Tranvik *et al.*, 2009). As lagoas salinas reúnem todas estas características (Santo; Sant'anna, 2010; Medina-Júnior; Rietzler, 2005), e estes podem ter contribuído para as emissões de CH₄, especialmente nos períodos secos, quando a atividade biológica se intensifica. As lagoas com os maiores fluxos de CH₄, baía e SG, apresentaram altas concentrações de DOC, porém, sugere-se que estes compostos orgânicos não tenham relação direta com a produção deste gás (XING *et al.*, 2005). As lagoas estudadas reúnem as condições favoráveis às emissões ebulitivas, porém, os dados obtidos não foram suficientes para explicar a dinâmica do CH₄ em qualquer lagoa estudada.

Há grande divergência espaço-temporal na transferência de massa do ambiente aquático para o atmosférico no Pantanal (Silva *et al.*, 2016; Rust, 2015; Marani; Alvalá, 2007). Assumindo que a variabilidade espacial fosse mais significativa, propôs-se que as medidas de GEE nestes ecossistemas fossem pontuais e sem comparação (Bastviken *et al.*, 2010), contudo, observou-se que, em ambientes rasos como estes, a maior variação dos fluxos de CH₄ é temporal (Peixoto *et al.*, 2015). Esta diversidade na dinâmica dos GEE foi observada entre ecossistemas estritamente relacionados como as salinas e entre as estações

climáticas em uma mesma lagoa (salina do meio). Este cenário descreve a complexidade desta região e a necessidade de ampliar o monitoramento em diferentes escalas e abordagens.

Os lagos salinos globais são considerados sumidouros de CO₂ devido diferença de concentração do gás entre o ambiente aquático e o atmosférico (Balmer; Downing, 2011). Apesar disto, os mesmos ecossistemas podem torna-se importantes fontes de GEE, visto que, o carbono inorgânico apreendido é convertido a matéria orgânica, e após degradação, converte-se em CH₄ e CO₂ (Sherman *et al.*, 2012). Este cenário foi observado na SM, que atuou como sumidouro no período úmido e fonte na estação seca. A SG, lagoa com a maior abundância de fitoplâncton, apresentou intensa apreensão líquida de CO₂ (Tab. 6).

Tabela 6. Emissão média de CO₂ e N₂O em lagoa de água doce e salinas.

Lagoas	Fluxos	CO ₂ (mg m ⁻² d ⁻¹)	Referências
Água doce	Difusivo	1798	Bergier <i>et al.</i> , 2016**
		363	Estudo atual, 2016
Salina Grande		-28	Estudo atual, 2016
Salina do Meio		-498	Bergier <i>et al.</i> , 2016
		176	Estudo atual, 2016
Salina Preta		21,4	Estudo atual, 2016
		N ₂ O (µg m ⁻² d ⁻¹)	
Salina do Meio		-2,9	Estudo atual, 2016
Grande		-9,3	Estudo atual, 2016
Preta		4,3	Estudo atual, 2016

O aumento do pH e da salinidade da água dificultam as emissões de CO₂ (Balmer; Downing, 2011; Therrien *et al.*, 2005; Haynes; Hammer, 1978), enquanto que, a oferta de nutrientes, altas temperaturas, intensa floração de fitoplâncton e concentração de DIC, aumentam a produtividade dos ecossistemas aquáticos e favorecem a emissão de CO₂ (Marotta *et al.*, 2012; Medina-Júnior; Rietzler, 2005; Hammer, 1981). O principal mecanismo de transferência de CO₂ para a atmosfera ocorre por difusão (Casper *et al.*, 2000). A ausência de estabilidade e misturas da coluna d'água, devido efeito dos ventos também contribuem para a transferência de massa entre os sistemas água-atmosfera (Roland *et al.*, 2010; Keller; Stallard, 1994).

Houve grande apreensão líquida de N₂O nas salinas do tipo verde, onde há abundante comunidade fitoplanctônica, porém, a perda de N₂O, como resultado da desnitrificação não foi proporcional ao volume apreendido. A fixação de N₂O pode estar indicando que a demanda de N para a produtividade primária dos lagos é maior do que as concentrações disponíveis (Howarth *et al.*, 1988). As variáveis abióticas mais significativas para a ciclagem deste gás são a concentração de nitrogênio total no sedimento e temperatura da água (Liu *et al.*, 2013). As salinas verdes atuaram como sumidouros de N₂O, especialmente a SG, lagoa com a maior eflorescência fitoplanctônica. A salinidade tende a aumentar a oxidação da amônia (NH₃⁺), ofertando N para o fitoplâncton (Joye *et al.*, 1999) e aumentando a produção de N₂O (Liu *et al.*, 2011). Apesar disto, emissões de N₂O em lagos salinos de regiões temperadas são reduzidas (Law *et al.*, 1992; DeLaune *et al.*, 1983). Ainda que ecossistemas rasos, expostos a maior radiação e temperatura estejam mais susceptíveis à produção deste gás (Liu *et al.*, 2011; Law *et al.*, 1992), não foi possível determinar se houve padrão de emissão ou apreensão deste gás nas lagoas estudadas.

Referências

- Abril G, Guérin F, Richard S *et al.* (2005) Carbon dioxide and methane emissions and the carbon budget of a 10-years old tropical reservoir (Petit-Saut, French Guiana). *Global Biogeochemical Cycles*, **19**(4), 1-16.
- Almeida TIR, Calijuri MDC, Falco PB *et al.* (2011). Biogeochemical processes and the diversity of Nhecolândia lakes, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **83**(2), 391-407.
- ANA (GEF/PNUMA/OEA) (2003) Implementação de Práticas de Gerenciamento Integrado de Bacia Hidrográfica para o Pantanal e Bacia do Alto Paraguai. Elaboração do Diagnóstico Analítico do Pantanal e Bacia do Alto Paraguai – DAB. Relatório Final. Brasília, Brasil.

- Balmer MB, Downing JA (2011) Carbon dioxide concentrations in eutrophic lakes: undersaturation implies atmospheric uptake. *Inland Waters* **1**, 125-132.
- Bastviken D, Santoro AL, Marotta H et al. (2010) Methane Emissions from Pantanal, South America, during the Low Water Season: Toward More Comprehensive Sampling. *Environmental Science & Technology*, **44**, 5450–5455.
- 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*, **18**(4), 1-12.
- Bergier I, Krusche A, Guérin F (2016) Alkaline Lake Dynamics in the Nhecolândia Landscape (eds. Bergier I, Assine ML), pp. 145-161. In: *Dynamics of the Pantanal Wetland in South America*, The Handbook of Environmental Chemistry, Springer International Publishing Switzerland.
- Bergier I, Silva APS, Monteiro H et al. (2016) Methane and Carbon Dioxide Dynamics in the Paraguay River Floodplain (Pantanal) in Episodic Anoxia Events. (eds. Bergier I, Assine ML), pp. 145-161. In: *Dynamics of the Pantanal Wetland in South America*, The Handbook of Environmental Chemistry, Springer International Publishing Switzerland.
- Casper P, Maberly SC, Hall GH et al. (2000) Fluxes of methane and carbon dioxide from a small productive lake to the atmosphere. *Biogeochemistry*, **49**, 1-19.
- Conrad R, Noll M, Claus P et al. (2011) Stable carbon isotope discrimination and microbiology of methane formation in tropical anoxic lake sediments. *Biogeosciences*, **8**, 795–814.

- Costa M, Telmer KH, Evans TL, Almeida TIR, Diakun MT (2015) The lakes of the Pantanal: inventory, distribution, geochemistry, and surrounding landscape. *Wetlands Ecology and Management*, **23**, 19–39.
- Dadheech PK, Glöckner G, Casper P et al. (2013) Cyanobacterial diversity in the hot spring, pelagic and benthic habitats of a tropical soda lake. *FEMS Microbiology Ecology*, **85**, 389–40.
- Dai Z, Trettin CC, Li C et al. (2012) Effect of assessment scale on spatial and temporal variations in CH₄, CO₂, and N₂O fluxes in a forested wetland. *Water, Air, & Soil Pollution*, **223**(1), 253-265.
- DeLaune RD, Smith CJ & Patrick WH Jr (1983) Nitrogen losses from a Louisiana Gulf Coast salt marsh. *Estuarine and Coastal Shelf Science* 17: 133–141
- DelSontro T, Kunz MJ, Kempter T et al. (2011) Spatial Heterogeneity of Methane Ebullition in a Large Tropical Reservoir. *Environmental Science & Technology*, **45**, 9866–9873.
- Furian S, Curti ERM, Parizotto TM et al. (2013) Chemical diversity and spatial variability in myriad lakes in Nhecolandia in the Pantanal wetlands of Brazil. *Limnology and Oceanography*, **58**(6), 2249-2261.
- Hammer UT (1981) A Comparative Study of Primary Production and Related Factors in Four Saline Lakes in Victoria, Australia. *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie*, **66**, 701–743.
- Haynes RC, Hammer UT (1978) The Saline Lakes of Saskatchewan IV. Primary Production by Phytoplankton in Selected Saline Ecosystems. *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie*, **63**, 337–351.

- Howarth RW, Marino R, Cole JJ (1988) Nitrogen fixation in freshwater estuarine, and marine ecosystems. 2. Biogeochemical control. *Limnology and Oceanography*, **33**, 688 – 701.
- IHA. 2010. GHG Measurement Guidelines for Freshwater Reservoirs. Association (IHA), London, United Kingdom.
- INMET (2016) Anomalias de Precipitação. <http://www.inmet.gov.br/html/clima.php?lnk=/html/clima/anomalias/index.html>. Acesso em novembro de 2016.
- IPCC (2014). 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands (eds Hiraishi T, Krug T, Tanabe K, Srivastava N, Baasansuren J, Fukuda M, Troxler TG). IPCC, Switzerland.
- Jennerjahn TC (2012) Biogeochemical response of tropical coastal systems to present and past environmental change. *Earth-Science Reviews*, **114**(1–2), 19–41.
- Joyce J, Jewell PW (2003) Physical Controls on Methane Ebullition from Reservoirs and Lakes *Environmental & Engineering Geoscience*, **IX**(2), 167–178.
- Joye SB, Connell TL, Miller LG *et al.* 1999. Oxidation of ammonia and methane in an alkaline, saline lake. *Limnology and Oceanography*, **44**(1), 178–188.
- Keller M, Stallard RF (1994) Methane emission by bubbling from Gatun Lake, Panama. *Journal of Geophysical Research*, **99**, 8307–9319.
- Kirschke S, Bousquet P, Ciais P *et al.* (2013) Three decades of global methane sources and sinks. *Nature Geoscience*, **6**(10), 813-823.
- Law, C. S., Rees, A. P., & Owens, N. J. P. (1992). Nitrous oxide: estuarine sources and atmospheric flux. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **35**(3), 301-314.

- Liu L, Xu M, Lin M, Zhang X. 2013. Spatial variability of greenhouse gas effluxes and their controlling factors in the Poyang Lake in China. *Polish Journal of Environmental Studies*, **22**(3), 749-758.
- Liu Y, Zhu R, Ma D et al. (2011) Temporal and spatial variations of nitrous oxide fluxes from the littoral zones of three alga-rich lakes in coastal Antarctica. *Atmospheric Environment*, **45**(7), 1464-1475.
- Marani L, Alvala PC (2007) Methane emissions from lakes and floodplains in Pantanal, Brazil. *Atmospheric Environment* 41(8), 1627–1633.
- Marotta H, Ricci RMP, Sampaio PL et al. (2012) Variações de curto prazo do metabolismo e da pco₂ na lagoa Rodrigo de Freitas: elevado dinamismo em um ecossistema tropical urbano. *Oecologia Australis*, **16**(3), 391-407.
- Martins ERC (2012) Tipologia de lagoas salinas no pantanal da Nhecolândia (MS). Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, Brasil.
- Medina-Júnior PB, Rietzeler AC (2005) Limnological study of a Pantanal saline lake. *Brazilian Journal of Biology*, **65**, 651–659.
- Mourão GM (1989) Limnologia comparativa de três lagoas (duas “baías” e uma “salina”) do Pantanal da Nhecolândia, MS. Dissertação. São Carlos.
- Panneer SB, Natchimuthu S, Arunachalam L, Bastviken D (2014) Methane and carbon dioxide emissions from inland waters in India—implications for large scale greenhouse gas balances. *Global change biology*, **20**(11), 3397-3407.

- Peixoto RB, Machado-Silva F, Marotta H et al. (2015) Spatial versus Day-To-Day Within-Lake Variability in Tropical Floodplain Lake CH₄ Emissions – Developing Optimized Approaches to Representative Flux Measurements. *PLoS One*, **10**(4), e0123319.
- Poffenbarger HJ, Needelman BA, Megonigal JP (2011) Salinity Influence on Methane Emissions from Tidal Marshes. *Wetlands*, **31**(5), 831–842.
- Por FD (1995) The Pantanal of Mato Grosso (Brazil). World's largest wetlands. Monography, 73. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands.
- Raymond, P. A., Hartmann, J., Lauerwald, R., Sobek, S., McDonald, C., Hoover, M., ... & Kortelainen, P. (2013). Global carbon dioxide emissions from inland waters. *Nature*, 503(7476), 355-359.
- Rodela LG (2006) Unidades de Vegetação e Pastagens Nativas no Pantanal da Nhecolândia, Mato Grosso do Sul. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, Brasil.
- Roland F, Vidal L. O, Pacheco FS et al (2010). Variability of carbon dioxide flux from tropical (Cerrado) hydroelectric reservoirs. *Aquatic Sciences*, **72**(3), 283-293.
- Rust F (2015). **Fluxo de CO₂ e CH₄ em uma lagoa tropical (Pantanal, Brasil) com gradiente de turbidez**. Dissertação, Juiz de Fora, Brasil.
- Santos KR de S (2013) **Estudos de desenvolvimento, moleculares e do potencial biotecnológico em cepas de cianobactérias provenientes de lagoas salinas do Pantanal da Nhecolândia, MS, Brasil: *Anabaenopsis elenkinii* (Nostocales) e *Arthrospira platensis* (Oscillatoriales)**. Tese de Doutorado. Instituto de Botânica da Secretaria de Estado do Meio Ambiente, Brasil.

- Santos KRDS, Sant'anna CL. 2010. Cyanobacteria from different types of lakes ("salina", "salitrada" and "baía") representative of the Pantanal da Nhecolândia, MS, Brazil. *Brazilian Journal of Botany*, **33**(1), 61-83.
- Silva GM da (2015) Diversidade taxonômica e funcional de comunidades microbianas em lagoas salino-alcálicas do Pantanal brasileiro. Dissertação, Piracicaba, Brasil.
- Silva MG da, Alvalá PC, Marani L, Ferreira WJ (2016) Análise da influência de parâmetros ambientais no fluxo de metano em áreas alagáveis e lagoas permanentes na região do Rio Abobral, no Pantanal, Brasil. *Revista Ambiente e Água*, **11**(2), 327-338.
- Sjögersten S, Black CR, Evers S et al. (2014) Tropical wetlands: A missing link in the global carbon cycle? *Global Biogeochemical Cycles*, **28**(12), 1371–1386.
- Therrien J, Tremblay A, Jacques RB (2005) CO₂ emissions from semi-arid reservoirs and natural aquatic ecosystems. In: *Greenhouse Gas Emissions—Fluxes and Processes*. pp. 233-250. Springer, Berlin Heidelberg, Alemanha.
- Tranvik LJ, Downing JA, Cotner JB et al. (2009) Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. *Limnology and Oceanography*, **54**(6part2), 2298-2314.
- Varner RK, Keller M, Robertson JR et al. (2002) Experimentally induced root mortality increased nitrous oxide emission from tropical soil. *Geophysical Research Letters*, **29**, 1–7.
- Xing Y, Xie P, Yang H et al. (2005) Methane and carbon dioxide fluxes from a shallow hypereutrophic subtropical Lake in China, *Atmospheric Environment*, **39**, 5532-5540.

4 CONCLUSÃO FINAL

O estudo em lagoas do Pantanal confirmou a diversidade química e biológica, já descrita, destes ambientes. Descobriu-se que ecossistemas estritamente relacionados, como estes, podem contribuir diferentemente para o balanço regional de gases. Isto aponta para a necessidade de maior representação das emissões de GEE, retratando, ainda mais, a diversidade espacial e temporal, próprios do Pantanal. A dinâmica dos gases variou na mesma lagoa em estações climáticas distintas, mesmo com aparente similitude entre os períodos. Tal condição sugere que o funcionamento dos ecossistemas aquáticos pode ser mais sensível às pequenas alterações ambientais. Estes resultados indicam que a variabilidade temporal é tão significativa quanto a variabilidade espacial e esta diversidade de funcionamento e transferência de massa do sistema aquático para terrestre deve ser integrada aos modelos de previsão climática. Por isto, futuros estudos desta natureza devem incluir metodologias mais amplas que representem o funcionamento individual dos ecossistemas aquáticos, aumentando a compreensão sobre a dinâmica dos gases em cada ambiente, para que seja possível expandir este entendimento para a região. O aumento destas estimativas para o Pantanal permitirá a construção de modelos climáticos regionais mais precisos e validará a efetiva contribuição da maior área úmida continental para o balanço global climático e de emissões gasosas.