

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
CAMPUS SOROCABA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOTECNOLOGIA E MONITORAMENTO
AMBIENTAL

JOÃO PAULO MARIANO GODINHO

**CARACTERIZAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES DE METANO (CH₄)
EM LAGOAS DO PANTANAL**

Sorocaba

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
CAMPUS SOROCABA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOTECNOLOGIA E MONITORAMENTO
AMBIENTAL

JOÃO PAULO MARIANO GODINHO

**CARACTERIZAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES DE METANO (CH₄)
EM LAGOAS DO PANTANAL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia e Monitoramento Ambiental da Universidade Federal de São Carlos, *Campus* Sorocaba, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Biotecnologia e Monitoramento Ambiental.

Orientação: Profa. Dra. Janaina Braga do Carmo

Coorientação: Prof. Dr. Ricardo Hideo Taniwaki

Financiamento: FAPESP (nº 2018/10290-0)

Sorocaba

2024

João Paulo Mariano, Godinho

Caracterização e quantificação das emissões de Metano (CH₄) em lagoas do Pantanal / Godinho João Paulo Mariano -- 2024.
135f.

Tese de Doutorado - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba

Orientador (a): Janaina Braga do Carmo

Banca Examinadora: Pedro José Ferreira Filho, Raquel Fernanda Salla Jacob, Cristiano Alberto de Andrade, Ana Paula Contador Packer

Bibliografia

1. Gases do Efeito Estufa. 2. Mudanças Climáticas. 3. Ecologia de Ecossistemas. I. João Paulo Mariano, Godinho. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano -
CRB/8 6979

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
CAMPUS SOROCABA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOTECNOLOGIA E MONITORAMENTO
AMBIENTAL

JOÃO PAULO MARIANO GODINHO

**CARACTERIZAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES DE METANO (CH₄)
EM LAGOAS DO PANTANAL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia e Monitoramento Ambiental da Universidade Federal de São Carlos, *Campus* Sorocaba, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Biotecnologia e Monitoramento Ambiental.

Orientação: Profa. Dra. Janaina Braga do Carmo

Coorientação: Prof. Dr. Ricardo Hideo Taniwaki

Financiamento: FAPESP (nº 2018/10290-0)

Orientadora

Profa. Dra. Janaina Braga do Carmo

UFSCar - Sorocaba

Coorientador

Prof. Dr. Ricardo Hideo Taniwaki

UFABC - Santo André

Examinador

Prof. Dr. Pedro José Ferreira Filho

UFSCar - Sorocaba

Examinador

Prof. Dr. Cristiano Alberto de Andrade

Embrapa - Meio Ambiente

Examinadora

Profa. Dra. Raquel Fernanda Salla Jacob

UFSCar - Sorocaba

Examinadora

Profa. Dra. Ana Paula Contador Packer

Embrapa - Meio Ambiente

AGRADECIMENTO

Primeiramente, agradeço a Criação, conhecida pela nossa cultura como Deus, que se manifesta com inúmeros nomes e formas, indo muito além da *Laniakea* ao *quark*, cujo é incompreensível às nossas capacidades cognitivas, mas que deu a oportunidade desse *Arranjo Molecular* de ser um Ecólogo e viver nessa majestosa improbabilidade estatística, chamado planeta Terra.

Agradeço a minha Família, principalmente meu pai Elias (*in memoriam*), minha mãe Rosa e meus irmãos por todo apoio e liberdade para eu acreditar nos meus ideais e principalmente por todo Amor Incondicional recebido desde início dessa existência.

Agradeço aos meus amigos dessa jornada: Willian Scagion, Maísa Campos, Marcos Antonio Campos de Barros (*in memoriam*), Carlos Gardenali, Eduardo Rossitti, Natália Zanetti, Minoru Beltrão, Carlos e Eunice Durão, Swami Ishwarananda Giri, Paramahansa Prajnanananda. a todos que passaram pela minha vida, mostrando-me a direção para ser uma pessoa melhor e que, direta ou indiretamente, contribuíram para este trabalho.

Agradeço e reverencio todos os Professores(as) que eu tive em todas as etapas do meu aprendizado. Especialmente, a Profa. Dra. Janaina por orientar esse trabalho, pela paciência, liberdade e por acreditar em mim. Também, meu agradecimento é para o Prof. Dr. Ricardo por me ajudar me apoiando com todas as análises laboratoriais e de gabinete desse estudo e todos os membros da banca que avaliaram esse trabalho na qualificação e defesa.

Agradeço ao apoio financeiro da FAPESP através do processo nº 2018/10290-0, à UFSCar, à UFABC, ao PPGBMA, ao grupo do Laboratório BioClima, aos coordenadores do Projeto Temático (Processo nº 2016/14227-5): Prof. Dr. Melfi e Prof. Dra. Célia, aos administradores da Fazenda São Roque por fornecerem todo o suporte e execução desse estudo e todas as pessoas que ajudaram na coleta dos dados em campo. Sem ajuda de todos essa tese não existiria.

Agradeço sinceramente a todos vocês por estarem presentes em diferentes momentos da minha vida, contribuindo com suas peculiaridades e perspectivas únicas, enriquecendo-a de maneira imensurável. Com cada um de vocês, aprendi que todo ser humano merece o direito a um lugar no mundo, onde tenha espaço para seguir suas próprias escolhas, alimentando a criatividade que nos torna diferente de outros seres. Afinal, mesmo com a distância, nossos laços de amizade permanecem eternizados!

मूल श्लोकः

न जायते म्रियते वा कदाचि
न्नायं भूत्वा भविता वा न भूयः।
अजो नित्यः शाश्वतोऽयं पुराणो
न हन्यते हन्यमाने शरीरे ॥2.20॥

*na jāyate mriyate vā kadācin
nāyaṃ bhūtvā bhavitā vā na bhūyaḥ |
ajo nityaḥ śāśvato 'yaṃ purāṇo
na hanyate hanyamāne śarīre ||*

“Para a alma, não há nascimento nem morte. Tendo sido, nunca
deixa de ser. Ela não nasce, vive para sempre, é incréda e eterna.

Não é destruída, mesmo quando o corpo morre”

Bhagavad Gita – 2.20

RESUMO

GODINHO, João Paulo Mariano Godinho Caracterização e quantificação das emissões de Metano (CH₄) em lagoas do Pantanal. 2024. 135f. Tese (Doutorado em Biotecnologia e Monitoramento Ambiental) – Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2024.

Esta tese fornece evidências que os fluxos de metano (CH₄) em ecossistemas lênticos do Pantanal são intensamente regulados por combinação de fatores ambientais, ecológicos e climáticos, com variação espacial e temporal. Eventos climáticos atípicos, particularmente secas e ondas de calor observadas em 2020, aumentaram as emissões de CH₄, enfatizando a sensibilidade desses ecossistemas às mudanças climáticas. A análise confirmou a influência determinante da composição de matéria orgânica e das condições físico-químicas na regulação dos fluxos de CH₄, onde as maiores emissões de metano (CH₄) foram registradas nos sedimentos marginais das lagoas de água doce (68,23 mg CH₄ m⁻² dia⁻¹), indicando a influência da composição do sedimento e da presença de matéria orgânica nessas emissões. Um índice de monitoramento de gases do efeito estufa (IMGEE) foi desenvolvido para compreender a variação espacial e temporal das emissões, destacando maiores índices nas lagoas de água doces. As emissões de CH₄ estão diretamente relacionadas as concentrações de carbono orgânico total (TOC) do *compartimento*, no grupo das lagoas doces em *transition*, onde ocorreu a maior emissão (27,78 mg CH₄ m⁻² dia⁻¹), também ocorre a maior concentração de TOCs (8,1 mg m⁻² mg⁻¹) e no grupo das lagoas salino-alcálicas, a maior emissão (5,59 mg CH₄ m⁻² dia⁻¹) foi observada em *aquatic*, mesmo *compartimento* em que a concentração de TOC_w foi mais alta (586 mg/L). Foi observado aumento nas emissões em 2020, tanto nas lagoas de água doce quanto nas salino-alcálicas, com aumentos respectivos de 834% e 631% em relação a 2019. Em um contexto mais amplo, durante a intensificação da seca no Pantanal em 2020, uma lagoa salino-alcálica em processo de secamento apresentou aumento massivo de 5.423% nas emissões de CH₄. Esses resultados ressaltam a importância crítica dos ecossistemas lênticos no ciclo global de carbono e a urgência de estratégias de biomonitoramento e gestão para mitigar seus impactos negativos, contribuindo para políticas de conservação e práticas de gestão sustentável em face das mudanças climáticas.

Palavras-chave: gases do efeito estufa, mudanças climáticas, ecologia de ecossistemas, ecossistemas lênticos e limnologia.

ABSTRACT

GODINHO, João Paulo Mariano Godinho. Characterization and quantification of methane (CH₄) emissions in Pantanal lakes. 2024. 135p. Thesis (PhD in Biotechnology and Environmental Monitoring) – Federal University of São Carlos, Sorocaba, 2024.

This thesis provides evidence that methane (CH₄) fluxes in lentic ecosystems of the Pantanal are heavily regulated by a combination of environmental, ecological, and climatic factors, with significant spatial and temporal variation. Atypical weather events, particularly droughts and heatwaves observed in 2020, increased CH₄ emissions, emphasizing the sensitivity of these ecosystems to climate change. The analysis confirmed the decisive influence of organic matter composition and physicochemical conditions in regulating CH₄ fluxes, with the highest methane emissions recorded in the marginal sediments of freshwater lagoons (68.23 CH₄ m⁻² day⁻¹), indicating the influence of sediment composition and organic matter presence on these emissions. A greenhouse gas monitoring index (IMGEE) was developed to understand spatial and temporal emission variations, highlighting higher indices in freshwater lagoons. CH₄ emissions are directly related to total organic carbon (TOC) concentrations in the compartment; in the transitional freshwater lagoon group, where the highest emission (27.78 mg CH₄ m⁻² day⁻¹) occurred, the highest TOCs concentration was found (8.1 mg m⁻² mg⁻¹), and in the saline-alkaline lagoon group, the highest emission (5.59 mg CH₄ m⁻² day⁻¹) was observed in the aquatic compartment, where the TOC_w concentration was highest (586 mg/L). An increase in emissions was observed in 2020, both in freshwater and saline-alkaline lagoons, with respective increases of 834% and 631% compared to 2019. In a broader context, during the intensification of the Pantanal drought in 2020, a drying saline-alkaline lagoon showed a massive increase of 5.423% in CH₄ emissions. These results underscore the critical importance of lentic ecosystems in the global carbon cycle and the urgency of biomonitoring and management strategies to mitigate their negative impacts, contributing to conservation policies and sustainable management practices in the face of climate change.

Keywords: greenhouse gases, climate change, ecosystem ecology, lentic ecosystems.

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO | 13 |
| 1.2 HIPÓTESES DE TRABALHO | 14 |
| 1.2.1 HIPÓTESE PRINCIPAL..... | 14 |
| 1.2.1.1 HIPÓTESES SECUNDÁRIAS | 15 |
| 1.3 OBJETIVOS PROPOSTOS | 15 |
| 1.3.1 OBJETIVO PRINCIPAL DO ESTUDO | 15 |
| 1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 16 |
| 2 CAPÍTULO 1 - EMISSÕES E CONSUMO DE METANO (CH₄) EM LAGOAS TROPICAIS: FATORES E PROCESSOS ENVOLVIDOS | 17 |
| 2.1 INTRODUÇÃO | 18 |
| 2.1.1 O CRESCENTE AUMENTO DE CH ₄ NA ATMOSFERA | 20 |
| 2.1.2 PRINCIPAIS FONTES DE EMISSÃO E CONSUMO DE CH ₄ | 21 |
| 2.1.3 CICLO BIOGEOQUÍMICO DO CH ₄ EM ECOSSISTEMAS LÊNTICOS | 24 |
| 2.1.4 DISTRIBUIÇÃO MUNDIAL DOS ESTUDOS SOBRE AS EMISSÕES DE CH ₄ EM ECOSSISTEMAS LÊNTICOS | 26 |
| 2.1.5 OS PANTANAIS | 27 |
| 2.1.6 O PANTANAL DA NHECOLÂNDIA | 29 |
| 2.1.7 OS ECOSSISTEMAS LÊNTICOS DA NHECOLÂNDIA | 31 |
| 2.1.8 O PANTANAL AMEAÇADO..... | 35 |
| 2.1.9 LAGOAS TROPICAIS COMO MODELO PARA BIOMONITORAMENTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS | 37 |
| 2.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 39 |
| REFERÊNCIAS | 40 |
| 3 CAPÍTULO 2 - PADRÕES ESPACIAIS E TEMPORAIS DOS FLUXOS DE METANO (CH₄) EM ECOSSISTEMAS LÊNTICOS NO PANTANAL DA NHECOLÂNDIA | 56 |
| RESUMO | 56 |
| 3.1 INTRODUÇÃO | 57 |
| 3.2 MATERIAL E MÉTODOS | 59 |
| 3.2.1 ÁREA DE ESTUDO | 59 |
| 3.2.2 O FLUXO DE CH ₄ DOS DIFERENTES <i>COMPARTIMENTOS</i> | 61 |
| 3.2.3 VARIAÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DOS FLUXOS DE CH ₄ | 64 |

| | |
|--|------------|
| 3.2.4 ANÁLISE DOS DADOS | 66 |
| 3.3 RESULTADOS | 67 |
| 3.3.1 VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DOS FLUXOS DE CH ₄ EM LAGOAS DE ÁGUA DOCE | 67 |
| 3.3.2 VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DOS FLUXOS DE CH ₄ EM LAGOAS DE ÁGUA SALINO-ALCALINA | 70 |
| 3.3.3 MAGNITUDE DA VARIAÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DOS FLUXOS DE CH ₄ EM TODAS AS LAGOAS | 73 |
| 3.4 DISCUSSÃO | 74 |
| 3.5 CONCLUSÃO | 79 |
| REFERÊNCIAS | 80 |
| 4 CAPÍTULO 3 - AUMENTO DE EMISSÕES DE METANO (CH₄) EM LAGOAS DO PANTANAL DURANTE O SECAMENTO | 91 |
| RESUMO..... | 91 |
| 4.1 INTRODUÇÃO | 92 |
| 4.2 MATERIAL E MÉTODOS | 94 |
| 4.2.1 ÁREA DE ESTUDO | 94 |
| 4.2.2 COLETA DE CH ₄ | 97 |
| 4.2.3 COLETA DE AMOSTRAS PARA MEDIDAS DE C E DOS PARÂMETROS AMBIENTAIS | 100 |
| 4.2.4 MEDIÇÕES AMBIENTAIS DAS LAGOAS | 100 |
| 4.2.5 CARBONO NOS <i>COMPARTIMENTOS</i> AMBIENTAIS..... | 100 |
| 4.2.6 O FLUXO DE CH ₄ NOS <i>COMPARTIMENTOS</i> AMBIENTAIS | 101 |
| 4.2.7 ANÁLISE DOS DADOS | 102 |
| 4.3 RESULTADOS | 103 |
| 4.3.1 EFEITOS ESPACIAIS, TEMPORAIS E AMBIENTAIS NOS ECOSISTEMAS LÊNTICOS..... | 103 |
| 4.3.2 VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DO TOC..... | 107 |
| 4.3.3 VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DO CH ₄ | 110 |
| 4.3.4 VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DO CH ₄ EM UMA LAGOA SECANDO | 113 |
| 4.4 DISCUSSÃO | 116 |
| 4.5 CONCLUSÃO..... | 122 |
| REFERÊNCIAS | 123 |

| | |
|------------------------------------|------------|
| 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 132 |
| 6 CONCLUSÃO GERAL | 134 |
| 7 ESTUDOS FUTUROS | 135 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação do trabalho

A pesquisa dessa *tese* focou na caracterização e quantificação dos fluxos totais de CH₄ em diferentes ecossistemas lênticos no Pantanal, região pouco explorada nesse aspecto. A *tese* propõe nova abordagem metodológica para compreender os padrões espaciais, processos temporais e fatores ambientais associados a regulação dos fluxos totais de CH₄, utilizando como exemplo os diferentes tipos de ecossistemas lênticos encontrados no Pantanal da Nhecolândia, Aquidauana-MS. Essa metodologia visa preencher lacunas de conhecimento sobre as emissões dos gases do efeito estufa (GEE) em lagoas tropicais e proporcionar base sólida para as análises subsequentes.

O *Capítulo 1* fornece uma visão geral do tema, destacando a crescente preocupação sobre as emissões de CH₄ na atmosfera e enfatizando a relevância dos ecossistemas lênticos como importantes fontes e sumidouros desse gás. Nesse capítulo inicial, são exploradas as complexidades inerentes à emissão e consumo de CH₄, ressaltando a escassez de pesquisas nas áreas tropicais. Adicionalmente, são examinadas as particularidades do Pantanal, principalmente a sub-região da Nhecolândia, e os fatores físicos e ambientais que fazem dessa região ser importante fonte de emissão de GEE. Esta revisão tem como objetivo fornecer visão abrangente da área de estudo deste doutorado, bem como identificar lacunas e destacar a importância desta pesquisa. Esse esforço visa promover o monitoramento efetivo das emissões e consumo de CH₄ nas lagoas tropicais, visando construir modelos robustos para estabelecer estratégias de enfrentamento às mudanças climáticas.

O *Capítulo 2* concentra-se nas caracterizações e quantificações do CH₄ em cinco ecossistemas lênticos específicos, duas lagoas de água doce e três de água salino-alcálicas. Os fluxos totais de CH₄ são explorados considerando variações espaciais e temporais, nelas e entre elas. Essa etapa foi crucial para construir um entendimento detalhado dos fluxos totais de CH₄ em cada uma das lagoas identificando os padrões e fatores determinantes das emissões e consumo. Na qual foi proposto o índice de monitoramento de GEE. Esse estudo é de significativa importância para compreender as dinâmicas dos diferentes tipos de ecossistemas lênticos tropicais e seu papel nos fluxos totais de CH₄.

O *Capítulo 3* aborda como as variáveis ambientais e o impacto das mudanças climáticas interferem nos fluxos totais de CH₄ e nas concentrações de carbono (C) dissolvido na água, no sedimento e solo adjacentes desses diferentes ecossistemas lênticos divididos em dois grupos, um de água doce e outro de água salino-alcálica. Dada a crescente preocupação global com as alterações climáticas, esse capítulo examina como os eventos climáticos extremos e mudanças a curto prazo podem influenciar as emissões totais de CH₄ nas lagoas do Pantanal. Essa análise proporciona dados essenciais para antecipar e mitigar os potenciais efeitos das mudanças climáticas nessa zona úmida tropical.

A pesquisa, ao integrar esses três capítulos, contribui para preencher uma visão abrangente das emissões e consumo de CH₄ em lagoas tropicais. A metodologia proposta, a criação de índices, as caracterizações detalhadas e a análise das mudanças climáticas fornecem base sólida para compreender a dinâmica desses fluxos em um contexto regional único e pouco explorado. Portanto, essa *tese* reforça a necessidade de biomonitoramento ambiental contínuo e de um entendimento aprofundado das respostas dos ecossistemas lênticos tropicais às variações climáticas e às intervenções humanas. Estes esforços são indispensáveis para prever e mitigar os impactos das mudanças climáticas em uma das maiores e mais biodiversas zonas úmidas do mundo.

1.2 Hipóteses de trabalho

1.2.1 Hipótese principal

A hipótese desta tese é que a variabilidade espacial e temporal nos fluxos totais de CH₄ em lagoas de água doce e salino-alcálica no Pantanal é regulada pela composição dos teores de carbono na matéria orgânica (MO) e pelas condições físico-químicas da água, dos sedimentos marginais e dos solos adjacentes. Esses diferentes ambientes de interface água-solo serão tratados como *compartimentos* ambientais. Além disso, a hipótese sugere que eventos climáticos atípicos, como secas severas e aumento de temperatura, aumentam as emissões de CH₄ nesses compartimentos, indicando sensibilidade acentuada dos ecossistemas lênticos às mudanças climáticas."

1.2.1.1 Hipóteses secundárias

Hipótese da Variação Espacial: As emissões de CH₄ variam entre diferentes *compartimentos* ambientais da mesma lagoa, logo existe diferença nos fluxos totais de CH₄ nelas e entre elas.

Hipótese da Variação Temporal: As emissões totais de CH₄ nas lagoas demonstram flutuações de um ano para o outro, correlacionando-se com eventos climáticos atípicos e mudanças ambientais, tais como secas e altas temperaturas. Esta hipótese propõe que os anos com condições climáticas extremas resultarão em maiores emissões de CH₄.

Hipótese Ambiental do Carbono: As emissões totais de CH₄ são influenciadas pelos teores de C na água, no sedimento e solos adjacentes. Esta hipótese sugere que áreas com maior concentração de teores de C apresentarão emissões mais elevadas de CH₄.

Hipótese de Sensibilidade Climática: Os ecossistemas lênticos tropicais são particularmente responsivos a mudanças climáticas, e esta sensibilidade é refletida nas emissões de CH₄. Essa hipótese enfatiza que as mudanças climáticas, como o aumento da temperatura e alterações no regime de chuvas, podem intensificar as emissões de CH₄ nos diferentes ecossistemas lênticos.

1.3 Objetivos propostos

1.3.1 Objetivo Principal do Estudo

Identificar os principais padrões espaciais, processos temporais e fatores ambientais reguladores dos fluxos totais de CH₄, mediante a quantificação das emissões e consumos de CH₄ na água, sedimentos marginais e solos adjacentes em diferentes ecossistemas lênticos do Pantanal da Nhecolândia-MS. Assim, essa *tese* investiga e analisa a variabilidade espacial, temporal e ambiental dos fluxos de CH₄ em diferentes ecossistemas lênticos, com objetivo de compreender como os fatores ambientais e ecológicos locais, bem como eventos climáticos extremos, influenciam e determinam as emissões totais de CH₄ em diferentes lagoas tropicais. O estudo enfatiza a importância do biomonitoramento ambiental contínuo e busca proporcionar uma compreensão detalhada de como os ecossistemas lênticos tropicais

respondem às variações climáticas. Assim, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias eficazes de gestão e conservação desses ecossistemas frente às mudanças globais.

1.3.2 Objetivos Específicos

Caracterização e Quantificação dos fluxos totais de CH₄: Caracterizar e quantificar os fluxos totais de CH₄ nos diferentes *compartimentos* ambientais das lagoas de água doce e salino-alcalina, identificando as maiores emissões e seus fatores contribuintes, como a composição da matéria orgânica, presente dissolvida na água, no sedimento marginais e solos adjacentes desses ecossistemas lênticos.

Análise da Variabilidade Espacial e Temporal: Analisar como as emissões e o consumo de CH₄ variam entre os diferentes *compartimentos* ambientais dentro de cada lagoa e ao longo do tempo, para entender a dinâmica e a complexidade dos processos ecológicos nos ecossistemas lênticos tropicais.

Investigação dos Teores de Carbono nas Emissões e Consumo: Examinar a influência dos teores de C presente na água, nos sedimentos marginais e nos solos adjacentes sobre as emissões e o consumo de CH₄ nos diferentes ecossistemas lênticos. Este objetivo visa compreender como os teores do C em diferentes compartimentos do ecossistema afetam diretamente as variações nas emissões e consumo de CH₄ em lagoas tropicais

Impacto das Mudanças Climáticas: Avaliar o impacto de eventos climáticos atípicos, como secas severas e elevação de temperatura, sobre as emissões de CH₄, investigando a sensibilidade desses ecossistemas lênticos às mudanças climáticas.

2 CAPÍTULO 1 - EMISSÕES E CONSUMO DE METANO (CH₄) EM LAGOAS TROPICAIS: FATORES E PROCESSOS ENVOLVIDOS

RESUMO

Esse *capítulo* fornece visão geral sobre a origem das emissões e consumo de metano (CH₄) em lagoas, destacando sua importância e discutindo como as mudanças climáticas podem aumentar dessas emissões, particularmente em lagoas tropicais. Esses ecossistemas lênticos representam fontes naturais significativas de CH₄, com emissões ocorrendo principalmente no sedimento anóxico através do processo de metanogênese realizado por bactérias metanogênicas. Além disso, as lagoas também podem atuar como sumidouros de CH₄, devido à atividade de bactérias metanotróficas. No entanto, a pesquisa sobre os fluxos de CH₄ está predominantemente concentrada em regiões de altas latitudes, deixando uma lacuna considerável nas investigações voltadas para as lagoas nas baixas latitudes. Ao contrário das lagoas temperadas e polares, as lagoas tropicais apresentam dinâmica mais complexa, influenciada por variações ambientais sazonais como temperatura, precipitação e evapotranspiração ao longo do ano. Com área de 24 mil km², a sub-região da Nhecolândia no Pantanal oferece um cenário ideal para investigar as emissões de CH₄ em ecossistemas lênticos tropicais. Atualmente, o Pantanal enfrenta ameaças como secas, ondas de calor e intervenções humanas, tornando a compreensão e monitoramento das emissões de CH₄ ainda mais crucial para a conservação desse importante bioma.

Palavras-chave: gases do efeito estufa; ecossistemas lênticos; wetlands; Pantanal; mudanças climáticas

2.1 INTRODUÇÃO

O metano (CH_4) é o segundo gás de efeito estufa antrópico mais relevante, respondendo por 20% do total dos gases de efeito estufa (GEE). Com potencial de aquecimento global 84-87 vezes maior que o do dióxido de carbono (CO_2) ao longo de 20 anos (GWP20), o CH_4 é o gás orgânico mais abundante na atmosfera terrestre (IPCC, 2021). A presença desse gás é crucial na regulação do clima global, influenciando principalmente a temperatura da Terra (Allen *et al.*, 2023; Etminan *et al.*, 2016; Myhre *et al.*, 2007). Portanto, é fundamental compreender as fontes de emissões e sumidouros de CH_4 para desenvolver estratégias eficazes na redução e mitigação dos impactos das mudanças climáticas.

Embora as atividades humanas, incluindo agricultura, produção e uso de petróleo e gás natural, assim como os aterros sanitários, sejam responsáveis pela maior parte da origem antrópica do CH_4 atmosférico, cerca de um terço das emissões totais de CH_4 provém de zonas úmidas (Sauniois *et al.*, 2020). Essas zonas estão representadas em diversos ecossistemas aquáticos, marcados pela presença de solos alagados e/ou *permafrost*, que desempenham um papel importante como reservatórios de carbono (C) (Basteviken *et al.*, 2011; Casa-Ruiz *et al.*, 2023; Georgiou *et al.*, 2022; Lin *et al.*, 2022; Lo *et al.*, 2022). Contudo, as mudanças climáticas têm o potencial de aumentar a suscetibilidade de solos ricos em C, previamente estabilizados há anos, a sofrerem impactos perturbadores, tais como inundações, secas e o aumento das temperaturas. Esses eventos podem facilitar a intensificação dos processos de decomposição do material orgânico, resultando na liberação de C para a atmosfera, principalmente na forma de CH_4 (Bao; Jia; Xiyan, 2023; NASA, 2023).

As áreas alagadas tropicais, apesar de menos estudadas, têm papel fundamental no controle de fatores influenciadores ou influenciados pelas mudanças climáticas, incluindo a produção e consumo de CH_4 . Atualmente estima-se que 94 (56 – 158) Tg y^{-1} do fluxo de CH_4 natural são dessas áreas (Murguia-Flores; Jaramillo; Gallego-Sala, 2023). O Pantanal, uma das maiores zonas úmidas continentais do mundo, tem superfície considerável de cerca de 150 mil km^2 . No entanto, existem poucos dados sobre a produção e emissão de CH_4 nesta área (Marani; Avalá, 2007; Bastviken *et al.*, 2010).

A contribuição do Pantanal no balanço global das emissões de CH₄ é frequentemente estimada com base em medidas realizadas na Amazônia ou na África Equatorial, em ambientes não alcalinos e, portanto, distintos da maior parte do Pantanal, além disso, informações sobre a variação sazonal e espacial das emissões tropicais também são limitadas (Basteviken *et al.*, 2010; Smith *et al.*, 2000).

Esta lacuna de conhecimento se torna preocupante diante de modelos climáticos que preveem, até 2080, aumento de 60 a 90 dias na duração da estação seca no Pantanal, juntamente com redução nas chuvas de mais de 150 mm/ano e aumento da temperatura média (Marengo; Oliveira; Alves, 2016; Meehl *et al.*, 2007). Essas mudanças ambientais podem afetar significativamente o balanço dos fluxos de CH₄.

A Nhecolândia, sub-região do Pantanal sul-mato-grossense, é notável pelo seu extenso sistema lacustre, composto por cerca de 15.000 lagoas de composição variável, desde água doce até oligosalinas e hipersalinas, com variações espaço-temporais e diferentes estados tróficos (Pereira *et al.*, 2020, Pellegrinetti *et al.*, 2023). A diversidade biogeoquímica da Nhecolândia torna-a uma área ideal para estudar os fatores e processos que influenciam as emissões de CH₄ em diferentes ecossistemas úmidos tropicais.

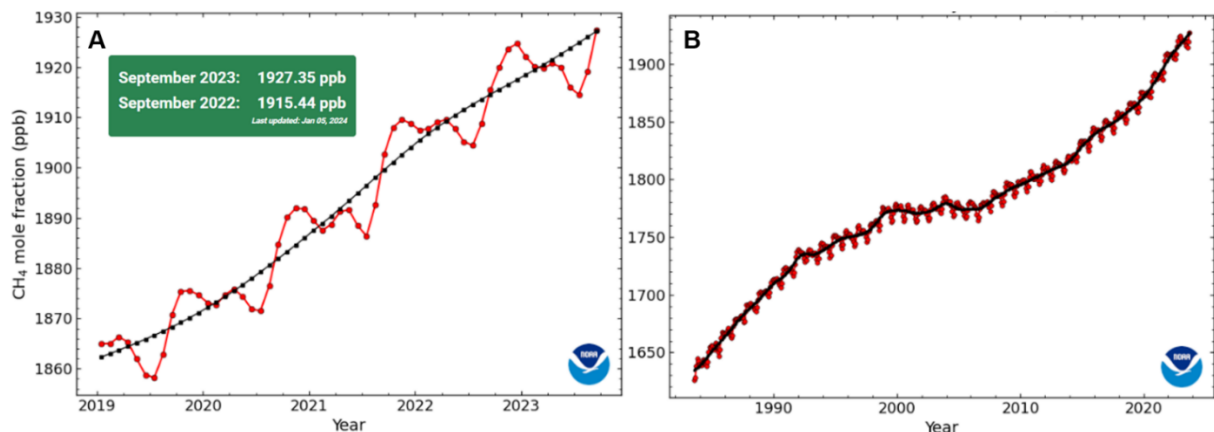
Diante das mudanças climáticas, os ecossistemas lênticos podem exceder as emissões antropogênicas de CH₄ no século 21, principalmente devido à sensibilidade das emissões CH₄ às temperaturas e às alterações na área das zonas úmidas. Essa dinâmica enfatiza a necessidade de integrar essas áreas nas estratégias de mitigação do aquecimento global, considerando tanto suas emissões naturais quanto seu potencial de sequestro de carbono, para efetivamente combater o avanço das mudanças climáticas e atingir as metas de limitação do aquecimento a menos de 2°C (Zhang *et al.*, 2017).

Esta revisão aborda os fatores e processos envolvidos nas emissões e no consumo de CH₄ em ecossistemas aquáticos, com ênfase nas emissões crescentes, principais fontes e sumidouros de CH₄, destacando a importância dos ecossistemas lênticos, especialmente as lagoas tropicais do Pantanal da Nhecolândia. Estas lagoas são modelos essenciais para o monitoramento ambiental em relação às mudanças climáticas e às emissões e consumo de CH₄.

2.1.1 O crescente aumento de CH₄ na atmosfera

Nos últimos anos, as concentrações de gases de efeito estufa (GEE) têm aumentado em ritmo alarmante, conforme evidenciado por estudos recentes (Friedlingstein *et al.*, 2022; Nisbet *et al.*, 2023; UNEP, 2023). Em setembro de 2023, as emissões dos GEE alcançaram níveis sem precedentes, com destaque para a concentração média mensal de CH₄ atmosférico, que atingiu 1927,35 partes por bilhão (ppb), equivalente a 1,927 partes por milhão (ppm) (Figura 1). Esse valor representa aumento de mais de 275% em relação aos níveis pré-industriais, estimados em 0,7 ppm. Tal aumento superou o crescimento nas concentrações de CO₂ e óxido nitroso (N₂O), que, desde o período pré-industrial, aumentaram em 50% (de 280 ppm para 421,86 ppm) e 22% (de 0,27 ppm para 0,33 ppm), respectivamente (Lan; Thoning; Dlugokencky, 2024).

Figura 1 - A Figura 1 apresenta os gráficos da concentração média mensal de CH₄ atmosférico. O gráfico A exibe as médias mensais dos últimos quatro anos, enquanto o gráfico B ilustra a série temporal completa desde 1983. Em ambos os gráficos, as linhas e círculos vermelhos representam as médias mensais, centradas no meio de cada mês, e as linhas e quadrados pretos indicam a tendência de longo prazo.

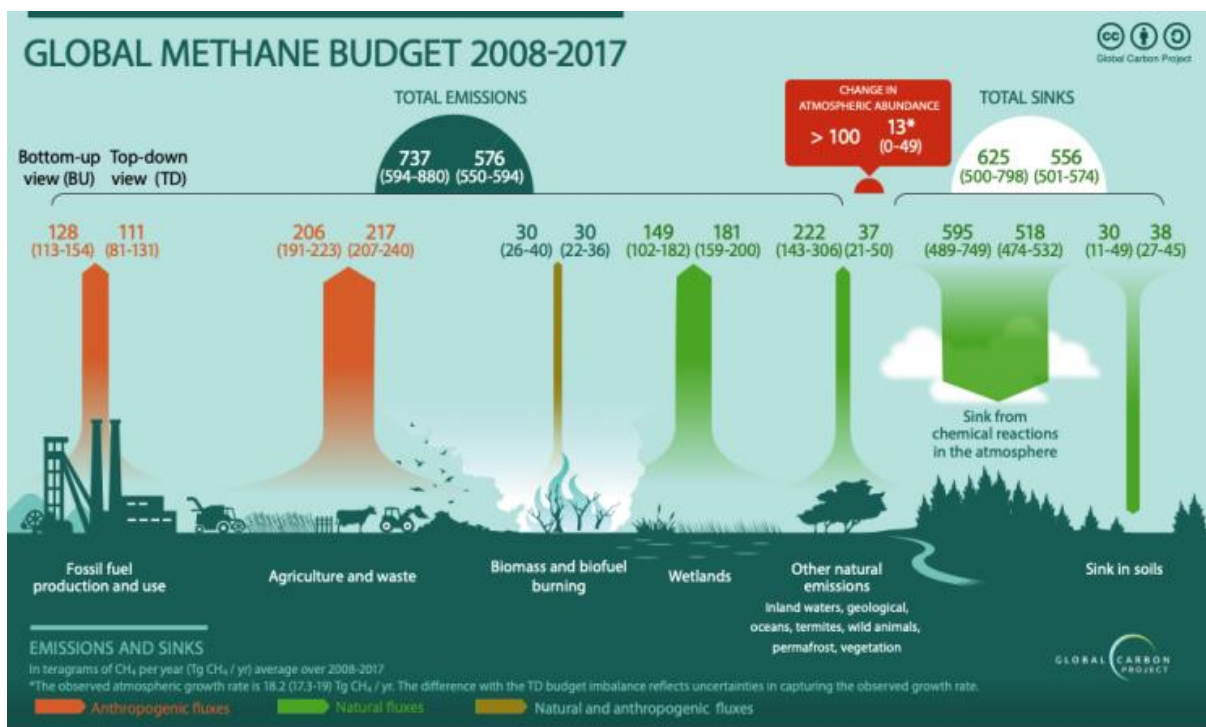


Fonte: Adaptado de Lan, Thoning; Dlugokencky, 2024. Disponível em: https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4/. Acesso em 01 de janeiro de 2024.

2.1.2 Principais fontes de emissão e consumo de CH₄

As principais fontes de emissão de CH₄ são categorizadas em antrópicas e naturais (Saunois *et al.*, 2020) (Figura 2). As fontes antrópicas predominantes incluem sistemas de produção de gás natural e petróleo, agricultura, pecuária (fermentação entérica e manejo de esterco), aterros sanitários, mineração de carvão, queima de biomassa e de combustíveis. As principais fontes naturais compreendem ecossistemas de áreas úmidas de água doce, oceanos (hidratos de CH₄), *permafrost* (solos ricos em MO congelados), processo de decomposição de MO em florestas e atividade geotérmica (vulcanismos e falhas geológicas) (Allen, 2016; Heilig, 1994; IPCC, 2007; Saunois *et al.*, 2020).

Figura 2 – Orçamento global de CH₄ para a década de 2008-2017. As estimativas das principais fontes emissões antrópicas e naturais, assim como as fontes de sumidouros que foram quantificadas por ano (Tg CH₄ ano⁻¹).

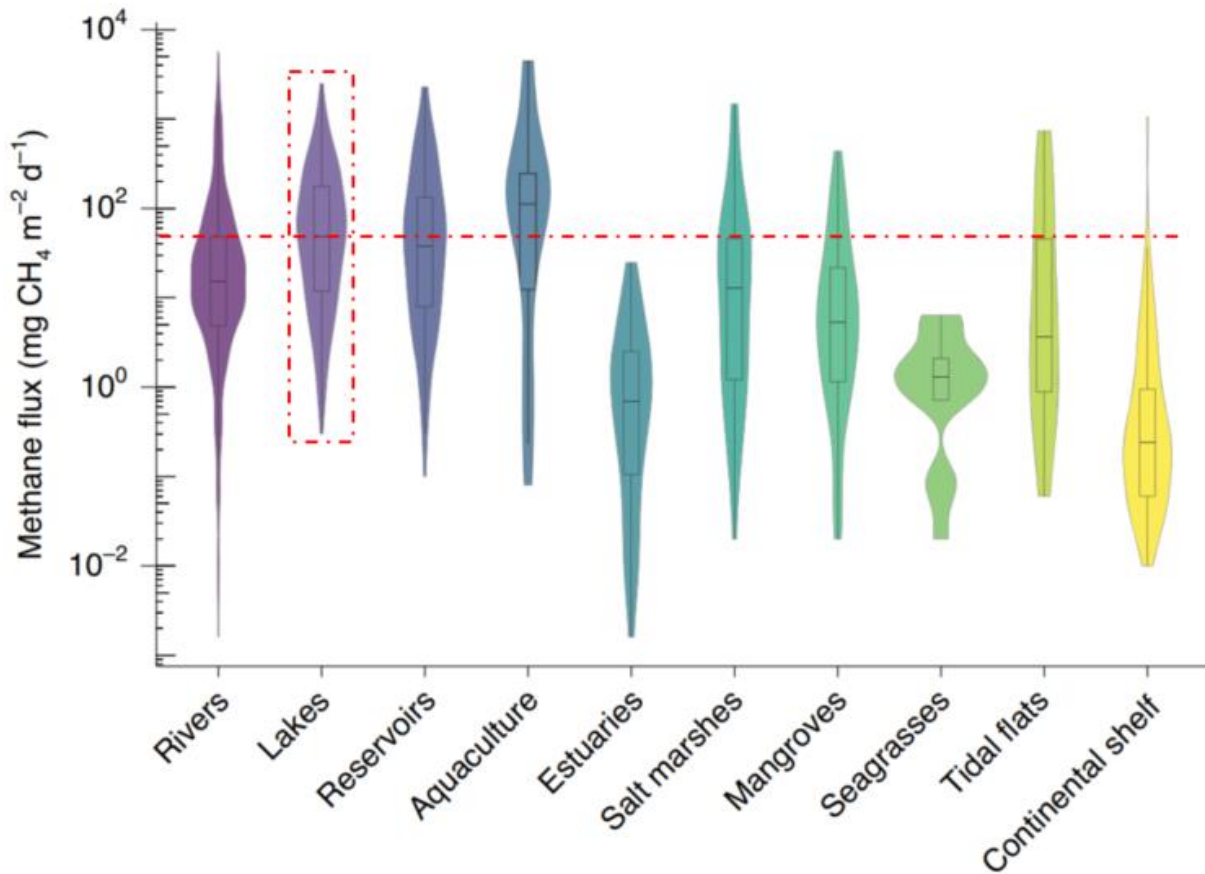


Fonte: Saunois *et al.*, 2020

Os sumidouros de CH₄ ocorrem principalmente na troposfera e estratosfera, onde ele é oxidado por radicais OH após reações fotoquímicas envolvendo átomos de vapor de água, ozônio, cloro e oxigênio (Cicerone, 1988; Ehhalt, 1974; Myhre *et al.*, 2007). Significativa parte dos sumidouros é constituída por zonas úmidas costeiras e solos orgânicos florestais que sequestram CH₄ da atmosfera através de reações microbióticas (metanotrofia), processo atualmente conhecido como “carbono azul” (“blue carbon”) (Ahmed; Thompson, 2018; Eyre *et al.*, 2023; Lee *et al.*, 2023;; Rosentreter *et al.*, 2021a; Rosentreter *et al.*, 2022; Rosentreter *et al.*, 2023; Roth *et al.*, 2023).

Cerca de metade das emissões globais de CH₄ são originadas de ecossistemas aquáticos (Saunois *et al.*, 2020; Rosentreter *et al.*, 2021b). Ao distinguir os ecossistemas aquáticos, os sistemas de aquicultura (água doce e estuarina) e as lagoas se destacam como os maiores emissores de CH₄, conforme ilustrado na Figura 3. Apesar de muitos sistemas de aquicultura serem gerenciados pelo homem, as lagoas contribuem significativamente para mais da metade das emissões naturais provenientes de ecossistemas aquáticos.

Figura 3 - Fluxos de CH₄ em águas interiores e oceanos costeiros. Os traços vermelhos destacam as lagoas em comparação com outros ecossistemas aquáticos.



Fonte: Adaptado de Rosentreter *et al.*, 2021b

Estudos sobre emissão de CH₄ em lagoas são relativamente recentes e estão em constante evolução. Os resultados encontrados ao redor do mundo apresentam ampla variação, com frequentes discrepâncias (Johnson *et al.*, 2022). Contudo, há consenso de que os ecossistemas lênticos são reguladores importantes do ciclo de C (Benoy *et al.*, 2007; Tranvik *et al.*, 2009; Bastviken *et al.*, 2011; Rasbold *et al.*, 2021; Lo *et al.*, 2022; Amorano-Nogueira *et al.*, 2022; Pi *et al.*, 2022) e fontes naturais significativas de emissões de CH₄ para a atmosfera em diferentes latitudes (Anthony *et al.*, 2018; Camacho *et al.*, 2017; Delsontro; Beaulieu; Downing, 2019; Bastviken *et al.*, 2008; Heslop *et al.*, 2020; Matthews *et al.*, 2019).

2.1.3 Ciclo biogeoquímico do CH₄ em ecossistemas lênticos

Grande parte do CH₄ é produzido em sedimentos anóxicos no fundo das lagoas e posteriormente liberado para a atmosfera através da coluna de água. A produção de CH₄ no sedimento é resultado de interações microbianas anaeróbicas (metanogênese), principalmente por arqueobactérias que decompõem a matéria orgânica (MO) (Bastviken *et al.*, 2008).

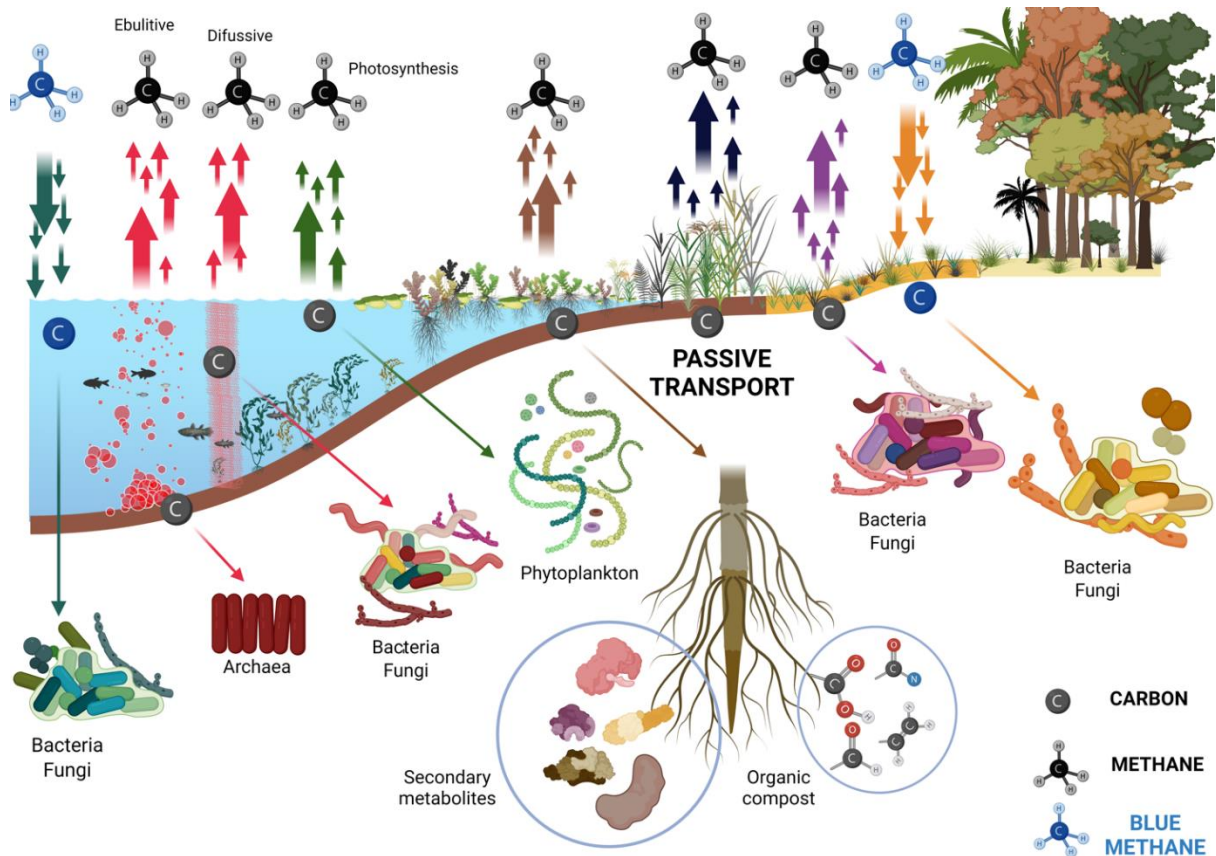
A metanogênese ocorre de duas maneiras principais, conhecidas como metanogênese acetotrófica e metanogênese hidrogenotrófica. Na primeira, o CH₄ é gerado pela divisão de acetato (CH₃COO) em CH₄ e CO₂. Na metanogênese hidrogenotrófica, ocorre a reação de CO₂ com hidrogênio (H₂), resultando em CH₄ e H₂O. Outras substâncias, como sulfato, metanol, dimetil e etilamina, também podem formar CH₄ (Bastviken, 2009). Essas duas vias de metanogênese contribuem com aproximadamente 20 a 80% da produção total de CH₄ nos sedimentos (Bastviken, 2009). Durante esses processos, o CH₄ pode ficar retido nos sedimentos em forma de bolhas ou dissolvido na água em microbolhas, sendo liberado para a atmosfera por ebulição ou difusão, respectivamente (Figura 4).

Nos fluxos de CH₄ ebulitivo as bolhas que estão retidas no sedimento escapam rapidamente e percorrem a coluna de água até atingir a atmosfera. No fluxo difusivo o CH₄ fica dissolvido na coluna de água em forma de milhares de microbolhas que lentamente escapam da lamina de água até atingir a atmosfera (Borrel *et al.*, 2011).

Descobertas recentes sugerem que o CH₄ também pode ser produzido em condições aeróbicas, principalmente por cianobactérias (Bižić *et al.*, 2020), fitoplâncton (Bižić, 2021), fungos (Lenhart *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2022) e macrófitas aquáticas (Hilt *et al.*, 2022). No caso das macrófitas, a produção ocorre via transporte passivo e interações de degradação de compostos secundários em suas raízes (Hilt *et al.*, 2022) (Figura 4). No entanto, esses processos de metanogênese óxica em lagos são pouco compreendidos e requerem estudos mais aprofundados (Günthel *et al.*, 2019; Günthel *et al.*, 2020; Peeters; Hofmann, 2021; Tang *et al.*, 2016).

Além disso, esses ecossistemas aquáticos podem atuar como sumidouros de CH₄. Isso se deve à presença de comunidades de bactérias e fungos que consomem CH₄ (metanotrofia), atuando como filtro eficiente para capturar o CH₄ antes de sua liberação na atmosfera (Vergara-Fernández *et al.*, 2020)

Figura 4 – Diversas vias de produção e consumo de CH₄ em lagoas. As setas apontadas para cima representam as vias de emissão de CH₄ e as setas apontadas para baixo representam o consumo de CH₄.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As bactérias são capazes de consumir CH₄ tanto em habitats anaeróbicos, como o fundo de lagos, quanto em habitats aeróbicos, como o solo e sedimentos. Em ambos contextos, elas oxidam o CH₄ (Hanson; Hanson, 1996; He *et al.*, 2023; Jensen; Siljanen; Dörsch, 2023; Roldán *et al.*, 2022). Os fungos podem aumentar a disponibilidade de CH₄ na fase biológica, formando biofilmes onde o CH₄ é biodegradado por enzimas específicas (Muñoz *et al.* 2007), e podem atuar como solubilizadores de CH₄ na água, facilitando assim o consumo por bactérias metanotróficas (Oliver; Schilling, 2018).

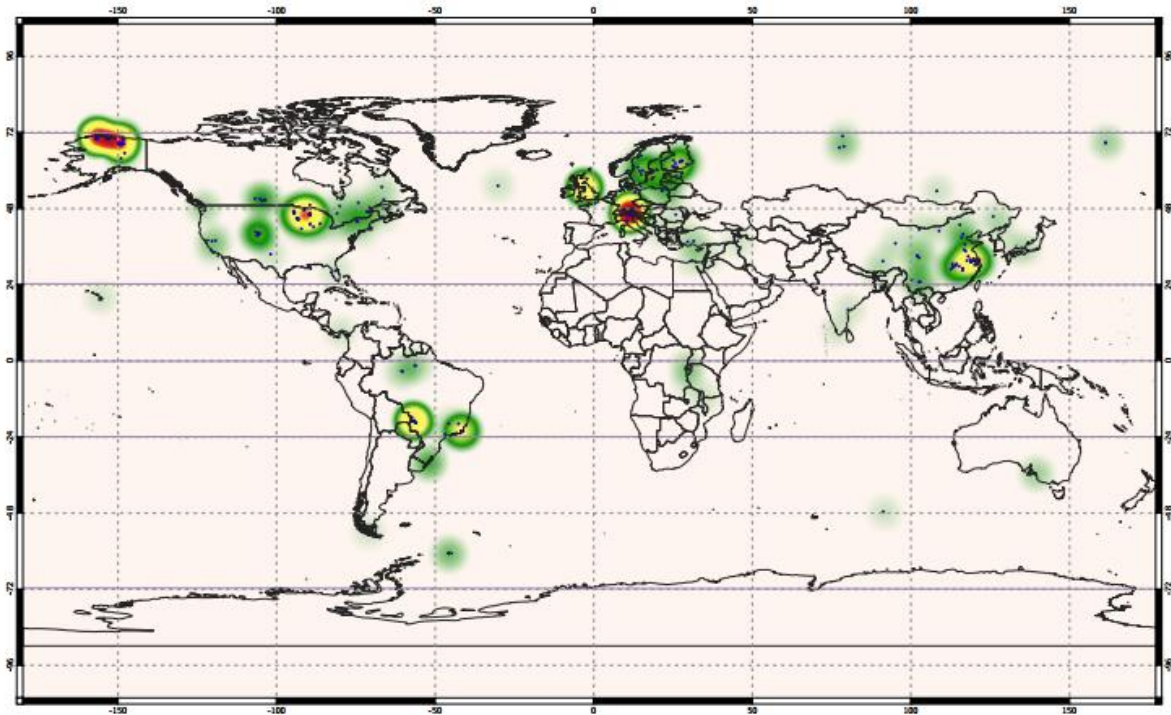
2.1.4 Distribuição mundial dos estudos sobre as emissões de CH₄ em ecossistemas lânticos

A análise dos locais de estudo presentes em 120 artigos publicados entre 1963 e 2019 revela que as pesquisas sobre emissões de CH₄ estão amplamente concentradas nas altas latitudes (Figura 5). Uma razão para essa concentração é a maior densidade (Messenger *et al.*, 2016) e quantidade (Wang *et al.*, 2018) dos ecossistemas lânticos nas altas latitudes.

Em contrapartida, há escassez de estudos conduzidos nas baixas latitudes, onde a dinâmica da evaporação (Wang *et al.*, 2018) e as altas temperaturas potencializam as reações biogeoquímicas (Fustec; Lefeuvre, 2000; Gudasz, Karlsson; Bastviken, 2021; Reddy; DeLaune, 2008; Yvon-Durocher *et al.*, 2014), o que, por sua vez, resulta em concentrações significativamente mais elevadas de emissões de CH₄ nos trópicos em escala global (Frankenberg *et al.*, 2005).

As zonas alagadas tropicais são componentes críticos na regulação de vários fatores que influenciam ou são influenciados pelas mudanças climáticas e ambientais, com a produção de CH₄ sendo um dos fatores determinantes. Na América do Sul, os estudos de emissões de CH₄ se concentram na Amazônia (Crill *et al.*, 1988; Melack *et al.*, 2004; Barbosa *et al.*, 2016; Barbosa *et al.*, 2021) e no Pantanal (Alvalá; Kirchoff, 2000; Barbiero *et al.*, 2018; Bastviken *et al.*, 2010; Hamilton; Sippel; Melack, 1995; Marani; Alvalá, 2007). Contudo, o Pantanal, em particular, ainda é pouco estudado (Bastviken *et al.*, 2008), uma lacuna que prejudica a compreensão completa da dinâmica das emissões e consumo de CH₄ em regiões tropicais.

Figura 5 - Distribuição mundial dos 351 locais estudados nos 120 artigos publicados nos últimos 56 anos (1963 até 2019). A intensidade das cores reflete a aproximação e a concentração dos estudos, as cores mais quentes indicando maior densidade de pesquisas.



Fonte: Elaborado pelo autor

2.1.5 Os pantanais

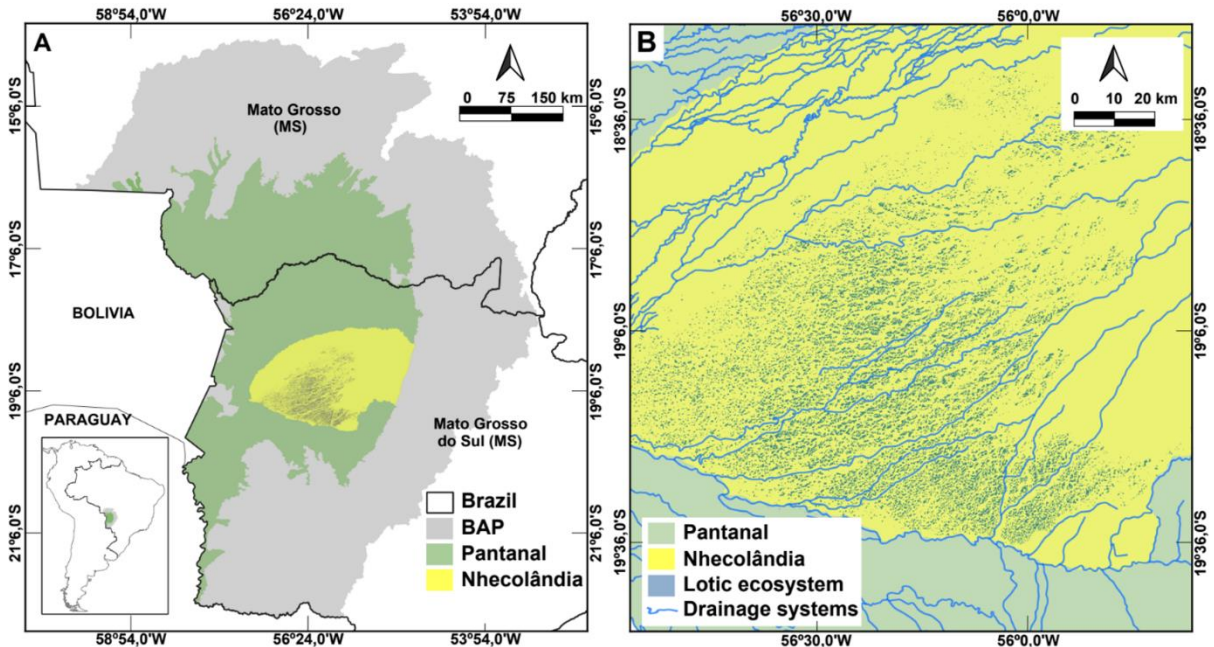
A Bacia do Alto Paraguai (BAP) e o Pantanal são de imensa importância ambiental na América do Sul. A BAP é uma extensa área hidrográfica de aproximadamente 360 mil km², que se estende pelo Brasil, Bolívia e Paraguai, caracterizada por uma topografia predominantemente plana e vasta rede de ecossistemas aquáticos (Junk; Cunha, 2016) (Figura 6 - A).

As inundações sazonais que ocorrem anualmente na BAP, conhecidas como "pulso de inundação" (Junk, 1989), são determinantes para inúmeras séries de interações ecológicas e processos biogeoquímicos vitais para o bioma. Essas dinâmicas de inundação, alternando entre fases úmidas e secas, mobilizam nutrientes e C armazenados, resultando em uma produtividade excepcional nesses sistemas (Hamilton, 2002; Wantzen, 2022; Wantzen *et al.*, 2023).

Localizado no “coração” da América do Sul, o Pantanal é uma das maiores zonas úmidas continentais do mundo, abrangendo área de cerca de 150 mil km² (Por, 1995; Assine *et al.*, 2015; Padovani, 2010). O pulso de inundação dá origem a um dos ecossistemas úmidos mais complexos da região Neotropical, conferindo ao Pantanal uma biodiversidade rica e única (Gimênes Junior; Rech, 2022; Junk, 2006; Junk; Wantzen, 2004; Pott; Silva, 2015; Pott; Pott, 2021; Nunes *et al.*, 2021; Tubelis; Tomas, 2003). Reconhecido pela UNESCO como Reserva da Biosfera e Patrimônio Natural da Humanidade em 2000 (UNESCO, 2000) e pela Convenção de Ramsar como Zona Úmida de Importância Internacional, o Pantanal é área de relevância global.

A região do Pantanal é delimitada por depressão alimentada e drenada pelo rio Paraguai e seus afluentes, a maioria originando-se nas montanhas e planaltos à leste. A planície aluvial do Pantanal é notável por suas baixas altitudes (100-200 m), com gradientes topográficos mínimos (0,02 a 0,03°) (Assine; Soares, 2004; Assine, 2005; Silva; Abdon, 1998). Cerca de 110 mil km² (73%) do Pantanal são periodicamente inundados, especialmente durante o verão (de novembro a março) (Junk; Cunha, 2005; Junk; Cunha, 2016), formando mosaico regional de sub-zonas úmidas com características distintas, incluindo aspectos hidrológicos, geomorfológicos, pedológicos e geoquímicos (Rezende Filho *et al.*, 2012; Rezende Filho *et al.*, 2015).

Figura 6 – Localização geográfica da BAP, incluindo o Pantanal no Brasil, com destaque para a sub-região da Nhecolândia (A), e detalhe da sub-região da Nhecolândia com sua rede de drenagem e abundância de ecossistemas lânticos (B).



Fonte: Adaptado de Silva; Abdon, 1998; Padovani, 2010.

2.1.6 O Pantanal da Nhecolândia

Diversos autores dividiram o Pantanal em várias sub-regiões devido às suas diversidades ambientais (Assine *et al.*, 2015; Bergier; Assine, 2022; Furquim; Vidoca, 2021; Hamilton *et al.*, 1996; Padovani, 2010; Silva; Abdon, 1998). A sub-região da Nhecolândia, uma das maiores, abrange 24 mil km² e é delimitada pelo rio Taquari no norte e noroeste, parte do rio Paraguai no oeste, o rio Negro no sul e o planalto Serra de Maracaju à leste.

Na área da Nhecolândia são encontrados milhares de pequenos ecossistemas lânticos que são influenciados diretamente pelo pulso de inundação, pluviosidade e pela alta taxa de evapotranspiração, originando lagoas rasas de água doce à hipersalinas com diferentes pH, alcalinidade (Guerreiro *et al.*, 2019; Bergier; Assine, 2022) e com diferentes estados tróficos (Pellegrinetti, 2022), formando paisagem emblemática e exclusiva do Brasil (Figura 6 -B).

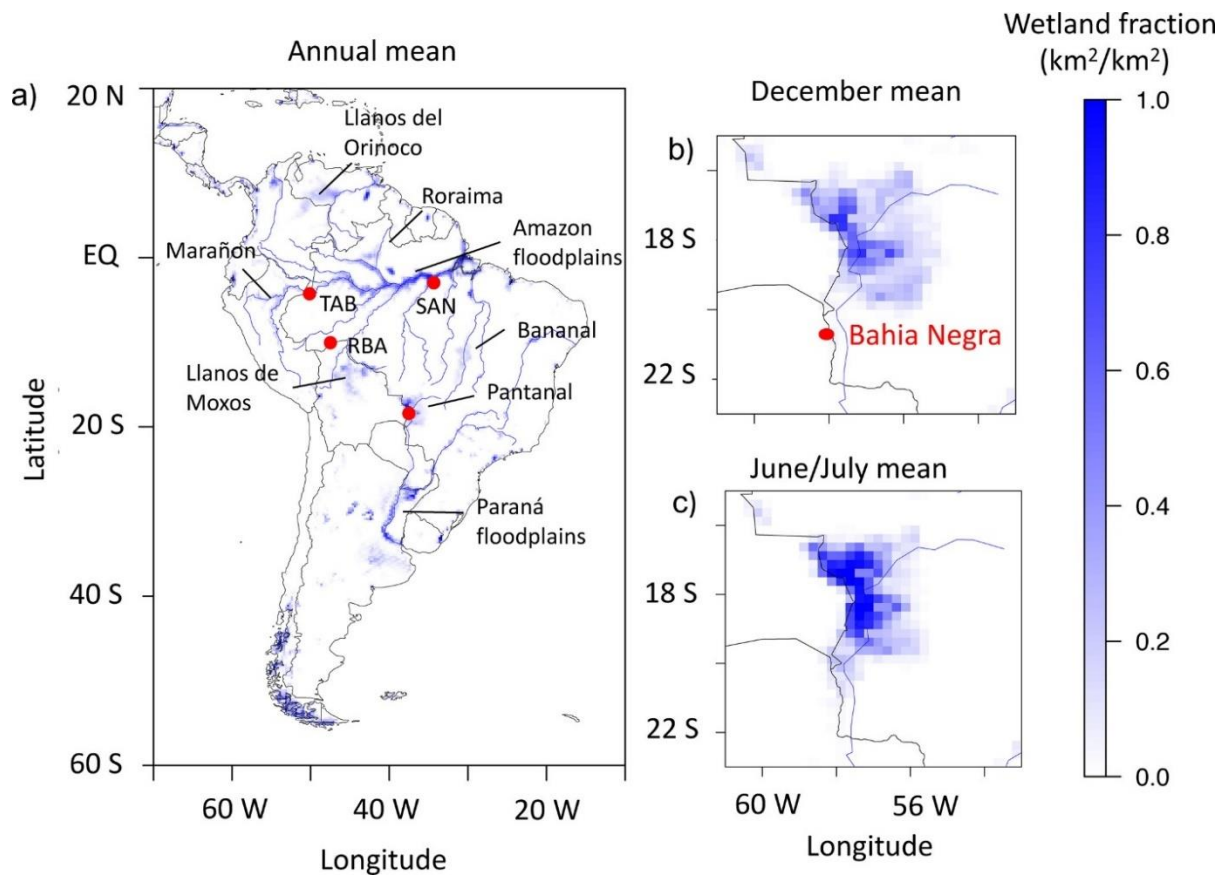
Na escala de 1:5.000.000, os solos dominantes na Nhecolândia são os Espodossolos Ferrihumilúvicos Hidromórficos, solos ácidos e distróficos com altas proporções de areia e matéria orgânica. Estes solos experienciam processos pedológicos como a formação coloidal de matéria orgânica com ferro de origem iluvial em ambientes saturados de água (Embrapa, 2006; 2018; 2023).

Em uma maior escala, também estão presentes os solos Salino-Sódicos, conhecidos como Solonetz Solodizado, associados às lagoas salinas. Estes solos, formados em ambientes hidromórficos, possuem elevada alcalinidade e horizontes superficiais de material arenoso sobre horizontes ricos em carbonatos e argilominerais de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K). As altas taxas de evapotranspiração nas lagoas resultam na precipitação desses minerais, contribuindo para o aumento da salinidade e alcalinidade dessas águas (Barbiero *et al.*, 2008; Furquim *et al.*, 2017).

O clima na região é classificado como semi-úmido tropical com curta estação seca (tipo "Aw" segundo Köppen), influenciado pela migração sazonal da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). A temperatura média anual fica em torno de 25 °C, oscilando de 20,3 °C nos invernos secos a 31,6 °C nos verões chuvosos. A média anual de precipitação é de cerca de 1.433 mm, enquanto a evapotranspiração anual chega a 1.862 mm, resultando em déficit hídrico de aproximadamente 329 mm (Soriano; Galdino, 2000). No contexto local, o contraste térmico marcante entre os lagos salinos e as áreas florestais circundantes gera ventos baixos alternados entre o dia e a noite, intensificando a evaporação (Quénol *et al.*, 2006).

Estudos recentes na troposfera da América do Sul apontaram a região da Nhecolândia como fonte significativa de emissões de CH₄ para a atmosfera. Observou-se que o fluxo de CH₄ apresenta sazonalidade marcada, com emissões alcançando valores aproximados de 3,3 Tg C ano⁻¹, observadas com o início da subida dos níveis de água e novamente após os níveis máximos serem atingidos (Gloor *et al.*, 2021).

Figura 7 – A figura a) demonstra a fração média anual das áreas úmidas com base em dados de sensoriamento remoto, destacando as principais áreas emissoras de CH₄. Na figura b) são evidenciados os fluxos de CH₄ durante o período das cheias e em c) o período das águas baixas nas proximidades da região da Nhecolândia.



Fonte: Gloor *et al.*, 2011

2.1.7 Os ecossistemas lênticos da Nhecolândia

A paisagem da Nhecolândia se destaca por mais de 12 mil ecossistemas lênticos, que dão origem a lagoas de água doce e salino-alcálinas, aproximadamente 92,5% apresentando valores de pH entre 4,69 a 7,9 (Pereira *et al.*, 2020), ou seja a grande maioria dos ecossistemas lênticos são lagoas de água doce. Até o momento, ainda não foram totalmente esclarecidos os aspectos geoquímicos, biogeoquímicos, geológicos e pedológicos que explicam a coexistência desses sistemas lacustres distintos (Almeida; Lima 1969; Braun, 1977; Klammer, 1982; Sánchez, 1977; Tricart, 1982).

Os baixos gradientes topográficos da Nhecolândia tornam a área particularmente suscetível ao pulso de inundação anual causado pela conectividade hidrológica da BAP, originado as lagoas de água doce com até 9 metros de profundidade e hidrologicamente abertos que raramente secam (Bergier; Assine, 2022; Mcglue *et al.*, 2011; Lo *et al.*, 2017).

As lagoas de água doce, localmente chamadas de “*baías*”, são ecossistemas lênticos de formato circular, semicircular e irregular, não estratificados e com extensões que variam de dezenas a centenas de metros (Pott; Pott, 2011). As margens dessas lagoas são difusas e abrigam rica comunidade de diversas espécies de macrófitas aquáticas, peixes, aves e mamíferos (Pott; Silva, 2015).

Em contraste, as lagoas salino-alcálicas estão completamente isoladas da BAP e dos processos do pulso de inundação, sendo recarregadas pela água da chuva e águas subterrâneas (Bergier; Assine, 2022; Furian *et al.*, 2013). Estas lagoas são mais rasas (aproximadamente 2 metros), hidrologicamente fechadas e cercadas por cristas arenosas cobertas pela vegetação típica de Cerrado florestado (cerradão), conhecidas localmente como “*cordilheiras*”. Estas elevações, que podem atingir de 2 a 3 metros acima do nível dessas lagoas, são inundadas apenas por cheias excepcionais (Mariot *et al.*, 2008).

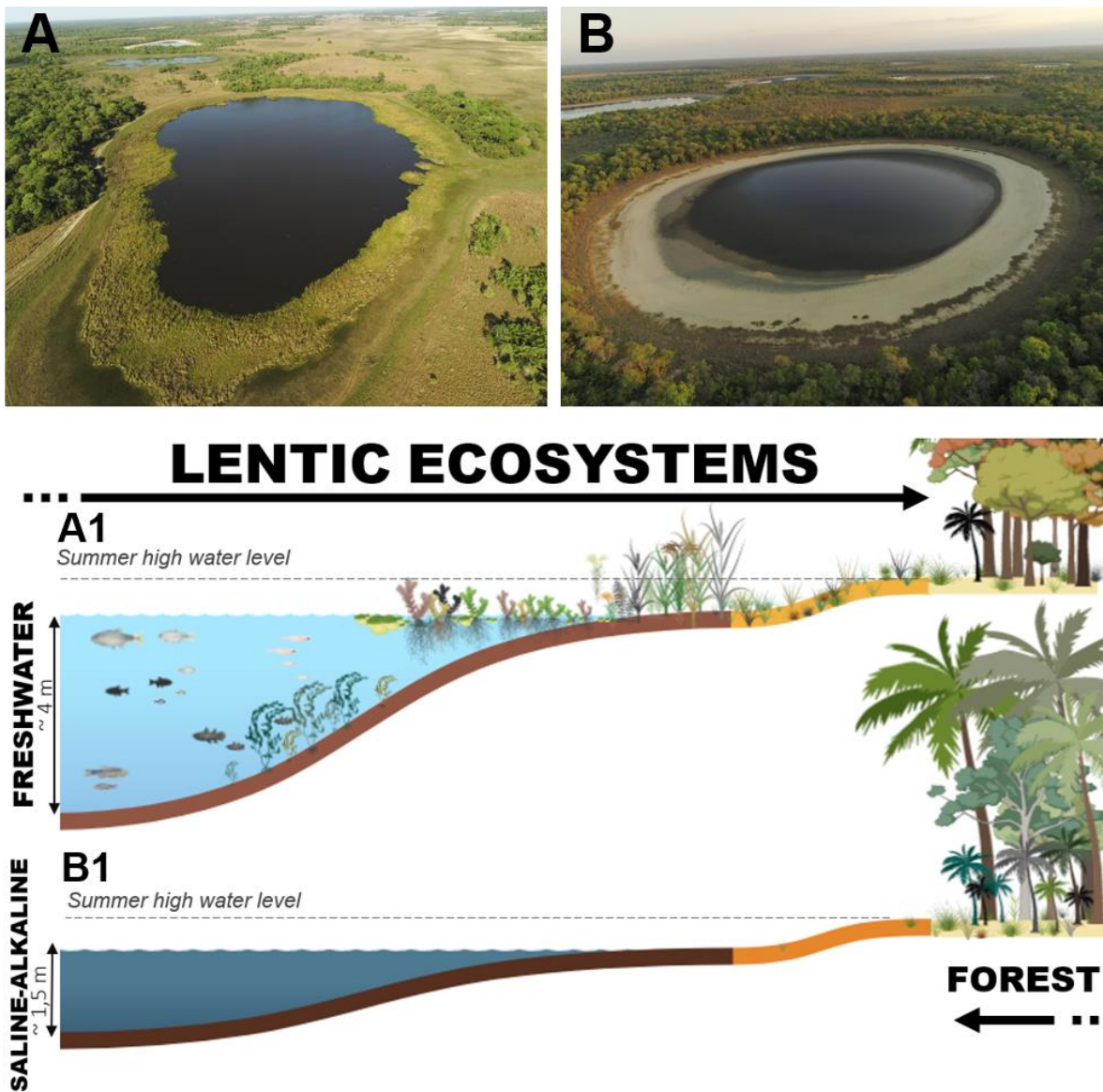
As lagoas salino-alcálicas, localmente chamadas de “*salinas*”, são ecossistemas com biota mais restrita, adaptada às elevadas alcalinidade, condutividade elétrica (salinidade) e pH. A origem dessa elevada salinidade é possivelmente explicada por processos evaporativos contínuos em condições de má drenagem (Furian *et al.*, 2013), resultando na dissolução e concentração de Ca, Mg e K (Barbiero *et al.*, 2008).

As condições ambientais desfavoráveis nessas lagoas *salinas* limitam a biodiversidade de plantas e vertebrados, favorecendo predominantemente a existência de formas de vida extremófilas, incluindo arqueobactérias, cianobactérias e fitoplâncton (Cotta *et al.*, 2022; Guerreiro *et al.*, 2019; Pellegrinetti, 2022; Pellegrinetti *et al.*, 2022; Schleder, 2022).

Em ambos os ecossistemas lênticos da Nhecolândia, encontram-se comunidades bacterianas metanogênicas específicas, adaptadas à sazonalidade e à ampla gama de condições ambientais, incluindo aquelas consideradas adversas (Pellegrinetti, 2022; Pellegrinetti *et al.*, 2022; Schleder *et al.*, 2022). Além disso, comunidades bacterianas encontradas em sedimentos de lagoas apresentam maior diversidade na comunidade bacteriana em comparação com as lagoas de água doce (Schleder *et al.*, 2022). Dessa forma, a conservação dos ecossistemas lênticos da Nhecolândia tem implicações para a dinâmica dos gases de efeito estufa no Pantanal, além de proporcionar novas oportunidades de pesquisa associadas com vida extremófila e biotecnologia (Guerreiro *et al.*, 2019).

Embora, os estudos de emissão de GEE nesses ecossistemas lênticos sejam escassos, as lagoas salino-alcálinas são consideravelmente mais baixas (topografia) que as lagoas de águas doces, inclusive até comportando como fontes de sumidouro de C (Bergier *et al.*, 2016; Barbiero *et al.*, 2018). Por outro lado, em lagoas salino-alcálinas dominadas por florações abundantes de cianobactérias podem contribuir com elevada emissão de CH₄ no momento em que elas produzem O₂, resultado da fotossíntese. Logo, quando ocorre a supersaturação de O₂ na água, o CH₄ é transportado para a atmosfera (Barbiero *et al.*, 2018).

Figura 8 – Fotografias aéreas tiradas de drone dos dois típicos ecossistemas lenticos encontrados em Nhecolândia. A fotografia A apresenta uma lagoa de água doce, evidenciando seu sistema hidrológico aberto e a abundante presença de macrófitas aquáticas nas margens. A fotografia B retrata uma lagoa salina-alkalina, com sistema hidrológico fechado, circundada por cristas arenosas (*cordilheiras*) cobertas pela vegetação do Cerrado. As representações esquemáticas A1 e B1 ilustram, respectivamente, os perfis horizontais típicos de uma lagoa de água doce e uma lagoa salina-alkalina.

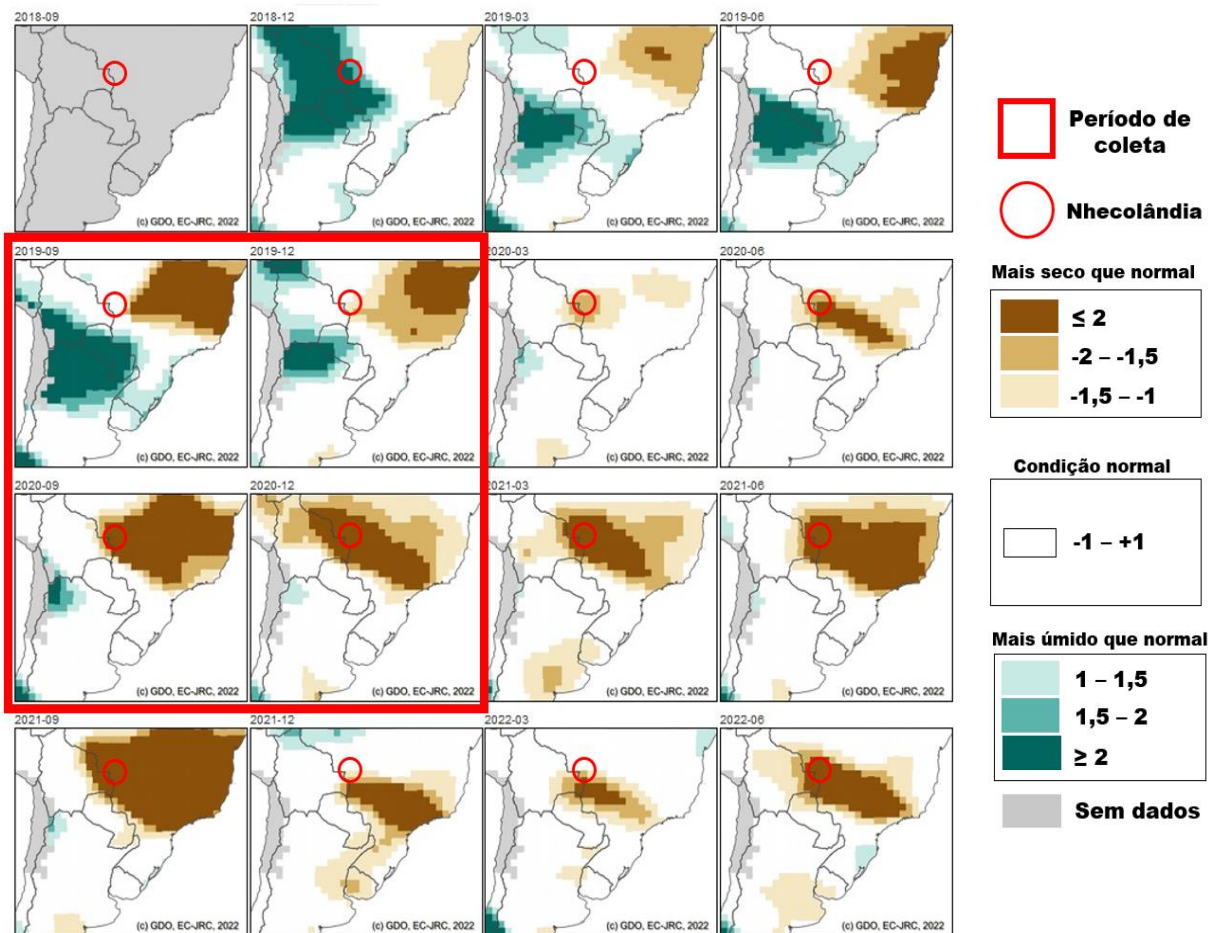


Fonte: Elaborado pelo autor.

2.1.8 O Pantanal Ameaçado

Recentemente, o Pantanal tem enfrentado ameaças em duas frentes. Durante os verões de 2019 e 2020, a região enfrentou seca atípica e onda de calor (Marengo *et al.*, 2021a), devido mudanças na circulação atmosférica que provocaram redução da umidade e aumento das temperaturas em toda a América do Sul (Cunha; Buermann; Marengo, 2024; Marengo *et al.*, 2021b; Nauman *et al.*, 2023; Thielen *et al.*, 2020; Thielen *et al.*, 2021) (Figura 9).

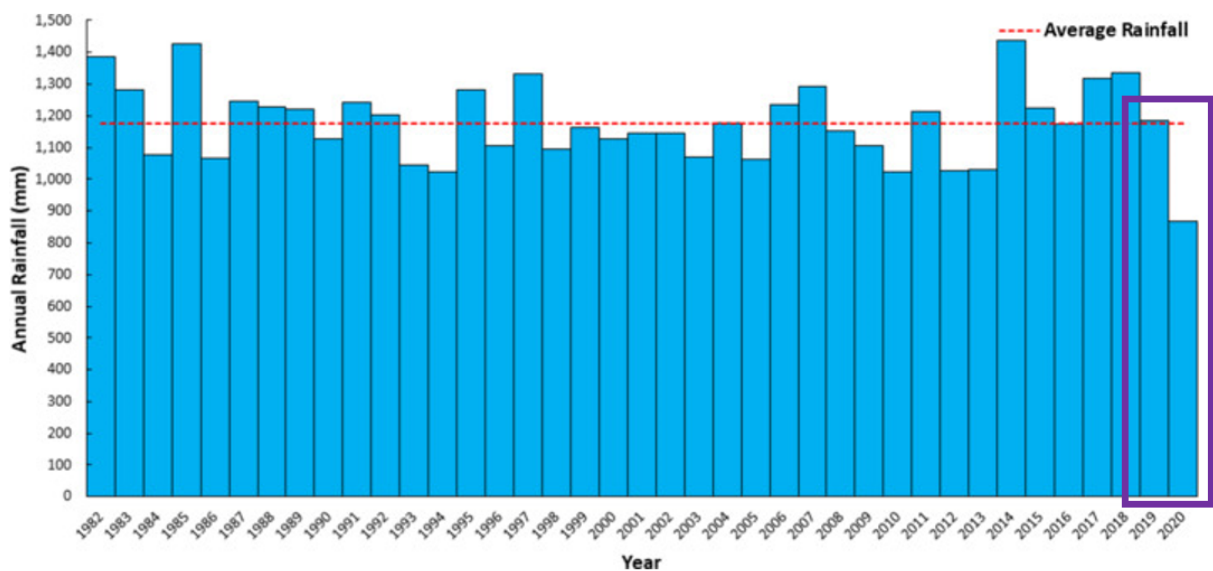
Figura 9 - Área de extensão da atuação da seca no período de 2018 a junho de 2022, a partir de indicador de armazenamento total de água superficial.



Fonte: Adaptado de Naumann *et al.*, 2023

Em 2020, o Pantanal enfrentou redução significativa nas chuvas, com o término do ciclo hidrológico anual evidenciando diminuição de 26% na precipitação média em relação à média histórica de 1982 a 2020 (Mataveli *et al.* 2021) (Figura 10). Este déficit pluviométrico resultou em consequências catastróficas, desencadeando incêndios florestais em larga escala que se revelaram incontroláveis (Abreu *et al.*, 2022; Barbosa *et al.*, 2022; Corrêa *et al.*, 2022; Mataveli *et al.*, 2021; Marques *et al.*, 2021; Neto; Evangelista, 2022; Kumar *et al.*, 2022), impactando aproximadamente 30% do bioma (Mega, 2020). A grande maioria (95%) desses incêndios devastou vegetação natural, incluindo 28% em regiões previamente classificadas como zonas úmidas, as quais, devido à intensidade da seca, provavelmente experimentaram processos de secagem (Mataveli *et al.*, 2021). Esses eventos resultaram em impactos severos, destacando-se a elevada mortalidade de fauna (Tomas *et al.*, 2021).

Figura 10 - Precipitação anual estimada no Pantanal nos anos de 1982 a 2020. Com destaque em roxo nos anos de 2019 e 2020, período da coleta de dados desse estudo.



Fonte: Adaptado de Mataveli *et al.*, 2021.

Adicionalmente, a ausência de políticas públicas eficazes de monitoramento e controle ambiental no Brasil agravou a situação (Abessa; Fama; Buruaem, 2019; Filho *et al.*, 2021; Libonati *et al.*, 2020), acarretando grandes prejuízos aos serviços ecossistêmicos. Estima-se que os custos para a restauração ecológica pós-incêndio em áreas prioritárias do Pantanal ultrapassem US\$ 120 milhões (Martins *et al.*, 2022).

Agora, o Pantanal enfrenta novas ameaças provenientes de projetos de pequenas centrais hidrelétricas (PCH) e da Hidrovia Paraguai-Paraná, que podem comprometer a integridade do bioma, afetando a qualidade, dinâmica e fluxo ecológico de suas águas (Jardim *et al.*, 2020; Cruz *et al.*, 2021). A alteração antrópica no regime do fluxo hidrológico promete causar impactos negativos significativos, cuja extensão e efeitos sinérgicos ainda são desconhecidos (Wantzen *et al.*, 2024).

Somando-se às projeções das mudanças climáticas e às intervenções humanas, os ecossistemas lênticos da Nhecolândia também estão sob ameaça. Ainda não compreendemos completamente como as lagoas serão afetadas pela modificação no pulso de inundação, nem a resiliência desse sistema diante da seca e ondas de calor. Além disso, carece de informações sobre as emissões de CH₄ desses ecossistemas frente às transformações esperadas nessa região.

2.1.9 Lagoas tropicais como modelo para biomonitoramento das mudanças climáticas

Nos últimos anos, as lagoas têm sido impactadas pelos efeitos das mudanças climáticas, sendo altamente sensíveis às variações espaciais, sazonais e ambientais (Grant *et al.*, 2021; Woolway *et al.*, 2020; Wurtsbaugh *et al.*, 2017). Dessa forma, os ecossistemas lênticos são sentinelas eficazes para o monitoramento dos efeitos das mudanças climáticas (Adrian *et al.*, 2009), e também são sistemas modelos para entender como os sistemas biológicos respondem a essas alterações (Loewen, 2023). No entanto, há carências de informações sobre as emissões de CH₄ provenientes das lagoas tropicais, e os impactos dessas emissões diante dos futuros cenários climáticos globais que ainda permanecem desconhecidos.

A compreensão das emissões de CH₄ oriundas de fontes naturais, como as zonas úmidas, torna-se de extrema importância para cientistas e formuladores de políticas públicas, que buscam garantir que as mudanças nos ecossistemas naturais contrabalancem os desafios enfrentados na redução das emissões provenientes de atividades humanas (NASA, 2023). Pois, caso o aquecimento global ultrapasse 2°C, existem previsões que essas áreas possam aumentar de 50% a 80% as emissões de CH₄ até 2100 (Koffi *et al.*, 2020) e até mesmo exceder as emissões antropogênicas (Zang *et al.*, 2017).

Embora os estudos sobre os fluxos de CH₄ nessa sub-região sejam poucos, as pesquisas acerca da produção e consumo de CH₄ em ecossistemas lênticos tropicais é limitada e se concentra majoritariamente nos fluxos superficiais da água, desconsiderando frequentemente os fluxos provenientes dos sedimentos das margens e dos solos periodicamente inundados, aqui nessa tese considerados como *compartimentos ambientais*. Essa lacuna no conhecimento dificulta a precisão da avaliação do papel desses ecossistemas no entendimento dos fluxos temporais, espaciais e ambientais, bem como a contribuição do balanço regional dos GEE e bem como esses ecossistemas responderão as mudanças do clima.

Diante desse cenário, o presente trabalho de *tese* propõe-se a elucidar os processos, fatores espaciais, temporais e ambientais envolvidos nas emissões e no consumo de CH₄, utilizando 5 ecossistemas lênticos da Nhecolândia como exemplos. Dessa forma, essa pesquisa quantificou e caracterizou as fontes e sumidouros naturais desse gás em duas lagoas de água doce e três de água salino-alkalino, incluindo medições de fluxos na água, o sedimento exposto nas margens e os solos periodicamente inundados adjacentes a esses locais.

Além disso, essa *tese* buscou compreender como diferentes *compartimentos ambientais* responderão à escassez de precipitação e ao aumento da temperatura global, conforme prognósticos do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021). Portanto, torna-se imperativo o monitoramento ambiental contínuo dos ecossistemas lênticos tropicais para o desenvolvimento de modelos preditivos precisos frente aos desafios impostos pelas Mudanças Climáticas Globais.

Este trabalho de *tese* faz parte do Projeto Temático “Mudanças climáticas e impactos ambientais em áreas alagadas (*wetlands*) do Pantanal (Brasil): Quantificação, fatores de controle e previsão de longo prazo” (Processo FAPESP 2016/14227-5).

2.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O *Capítulo 1* proporciona uma abordagem abrangente ao tema, enfocando a crescente apreensão relacionada às emissões de CH₄ na atmosfera e sublinhando a significativa contribuição dos ecossistemas lênticos como fontes e sumidouros desse gás. Exploraram-se as complexidades inerentes à emissão e consumo de CH₄, ressaltando, em particular, a escassez de estudos em regiões tropicais. Adicionalmente, foram examinadas as peculiaridades do Pantanal, com ênfase na sub-região da Nhecolândia, elucidando os fatores físicos e ambientais que conferem singularidade a essa área. Esta revisão tem por objetivo proporcionar uma visão holística do escopo desta pesquisa de doutorado, identificando lacunas e destacando a relevância do estudo em questão. O esforço empreendido visa fomentar o monitoramento efetivo das lagoas tropicais diante das mudanças climáticas, visando construir modelos robustos para o estabelecimento de estratégias para o enfrentamento das alterações ambientais.

REFERÊNCIAS

Abessa, D.; Famá, A.; Buruaem, L. The systematic dismantling of Brazilian environmental laws risks losses on all fronts. **Nature Ecology & Evolution**, v.3, p. 510-11, 18 mar. 2019.

Abreu, M. C. *et al.* Temporal and spatial patterns of fire activity in three biomes of Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 8, p. 44, 5 jul. 2022.

Adrian, R. *et al.* Lakes as sentinels of climate change. **Limnology and Oceanography**, v. 54 p. 2283-2297, 01. nov. 2009.

Ahmed, N.; Thompson, S. The blue dimensions of aquaculture: A global synthesis. **Science of The Total Environment**, v. 652, p. 851-861, 20 fev. 2019.

Allen, D. Attributing Atmospheric Methane to Anthropogenic Emission Sources. **Accounts of Chemical Research**, v. 49, n. 7, p. 1344- 1350, 17 jun. 2016.

Allen, R. J. *et al.* Surface warming and wetting due to methane's long-wave radiative effects muted by short-wave absorption. **Nature Geoscience**, v 16, p. 314-320, 26 mar. 2023.

Almeida, F. F. M. de; Lima, M. A. de. Planalto centro ocidental e Pantanal. Matogrossense. In: **Guia de excursão n. 1, realizado por ocasião do XVIII Congresso Internacional de Geografia**. CNG. Rio de Janeiro, 1959, 170 p.

Alvalá, P. C.; Kirchhoff, W. V. J. H. Methane fluxes from the Pantanal floodplain in Brazil: seasonal variation. In: Van Ham, J. *et al.* (Eds.) **Non-CO₂ Greenhouse gases: scientific understanding, control and implementation**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000. p. 95-99.

Amora-Nogueira, L. *et al.* Tropical forests as drivers of lake carbon burial. **Nature Communications**, v. 13, p. 1-7, 13 jul. 2022.

Anthony, K. W. *et al.* 21st-century modeled permafrost carbon emissions accelerated by abrupt thaw beneath lakes. **Nature Communications**. v. 9, p. 1-11, 15 ago. 2018.

Assine, M. L. *et al.* The Quaternary alluvial systems tract of the Pantanal Basin, Brazil. **Braz. J. Geol.**, v. 45, p. 475-489, 01 set. 2015.

Assine, M. L. River avulsions on the Taquari megafan, Pantanal wetland, Brazil. **Geomorphology**, v. 70, n. 3, p. 357-371, 01 set. 2005.

Assine, M. L.; Soares, P. C. Quaternary of the Pantanal, west-central Brazil. **Quaternary International**, v. 114, n. 1, p. 23-34, 01 jan. 2004.

Bao, T; Jia, G; Xiyan, X. Weakening greenhouse gas sink of pristine wetlands under warming. **Nature Climate Change**, v. 13, p. 462-469, 20 mar. 2023.

Barbiero, L. *et al.* Biogeochemical diversity, O₂-supersaturation and hot moments of GHG emissions from shallow alkaline lakes in the Pantanal of Nhecolândia, Brazil. **Sci. Total Environ**, v. 619, p. 1420-1430, 1 abr. 2018.

Barbiero, L. *et al.* Soil morphological control on saline and freshwater lake hydrogeochemistry in the Pantanal of Nhecolândia, Brazil. **Geoderma**, v. 148, p. 91-106, 30 nov. 2008.

Barbosa, M. L. F. *et al.* Compound impact of land use and extreme climate on the 2020 fire record of the Brazilian Pantanal. **Global Ecology and Biogeography**, v. 31, p. 1960-1975, 8 jul. 2022.

Barbosa, P. M. *et al.* Diffusive methane fluxes from Negro, Solimoes and Madeira rivers and fringing lakes in the Amazon basin. **Limnology and Oceanography**, v. 16, p. 221-237, 21 jul. 2016.

Barbosa, P. M. *et al.* Large Seasonal and Habitat Differences in Methane Ebullition on the Amazon Floodplain. **JGR: Atmospheres**, p. 1-18, v. 126, 12 jul. 2021.

Bastviken, D. *et al.* Freshwater methane emissions offset the continental carbon sink. **Science**, v. 331, p. 50-62, 7 jan. 2011.

Bastviken, D. *et al.* Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: toward more comprehensive sampling. **Environ. Sci. Technol**, v. 44, p. 5450-5455, 22 jun. 2010.

Bastviken, D. *et al.*, Fates of methane from different lake habitats: Connecting whole-lake budgets and CH₄ emissions. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 113, p. 1-13, 24 maio 2008.

Bastviken, D. Methane. In: **Encyclopedia of Inland Waters**, Oxford: Elsevier, 2009, p. 783-805.

Benoy, G., K. Carbon dynamics in lakes of the boreal forest under a changing climate. **Environ. Rev**, v. 15, p. 175-189, 21 nov. 2007.

Bergier, I. *et al.* Alkaline lake dynamics in the Nhecolândia landscape. In: Bergier, I., Assine, M. L. (Eds.), **Dynamics of the Pantanal Wetland in South America**. Springer International, Switzerland, 2016, p. 145-161.

Bergier, I.; Assine, M. L. Functional fluvial landforms of the Pantanal: Hydrologic trends and responses to climate changes. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 119, p. 1-12, 01 nov. 2022.

Bižić M. *et al.* Aquatic and terrestrial cyanobacteria produce methane. **Science Advances**, v. 6, p. 1-9, 15 jan. 2020.

Bižić M. Phytoplankton photosynthesis: an unexplored source of biogenic methane emission from oxic environments. **Journal of Plankton Research**, v. 43, p. 822-830, 11 out. 2021.

Borrel, G. *et al.* Production and consumption of methane in freshwater lake ecosystems. **Research in Microbiology**, v. 162, p. 832-847, 01 nov. 2011.

Braun, E. W. G. Cone aluvial do Taquari, unidade geomórfica marcante da planície quaternária do Pantanal. **Revista Brasileira Geografia**, v. 39, p. 164-180, 01 out. 1977.

Camacho A. *et al.* Methane emissions in spanish saline lakes: Current rates, temperature and salinity responses, and evolution under different climate change scenarios. **Water**, v. 9, p. 1-20, 1 set. 2017.

Casa-Ruiz, J. *et al.* Integrating terrestrial and aquatic ecosystems to constrain estimates of land-atmosphere carbon exchange. **Nature Communications**, v. 14, p. 1-12, 21 mar. 2023.

Cicerone, R.J.; Oremland, R.S. Biogeochemical aspects of atmospheric methane. **Global Biogeochem. Cycles**, v. 2, n. 4, p. 299-327, 01 dez. 1988.

Corrêa, B. C., *et al.* Increased burned area in the Pantanal over the past two decades. **Science of The Total Environment**. v 835, 20 ago. 2022.

Cotta, S. R. *et al.* Disentangling the lifestyle of bacterial communities in tropical soda lakes. **Scientific Reports**, v. 12, p. 1-10, 13 mai. 2022.

Crill, P. M. *et al.* Tropospheric methane from an Amazonian floodplain lake. **JGR: Atmospheres**, v. 93, p. 1564-1570, 20 fev.1988.

Cruz, R. F. da *et al.* Water quality impacts of small hydroelectric power plants in a tributary to the Pantanal floodplain, Brazil. **River Research and Applications**, v, 27 p. 448-461, 24 jan. 2021.

Cunha, A. P. M. A.; Buermann, W.; Marengo, J. A. Changes in compound drought-heat events over Brazil's Pantanal wetland: an assessment using remote sensing data and multiple drought indicators. **Climate Dynamics**, v. 62, p. 739–757, jan. 2024.

Delsontro T.; Beaulieu J. J.; Downing J. A. Greenhouse gas emissions from lakes and impoundments: Upscaling in the face of global change. **Limnology and Oceanography Letters**, v. 3, p. 64-75, 2019.

Ehhalt, D. H. The atmospheric cycle of methane. **Tellus**. v. 26, p. 58-70. 01 fev. 1974.

Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5.ed. Rio de Janeiro, 2018. 356p.

Embrapa. **Proposta de atualização da 5ª edição do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos: ano 2023**. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2023, 141 p.

Etminan, M. *et al.* Radiative forcing of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide: A significant revision of the methane radiative forcing. **Geophysical Research Letter.**, v. 43, p. 12.614-12.623, 27 dec. 2016.

Eyre, B. D. *et al.* The climate benefit of seagrass blue carbon is reduced by methane fluxes and enhanced by nitrous oxide fluxes. **Communications Earth & Environment**, v. 4, p. 1-9, 13 out. 2023.

Filho, W. L. *et al.* Fire in Paradise: Why the Pantanal is burning. **Environmental Science**, v. 123, p. 31-34, 01 set. 2021.

Frankenberg, C. *et al.* Assessing Methane Emissions from Global Space-Borne Observations. **Science**, vol. 308, p. 1010-1014, 13 maio 2005.

Friedlingstein, P. *et al.* Global Carbon Budget 2022. **Earth Syst. Sci. Dados**, v. 14, p. 4811-4900, 4, 11 nov. 2022.

Furian, S. *et al.* Chemical diversity and spatial variability in myriad lakes in Nhecolândia in the Pantanal wetlands of Brazil. **Limnology and Oceanography**, v. 58, n. 6, p. 2249-2261, 14 nov. 2023.

Furquim, S. A. C *et al.* Salt-affected soils evolution and fluvial dynamics in the Pantanal wetland, Brazil. **Geoderma**, v. 286, 139-152, 15 jan. 2017.

Furquim, S. A. C.; Vidoca, T. T. Salt-Affected Soils of Pantanal Wetland. In: Taleisnik, E., Lavado, R. S. (eds) **Saline and Alkaline Soils in Latin America**. Springer, Cham., 2020, p. 229-254.

Fustec, E.; Lebeuvre, J. C. **Fonctions et valeurs des zones humides**. Ed. Dunod, 2000, 426 p.

Galchenko, V. F. *et al.* Microbiological and biogeochemical processes in the ocean water as indicators of hydrothermal vent activity. **Geokhimiya**, 1989.

Georgiou, K. *et al.* Global stocks and capacity of mineral-associated soil organic carbon. **Nature Communications**, v. 13, p. 1-12, 01 jul. 2022.

Gimênes Junior, H.; Rech, R. **Guia ilustrado dos peixes do Pantanal e entorno**. Julien Design, Campo Grande, MS, 2021, 660 p.

Gloor, M. *et al.* Large Methane Emissions From the Pantanal During Rising Water-Levels Revealed by Regularly Measured Lower Troposphere CH₄ Profiles. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 35, p. 1-14, 21 st. 2021.

Grant, L. *et al.* Attribution of global lake systems change to anthropogenic forcing. **Nature Geoscience**, v. 14, p. 849-854, 18 out. 2021.

Gudasz, C.; Karlsson, J.; Bastviken, D. When does temperature matter for ecosystem respiration? **Environmental Research Communications**, v. 3, p. 1-8, 7 dez. 2021.

Guerreiro, R. L. *et al.* The soda lakes of Nhecolândia: A conservation opportunity for the Pantanal wetlands. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 17, p. 9-18, 01 jan. 2019.

Günthel M. *et al.* Contribution of oxic methane production to surface methane emission in lakes and its global importance. **Nature Communications**, v. 10, p. 1-10, 2 dez. 2019.

Günthel, M. *et al.* Photosynthesis-driven methane production in oxic lake water as an important contributor to methane emission. **Limnology and Oceanography**, v. 65, p. 2853-2865, 24 jul. 2020.

Hamilton, S. K. Hydrological Controls of Ecological Structure and Function in the Pantanal Wetland (Brazil). In: McClain, M., Ed., **The Ecohydrology of South American Rivers and Wetlands**. International Association of Hydrological Sciences, Manaus, 2002, p. 133-158.

Hamilton, S. K.; Sippel, S. J.; Melack, J. M. Inundation Patterns in the Pantanal Wetland of South America Determined from Passive Microwave Remote Sensing. **Archivfur Hydrobiologie**, v. 137, p. 1-23, 01 jul. 1996.

Hamilton, S. K; Sippel, S. J.; Melack, J. M. Oxygen depletion and carbon dioxide and methane production in waters of the Pantanal wetland of Brazil. **Biogeochemistry**, v. 30, p. 115-141, 1 ago. 1995.

Hanson, R. S.; Hanson T. E. Methanotrophic bacteria. **Review Microbiol Rev**, v. 60, p. 439-471, 1 jun. 1996.

He, L. *et al.* A methanotrophic bacterium to enable methane removal for climate mitigation. **PNAS**, v. 120, p. 1-8, 21 ago. 2023.

Heilig, G. K. The greenhouse gas methane (CH₄): Sources and sinks, the impact of population growth, possible interventions. **Popul Environ**, v. 16, p. 109-137, 01 nov. 1994.

Heslop, J. K., *et al.* A synthesis of methane dynamics in thermokarst lake environments. **Earth-Science Reviews**, v. 210, 01 nov. 2020.

Hilt, S. *et al.*, Potential role of submerged macrophytes for oxic methane production in aquatic ecosystems. **Limnology and Oceanography**, v. 67, p. 1-13, 11 maio 2022.

IPCC, 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report. **Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva e Suíça, 2007, p. 104.

Jardim, P. F. *et al.* A Modeling Assessment of Large-Scale Hydrologic Alteration in South American Pantanal Due to Upstream Dam Operation **Front. Environ. Sci.**, v. 8, p. 1-15, 19 out. 2020.

Jensen, S; Siljanen, H. M. P.; Dörsch, P. Activity and abundance of methanotrophic bacteria in a northern mountainous gradient of wetlands. **Environmental Microbiology**, v. 15, p. 206-215 14 fev. 2023.

Johnson, M. S. *et al.* Methane Emission From Global Lakes: New Spatiotemporal Data and Observation-Driven Modeling of Methane Dynamics Indicates Lower Emissions. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 127, p. 1-22, 27 jul. 2022.

Junk W. J. *et al.*, Biodiversity and its conservation in the Pantanal of Mato Grosso, Brazil. **Aquatic Sciences**, v. 68, n. 3, p. 278-309, 2006.

Junk, W. J *et al.* The flood-pulse concept in river-floodplain systems. In: Dodge, D.P., Ed., **Proceedings of the International Large River Symposium (LARS)**, Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences Special Publication 106, NRC research press, Ottawa, 1989, p. 110-127.

Junk, W. J.; Cunha, C. N. Pantanal: a large South American wetland at a crossroads. **Ecological Engineering**, v. 24, p. 391-401, 10 nov. 2004.

Junk, W. J.; Cunha, C. N. The Pantanal: A brief review of its ecology, biodiversity, and protection status. In: C. M. Finlayson, G. R. Milton, R. C. Prentice, & N. C. Davidson (Eds.), **The wetland book; II: Distribution, description, and conservation**, 2016, p. 797-811.

Junk, W. J.; Wantzen, K. M. Flood pulsing, and the development and maintenance of biodiversity in floodplains. In: Batzer, D.P., Sharitz, R.R. (Eds.), **Ecology of Freshwater and Estuarine Wetlands**. University of California Press, Berkeley, 2004, p. 407-435.

Klammer, G. Die Palaowiiste des Pantanal von Mato Grosso und die pleistzane. Klimagechichte der brasilianis chen randtropen. **Z. Geomorph**, v. 26, p. 393-416, 01 jul. 1982.

Kumar, S. *et al.* Changes in land use enhance the sensitivity of tropical ecosystems to fire-climate extremes. **Scientific Reports**. v. 12, p. 964, 19 jan. 2022.

Lan, X.; Thoning, K. W.; Dlugokencky, E. J. **Trends in globally-averaged CH₄, N₂O, and SF₆ determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements.** Disponível em: https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4/. Acessado em 01 jan. 2024.

Lee, J. *et al.*, Soil organic carbon is a key determinant of CH₄ sink in global forest soils. **Nature Communications**, v. 14, p. 1-8, 30 maio 2023.

Lenhart, C. *et al.* Evidence for methane production by saprotrophic fungi. **Nature Communications**, v. 3, p. 1-8, 4 set. 2012.

Libonati, R. *et al.* Rescue Brazil's burning Pantanal wetlands. **Nature**. p. 217-219, 8 dec. 2020.

Lin, Q. *et al.* Spatial variation of organic carbon sequestration in large lakes and implications for carbon stock quantification. **CATENA**, v. 208, 01 jan. 2022.

Lo, E. *et al.* Sediment Infill of Tropical Floodplain Lakes: Rates, Controls, and Implications for Ecosystem Services. **Front. Earth Sci.**, v. 10, p. 1-14, 19 mai. 2022.

Lo, E. L. *et al.* Papel das macrófitas aquáticas na sucessão ecológica de feições geomorfológicas em leques aluviais do Pantanal: Lagoa Uberaba. **Geografia**, v. 42, n. 3, p. 159-173, 11 nov. 2016.

Loewen, C. J. G. Lakes as model systems for understanding global change. **Nature Climate Change**, v. 13, p. 304–306, 23 mar. 2023.

Marani, L.; Alvalá, P. C. Methane emissions from lakes and floodplains in Pantanal, Brazil. **Atmos. Environ.** v.41, p. 1627-1633, 8 mar. 2007.

Marengo, J. A. *et al.* Extreme Drought in the Brazilian Pantanal in 2019-2020: Characterization, Causes, and Impact. **Front. Water**, v. 3, p. 1-20, 23 fev. 2021b.

Marengo, J. A. *et al.* The heat wave of October 2020 in central South America. **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 4, p. 2281-2298, 23 ago. 2021a.

Mariot, M. *et al.* Dissolved organic matter fluorescence as a water-flow tracer in the tropical wetland of Pantanal of Nhecolândia, **Brazil. Sci. Total Environ.** v. 388, p. 184–193, 01 jan. 2008

Marques, J. F. *et al.* Fires dynamics in the Pantanal: Impacts of anthropogenic activities and climate change. **Journal of Environmental Management**, v. 299, 1 dez. 2021.

Martins, I. M. *et al.* Prioritising areas for wildfire prevention and post-fire restoration in the Brazilian Pantanal. **Ecological Engineering**, v. 176, p. 01 mar. 2022.

Matthews E., *et al.* Methane emission from high latitude lakes: methane-centric lake classification and satellite-driven annual cycle of emissions. **Scientific Reports**, v. 10, p 1-10, 27 jul. 2020.

McGlue, M. M. *et al.* Limnogeology in Brazil's "forgotten wilderness": a synthesis from the large floodplain lakes of the Pantanal. **J. Paleolimnol**, v. 46, n. 2, p. 273-289, 13 jun. 2011.

Meehl, G. A. *et al.* Climate Change 2007: The Physical Science Basis. In: **IPCC. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, 2007, p. 966.

Mega, E. R. Apocalyptic' fires are ravaging the world's largest tropical wetland. **Nature**, v. 586, p. 20-21, 01. set. 2020.

Melack, J. M. *et al.* Regionalization of methane emissions in the Amazon Basin with microwave remote sensing. **Global Change Biology**, v. 10, p. 530-544, 21 abr. 2004.

Messenger, M. L. *et al.* Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach. **Nature Communications**, vol. 7, p. 1-11, 15 dez. 2016.

Muñoz, R. *et al.* Two-phase partitioning bioreactors for treatment of volatile organic compounds. **Biotechnology Advances**, v. 25, Issue 4, p. 410-422, 1 jul. 2007.

Myhre, G., Radiative forcing due to stratospheric water vapour from CH₄ oxidation. **Geophysical Research Letters**, v. 34, p. 1-5, 09 jan. 2007.

NASA. **Methane Emissions from Wetlands, 2023**. Disponível em: <https://svs.gsfc.nasa.gov/5054/>. Acesso em: 01/01/2024.

Nascimento; S. C. do; Melo; M. M. M.; Paz, A. R. da. River-floodplain interaction and flood wave routing along rivers flowing through Pantanal wetlands. **Journal of South American Earth Sciences**, v 125, 01 mai. 2023.

Naumann, G. *et al.* **Extreme and long-term drought in the La Plata Basin: event evolution and impact assessment until September 2022**. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023, 60 p.

Neto, N. M.; Evangelista, H. Human Activity Behind the Unprecedented 2020 Wildfire in Brazilian Wetlands (Pantanal). **Front. Environ**, v. 10, p. 1-15, 15 ju. 2022.

Nisbet, E. G. *et al* Atmospheric Methane: Comparison Between Methane's Record in 2006-2022 and During Glacial Terminations. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 37. p. 1-33, 14 jul. 2023.

Nunes, A. P. *et al.* Birds of the Pantanal floodplains, Brazil: historical data, diversity, and conservation. **Papéis Avulsos de Zoologia**, v. 61, p. 1-29, 27 set. 2021.

Oliver, J. P.; Schilling, S. J. Harnessing fungi to mitigate CH₄ in natural and engineered systems. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 102, p. 7365-7375, 7 jun. 2018.

Padovani, C. R. **Dinâmica espaço-temporal das inundações do pantanal**. Tese (Doutorado em Ecologia Aplicada) - Universidade de São Paulo; Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”; Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Piracicaba, 2010, 175 p.

Peeters F.; Hofmann H. Oxidic methanogenesis is only a minor source of lake-wide diffusive CH₄ emissions from lakes. **Nature Communications**, v. 12, p. 1-5, 22 fev. 2021.

Pellegrinetti, T. A. *et al.*, 2023 Bacterial Communities Along Environmental Gradients in Tropical Soda Lakes. **Microb Ecol.**, v. 85, p. 892-903. 2 ago. 2023.

Pellegrinetti, T. A. **Microbial communities and functional genes involved in nutrient cycling of Pantanal of Nhecolândia - MS**. 2022. 128 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2022.

Pereira, O. J. R. *et al.* Estimating Water pH Using Cloud-Based Landsat Images for a New Classification of the Nhecolândia Lakes (Brazilian Pantanal). **Remote Sensing**, v. 12, p. 1-21, 28 mar. 2020.

Pi, X. *et al.* Mapping global lake dynamics reveals the emerging roles of small lakes. **Nature Communications**, v. 13, p. 1-12, 1 out. 2022.

Por, F. D. **The Pantanal of Mato Grosso (Brazil): Worlds largest wetland**. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1995, 125 p.

Pott, A.; J. S. V. Silva. Terrestrial and aquatic vegetation diversity of the Pantanal wetland. In: I. Bergier; M. Assine (Ed.): **Dynamics of the Pantanal Wetland in South America**. Springer. The Handbook of Environmental Chemistry, 2015, p. 111-131.

Pott, A.; Pott, V. J. Chapter 3. Flora of the Pantanal. In: Damasceno-Junior, G. A., Pott, A. (Eds.), **Flora and Vegetation of the Pantanal Wetland**, 1. ed. Springer, Amsterdam, 2021, p. 39-226.

Quénol, H. *et al.* Climatologia em escalas finas num ambiente representativo do Pantanal da Nhecolândia: exemplo da salina do Meio. **Anais do XI Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006, p. 2226-2229.

Rasbold, G. G. *et al.* Enhanced middle Holocene organic carbon burial in tropical floodplain lakes of the Pantanal (South America). **Journal of Paleolimnology**, v. 65, p. 181-199, 01 fev. 2021.

Reddy, R.; DeLaune, R. D. **Biogeochemistry of Wetlands: Science and Applications**. CRC Press. 2008, 684 p.

Rezende Filho, A. T. *et al.* Hydrochemical variability at the Upper Paraguay Basin and Pantanal wetland. **Hydrol. Earth Syst. Sci**, v. 16, p. 2723-2737, 14 ago. 2012.

Rezende Filho, A. T. *et al.* Impacts of lithological and anthropogenic factors affecting water chemistry in the upper Paraguay River Basin. **Journal of Environmental Quality**, v. 44, p. 1832-1842, 01 nov. 2015.

Roldán, D. *et al.* Diversity and Effect of Increasing Temperature on the Activity of Methanotrophs in Sediments of Fildes Peninsula Freshwater Lakes, King George Island, Antarctica. **Front. Microbiol.**, v. 13, p. 1-15, 12 mar. 2022.

Rosentreter, J. A. *et al.* Coastal vegetation and estuaries are collectively a greenhouse gas sink. **Nature Climate Change**. v. 13, p. 579-587, 21 apr. 2023.

Rosentreter, J. A. *et al.* Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources. **Nature Geosciences**. v. 14, p. 225-230, 5 abr. 2021b.

Rosentreter, J. A. *et al.* Methane and Nitrous Oxide Emissions Complicate Coastal Blue Carbon Assessments. **Global Biogeochem. Cycles**, v. 35, p. 1-8, 28 jan. 2021a.

Roth, F. *et al.* Methane emissions offset atmospheric carbon dioxide uptake in coastal macroalgae, mixed vegetation and sediment ecosystems. **Nature Communications**, v. 14, p. 1-11, 03 jan. 2023.

Sánchez, R. O. **Las unidades geomórficas del Pantanal y sus connotaciones biopedoclimáticas**. EDIBAP. Programa de desarrollo Regional de la O.E.A., 1977, 31 p.

Saunois *et al.* The growing role of methane in anthropogenic climate change. **Environ. Res. Lett.**, v. 11, n. 12, p. 1202-1207, 12 dez. 2016.

Saunois, M. *et al.* The Global Methane Budget 2000–2017. **Earth System Science Data**, v. 12, n. 3, p. 1561-1623, 15 jul. 2020

Schleder, A. *et al.* Disentangling sources and variation of organic matter in soda lakes from Nhecolândia (Pantanal, Brazil) based on hydrocarbons and bacterial composition. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 114, 01 mar. 2022.

Silva, J. S. V; Abdon, M. M. Delimitação do pantanal brasileiro e suas sub-regiões. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 33, p. 1703-1711, 01 out. 1998.

Smith, L. K. *et al.* Methane emission from the Orinoco River floodplain, Venezuela. **Biogeochemistry**, v. 51, n. 2, p. 113-140, 1 nov. 2000.

Soriano, B. M. A.; Galdino, S. **Análise das condições climáticas em 2000 na sub-região da Nhecolândia, Pantanal, Mato Grosso do Sul, Brasil**. Corumbá: Embrapa Pantanal, 2002, 34

p.

Tang K. W. *et al.* Methane Production in Oxic Lake Waters Potentially Increases Aquatic Methane Flux to Air. **Environ. Sci. Technol. Lett.**, v. 3, p. 227-233, 31 maio 2016.

Thielen D, *et al.* Marine heatwaves in the dynamics of the Pantanal's historical drought and unprecedented fires. **EGU General Assembly 2021**, EGU21-9268, 19 abr. 2021.

Thielen, D. *et al.* Quo vadis Pantanal? Expected precipitation extremes and drought dynamics from changing sea surface temperature. **PloS one**, v. 15, n. 1, p. 1-25, 7 jan. 2020.

Tomas, *et al.* Distance sampling surveys reveal 17 million vertebrates directly killed by the 2020's wildfires in the Pantanal, Brazil. **Scientific Reports**, v. 11, 16 dez. 2021.

Tranvik, L. J. *et al.* Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. **Limnol. Oceanogr.**, v. 54, p. 2298-2314, 16 nov. 2009.

Tricart, J. El Pantanal: un ejemplo del impacto geomorfológico sobre el ambiente. **Informaciones Geográficas**, v. 29, p. 81-97, 01 jan. 1982.

Tubelis, D. P.; Tomas, W. M. Bird species of the Pantanal wetland. Brazil. **Ararajuba**, v. 11, p. 5-37, 01 jun. 2003.

UNEP. **Adaptation Gap Report 2023: Underfinanced. Underprepared. Inadequate investment and planning on climate adaptation leaves world exposed.** Nairobi. 2023, 112 p.

UNESCO. **Pantanal Conservation Area.** Disponível em: <https://whc.unesco.org/en/list/999>. Acesso em: 01/01/2024.

Vergara-Fernández, A. *et al.* A comparative assessment of the performance of fungal-bacterial and fungal biofilters for methane abatement. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, 5 out. 2020.

Wang W. *et al.* Global lake evaporation accelerated by changes in surface energy allocation in a warmer climate. **Nature Geoscience**, p. 410-414, 30 abr. 2018.

Wang, L. *et al.* Fungi and cercozoa regulate methane-associated prokaryotes in wetland methane emissions. **Front. Microbiol.**, v. 13, p. 1-16, 6 jan. 2023.

Wantzen, K. M. *et al.* The end of an entire biome? World's largest wetland, the Pantanal, is menaced by the Hidrovia project which is uncertain to sustainably support large-scale navigation. **Science of the Total Environment**, v. 908, p. 1-9, 15 jan. 2024.

Wantzen, K. M. *et al.* The Pantanal: How long will there be life in the rhythm of the waters? In: Wantzen, K.M. (Ed.), **River Culture - Life as a Dance to the Rhythm of the Waters.** UNESCO Publishing, Paris, 2023, p. 497-536.

Wantzen, K. M. *ver culture: how socio-ecological linkages to the rhythm of the waters develop, how they are lost, and how they can be regained.* **The Geographical Journal**, v. 0, 1-16, 23 ago. 2022

Woolway, R. I. *et al.* Global lake responses to climate change. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, p. 388–403, 14 jul. 2020.

Wurtsbaugh, W. A. *et al.* Decline of the world's saline lakes. **Nature Geoscience**, v. 10, p. 816-821, 23 out. 2017.

Yvon-Durocher, G. *et al.* Methane fluxes show consistent temperature dependence across microbial to ecosystem scales. **Nature**, v. 507, p. 488–491, 19 mar 2014.

Zhang *et al.* Emerging role of wetland methane emissions in driving 21st century climate change. **PNAS**, v. 114, n. 36, p. 9647-9652, 21 ago 2017.

3 CAPÍTULO 2 - PADRÕES ESPACIAIS E TEMPORAIS DOS FLUXOS DE METANO (CH₄) EM ECOSISTEMAS LÊNTICOS NO PANTANAL DA NHECOLÂNDIA

RESUMO

As zonas úmidas são as principais fontes naturais de emissão de CH₄. O Pantanal é uma das maiores áreas úmidas continentais do planeta, no entanto, há poucos dados sobre a produção e emissão de metano (CH₄) nesse bioma. Identificar a origem e estimar os fluxos de gases de efeito estufa (GEE) nesses locais é um grande desafio devido à falta de estudos em zonas úmidas tropicais. A contribuição global dessas áreas para os modelos de Mudanças Climáticas é subestimada devido à escassez e incerteza dos dados disponíveis. Utilizando câmaras flutuantes e fixas em diferentes locais das lagoas, aqui tratados com *compartimentos*, este estudo caracterizou e quantificou os fluxos de CH₄ de duas lagoas de água doce e três de água salino-alkalina, durante os anos de 2019 e 2020. Esse estudo revelou variação nas emissões de CH₄ entre diferentes *compartimentos* ambientais das lagoas, bem como mudanças anuais nos fluxos de CH₄. Os resultados indicam que as maiores emissões de CH₄ foram observadas nos sedimentos marginais das lagoas de água doce (68,23 mg CH₄ m⁻² dia⁻¹), sugerindo que a composição do sedimento e a presença de matéria orgânica são fatores determinantes nas emissões nestes ecossistemas. Para compreender a variação espacial e temporal das emissões de CH₄ das lagoas, foi desenvolvido um índice denominado IMGEE, cujo os maiores valores foram nas lagoas de água doce. Além disso, foi observado aumento superior a 2.800% de aumento das emissões em 2020, aos quais foram correlacionados com eventos climáticos atípicos, como secas prolongadas e aumento das temperaturas. Essas correlações sugerem notável sensibilidade desses ecossistemas às mudanças climáticas. A compreensão desses processos é fundamental para aprimorar os modelos de balanço de CH₄ e desenvolver estratégias de mitigação dos impactos ambientais. Os resultados obtidos fornecem dados para gestão sustentável de ecossistemas lênticos tropicais e destacam a importância de incluir esses ambientes nas estratégias globais de mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

Palavras chave: ecossistemas lênticos, mudanças climáticas e gases do efeito estufa

3.1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o metano (CH_4) vem aumentando gradativamente na atmosfera. Para se ter uma ideia, as zonas úmidas são responsáveis por aproximadamente 20% da emissão global de CH_4 de $500 \pm 100 \text{ Tg}$ (10^{12} g) anualmente ((Bartlett; Harriss, 1993; Bloom *et al.*, 2010; Bridgham *et al.*, 2013). Nas regiões tropicais, essas zonas são conhecidas como importante fonte emissora de CH_4 para a atmosfera, na qual estima-se que 94 (56 – 158) Tg ano^{-1} do fluxo de CH_4 natural são dessas áreas (Murguia- Flores; Jaramillo; Gallego-Sala, 2023).

Entre os ecossistemas aquáticos encontrados nas zonas úmidas, os lânticos (lagoas) destacam-se como importantes fontes de emissão de CH_4 (Saunois *et al.*, 2020; Rosentreter *et al.*, 2021). O Pantanal é uma das maiores zonas úmidas continental do Planeta, no entanto, apesar de sua superfície ser considerável de $\sim 150 \text{ mil km}^2$ com inúmeras lagoas (Por, 1995; Assine *et al.*, 2015; Padovani, 2010; Silva; Abdon, 1998), existem poucos dados sobre a produção e emissão CH_4 para esta zona (Barbiero *et al.*, 2018; Bastviken *et al.* 2010; Marani; Avalá, 2007).

A maioria dos estudos sobre as emissões de CH_4 em lagoas tem sido conduzida em regiões de altas latitudes, onde a densidade (Messenger *et al.*, 2016) e quantidade (Wang *et al.*, 2018) desses ecossistemas mais abundantes em escala global. Por outro lado, há escassez de estudos em regiões de baixas latitudes, onde fatores como a dinâmica da evaporação (Wang *et al.*, 2018) e as variações de temperatura aceleram as reações biogeoquímicas diretamente associadas à respiração do ecossistema (Fustec; Lefeuvre, 2000; Gudasz, Karlsson; Bastviken, 2021; Reddy; DeLaune, 2008; Yvon-Durocher *et al.*, 2014), resultando em níveis mais elevados de emissões de CH_4 nos trópicos (Frankenberg *et al.*, 2005). Ao contrário dos ecossistemas temperados e árticos, que permanecem congelados durante a maior parte do ano e liberam CH_4 à medida que descongelam (Matthews *et al.*, 2020; Zhuang *et al.*, 2023).

Nesse contexto, a variabilidade temporal e espacial das emissões de CH_4 na água, sedimento e solo desses ecossistemas lânticos tropicais são poucos representados na literatura. O CH_4 emitido nas lagoas é o produto das interações anaeróbicas microbianas (metanogênese) que metabolizam a matéria orgânica (MO), enriquecendo o ambiente de carbono (C) (Bastviken *et al.*, 2008), por *Archeas* em sedimento anóxico (Bastviken, 2009; Bastviken *et al.*, 2011). Diante desse processo, o CH_4 é produzido e pode ficar retido no

sedimento em forma de bolhas ou dissolvido na água em microbolhas, na qual são liberadas para a atmosfera via ebulição ou difusão, respectivamente.

Diante dessa situação de escassez e falta de entendimento profundo sobre os mecanismos temporais e espaciais da emissão de CH₄, o Pantanal de 2019 e 2020 foi um dos biomas mais catigados pelas alterações climáticas atípicas e por atividades antrópicas (Tomas *et al.*, 2021; Libonati *et al.*, 2022). Severa seca e onda de calor atingiram toda a região (Cunha; Buermann; Marengo, 2024; Marengo *et al.*, 2021a; Marengo *et al.*, 2021b; Nauman *et al.*, 2023; Thielen *et al.*, 2020; Thielen *et al.*, 2021), sendo potencializada por inúmeros incêndios de origem natural e antrópica (Abreu *et al.*, 2022; Barbosa *et al.*, 2022; Corrêa *et al.*, 2022; Mataveli *et al.*, 2021; Marques *et al.*, 2021; Neto; Evangelista, 2022; Kumar *et al.*, 2022), com tendência que esses eventos sejam mais frequentes no futuro (Silva *et al.*, 2022). Esse fenômeno afetou diretamente os ecossistemas lênticos pantaneiros, pois eles necessitam de regimes de chuvas regulares para seu pleno funcionamento hidrológico, ecológico e biogeoquímico (Guerreiro *et al.*, 2019; Bergier; Assine, 2022; Nascimento; Melo; Paz, 2023).

Nesse sentido, o Pantanal da Nhecolândia, localizado no Estado do Mato Grosso do Sul, torna-se área ideal para discriminar e identificar os parâmetros e processos atuantes na emissão de CH₄ em ecossistemas lênticos tropicais. Essa sub-região é caracterizada pela presença de importante sistema lacustre, formado por cerca de 15.000 ecossistemas lênticos com águas que variam de composição de águas doce, oligosalinas a hipersalinas. Essas lagoas possuem altas quantidades de MO em diferentes estados tróficos, alta produtividade, pouca profundidade, elevada temperatura e evapotranspiração (Junk *et al.*, 1989; Junk; Cunha, 2004; Alho, 2005; Guerreiro *et al.*, 2019; Bergier; Assine, 2022).

Dessa forma, esse *Capítulo 2* visa entender os padrões espaciais e temporais dos fluxos de CH₄ na água, no sedimento presente nas margens e em solos adjacentes inundados periodicamente em cinco diferentes ecossistemas lênticos da Nhecolândia. Destaca-se a necessidade de compreender os processos naturais envolvidos na emissão e consumo naturais de CH₄, assim como avaliar a resposta dos diferentes ecossistemas lênticos com o aumento da temperatura global e alteração no regime das chuvas, conforme previsões do IPCC (2021).

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

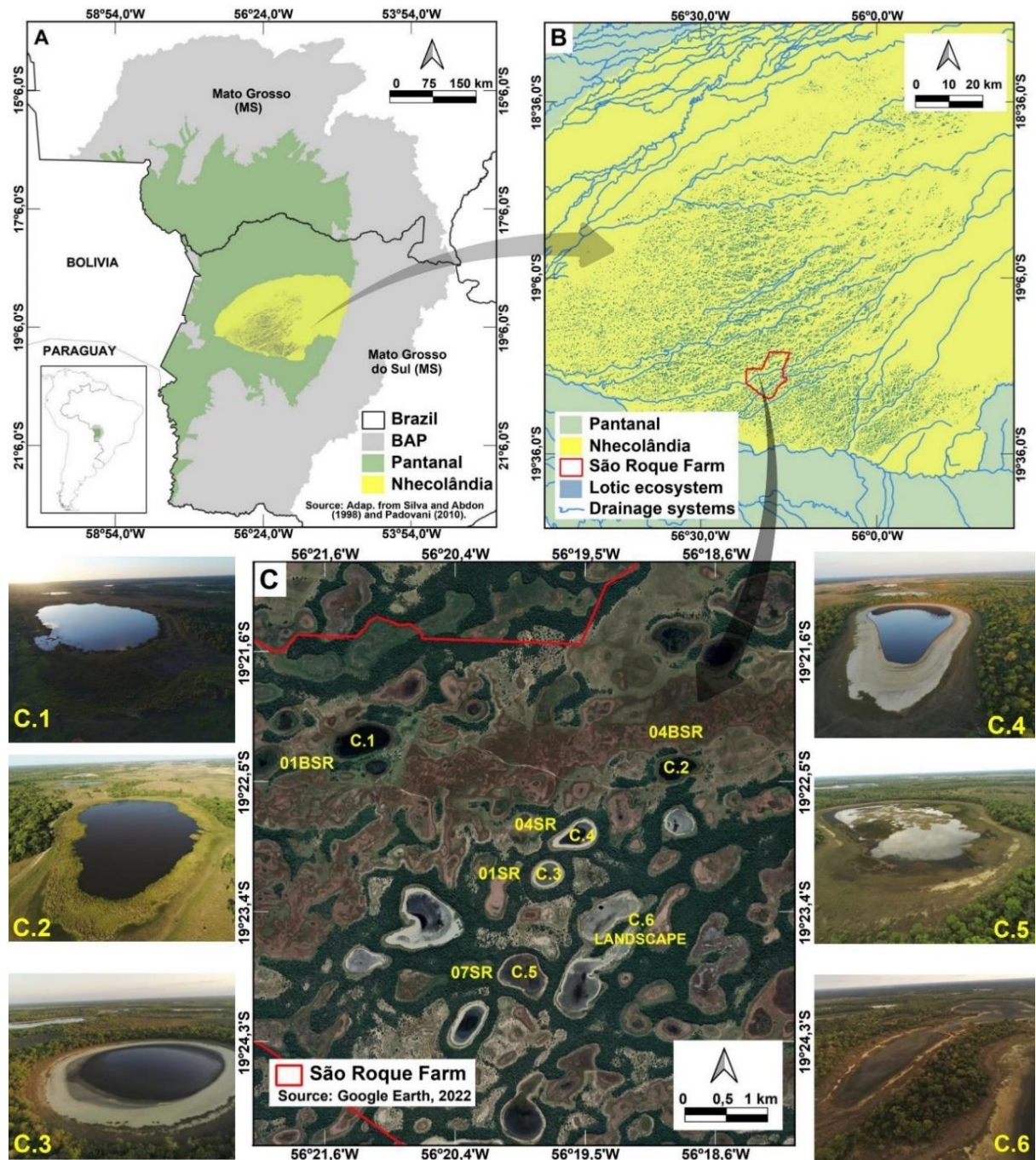
3.2.1 Área de estudo

A Nhecolândia é uma das sub-regiões do Pantanal mato-grossense e está inserida dentro da Bacia do Alto Paraguai (BAP) (Figura 11 - A). Esta sub-região é um importante sistema lacustre composto por cerca de 12 mil lagoas variando de alguns metros a dezenas de quilômetros quadrados com formato arredondado ou irregular (Barbiero *et al.*, 2018; Pereira *et al.*, 2020; Pott; Pott, 2011). Os trabalhos de campo foram desenvolvidos na Fazenda São Roque (19°22'13.22"S; 56°20'44.57"O) (Figura 11 – B e C). Nessa paisagem encontram-se dezenas de ecossistemas lênticos de água doce à salino-alcálicas (Figura 11 - C).

O Pantanal da Nhecolândia é caracterizado por clima tipo Awa segundo a classificação de Köppen, com estações distintas: seca de abril a setembro e chuvosa de outubro a março, resultando em invernos secos e verões chuvosos. Normalmente, essa região possui média anual de temperatura em torno de 25°C, com variações de 20,3°C a 31,6°C, dependendo da estação. A precipitação média anual é de aproximadamente 1.433mm, mas a evapotranspiração anual alcança 1.862mm, levando a déficit hídrico anual de cerca de 329mm (Soriano; Galdino 2000).

Contudo, este padrão climático sofreu variações durante o período avaliado no estudo (2019-2020). O ano de 2020 foi marcado por redução nas chuvas, com diminuição de 26% na precipitação média anual comparada à média de longo prazo desde 1982 (Mataveli *et al.*, 2021) e por onda de calor (Marengo *et al.*, 2021a). Tal déficit pluviométrico desencadeou incêndios florestais em larga escala, afetando cerca de 30% do bioma, com a maioria dos incêndios consumindo vegetação natural, incluindo áreas previamente úmidas que secaram devido à estiagem.

Figura 11 – Localização geográfica da Bacia do Alto Paraguai, onde se localiza o Pantanal no Brasil, com destaque para a sub-região da Nhecolândia (A). Localização da sub-região da Nhecolândia e da Fazenda São Roque (B e C). Imagem de satélite dos 5 ecossistemas lânticos amostrados (C) e imagem aérea de 01BSR (C.1) e 04BSR (C.2), lagoas de água doce, e 01SR (C.3), 04SR (C.4) e 07SR (C.5), lagoas de águas salino-alcálinas e paisagem do entorno (C.6).



Fonte: Adaptado de Silva; Abdon, 1998; Padovani, 2010; Google Earth, 2022. Fotografias C1 a C6 imagens do autor.

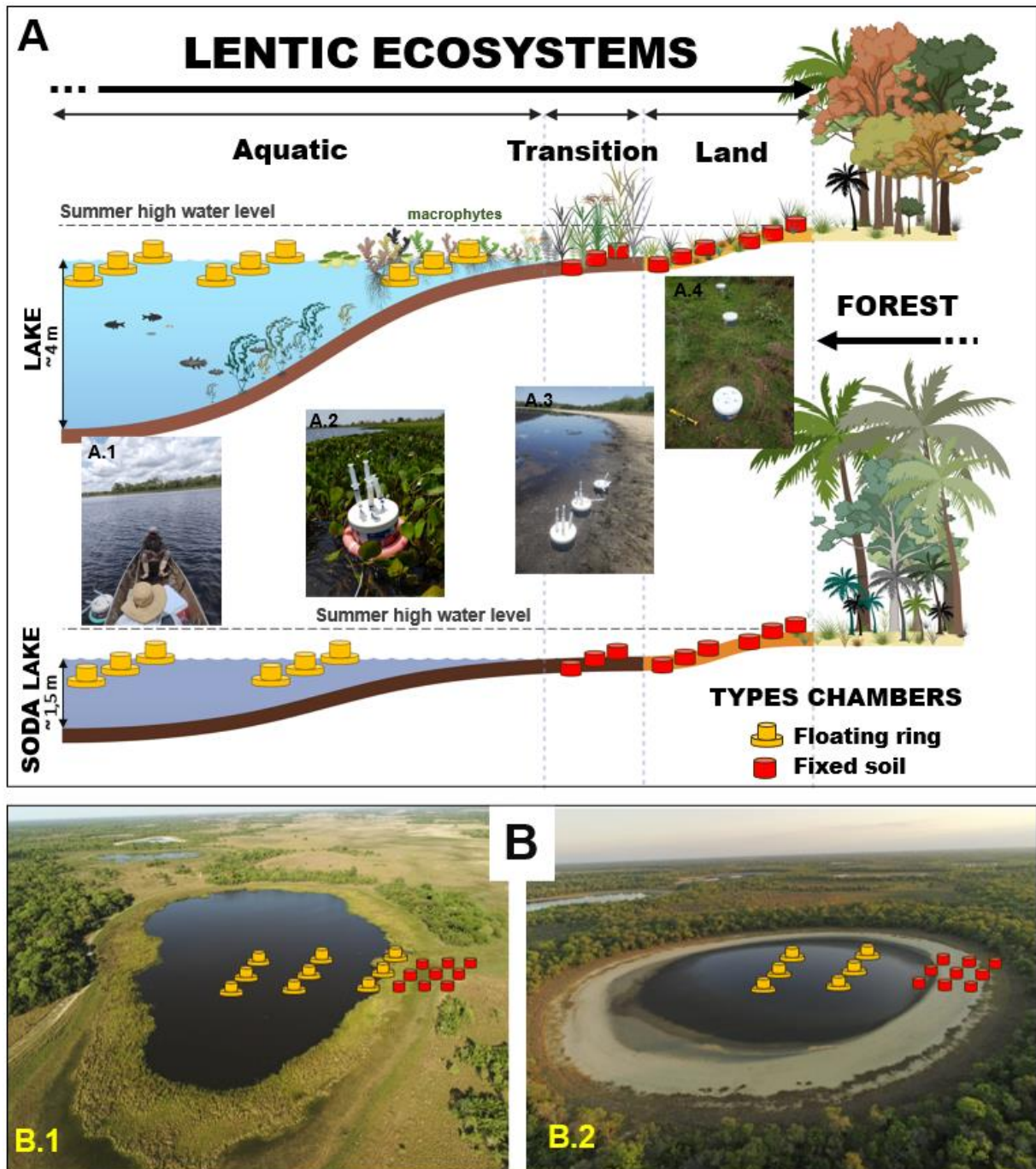
Para avaliar as emissões de CH₄ encontradas nessa área, foram escolhidos 5 ecossistemas lênticos (lagoas) típicos dessa região e com diferentes estados tróficos (Pellegrinetti 2022; Pellegrinetti, *et al.*, 2023). Sendo duas lagoas de água doce, denominadas de 01BSR e 04BSR e três lagoas salino-alcálicas, denominadas 01SR, 04SR e 07SR (Figura 11 - C1 a C6). Nas menções das siglas “BSR” e “SR” se refere à “baía” e a “salina” da “Fazenda São Roque”, respectivamente, cujo são nomes regionais dados aos tipos de água encontrada nessas lagoas. Nessas lagoas, as coletas ocorreram em outubro de 2019 e de 2020.

3.2.2 O Fluxo de CH₄ dos Diferentes *Compartimentos*

Por meio de transecto, os ecossistemas lênticos foram divididos em três compartimentos ambientais. Nesse estudo, esses compartimentos são definidos como “compartimentos”, denominados de “*aquatic*”, “*transition*” e *land*. Foi denominado de *aquatic* o centro até a extensão marginal da lagoa, *transition* a interface marginal entre a água e o solo, rico em sedimento litorâneo e *land* o solo arenoso periodicamente inundado pela lagoa (Figura 12).

Foram utilizadas câmaras padronizadas com dimensão de 20x30cm e equipadas com válvulas para equilibrar a pressão, adaptadas para condições distintas. Para *aquatic* as câmaras possuíam flutuadores e eram alocadas a 2 cm abaixo da lâmina de água por pequeno barco, quando necessário. Já para os *compartimentos* de *transition* e *land* as câmaras foram adaptadas para fixar cerca de 2 cm de profundidade no chão.

Figura 12 – Representação dos três *compartimentos* com as três sub-réplicas dentro dos ecossistemas lenticos de água doce e salino-alcalina, seguindo um transecto (A). Fotografias dos típicos locais que foram coletadas as amostras em *aquatic* (A.1 e A.2), *transition* (A.3) e *land* (A.4). Ilustração esquemática da disposição dos dois tipos de câmaras nas lagoas de água doce (B.1) e nas salino-alcalina (B.2), situação sem escala.

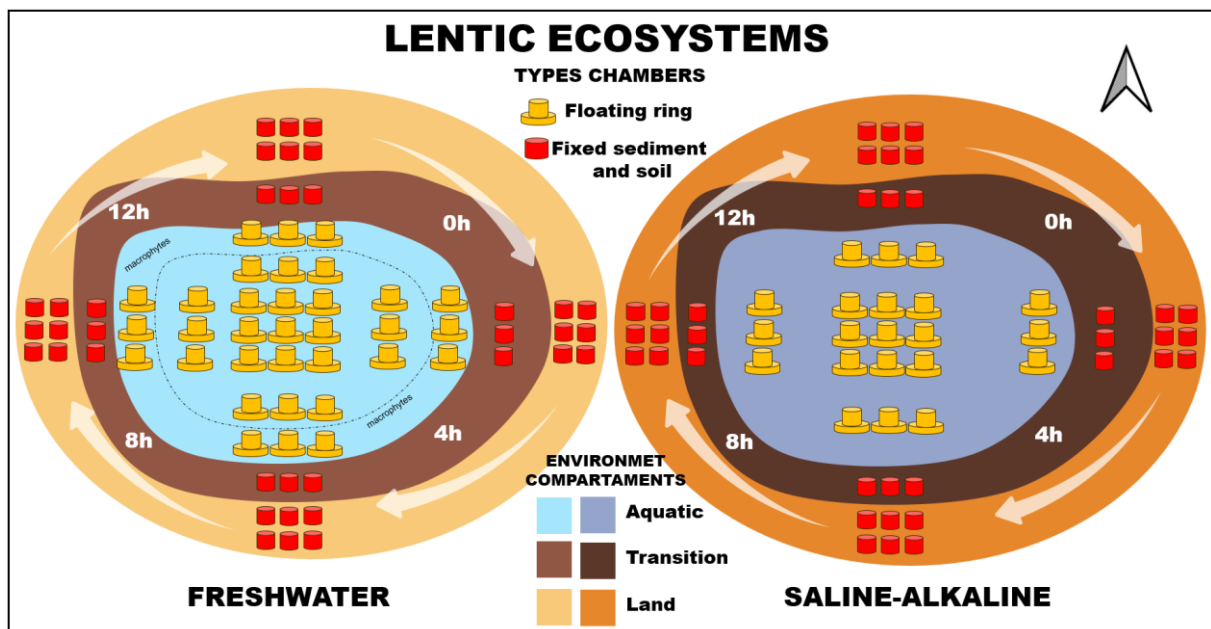


Fonte: Elaborado pelo autor.

Devido às diferenças das áreas ocupadas por cada *compartimento* e para compensar a representatividade das unidades amostrais no transecto, foram coletados de cada *compartimento* 3 sub-réplicas ao mesmo tempo (Figura 13).

Para representar a área total dos ecossistemas lênticos e testar a variabilidade temporal, espacial e ambiental das lagoas e dos *compartimentos*, cada transecto representou uma réplica. O transecto era rotacionado em cada 4 horas, seguindo o sentido horário na direção dos quatro pontos cardeais. Totalizando 4 transectos (4 réplicas) em 12 h por ecossistema lêntico (Figura 13). Esta técnica de amostragem foi repetida para ambas as campanhas (2019 e 2020).

Figura 13 - Esquema da disposição das câmaras flutuantes e fixas nos diferentes *compartimentos* ambientais encontrados nas lagoas de água doce e lagoas salino-alcálicas. As coletas foram realizadas seguindo os quatro pontos cardeais, cuja direção do transecto era rotacionadas a cada 4h no sentido horário, totalizando 12 h de esforço amostral que repetiram nas duas campanhas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O CH₄ que ficou armazenado na câmara foi retirado em 4 intervalos de tempos que variaram de 1 a 25 minutos de acordo com cada compartimento. Com auxílio de seringas plásticas (60 mL), o gás foi retirado e acondicionado em frascos de vidro (20 mL), lacrados com septo de isobutílica. A determinação da concentração de CH₄ foi quantificada em equipamento de cromatografia gasosa (Shimadzu GC 2014) que possui detector de ionização de chama (FID), capaz de quantificar hidrocarbonetos ajustado isotermicamente a 400 °C. O equipamento foi calibrado diariamente com sete padrões certificados (0,96; 1,84; 3,58; 11,0; 24,0, 102,0 e 1030,0 ppm).

Os fluxos de CH₄ foram calculados por meio da *Equação Geral dos Gases* para cada amostra foi determinado por regressão linear gerada a partir dos valores medidos do gás ao longo dos intervalos estipulados para cada compartimento, normalizado em função do volume (0,0120 m³), área da câmara (0,0942 m²) e a temperatura e pressão do local.

3.2.3 Variação espacial e temporal dos Fluxos de CH₄

Três índices específicos foram criados para entender a heterogeneidade complexa e fornecer análise abrangente. Estes índices visam quantificar de forma eficaz as variações nas emissões e consumos de CH₄, permitindo melhor compreensão da dinâmica ecológica e das respostas ambientais no ecossistema do Pantanal. Logo, o uso de índices é uma forma eficaz de resumir e comunicar a complexidade dos dados de forma mais acessível.

Para calcular a variação espacial foi criado o índice chamado de Índice de Variação Espacial (IVE) para cada lagoa em cada ano, foi usado o desvio padrão das medianas, médias e desvios padrões originais para cada *compartimento* (*aquatic*, *transition* e *land*). Esse cálculo fornece a variação dentro de cada lagoa.

A fórmula do desvio padrão (σ) é:

$$IVE = \sigma = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n}}$$

Onde:

x : representa os valores individuais (mediana, média ou desvio padrão de emissão/consumo).

\bar{x} : é a média desses valores.

n é o número total de valores (neste caso, o número de *compartimentos*).

A soma (\sum) é feita sobre todos os *compartimentos* de uma lagoa.

Para a variação temporal foi criado o índice chamado Índice de Variação Temporal (IVT), calculando a diferença absoluta entre os valores de 2019 e 2020 para cada parâmetro (mediana, média e desvio padrão) em cada *compartimento* de cada lagoa. Esta diferença absoluta demonstra a magnitude da mudança para cada fluxo de CH₄ em cada *compartimento*, de um ano para o outro.

A fórmula é:

$$IVT = IVT_{2020} - IVT_{2019}$$

Para sintetizar as variações espaciais e temporais das emissões e consumo dos ecossistemas lênticos é proposto o índice combinado que é chamado de Índice Integrado de Monitoramento de Gases do Efeito Estufa (IMGEE). Dada a natureza discreta dos dados, ou seja, os dados são limitados a momentos específicos, assume-se que exista variação linear dos fluxos de CH₄, é calculado a integral com a média das medições de 2019 e 2020, multiplicada pelo intervalo de tempo em um ano. O IMGEE é aplicado a cada *compartimento* em cada lagoa, desses resultados obtém o valor de magnitude da variação espacial e temporal de lagoa, de tal modo que é possível comparar as maiores mudanças dos fluxos de CH₄ em cada ecossistema.

A fórmula do IMGEE é:

$$IMGEE = \int_{2019}^{2020 \text{ ou } \infty} f(t) dt$$

Onde:

$f(t)$: é a função que descreve os fluxos de CH₄ em função do tempo

dt : é diferença do intervalo de tempo entre os anos de 2019 e 2020.

O IMGEE é a aproximação simplificada de interpolação linear entre dois pontos. Esse índice pode ser aplicado para qualquer fluxo de GEE e quando maior for o conjunto de dados (modelo contínuo ao longo do tempo) mais robusto e preciso serão os resultados. Logo, o IMGEE é possível calcular e comparar a magnitude da variação dos fluxos das lagoas, indicando que elas sofreram mudanças significativas, tais como: mudanças ambientais e climáticas. Além disso esse índice pode indicar tendências, na qual pode fornecer indicação útil sobre o comportamento das emissões e consumo dos GEE nas lagoas o que pode ser um dado valioso para pesquisas ambientais, bem como tomadas de decisão relacionada à gestão e conservação do Pantanal frente às mudanças climáticas ao longo do tempo.

3.2.4 Análise dos Dados

Considerando que a premissa da normalidade não foi satisfeita para a realização de testes estatísticos paramétricos, foi aplicado o Teste Pareado de Wilcoxon (*Test Wilcoxon Matched-Pairs*, $p < 0,05$) por representação da variação dos dados observados por meio de gráficos *boxplot*. Assim, esse teste não-paramétrico verifica a existência de diferenças nas concentrações dos anos de 2019 e 2020 dos fluxos de CH₄ nos diferentes *compartimentos* amostrados das lagoas de águas doces e salino-alcálicas.

Os dados dos fluxos aqui apresentados referem-se a mediana em $\text{mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, média e desvio padrão (*média* ± *dp*). A análise dos dados foi desenvolvida no software “R” (R Development Core Team, 2013), por meio dos pacotes “*vegan*”, “*FactoMineR*”, “*ggplot2*” e “*gpurR*”.

3.3 RESULTADOS

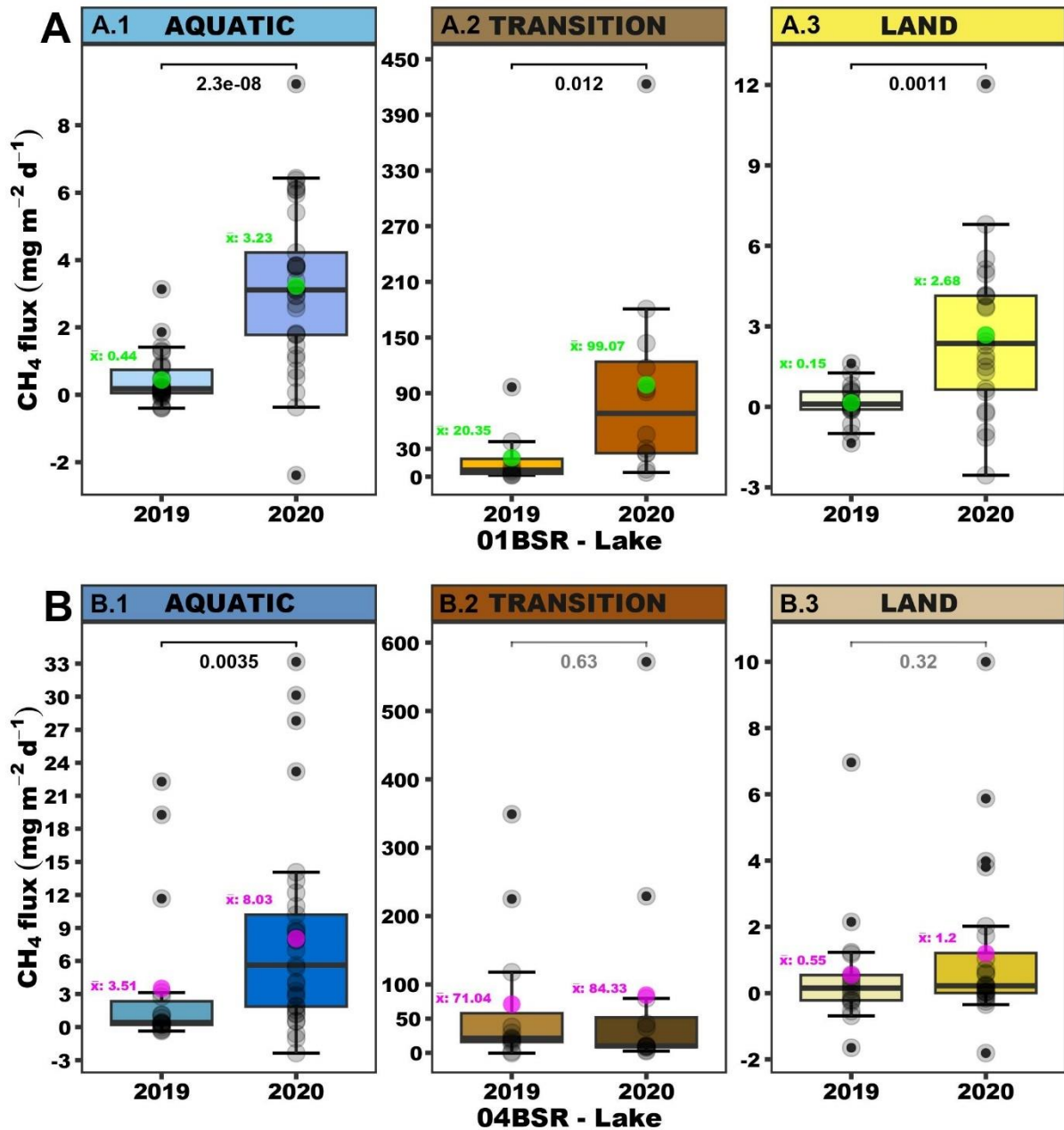
3.3.1 Variabilidade espacial e temporal dos fluxos de CH_4 em lagoas de água doce

Nos períodos de 2019 e 2020 foram calculadas 244 medições de fluxos de CH_4 nos ecossistemas lênticos de água doce e seus *compartimentos* associados (*aquatic*, *transition* e *land*). Esses resultados foram categorizados em dois grupos, a lagoa 01BSR e 04BSR com 126 e 118 medidas de fluxos, respectivamente

Os maiores fluxos de CH_4 foram observados no *compartimento transition* nas duas lagoas. Em 2020, em 01BSR foi observado fluxo de 68,23 ($5,63 \pm 6,92$) $\text{mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (Figura 14 – A2), seguida de 04BSR que atingiu fluxo de 21,26 ($71,04 \pm 108,62$) $\text{mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ em 2019 (Figura 14 – B2). Enquanto os fluxos intermediários encontram-se em *aquatic* e os menores em *land* em ambas lagoas, inclusive ocorrendo consumo de CH_4 .

Nas duas lagoas observaram variações temporais (*Test Wilcoxon Matched-Pairs*, com $p = < 0,05$) nos fluxos de CH_4 entre os anos em todos os *compartimentos*. Quando são comparados esses fluxos entre os anos de 2019 e 2020 nos ecossistemas lênticos e seus *compartimentos* associados, foram observados aumento nas emissões do ano de 2019 para 2020 na lagoa 01BSR, já em 04BSR este padrão foi apenas observado em *aquatic*, embora as médias de *transition* e *aquatic* tenham sido maiores em 2020. Além disso, no *compartimento transition* da lagoa 04BSR, observam-se diminuições das emissões de 2019 para 2020, de 21,26 ($71,04 \pm 108,62$) para 10,05 ($84,33 \pm 166,28$) $\text{mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, respectivamente (Figura 14).

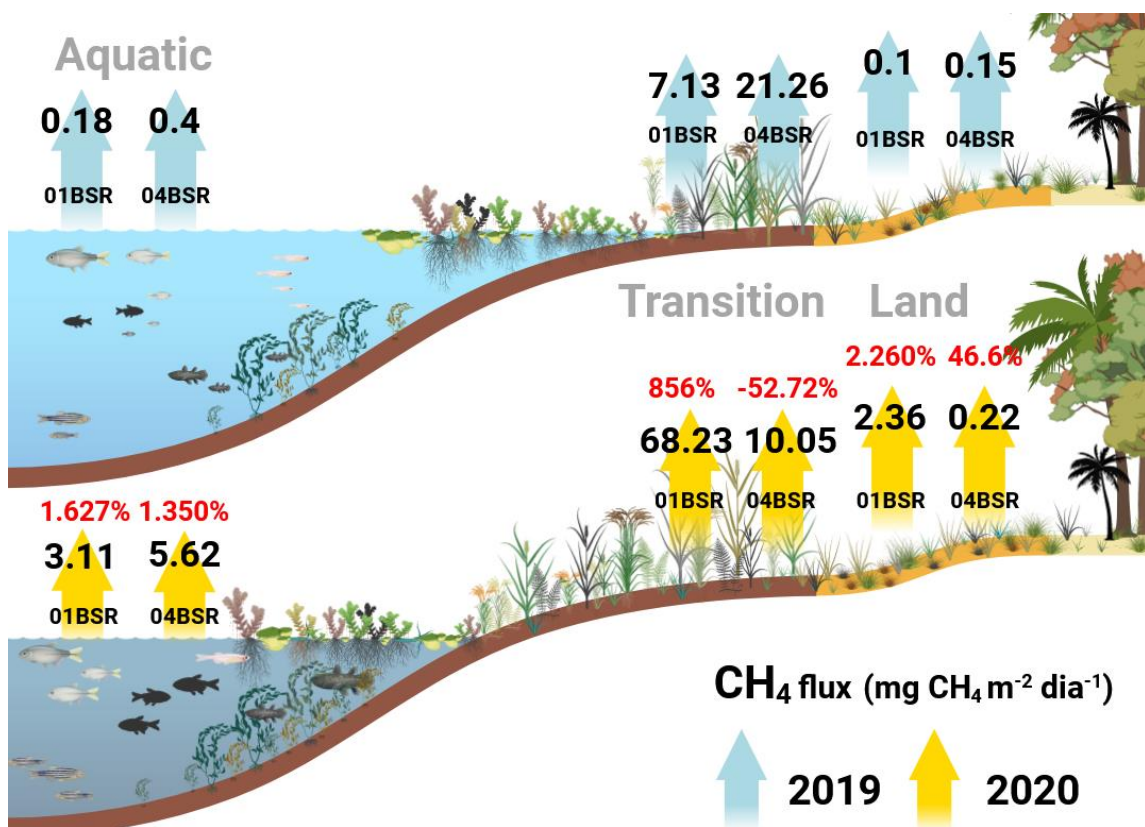
Figura 14 - Gráficos de *boxplot* (medianas, quartis, amplitudes de variação, média) para os fluxos anuais de CH₄ (mg CH₄ m⁻² dia⁻¹) nas lagoas de água doce 01BSR (A) e 04BSR B) e. As barras horizontais acima dos *boxplot* são os resultados do *Test Wilcoxon Matched-Pairs* (p= <0,05) que comparou as concentrações anuais nos *compartimentos* dos ecossistemas lânticos de água doce.



Em todos os *compartimentos* amostrados nas duas lagoas são observadas variações espaciais. Todos os *compartimentos* possuem padrões distintos de emissões e consumos (*Test Wilcoxon Matched-Pairs*, com p= <0,05). Em 2020 foi possível observar maior amplitude nos dados, inclusive com picos (*outliers*) de emissões em todos os *compartimentos* (Figura 14).

Todos *compartimentos* das lagoas de água doce aumentaram as emissões em 2020. Nesse ano, o nível de água das lagoas estava mais baixo, exceto o *compartimento land* de 04BSR, aonde observou consumo de CH₄. As maiores diferenças foram observadas nos *compartimentos* de *aquatic* e em *land* da 01BSR. Em 2019, foi observado fluxo de 0,18 (0,44±0,75) mg CH₄ m⁻² dia⁻¹ e no ano seguinte atingiu 3,11 (3,23 ±2,39) mg CH₄ m⁻² dia⁻¹ em *aquatic*, já em *land* as estava com baixa emissão de (0,15±0,72) mg CH₄ m⁻² dia⁻¹ e em 2020 estava emitindo 2,36 (2,68±3,08) mg CH₄ m⁻² dia⁻¹, aumentando as emissões cerca de 22,6 vezes (2.263%) e 33,28 vezes (3.328%), respectivamente (Figura 15). Esses dois valores encontrados em 01BSR representam a maior variação temporal de emissão de CH₄ de todos os ecossistemas lênticos estudados.

Figura 15 - Representação esquemática da comparação entre as medianas encontradas nas concentrações anuais de CH₄ (mg CH₄ m⁻² dia⁻¹) em *aquatic*, *transition* e *land* nas lagoas de água doce. Os valores em porcentagem são as comparações anuais entre os valores encontrados nos mesmos *compartimentos* de coleta.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.2 Variabilidade espacial e temporal dos fluxos de CH₄ em lagoas de água salino- alcalina

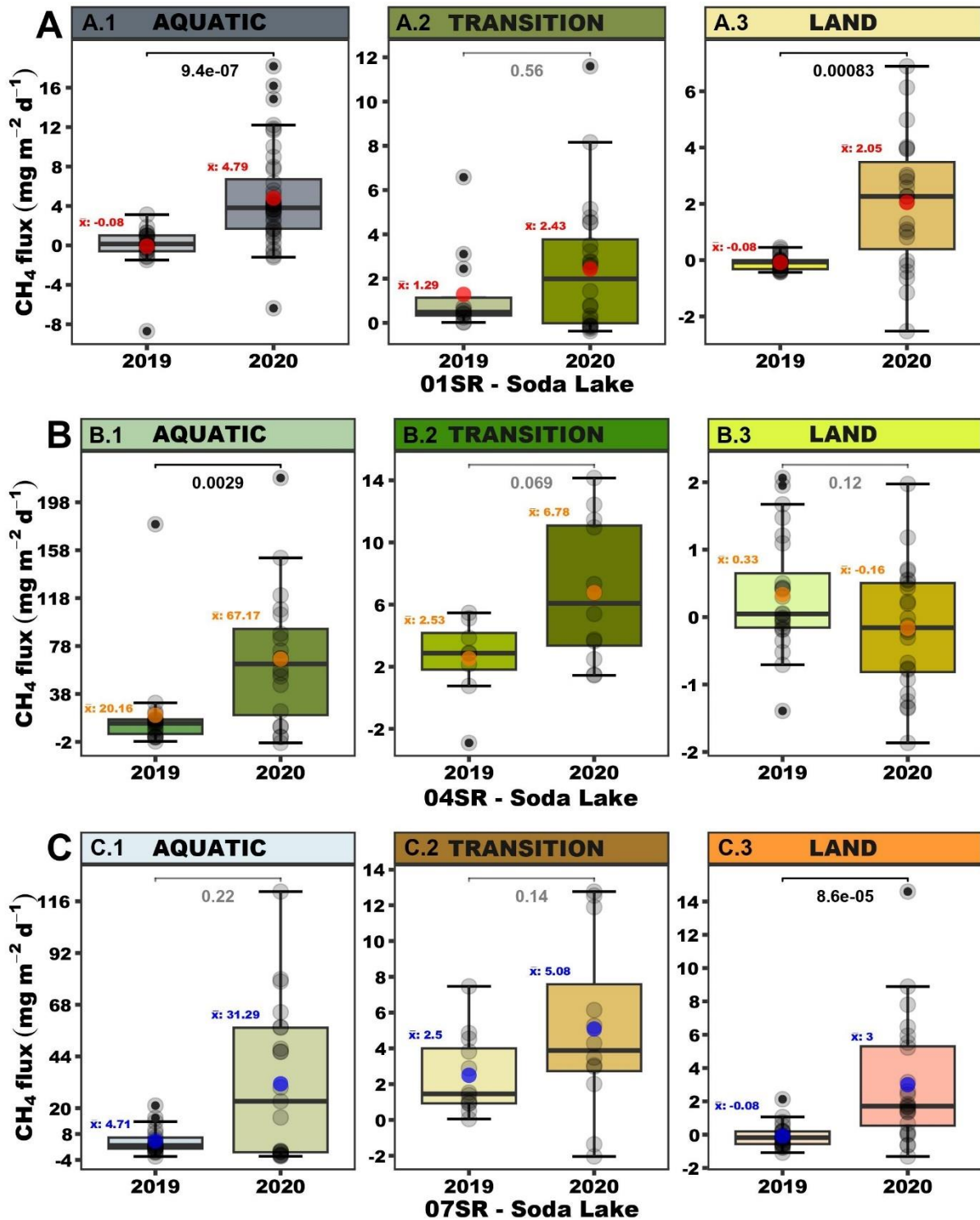
Nos períodos de 2019 e 2020 foram calculadas 367 medições de fluxos de CH₄ nos ecossistemas lênticos de salino-alcálicas e seus *compartimentos* associados (*aquatic*, *transition* e *land*). Esses resultados foram categorizados em três grupos, a lagoa 01SR, 04SR e 07SR com 144, 108 e 114 medidas de fluxos.

Os maiores valores de emissão de CH₄ ocorreram no *compartimento* de *aquatic* das lagoas 04SR e 07SR. No ano de 2020, a lagoa 04SR apresentou fluxo de 63,04 (67,17±55,82) mg CH₄ m⁻² dia⁻¹ (Figura 16 – B2), enquanto a lagoa 07BSR registrou fluxo de 23,26 (31,29±35,71) mg CH₄ m⁻² dia⁻¹ (Figura 16 – C2). Nos *compartimentos transition* foram observados consumos de CH₄ em todas as lagoas, cujo maior valor encontrado foi na lagoa 07SR com -0,18 (-0,08±0,69) mg CH₄ m⁻² dia⁻¹.

Na lagoa 01SR ocorreu variações temporais (*Test Wilcoxon Matched-Pairs*, com $p < 0,05$) nos fluxos de CH₄ entre os anos nos *compartimentos aquatic* e *land* (Figura 16 – A1 e A3). Na 04SR observou em *aquatic* e na 07SR em *land*. Além disso, no *compartimento* de *land* da lagoa 04SR, as emissões diminuíram de 0,05(0,33±086) mg CH₄ m⁻² dia⁻¹ para -0,16 (-0,16± 0,92) mg CH₄ m⁻² dia⁻¹, ou seja, esse *compartimento* comportou-se como sumidouro de CH₄ em 2020.

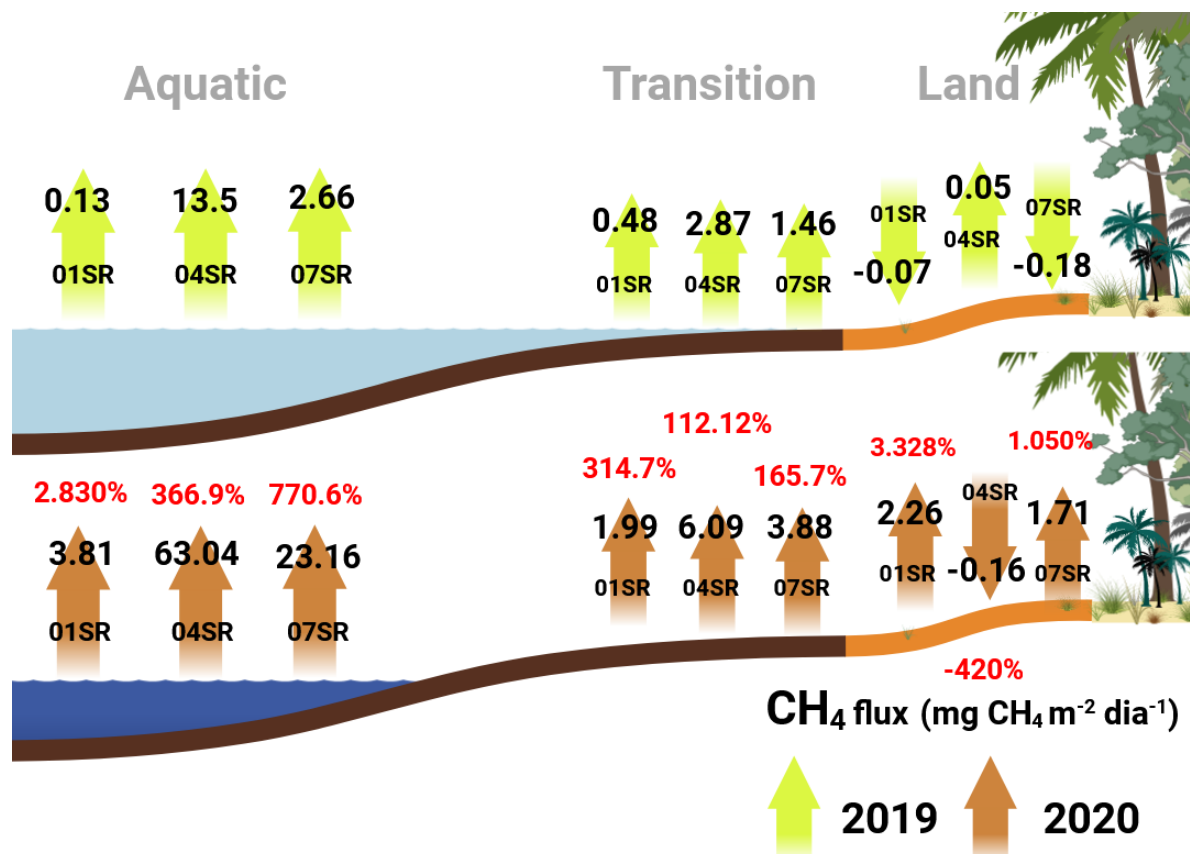
Em todos os *compartimentos* examinados, notaram-se diferenças espaciais nos fluxos de CH₄ entre as três lagoas, mesmo comportamento observado nas lagoas de água doce. Cada local exibiu padrão de emissão único nos anos de 2019 e 2020. Em 2020, a variação mais ampla foi observada nos dados, incluindo picos de emissões em todos os *compartimentos* (Figura 16).

Figura 16 - Gráficos de *boxplot* (medianas, quartis, amplitudes de variação, média) para os fluxos anuais de CH_4 ($\text{mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) nas lagoas de água doce 01BSR (A) e 04BSR B) e. As barras horizontais acima dos *boxplot* são os resultados do *Test Wilcoxon Matched-Pairs* ($p = <0,05$) que comparou as concentrações anuais nos *compartimentos* dos ecossistemas lênticos de água doce.



De maneira geral, todos os *compartimentos* das lagoas salino-alcálinas aumentaram as emissões em 2020 quando o nível de água das lagoas estava mais baixo. As maiores diferenças foram observadas nos *compartimentos* de *aquatic* e em *land* da 01SR. Em 2019, foi observado fluxo de 0,13 (-0,08±2,26) mg CH₄ m⁻² dia⁻¹ e, no ano seguinte, atingiu 3,81 (1,29±2,98) mg CH₄ m⁻² dia⁻¹ em *aquatic*. Já em *land*, ocorreu consumo de -0,07 (-0,08±0,26) mg CH₄ m⁻² dia⁻¹ e em 2020, emitiu 2,26 (2,05±2,05) mg CH₄ m⁻² dia⁻¹, aumentando as emissões cerca de 28,3 vezes (2,830%) e 33,28 vezes (3,328%), respectivamente (Figura 17).

Figura 17 - Representação esquemática da comparação entre as medianas encontradas nas concentrações anuais de CH₄ (mg CH₄ m⁻² dia⁻¹) em *aquatic*, *transition* e *land* nas lagoas salino-alcálinas. Os valores em porcentagem são as comparações anuais entre os valores encontrados nos mesmos *compartimentos* de coleta.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.3 Magnitude da variação espacial e temporal dos fluxos de CH₄ em todas as lagoas

Os resultados revelaram diferenças tanto na variação espacial quanto temporal entre todas as lagoas estudadas, refletindo a dinâmica complexa e as respostas às mudanças ambientais no Pantanal (Tabela 1).

Os valores de IVE destacaram as diferenças nas emissões e consumos entre todos os *compartimentos* de cada lagoa. A lagoa de água doce 04BSR apresentou valor relativamente alto de IVE, indicando heterogeneidade entre seus *compartimentos*. Os valores de IVT refletem como as emissões e consumos mudaram de um ano para o outro. Lagoas com valores altos de IVT, como a "01BSR", experimentaram mudanças consideráveis nos fluxos entre 2019 e 2020.

Ao comparar os valores do IMGEE entre as diferentes lagoas, observa-se quais lagoas experimentaram maiores mudanças nas suas emissões/consumos de CH₄. A lagoa de água doce 01BSR e 04BSR apresentaram maiores variações espaciais e temporais nos fluxos de CH₄ e têm valores de índice similares e relativamente altos, indicando que ambas as lagoas sofreram mudanças, possivelmente devido a fatores ambientais como seca e/ou temperatura que ocorreu, principalmente, em 2020.

Tabela 1: A tabela apresenta os resultados dos índices calculados para cada lagoa estudada no Pantanal. Estes índices quantificam as variações espaciais (IVE) e temporais (IVT) nas emissões e consumos, bem como fornecem a estimativa integral aproximada dessas variações ao longo de um ano (IMGEE)¹¹.

| Lagoa | IVE | IVT | IMGEE |
|--------------|------------|------------|--------------|
| 01BSR | 31.99 | 27.29 | 17.25 |
| 04BSR | 37.87 | 14.31 | 17.20 |
| 01SR | 1.14 | 2.30 | 1.49 |
| 04SR | 23.62 | 14.65 | 15.19 |
| 07SR | 8.70 | 10.31 | 6.60 |

¹ **Nota:** Os valores dos (IVE) e (IVT) foram calculados a partir de dados de emissões e consumos coletados nos *compartimentos* de *aquatic*, *transition* e *land* de cada lagoa para os anos de 2019 e 2020. O IMGEE foi estimado assumindo variação linear nas emissões/consumos entre os dois anos. Os valores de IVE e IVT representam médias das variações espaciais e temporais, respectivamente, enquanto o IMGEE reflete a acumulação estimada dessas variações no período de um ano.

3.4 DISCUSSÃO

Com a caracterização e quantificação dos fluxos de CH₄ nos cinco ecossistemas tropicais durante 2019 e 2020, observaram-se padrões espaciais e temporais nas emissões e consumo de CH₄ nessas diferentes lagoas e *compartimentos* associados.

As maiores emissões foram observadas no *compartimento transition* nas lagoas de água doce 01BSR e 04BSR, com valores (7,13 a 68,23 mg CH₄ m⁻² dia⁻¹), resultados superiores aos fluxos encontrados em outros *compartimentos* das mesmas lagoas. O *compartimento transition*, que marca o limite entre a lâmina de água e o início do solo marginal, pode ser um ponto crítico para a emissão de CH₄ devido ao sedimento rico em MO, indicando condições propícias para a liberação de CH₄ (Emerson *et al.*, 2021; Hu *et al.*, 2024; Yakimovich *et al.*, 2020, Nijaman *et al.*, 2021). Esse sedimento é substrato das emissões de CH₄ nesses ecossistemas, sugerindo que as condições ecológicas nesses locais são particularmente fontes de CH₄ para atmosfera.

As elevadas emissões no *compartimento transition* nas lagoas de água doce provavelmente relacionam-se à presença de microrganismos metanogênicos específicos devido ao elevado acúmulo de MO, resultante das altas taxas de decomposição de material biológico, principalmente macrófitas aquáticas, em condições físico-químicas favoráveis (Aichner *et al.*, 2010; Ofiti *et al.*, 2021; Laanbroek, 2009). Assim, este *compartimento* pode ter papel significativo no balanço regional das emissões, visto que as lagoas de água doce são mais abundantes do que as lagoas salino-alcálicas (Pereira *et al.*, 2020).

Os resultados revelaram fluxos intermediários no *compartimento aquatic* e os menores em *land*, evidenciando variação nas emissões de CH₄ entre os diferentes *compartimentos* das lagoas. Ademais, o *compartimento land*, originalmente mais seco, demonstrou ser menos suscetível a alterações climáticas nesses anos estudados. Essa observação ressalta a complexidade dos processos ecológicos nos ecossistemas lênticos, enfatizando a importância de compreender a dinâmica específica de cada *compartimento* para análise mais abrangente dos fluxos de CH₄.

Embora estudos semelhantes com a metodologia apresentada sejam inexistentes, os valores dos fluxos observados no período de estudo (0,18 a 5,62 mg CH₄ m⁻² dia⁻¹ nas lagoas de água doce e 0,13 a 63,04 mg CH₄ m⁻² dia⁻¹ nas lagoas salino-alcálicas) estão na faixa de emissões encontrados em outras sub-regiões do Pantanal, com base nas medições da câmara de fluxo (Bastviken *et al.*, 2008; Barbiero *et al.*, 2018; Hamilton; Sippel; Melack, *et al.*, 1995; Marani; Álvala, 2007).

Nas lagoas salino-alcálicas, as maiores emissões de CH₄ ocorreram no *compartimento aquatic*, particularmente nas lagoas 04SR e 07SR. Isso pode ser atribuído à maior atividade microbológica, decomposição da matéria orgânica ou condições físico-químicas favoráveis à produção de CH₄. Essas lagoas são conhecidas por seu elevado teor de C dissolvido (Pellegrinetti, 2022) em suas águas que conseqüentemente estejam relacionadas a essas elevadas emissões.

Elevadas emissões (600 mg CH₄ m⁻² dia⁻¹) foram observados em outra lagoa semelhante a 04SR na mesma sub-região (Barbiero *et al.*, 2018). Nessas lagoas oferecem condições ambientais para a proliferação de cianobactérias que em momentos de intensa atividade fotossintética, oxigenam a água fazendo com que as emissões de CH₄ aumentem rapidamente. Em 2019, foi observado que a lagoa 04SR estava nas mesmas condições ambientais e com emissões semelhantes descritas por Barbiero *et al.*, 2018. No entanto, no ano seguinte a mesma lagoa estava sem a presença de cianobactérias e anóxica, mas com emissões 3,6 vezes maior (>366%) que o seu estado do ano anterior (13,5 para 63,04 mg CH₄ m⁻² dia⁻¹), com verificado na figura 17.

Estudos recentes, sugerem que o CH₄ pode ser produzido por cianobactérias (Bižić *et al.*, 2020), fitoplâncton (Bižić, 2021) e macrófitas aquáticas (Hilt *et al.*, 2022). Mas esses processos de metanogênese em lagos são pouco compreendidos e carece de estudos mais aprofundados (Günthel *et al.*, 2019; Günthel *et al.*, 2020, Günthel *et al.*, 2021; Peeters; Hofmann, 2021).

Padrões divergentes de fluxos foram observados na lagoa 04SR. Em 2020, quando o *compartimento aquatic* estava com elevadas emissões e *land* encontrava consumindo CH₄, indicando que solos adjacentes a essa lagoa atuam como sumidouro de CH₄. Logo, esse *compartimento* ofereça condições para o desenvolvimento de organismos metanotróficos,

porém não há estudos sobre a composição desses microrganismos habitando esses tipos de solos alcalinos. Esses resultados destaca a complexidade desse ecossistema lântico e a importância de considerar as condições locais (*compartimentos*) específicos nos estudos de fluxos de CH₄.

Lagoas encontradas na mesma sub-região com características ambientais e ecológicas semelhantes à 01SR foram reconhecidas como fontes de sumidouro de C em suas águas (Barbiero *et al.*, 2018; Bergier *et al.*, 2016). Em 2019 a lagoa 01SR apresentou as menores emissões de CH₄ quanto comparado a todas as outras 4 lagoas aqui estudadas durante os dois anos. Inclusive em alguns momentos atuando como fonte de sumidouro de CH₄, como observado em *land* no ano de 2019. Esses baixos valores de emissão de 01SR estão na faixa de emissões encontradas em outras lagoas com as mesmas características ecológicas na sub-região de Nhecolândia (Barbiero *et al.*, 2018).

Ao analisar o IVE dos fluxos de CH₄ em todas as lagoas, observam diferenças nas emissões e consumos de CH₄ entre os diferentes *compartimentos* de cada lagoa. A lagoa 04BSR, por exemplo, apresentou alta heterogeneidade entre seus *compartimentos*. Sugerindo que os processos de emissões e consumos de CH₄ são influenciados por fatores locais específicos de cada *compartimento* da lagoa.

Os valores de IVT, indicando variação temporal, refletiram as mudanças nos fluxos de CH₄ de um ano para o outro. Lagoas como a 01BSR, que apresentaram IVT alto, tiveram mudanças consideráveis nos fluxos de CH₄ entre 2019 e 2020, o que pode ser atribuído a alterações ambientais que ocorreu em 2020.

O IMGEE forneceu estimativa integral das variações de emissões/consumos ao longo de um ano. Valores altos nesse índice, como observados nas lagoas 01BSR e 04BSR, indicam que essas lagoas apresentaram as maiores variações totais nos fluxos de CH₄, sugerindo sensibilidade acentuada nos fatores ambientais e climáticos em 2020. Nesse ano, o Pantanal no foi atingido pela pior seca dos último 75 anos, seguida de onda de calor que ultrapassou temperaturas acima de 40°C por vários dias seguidos (Cunha; Buermann; Marengo, 2024; Marengo *et al.*, 2021a; Marengo *et al.*, 2021b; Mataveli *et al.* 2020; Nauman *et al.*, 2023).

O uso do IMGEE conseguiu detectar essas mudanças nos fluxos de CH₄, logo os resultados demonstram a necessidade de estudos mais aprofundados e contínuos sobre as fontes e sumidouro de CH₄ em ecossistemas lênticos à longo prazo, particularmente em condições climáticas atípicas como ocorreu em 2020. Portanto, o IMGEE pode ser utilizado como ferramenta de monitoramento ambiental emissões de CH₄ frente às mudanças.

De maneira geral, todos os ecossistemas lênticos estudados aumentaram as emissões de CH₄ em 2020. A lagoa salino-alkalina 01SR apresentou grandes mudança que ultrapassou mais de 3.328% (*land*) e 2.830% (*aquatic*) nas emissões, juntamente com a lagoa de água doce 01BSR que apresentou aumento de 2.260% (*land*) e 1.627% (*aquatic*).

O evento climático atípico que afetou o Pantanal em 2020 contribuiu para o aumento das emissões de CH₄ por ecossistemas lênticos estudados na atmosfera. Logo, essas condições climáticas diminuíram a lâmina de água e aumentaram a concentração da MO nesses ecossistemas. Esses são processos fundamentais para a respiração do ecossistema (Gudasz; Karlsson; Bastviken, 2021), cujas interações microbianas nos processos biogeoquímicos e ciclagem do C são intensificadas nessas condições, resultando a maior atividade metanogênica em lagos de todas as latitudes (Bargett *et al.*, 2008; Bastviken *et al.*, 2008).

Devido à relativa insolubilidade do CH₄ em água (Blount; Leigh, 1977; Clever *et al.*, 1987), o aumento da coluna de água nas lagoas pode formar uma barreira física, retendo o CH₄ no fundo do leito, onde pode ser consumido por organismos metanotróficos. Comunidades microbianas específicas habitam esses tipos de *compartimentos* em Nhecolândia (Cotta *et al.*, 2022; Pellegrinetti, 2022; Schleder *et al.*, 2022), mas o comportamento desses microrganismos frente à retração e expansão natural da coluna de água, ou em eventos climáticos extremos, ainda é pouco conhecido, embora em um lago húmico temperado demonstrou-se que a comunidade bacteriana é resiliente a essas situações (Hoke *et al.*, 2020).

Este fenômeno pode ser um dos fatores responsáveis pelo aumento nas emissões de CH₄ observadas em ecossistemas lênticos que estão secando em várias partes do mundo (Paraíba *et al.*, 2022). Em particular, no Pantanal, durante 2020, aproximadamente 28% das áreas inicialmente classificadas como zonas úmidas foram afetadas por incêndios, os quais, provavelmente, secaram pelas altas temperaturas (Mataveli *et al.*, 2021). O consequente

secamento desses ecossistemas, juntamente com os sedimentos marginais ricos em C acumulados há décadas, levou à mineralização ou combustão dessa MO, liberando grandes quantidades de CH₄ para a atmosfera (Keller *et al.*, 2020; Parafba *et al.*, 2022). Tal liberação pode ter contribuído para o agravamento do aquecimento global, processo que até o momento, alcança níveis recordes de temperatura (McCulloch *et al.*, 2024; NASA, 2024; Witze, 2024).

Mais estudos são necessários para entender as origens e processos envolvidos nas emissões de CH₄ em ecossistemas lênticos que estão sujeitos às condições climáticas desfavoráveis. Os estudos nesses ecossistemas lênticos tropicais limitam-se apenas as emissões na lâmina da água das lagoas. Nesses estudos são ignoradas as emissões no sedimento presente nas margens e em solos adjacentes inundados periodicamente, mesmo considerando que esses ecossistemas anualmente sofrem expansão e retração de suas águas de forma natural. Logo os modelos de balanço de CH₄ atuais de emissões naturais de CH₄ acabam sendo subestimados.

Estes resultados demonstram como cinco ecossistemas lênticos tropicais se comportam durante eventos climáticos atípicos. Essa é uma preocupação, pois as lagoas responderam positivamente com emissões elevadas de CH₄ para a atmosfera. Modelos de mudanças climáticas existentes preveem que o Pantanal terá aumento de 60 a 90 dias na duração da estação seca nas próximas décadas, associado a diminuição de 30 a 40% na quantidade de chuva (< 150 mm/ano) e aumento da temperatura média de 2 a 7 °C (Meehl *et al.* 2007; Marengo; Oliveira; Alves, 2016). Portanto, essas mudanças climáticas previstas podem levar a mudanças expressivas nos fluxos de GEE no Pantanal.

3.5 CONCLUSÃO

O presente estudo, ao caracterizar e quantificar os fluxos de CH₄ em cinco ecossistemas lênticos durante 2019 e 2020, revelou-se complexa dinâmica de emissões e consumos de CH₄, marcada por variação tanto em padrões espaciais quanto temporais. Os resultados indicam que as maiores emissões ocorreram no *compartimento transition* das lagoas 01BSR e 04BSR, destacando-se significativamente em comparação com outros *compartimentos* das mesmas lagoas. Tal achado sugere que a composição do sedimento e a presença de MO são fatores determinantes nas emissões de CH₄ nesses ecossistemas.

A análise espacial e temporal através da criação de índices dos dados constataram sensibilidade notável dos ecossistemas lênticos às variações climáticas. As flutuações nos fluxos de CH₄ entre os anos estudados foram correlacionadas com eventos climáticos atípicos, como secas prolongadas e aumento das temperaturas. Essas observações são consistentes com a hipótese de que mudanças climáticas podem intensificar as emissões de CH₄ em ecossistemas lênticos tropicais, aspecto crucial para entender o papel desses *compartimentos* no ciclo global do C sob cenários futuros de mudança climática.

Outro aspecto relevante revelado pelo estudo é a necessidade de aprofundar o conhecimento sobre os processos de metanogênese e metanotrofia nos diferentes *compartimentos* desses ecossistemas lênticos. A complexidade destes processos biogeoquímicos e a sua influência nas emissões de CH₄ ainda são pouco compreendidas, representando campo fértil para futuras investigações. O entendimento detalhado desses processos é fundamental para aprimorar os modelos atuais de balanço de gases de efeito estufa e para desenvolver estratégias efetivas de mitigação dos impactos ambientais.

Em suma, os resultados deste estudo sublinham a importância crítica dos ecossistemas lênticos no ciclo global do C e reforçam a necessidade de incluí-los de forma mais proeminente nas estratégias de mitigação e adaptação às mudanças climáticas. Os resultados aqui obtidos constituem base valiosa para futuras pesquisas e para a formulação de políticas ambientais mais informadas, visando a gestão sustentável destes ecossistemas vitais para o Planeta.

REFERÊNCIAS

Abreu, M. C. *et al.* Temporal and spatial patterns of fire activity in three biomes of Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 8, p. 44, 5 jul. 2022.

Alho, C. J. R. The Pantanal. In: Fraser, L. H., Keddy, P. A., (Eds.) **The World's Largest Wetlands - Ecology and Conservation**. New York: Cambridge University Press. 2005. p. 203-271.

Assine, M. L. *et al.* The Quaternary alluvial systems tract of the Pantanal Basin, Brazil. **Braz. J. Geol.**, v. 45, p. 475-489, 01 set. 2015.

Barbiero, L. *et al.* Biogeochemical diversity, O₂-supersaturation and hot moments of GHG emissions from shallow alkaline lakes in the Pantanal of Nhecolândia, Brazil. **Sci. Total Environ**, v. 619, p. 1420-1430, 1 abr. 2018.

Barbosa, M. L. F. *et al.* Compound impact of land use and extreme climate on the 2020 fire record of the Brazilian Pantanal. **Global Ecology and Biogeography**, v. 31, p. 1960-1975, 8 jul. 2022.

Bardgett, R. D. *et al.* Microbial contributions to climate change through carbon cycle feedbacks. **The ISME Journal**, v. 2, p. 805–814, 10 jul. 2008.

Bartlett, K. B.; Harriss, R. C. Review and Assessment of Methane Emissions from Wetlands. **Chemosphere**, v. 26, p. 261-320, 01 fev. 1993.

Bastviken, D. *et al.* Freshwater methane emissions offset the continental carbon sink. **Science**, v. 331, p. 50-62, 7 jan. 2011.

Bastviken, D. *et al.* Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: toward more comprehensive sampling. **Environ. Sci. Technol**, v. 44, p. 5450-5455, 22 jun. 2010.

Bastviken, D. *et al.*, Fates of methane from different lake habitats: Connecting whole-lake budgets and CH₄ emissions. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 113, p. 1-13, 24 maio 2008.

Bastviken, D. Methane. In: **Encyclopedia of Inland Waters**, Oxford: Elsevier, 2009, p. 783-805.

Bergier, I. *et al.* Alkaline lake dynamics in the Nhecolândia landscape. In: Bergier, I., Assine, M. L. (Eds.), **Dynamics of the Pantanal Wetland in South America**. Springer International, Switzerland, 2016, p. 145-161.

Bergier, I.; Assine, M. L. Functional fluvial landforms of the Pantanal: Hydrologic trends and responses to climate changes. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 119, p. 1-12, 01 nov. 2022.

Bižić M. *et al.* Aquatic and terrestrial cyanobacteria produce methane. **Science Advances**, v. 6, p. 1-9, 15 jan. 2020.

Bižić M. Phytoplankton photosynthesis: an unexplored source of biogenic methane emission from oxic environments. **Journal of Plankton Research**, v. 43, p. 822-830, 11 out. 2021.

Bloom, A. A. *et al.* Global methane emission estimates from ultraviolet irradiation of terrestrial plant foliage. **New Phytologist**. v.187, n. 2, p. 417-425, 01 jul. 2010.

Blount, C. W; Leigh, P. Solubility of Methane in water under natural conditions a laboratory study. Final Reporty. **Departament of Geology Ioaho State University**, 1977, 161 p.

Bridgham, S. D. *et al.* Methane emissions from wetlands: biogeochemical, microbial, and modeling perspectives from local to global scales. **Global Change Biology**, v. 19, n. 5, p. 1325-1346, 26 dez. 2013.

Casa-Ruiz, J. *et al.* Integrating terrestrial and aquatic ecosystems to constrain estimates of land-atmosphere carbon exchange. **Nature Communications**, v. 14, p. 1-12, 21 mar. 2023.

Clever, H. L. *et al.* **Solubility data series. Vol. 1 - Oxford**; New York: Pergamon, 1979, 801 p.

Corrêa, B. C., *et al.* Increased burned area in the Pantanal over the past two decades. **Science of The Total Environment**. v 835, 20 ago. 2022.

Cotta, S. R. *et al.* Disentangling the lifestyle of bacterial communities in tropical soda lakes. **Scientific Reports**, v. 12, p. 1-10, 13 mai. 2022.

Cunha, A. P. M. A.; Buermann, W.; Marengo, J. A. Changes in compound drought-heat events over Brazil's Pantanal wetland: an assessment using remote sensing data and multiple drought indicators. **Climate Dynamics**, v. 62, p. 739–757, jan. 2024.

Emerson, J. B. Diverse sediment microbiota shape methane emission temperature sensitivity in Arctic lakes. **Nature Communications**, v. 12, 05 out. 2021

Frankenberg, C. *et al.* Assessing Methane Emissions from Global Space-Borne Observations. **Science**, vol. 308, p. 1010-1014, 13 maio 2005.

Fustec, E.; Lebeuvre, J. C. **Fonctions et valeurs des zones humides**. Ed. Dunod, 2000, 426 p.

Gudasz, C.; Karlsson, J.; Bastviken, D. When does temperature matter for ecosystem respiration? **Environmental Research Communications**, v. 3, p. 1-8, 7 dez. 2021.

Gudasz, C.; Karlsson, J.; Bastviken, D. When does temperature matter for ecosystem respiration? **Environmental Research Communications**, v. 3, p. 1-8, 7 dez. 2021.

Guerreiro, R. L. *et al.* The soda lakes of Nhecolândia: A conservation opportunity for the Pantanal wetlands. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 17, p. 9-18, 01 jan. 2019.

Günthel *et al.* Reply to ‘Oxic methanogenesis is only a minor source of lake-wide diffusive CH₄ emissions from lakes’. **Nature Communications** v.12, 22 fev. 2021.

Günthel M. *et al.* Contribution of oxic methane production to surface methane emission in lakes and its global importance. **Nature Communications**, v. 10, p. 1-10, 2 dez. 2019.

Günthel, M. *et al.* Photosynthesis-driven methane production in oxic lake water as an important contributor to methane emission. **Limnology and Oceanography**, v. 65, p. 2853-2865, 24 jul. 2020.

Hamilton, S. K; Sippel, S. J.; Melack, J. M. Oxygen depletion and carbon dioxide and methane production in waters of the Pantanal wetland of Brazil. **Biogeochemistry**, v. 30, p. 115-141, 1 ago. 1995.

Hilt, S. *et al.*, Potential role of submerged macrophytes for oxic methane production in aquatic ecosystems. **Limnology and Oceanography**, v. 67, p. 1-13, 11 maio 2022.

Hoke, A. *et al.* Impacts of Extreme Weather Events on Bacterial Community Composition of a Temperate Humic Lake. **Water**, v. 12, p. 2757,01 out. 2020.

Hu *et al.* Thermal responses of dissolved organic matter under global change. **Nature Communications**, v. 15, 17 jan. 2024.

INMET. **Tabela de dados da Estação AQUIDAUANA A719**. Disponível em: <https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A719>. Acesso: em 01/01/2023.

IPCC. **Climate Change 2021**. Synthesis Report, Cambridge University Press, London.

Junk, W. J *et al.* The flood-pulse concept in river-floodplain systems. In: Dodge, D.P., Ed., **Proceedings of the International Large River Symposium (LARS)**, Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences Special Publication 106, NRC research press, Ottawa, 1989, p. 110-127.

Junk, W. J *et al.* The flood-pulse concept in river-floodplain systems. In: Dodge, D.P., Ed., **Proceedings of the International Large River Symposium (LARS)**, Canadian Journal of

Fisheries and Aquatic Sciences Special Publication 106, NRC research press, Ottawa, 1989, p. 110-127.

Laanbroek, H. J. Methane emission from natural wetlands: interplay between emergent macrophytes and soil microbial processes. A mini-review. **Annals of Botany**, v. 105, n. 1, p. 141–153, 01. jan. 2010.

Keller, P. S. *et al.* Global CO₂ emissions from dry inland waters share common drivers across ecosystems. **Nature Communications**, v.11, 01 mai. 2020.

Kumar, S. *et al.* Changes in land use enhance the sensitivity of tropical ecosystems to fire-climate extremes. **Scientific Reports**. v. 12, p. 964, 19 jan. 2022.

Libonati, R. *et al.* Rescue Brazil's burning Pantanal wetlands. **Nature**. p. 217-219, 8 dec. 2020.

Marani, L.; Alvalá, P. C. Methane emissions from lakes and floodplains in Pantanal, Brazil. **Atmos. Environ.** v.41, p. 1627-1633, 8 mar. 2007.

Marengo, J. A. *et al.* Extreme Drought in the Brazilian Pantanal in 2019-2020: Characterization, Causes, and Impact. **Front. Water**, v. 3, p. 1-20, 23 fev. 2021b.

Marengo, J. A. *et al.* The heat wave of October 2020 in central South America. **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 4, p. 2281-2298, 23 ago. 2021a.

Marengo, J. A., Oliveira, G. S., Alves, L. M. Dynamics of the Pantanal Wetland in South America. **The Handbook of Environmental Chemistry**, 2016, v. 37, p. 227-238.

Marques, J. F. *et al.* Fires dynamics in the Pantanal: Impacts of anthropogenic activities and climate change. **Journal of Environmental Management**, v. 299, 1 dez. 2021.

Mataveli *et al.* 2020 Pantanal's widespread fire: short- and long-term implications for biodiversity and conservation. **Biodiversity and Conservation.**, v. 30, n. 11, p. 3299–3303, 2 jun. 2021.

Matthews E., *et al.* Methane emission from high latitude lakes: methane-centric lake classification and satellite-driven annual cycle of emissions. **Scientific Reports**, v. 10, p 1-10, 27 jul. 2020.

McCulloch, M. T. *et al.* 300 years of sclerosponge thermometry shows global warming has exceeded 1.5 °C. **Nature Climate Change**, v. 14, p. 171–177, 05 fev. 2024.

Meehl, G. A. *et al.* Climate Change 2007: The Physical Science Basis. In: **IPCC. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, 2007, p. 966.

Mega, E. R. Apocalyptic' fires are ravaging the world's largest tropical wetland. **Nature**, v. 586, p. 20-21, 01. set. 2020.

Messenger, M. L. *et al.* Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach. **Nature Communications**, vol. 7, p. 1-11, 15 dez. 2016.

Murguia- Flores, F.; Jaramillo, V. J.; Gallego-Sala, A. Assessing Methane Emissions From Tropical Wetlands: Uncertainties From Natural Variability and Drivers at the Global Scale. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 37, n. 9, p. 1-24, 25 ago. 2023.

NASA. **Global Temperature, 2024**. Disponível em: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature>. Acesso no 15 de jan. 2024.

Nascimento; S. C. do; Melo; M. M. M.; Paz, A. R. da. River-floodplain interaction and flood wave routing along rivers flowing through Pantanal wetlands. **Journal of South American Earth Sciences**, v 125, 01 mai. 2023.

Naumann, G. *et al.* **Extreme and long-term drought in the La Plata Basin: event evolution and impact assessment until September 2022**. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023, 60 p.

Neto, N. M.; Evangelista, H. Human Activity Behind the Unprecedented 2020 Wildfire in Brazilian Wetlands (Pantanal). **Front. Environ**, v. 10, p. 1-15, 15 ju. 2022.

Nijman, T. P. A. Warming and eutrophication interactively drive changes in the methane-oxidizing community of shallow lakes. **ISME Communications**, v. 1, 05 jul. 2021.

Ofiti, N. O. E. *et al.*, Warming promotes loss of subsoil carbon through accelerated degradation of plant-derived organic matter. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 156, p. 1-10, 20 fev. 2021.

Padovani, C. R. **Dinâmica espaço-temporal das inundações do pantanal**. Tese (Doutorado em Ecologia Aplicada) - Universidade de São Paulo; Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”; Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Piracicaba, 2010, 175 p.

Paranaíba, J.R. *et al.* Cross-continental importance of CH₄ emissions from dry inland-waters. **Science of the Total Environment**, v. 814, 25 mar. 2022.

Peeters F.; Hofmann H. Oxidic methanogenesis is only a minor source of lake-wide diffusive CH₄ emissions from lakes. **Nature Communications**, v. 12, p. 1-5, 22 fev. 2021.

Pellegrinetti, T. A. *et al.*, 2023 Bacterial Communities Along Environmental Gradients in Tropical Soda Lakes. **Microb Ecol.**, v. 85, p. 892-903. 2 ago. 2023.

Pellegrinetti, T. A. **Microbial communities and functional genes involved in nutrient cycling of Pantanal of Nhecolândia - MS**. 2022. 128 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2022.

Pereira, O. J. R. *et al.* Estimating Water pH Using Cloud-Based Landsat Images for a New Classification of the Nhecolândia Lakes (Brazilian Pantanal). **Remote Sensing**, v. 12, p. 1-21, 28 mar. 2020.

Por, F. D. **The Pantanal of Mato Grosso (Brazil): Worlds largest wetland**. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1995, 125 p.

R DEVELOPMENT CORE TEAM: **A language and environment for statistical Computing**, 2013.

Reddy, R.; DeLaune, R. D. **Biogeochemistry of Wetlands: Science and Applications**. CRC Press. 2008, 684 p.

Rosentreter, J. A. *et al.* Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources. **Nature Geosciences**. v. 14, p. 225-230, 5 apr. 2021.

Saunois, M. *et al.* The Global Methane Budget 2000–2017. **Earth System Science Data**, v. 12, n. 3, p. 1561-1623, 15 jul. 2020.

Schleder, A. *et al.* Disentangling sources and variation of organic matter in soda lakes from Nhecolândia (Pantanal, Brazil) based on hydrocarbons and bacterial composition. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 114, 01 mar. 2022.

Silva, J. S. V; Abdon, M. M. Delimitação do pantanal brasileiro e suas sub-regiões. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 33, p. 1703-1711, 01 out. 1998.

Soriano, B. M. A.; Galdino, S. **Análise das condições climáticas em 2000 na sub-região da Nhecolândia, Pantanal, Mato Grosso do Sul, Brasil**. Corumbá: Embrapa Pantanal, 2002, 34 p.

Thielen D, *et al.* Marine heatwaves in the dynamics of the Pantanal's historical drought and unprecedented fires. **EGU General Assembly 2021**, EGU21-9268, 19 abr. 2021.

Thielen, D. *et al.* Quo vadis Pantanal? Expected precipitation extremes and drought dynamics from changing sea surface temperature. **PloS one**, v. 15, n. 1, p. 1-25, 7 jan. 2020.

Tomas, *et al.* Distance sampling surveys reveal 17 million vertebrates directly killed by the 2020's wildfires in the Pantanal, Brazil. **Scientific Reports**, v. 11, 16 dez. 2021.

Wang W. *et al.* Global lake evaporation accelerated by changes in surface energy allocation in a warmer climate. **Nature Geoscience**, p. 410-414, 30 abr. 2018.

Witze, A. Earth boiled in 2023 — will it happen again in 2024? **Nature**, v. 625, p. 637-639, 15 jan. 2024.

Yvon-Durocher, G. *et al.* Methane fluxes show consistent temperature dependence across microbial to ecosystem scales. **Nature**, v. 507, p. 488–491, 19 mar 2014.

Zhuang, Q. *et al.* Current and Future Global Lake Methane Emissions: A Process-Based Modeling Analysis. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 128, n. 3, 16 mar. 2023.

4 CAPÍTULO 3 - AUMENTO DE EMISSÕES DE METANO (CH₄) EM LAGOAS DO PANTANAL DURANTE O SECAMENTO

RESUMO

Foi investigado os fluxos de metano (CH₄) emitidos em diferentes *compartimentos* lânticos, sedimentos e solos marginais de lagoas no Pantanal da Nhecolândia durante período de seca, que não ocorria há mais de 75 anos. Foi descoberto que a maior emissão (27,78 mg CH₄ m⁻² dia⁻¹) ocorreu em sedimentos marginais diretamente expostos à atmosfera, onde foi encontrado o maior teor carbono orgânico total (8,1 mg mg⁻¹). Todos os ecossistemas lânticos elevaram as emissões de CH₄ em 2020 em relação a 2019, com valores aumentando em 834% e 631% nas lagoas de água doce e salino-alcálicas, respectivamente. Durante a intensificação da seca no Pantanal em 2020, foi observado aumento de 5.423% nas emissões de CH₄ numa lagoa salino-alcálica em processo de secamento. Portanto, o *Capítulo 3* é descrito a dinâmica natural da emissão de CH₄ em lagoas tropicais, principalmente quando os sedimentos marginais das lagoas são expostos diretamente à atmosfera. Esses *compartimentos* se tornam grandes fontes de emissão, por isso, são importantes indicadores futuros das emissões de CH₄, embora os modelos de emissão de gases de efeito estufa subestimam a contribuição nesses locais. À medida que as lagoas dos ecossistemas lânticos tropicais secam com maior frequência, é provável que ocorra aumento na emissão de CH₄ nos próximos anos, impulsionando o aquecimento global e contribuindo para o agravamento das mudanças climáticas.

Palavras chave: Ecologia de ecossistemas, mudanças climáticas, limnologia e gases do efeito estufa

4.1 INTRODUÇÃO

O metano (CH_4) é o segundo gás antrópico mais importante na composição dos gases do efeito estufa (GEE), correspondendo a 20% da mistura total de gases da atmosfera (IPCC, 2021). Com potencial de aquecimento 84-87 vezes maior que o gás carbônico (CO_2), ao longo de 20 anos (GWP20), o CH_4 é o gás orgânico mais abundante na atmosfera da Terra e atua diretamente na manutenção natural do clima global (IPCC, 2021). Nas últimas décadas, a concentração de CH_4 aumentou rapidamente (Fletcher; Schaefer, 2019; Lan; Thoning; Dlugokencky, 2024; Nisbet *et al.*, 2023; Tollefson, 2022), gerando preocupação na comunidade científica devido à falta de identificação das principais fontes desse aumento (Myhre *et al.*, 2013; Nisbet *et al.*, 2014; Schaefer, 2019). Esse aumento da concentração de CH_4 na atmosfera pode elevar a temperatura global e intensificar as mudanças climáticas (IPCC, 2021; Cheng; Redfern, 2021), ocasionando efeitos prejudiciais aos ecossistemas e a saúde humana (Naiyer; Abbas, 2022; Mar *et al.*, 2022).

Metade das emissões globais de CH_4 são geradas em ecossistemas aquáticos (Sauniois *et al.*, 2020; Rosentreter *et al.*, 2021). Embora os resultados sejam distintos e conflitantes (Johnson *et al.*, 2022), há consenso que os ecossistemas lênticos são importantes reguladores do ciclo de carbono (C) (Amora-Nogueira *et al.*, 2022; Bastviken *et al.*, 2011; Benoy *et al.*, 2009; ; Lo *et al.*, 2022; Pi *et al.*, 2022; Rasbold *et al.*, 2021; Tranvik *et al.*, 2009) e fontes naturais de emissões de CH_4 para a atmosfera em diferentes latitudes do mundo (Anthony *et al.*, 2018; Camacho *et al.*, 2017; Delsontro *et al.*, 2018; Bastviken *et al.*, 2008; Heslop *et al.*, 2020; Matthews *et al.*, 2019).

Estudos de emissões de CH_4 e suas interações com o C em ecossistemas lênticos tropicais da América do Sul foram realizados na Amazônia (Crill *et al.*, 1988; Melack *et al.*, 2004; Barbosa *et al.*, 2016; Barbosa *et al.*, 2021), mas outras áreas potencialmente importantes, como o Pantanal, recebem menos atenção (Bastviken *et al.*, 2008). O Pantanal é uma das maiores planícies de inundação da América do Sul (Por, 1995) e na sub-região da Nhecolândia são encontrados milhares de pequenos ecossistemas lênticos influenciados diretamente pela precipitação e pela alta taxa de evapotranspiração originando lagoas rasas de água doce à hipersalinas com diferentes pH e alcalinidade (Bergier; Assine, 2022; Guerreiro *et al.*, 2019).

Embora, os pequenos lagos representem 15% na área total dos lagos ocupados no mundo, esses ecossistemas são dinâmicos e importantes reguladores dos ciclos hidrológicos locais e das emissões de C nas águas doces (Pi *et al.*, 2022). Logo, as lagoas de Nhecolândia são ideais para comparar, distinguir e determinar padrões para compreender os processos atuantes na emissão natural de CH₄ em baixas latitudes, pois são caracterizados pela alta quantidades de matéria orgânica (MO), alta produtividade, pouca profundidade, elevada luminosidade, temperatura e evapotranspiração (Alho, 2005; Junk *et al.*, 1989; Junk *et al.*, 2004; Hamilton; Sippel; Melack, 1995).

Os ecossistemas lênticos são sensíveis às variações espaciais, temporais e ambientais, por esse motivo, são consideradas sentinelas eficazes para monitorar os efeitos das mudanças climáticas (Adrian *et al.*, 2009). No entanto, há escassez de informações sobre as emissões de CH₄ das lagoas durante o evento climático que afetou o Pantanal, considerada a pior seca desde 1944 (Cunha; Buermann; Marengo, 2024; Marengo *et al.*, 2021; Mataveli *et al.*, 2021; Nauman *et al.*, 2023). Além disso, é desconhecido quais foram os efeitos dessas emissões frente aos cenários futuros do clima global decorrentes desse evento.

Portanto, nesse o *Capítulo 3* avalia o comportamento espacial, temporal e ambiental dos fluxos de CH₄ em dois grupos distintos de ecossistemas lênticos durante o período em que o Pantanal estava enfrentando condição climática atípica. Esse trabalho tem o objetivo de compreender como os diferentes ecossistemas lênticos responderão ao aumento da temperatura global e falta de precipitação, conforme previsões do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021).

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Área de Estudo

A Nhecolândia, localizada na Bacia do Alto Paraguai (BAP), é uma das sub-regiões do Pantanal sul mato-grossense que se destaca por seu complexo sistema lacustre, que abrange cerca de 12 mil lagoas de tamanhos variados, desde alguns metros até dezenas de quilômetros quadrados, apresentando formas arredondadas ou irregulares (Barbiero *et al.*, 2018; Pereira *et al.*, 2020; Pott; Pott, 2011) (Figura 18). As atividades de campo foram realizadas na Fazenda São Roque (19°22'13.22"S; 56°20'44.57"O), onde se encontram diversificados ecossistemas lânticos, desde águas doces e salino-alcálinas.

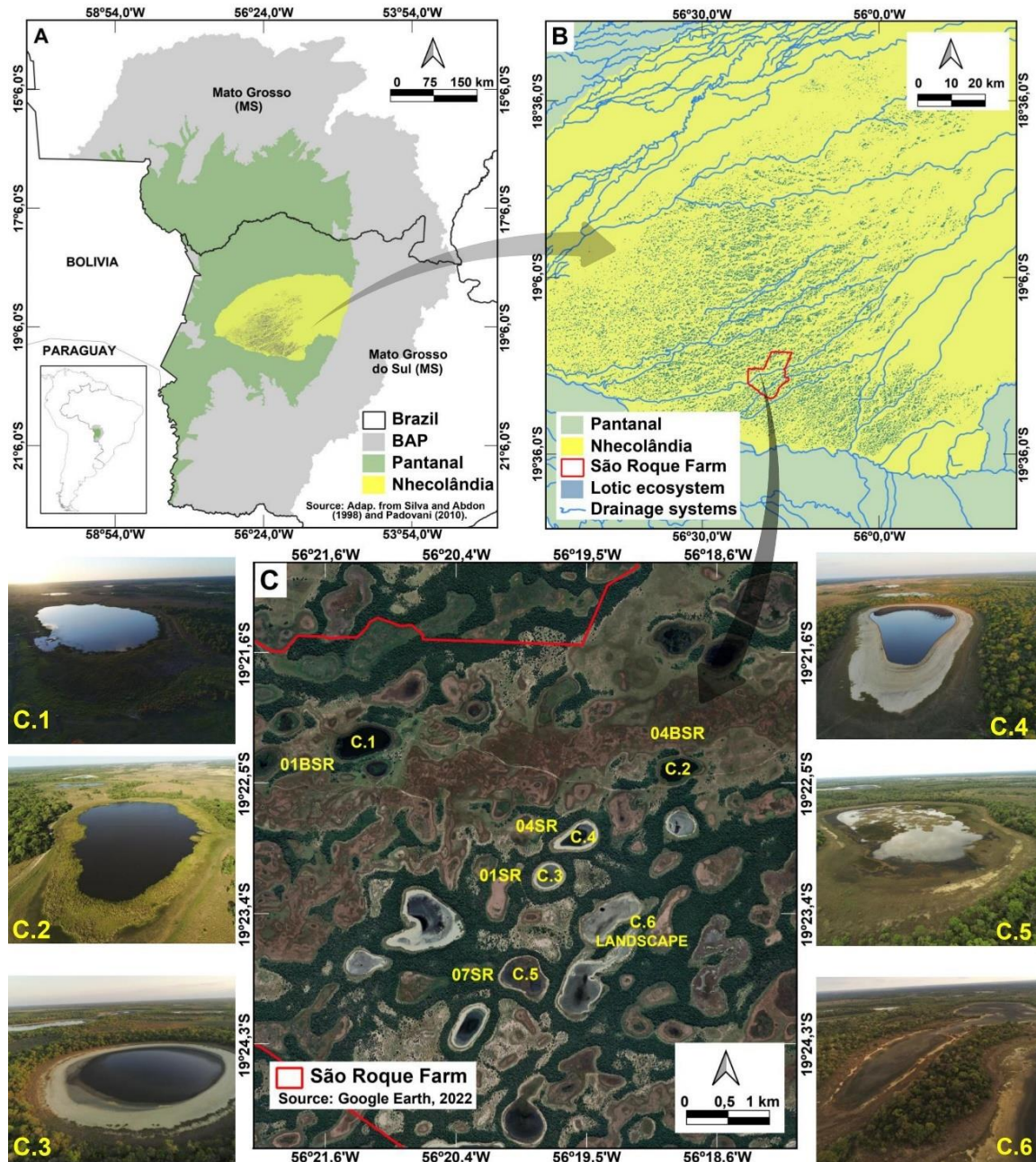
O clima na região da Nhecolândia é classificado como Awa, segundo Köppen, com estações bem definidas de seca e chuva, resultando em invernos secos e verões chuvosos. A temperatura média anual possui aproximadamente 25°C, com variações estacionais de 20,3°C a 31,6°C. A precipitação média anual é de aproximadamente 1.433mm, enquanto a evapotranspiração anual atinge 1.862mm, ocasionando déficit hídrico anual próximo a 329mm (Soriano e Galdino, 2000).

No entanto, durante o período de estudo (2019-2020) ocorreram variações climáticas notáveis. Em 2018, o Pantanal havia registrado as maiores precipitações da década (2.878,7mm acumulados e 239,89mm média) e anos seguintes a precipitação diminuiu (2019 – 1.857,63mm e 154,80mm média) para as menores precipitações registradas (2020 – 1.665,25mm e 138,77mm de média) (Pelissari, *et al.*, 2023). Em 2019, a temperatura média foi 27°C, e em 2020, aumentou para 33°C (INMET, 2023). Em 2020, a região registrou queda de 26% na precipitação média anual em relação à média de longo prazo desde 1982, provocando incêndios florestais extensivos que consumiram cerca de 30% do bioma (Mega, 2020), nas quais 95% ocorreram em áreas úmidas (Mataveli *et al.*, 2021).

Durante, durante o mesmo período, a região do Pantanal enfrentou onda de calor com temperaturas excedendo os 40°C por diversos dias consecutivos (Marengo *et al.*, 2021a). Além disso, no segundo dia de coleta houve chuva de aproximadamente 80 mm, fazendo com que a lâmina de água das lagoas aumentasse.

Para investigar as emissões de CH₄ na área, selecionaram-se 5 ecossistemas lênticos (lagoas) com distintos estados tróficos que foram agrupados em dois grupos, sendo duas lagoas de água doce (01BSR e 04BSR) e três salino-alcálicas (01SR, 04SR e 07SR). As siglas “BSR” e “SR” referem-se aos tipos regionais de água, “baía” e “salina”, respectivamente, na “Fazenda São Roque”. As coletas foram realizadas em outubro de 2019 e 2020.

Figura 18 – Localização geográfica da Bacia do Alto Paraguai, onde se localiza o Pantanal no Brasil, com destaque para a sub-região da Nhecolândia (A). Localização da sub-região da Nhecolândia e da Fazenda São Roque (B e C). Imagem de satélite dos 5 ecossistemas lânticos amostrados (C) e imagem aérea de 01BSR (C.1) e 04BSR (C.2), lagoas de água doce, e01SR (C.3), 04SR (C.4) e 07SR (C.5), lagoas de águas salino-alcálinas e paisagem do entorno (C.6).



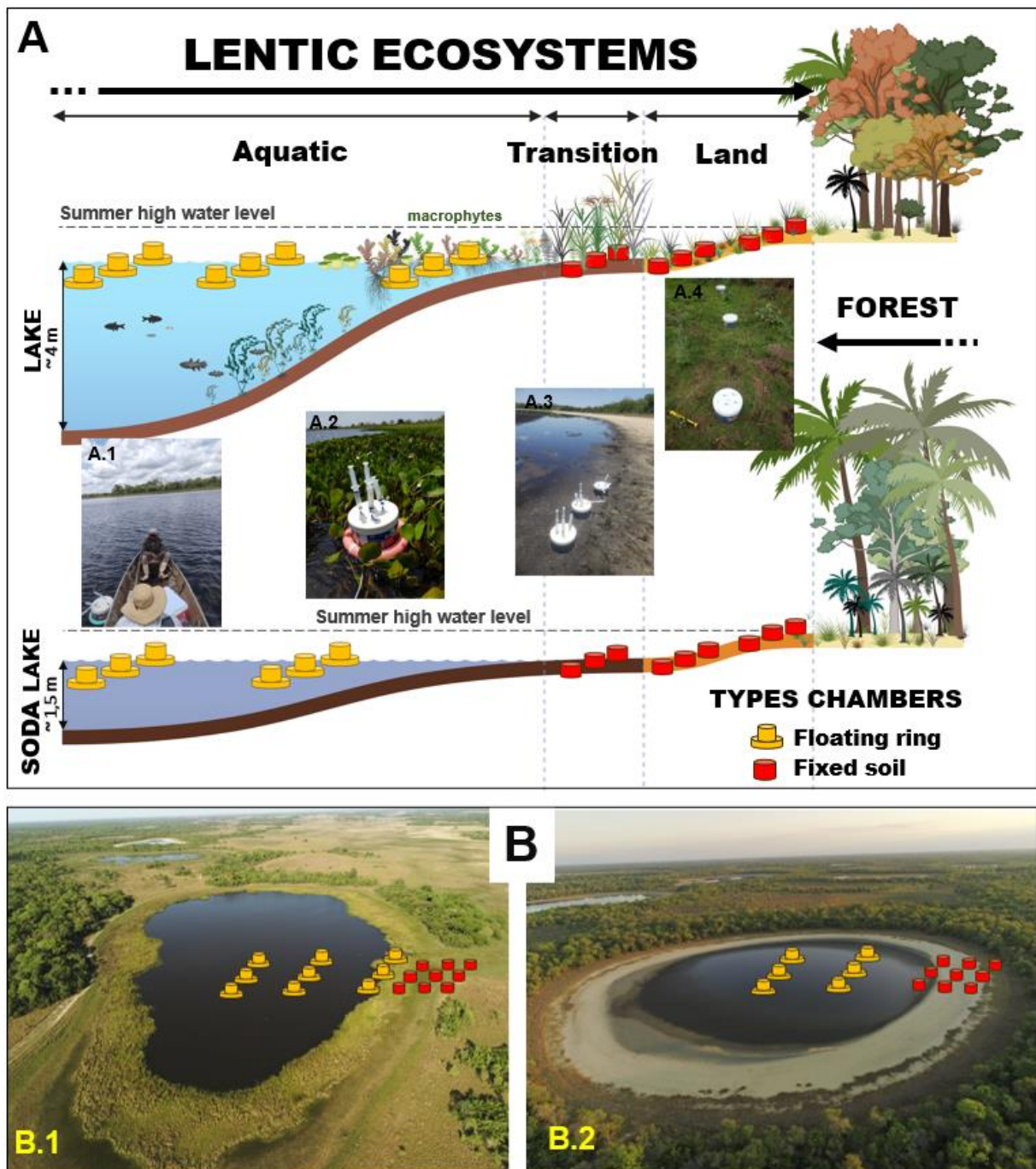
Fonte: Adaptado de Silva; Abdon, 1998; Padovani, 2010; Google Earth, 2022.

As características desses diferentes ecossistemas lênticos, selecionados para o estudo, refletem a diversidade e a complexidade dos habitats aquáticos encontrados na região, representando amplamente a gama de ecossistemas lênticos presentes na Nhecolândia (Pellegrinetti, 2022; Pellegrinetti *et al.*, 2023). Essa seleção abrangente permite análise detalhada das dinâmicas das emissões de CH₄ em diferentes condições ecológicas e tróficas, oferecendo perspectivas valiosas sobre os processos biogeoquímicos que regulam os fluxos de gases de efeito estufa nesses ambientes aquáticos variados.

4.2.2 Coleta de CH₄

Por meio de transecto, os ecossistemas lênticos foram divididos em três compartimentos ambientais. Nesse estudo, esses compartimentos são definidos como “*compartimentos*”, denominados de “*aquatic*”, “*transition*” e *land*. Foi denominado de *aquatic* o centro até a extensão marginal da lagoa, *transition* a interface marginal entre a água e o solo, rico em sedimento litorâneo, e *land* o solo arenoso periodicamente inundado pela lagoa (Figura 19).

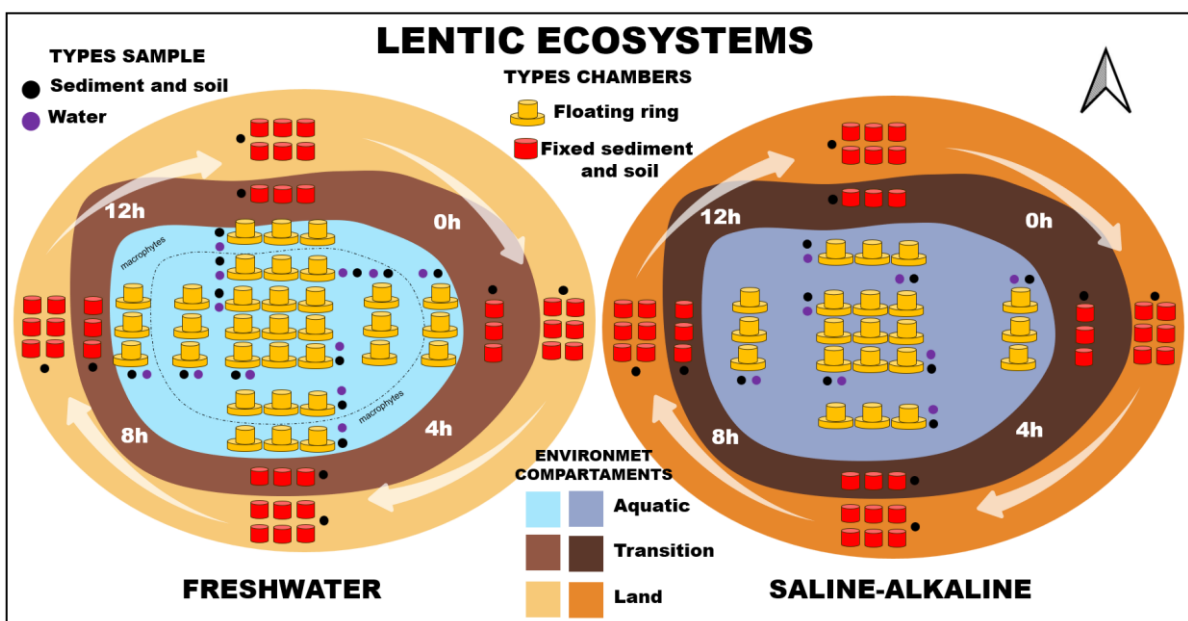
Figura 19 – Representação dos três *compartimentos* com as três sub-réplicas dentro dos ecossistemas lenticos de água doce e salino-alcalina, seguindo um transecto (A). Fotografias dos típicos locais que foram coletadas as amostras em *aquatic* (A.1 e A.2), *transition* (A.3) e *land* (A.4). Ilustração esquemática da disposição dos dois tipos de câmaras nas lagoas de água doce (B.1) e nas salino-alcalina (B.2), situação sem escala.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em 01BSR e 04BSR em *aquatic* foram amostradas 9 sub-réplicas ($9 \times 4 = 36$ amostras), por causa da abundante presença de macrófitas aquáticas (*Eichhornia crassipes*) ocupando as margens das duas lagoas. Já em 01SR, 04SR e 07SR em *aquatic* foram amostradas 6 sub-réplicas ($6 \times 4 = 24$ amostras). As demais divisões dos dois diferentes ecossistemas foram iguais, sendo 3 sub-réplicas ($3 \times 4 = 12$ amostras) para *transition* e 6 sub-réplicas para *land* ($6 \times 4 = 24$ amostras) (Figuras 19 e 20). Além disso, foi acrescentado 12 horas de esforço amostral em 01SR, nos *compartimentos* de *aquatic* ($6 \times 4 = 24$ amostras) e *transition* ($3 \times 4 = 12$ amostras), pois essa lagoa estava secando no início da coleta de 2020. Ao final das duas campanhas de campo, foram totalizadas aproximadamente 3 mil amostras de CH₄.

Figura 20 - Esquema da disposição das câmaras flutuantes e fixas juntamente com os locais de coleta de água, sedimento e solo nos diferentes *compartimentos* ambientais encontrados nas lagoas de água doce e lagoas salino-alcálicas. As coletas foram realizadas seguindo os quatro pontos cardeais, cuja direção do transecto era rotacionadas a cada 4h no sentido horário, totalizando 12 h de esforço amostral que repetiram nas duas campanhas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.3 Coleta de amostras para medidas de C e dos parâmetros ambientais

Para determinar as concentrações de carbono total (TC), carbono inorgânico (IC) e carbono orgânico total (TOC) presentes na água, sedimento e solo, as coletas seguiram o mesmo padrão, mas sem as sub-réplicas (Figura 20). Juntamente com os parâmetros ambientais (físico-químicos) da água, nas quais ambos foram coletados cerca de 10 cm dessas superfícies nos diferentes *compartimentos* (Figura 19). Para estas análises foram coletadas 283 amostras de água, de solo e sedimento e 120 dados de parâmetros ambientais.

4.2.4 Medições Ambientais das Lagoas

Os valores físico-químicos da água foram mensurados pela sonda YSI Professional Plus, sendo medidos os dados de temperatura da água (T_w - °C), O₂ dissolvido (O% - % de saturação), O₂ dissolvido (OE - mg/L), condutividade (C - μ S), potencial de oxirredução (ORP - mV) e pH. Seguindo a técnica de coleta descrito anteriormente.

Os valores da cor da água (Col - μ C) foram mensurados pelo fotoclorímetro AquaColor - PoliControl e os dados de turbidez (NTU) foram mensurados pelo turbidímetro AP2000 – PoliControl. As coordenadas geográficas (latitude - Lat e longitude - Long) foram extraídas do GPS – Garmin Dakota10 e a profundidade (Depth) foi mensurada com régua.

4.2.5 Carbono nos *Compartimentos* ambientais

A determinação das formas de C disponíveis nos *compartimentos* dos ecossistemas lênticos foram quantificados em duas etapas. A primeira etapa foi quantificar o carbono total (TCs) e carbono inorgânico (ICs) presentes nos sedimentos de *aquatic* e *transition* e nos solos de *land*, utilizando a fórmula apresentada na Figura 21, calcula-se o valor do carbono orgânico total (TOCs). Na segunda etapa, foi quantificado o carbono dissolvido na água na categoria *aquatic*, incluindo a quantificação do carbono total (TC_w) e do carbono inorgânico (IC_w) dissolvido, utilizando a mesma fórmula, mostrada na Figura 21, para calcular o carbono orgânico total (TOC_w)."

Figura 21 – Fórmula para o cálculo das concentrações de Carbono Orgânico Total (TOC) presente no sedimento e solo (TOCs) e dissolvido na água das lagoas (TOCw)

$$\text{TOC} = \text{TC} - \text{IC}$$

The diagram shows the formula $\text{TOC} = \text{TC} - \text{IC}$ inside a rectangular box. Below each term, a red arrow points down to its full name: 'Carbono Orgânico Total' under TOC, 'Carbono Total' under TC, and 'Carbono Inorgânico' under IC.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o TOCs, TCs e ICs presente nos sedimentos e solos, as amostras foram maceradas em almofariz de ágata e peneiradas com abertura de 0,20 mm. Esse material sólido preparado foi pesado (cerca de 100 mg) para encontrar os valores TCs nas amostras das lagoas de água doce. Devido à elevada alcalinidade do grupo das lagoas salino-alcálicas, foi adicionado cerca de 20 mg de óxido de vanádio (V_2O_5), segundo recomendações do fabricante do equipamento. Já a determinação do ICs, foram pesados cerca de 30 mg de amostra e adicionados 5 mL de ácido fosfórico (H_3PO_4), segundos antes da análise no equipamento. As medidas de TCs e ICs foram realizadas na unidade de combustão (900°C) para amostras sólidas Shimadzu SSM-5000 (“Solid Sample Measurement”) acoplado no Shimadzu TOC-L (“Total Organic Carbon Analyser”).

Para as análises de TOCw, TCw e ICw, foram utilizados 20 mL de cada amostra, posteriormente filtradas através de membrana calcinada de 0,20 μm . Em seguida, as amostras filtradas foram analisadas no equipamento Shimadzu TOC-L. Também, este equipamento mensurou-se os valores de nitrogênio total dissolvido (NT – mg/L) na água. A precisão das análises foi confirmada por curva de calibração com alto coeficiente de correlação ($R^2=1$).

4.2.6 O fluxo de CH_4 nos *Compartimentos Ambientais*

O CH_4 que ficou armazenado na câmara foi retirado em quatro intervalos de tempos que variaram de 1 a 25 minutos de acordo com cada *compartimento*. Com auxílio de seringas plásticas (60 mL), o gás foi retirado e acondicionados em frascos de vidro (20 mL), lacrados com septo de isobutílica. A determinação da concentração de CH_4 foi quantificada em equipamento de cromatografia gasosa (Shimadzu GC 2014) que possui detector de ionização

de chama (FID), capaz de quantificar hidrocarbonetos ajustado isotermicamente a 400 °C. O equipamento foi calibrado diariamente com sete padrões certificados (0,96; 1,84; 3,58;11,0; 24,0, 102,0 e 1030,0 ppm).

Os fluxos de CH₄ foram calculados por meio da *Equação Geral dos Gases* para cada amostra foi determinado por regressão linear gerada a partir dos valores medidos do gás nos intervalos estipulados para cada *compartimento*, normalizado em função do volume (0,0120 m³), área da câmara (0,0942 m²) e a temperatura (°C) e pressão do local (atm).

4.2.7 Análise dos Dados

Devido aos pressupostos do conjunto de dados não possuir normalidade e apresentar números negativos, aplicou-se a Análise de Componentes Principais (*Principal Components Analysis* - PCA) (Legendre, 2012), com o intuito de reduzir a dimensionalidade do conjunto dos dados originais e extrair as informações mais importantes correlacionadas com as matrizes ambientais coletadas nas duas campanhas.

Para testar a hipótese da existência de dois grupos distintos dentro dos ecossistemas lênticos a partir dos resultados dos eixos PCA, aplicou-se a Análise de Variância Multivariada Permutacional (*Permutation Multivariate Analysis of Variance* - PERMANOVA, $p < 0,05$ e permutações=9999).

Para testar a existência da diferença ambiental entre a mesma lagoa e entre elas em relação as campanhas, utilizou a Análise Multivariada da Variância (*Multivariate Analysis of Variance* - MANOVA) em pares. Essa análise realiza comparações pareadas entre as lagoas diante às variáveis ambientais e temporais com permutações ($p=9999$).

Analisando os resultados da PCA que indicaram a formação de dois distintos agrupamentos, aplicou-se a análise Escalonamento Multidimensional Não Métrico (*Non-Metric Multidimensional Scaling* - NMDS) e posteriormente a significância foi testada através da análise *Fits an Environmental Vector or Factor onto an Ordination* (ENVIFT).

Considerando que a premissa da normalidade não foi satisfeita para a realização de teste paramétrico, foi aplicado o Teste Pareado de Wilcoxon (*Test Wilcoxon Matched-Pairs*, $p < 0,05$)

por representação da variação dos dados observados por meio de gráficos *boxplot*. Assim esse teste verifica a existência de diferenças nas concentrações dos anos de 2019 e 2020 dos dados de TOCs, TOCw e CH₄ nos diferentes *compartimentos* amostrados das lagoas de águas doces e salino-alcálicas.

A análise dos dados foi desenvolvida no software “R” (R Development Core Team, 2013), por meio dos pacotes “*vegan*”, “*FactoMineR*”, “*ggplot2*” e “*gpurR*”. Os valores das medições ambientais encontrados nas lagoas foram incluídos com os valores de C (TOCs, TOCw, ICs, ICw, TCs e TCw) e com os valores médios dos fluxos de CH₄ (sub-réplicas) de cada *compartimento* das lagoas, formando um robusto conjunto de dados ambientais de todos ecossistemas lênticos nas diferentes campanhas. Posteriormente o conjunto dos dados ambientais foram transformados em matrizes de distância euclidiana.

4.3 RESULTADOS

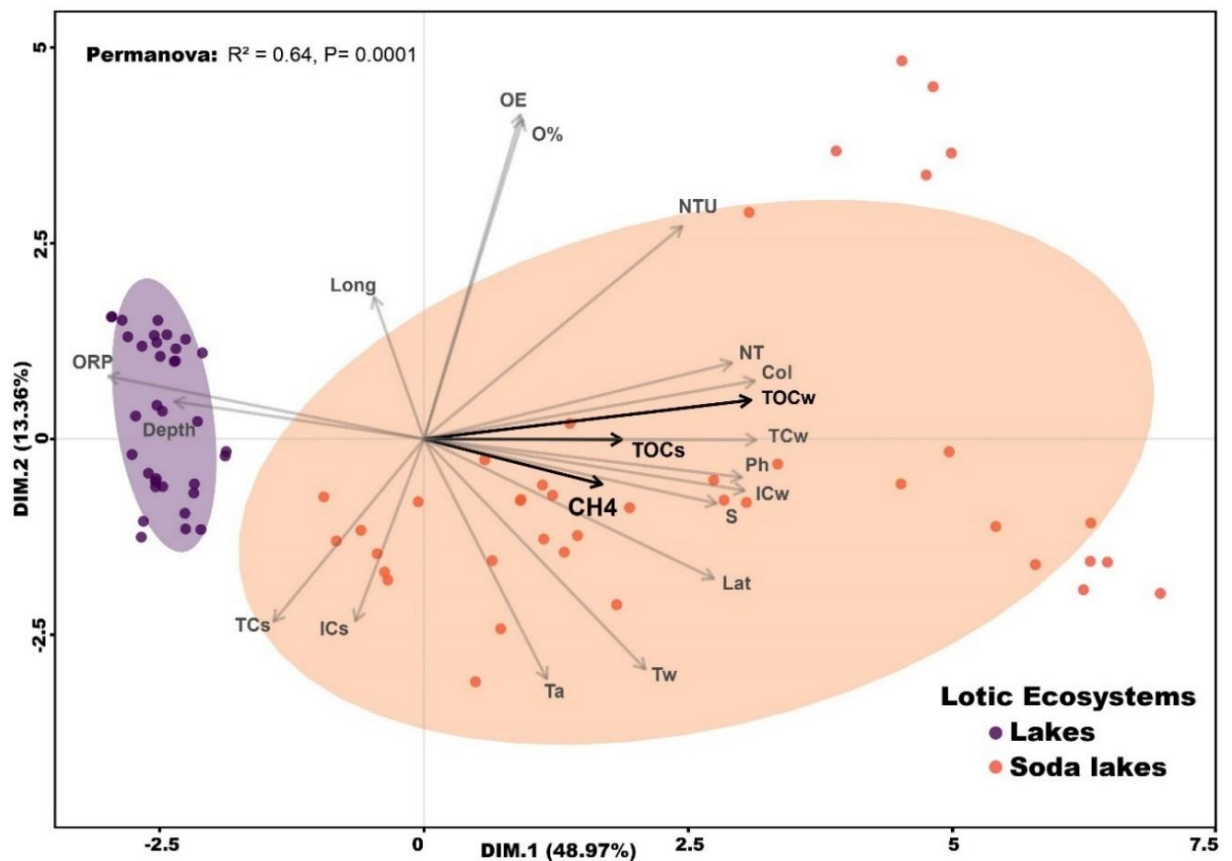
4.3.1 Efeitos Espaciais, Temporais e Ambientais nos Ecossistemas Lênticos

Por meio da PCA foi examinado que 62% da variação dos dados (dimensão 1 - 48,97% e dimensão 2 - 13,36%) foi explicada pelas características físico-química da água, emissão de CH₄ e teores de TOC formando dois grupos de ecossistemas lênticos distintos compostos por lagoas salino-alcálica (laranja) e lagoas de água doce (roxo) (Figura 22).

Nos valores positivos do eixo da dimensão 1 (48,97%), as lagoas salino-alcálicas apresentam maior amplitude ambiental, ou seja, elas são mais variáveis devido a maior diferença dos valores físico-químico da água. Observa-se nessa dimensão a relação positiva do CH₄ com o TOCs, TOw e TCw. Enquanto os valores negativos do eixo da dimensão 2 (13,36%), as lagoas de água doce estão relacionadas a maiores valores de ORP e profundidade (Figura 22). Além disso, a dimensão 3 observa correlação positiva com os maiores fluxos de CH₄ e TCs e ICs com correlação negativa.

Para testar a hipótese das existências da formação dos grupos de ecossistemas lênticos, foi aplicado a PERMANOVA. Foram observados que ocorreram diferenças ($R^2=0,64$; $p=0,0001$ e permutações=9999), confirmando a existência do agrupamento das lagoas de água doce (01BSR e 04BSR) e lagoas salino-alcálicas (01SR, 04SR e 07SR) (Figura 22).

Figura 22 – Resultados das Análise de Componentes Principais (PCA) e Análise de Variância Multivariada Permutacional (PERMANOVA). A PCA com a dimensão 1 (48,97%) e 2 (13,36%), explicam o agrupamento dos ecossistemas lânticos. Os vetores representam a indicação de organização na estrutura espacial e ambiental, na qual agrupam-se em dois grupos, as lagoas de água doce (roxo) e lagoas salino-alcálinas (laranja). Abreviações: CH₄ (metano), Col (cor), Depth (profundidade), ICs (carbono inorgânico sedimento e solo), ICw (carbono inorgânico água), Lat (latitude), Long (longitude), NT (nitrogênio total), NTU (turbidez), O% (oxigênio dissolvido %), OE (oxigênio dissolvido mg/), ORP (potencial de oxirredução), pH, S (salinidade), TCs (carbono total sedimento e solo), TCw (carbono total água), TOCs (carbono orgânico total sedimento e solo), TOCw (carbono orgânico total água), Ts (temperatura sedimento e solo), Tw (temperatura água).



Também, foi observado que os valores ambientais apresentam diferenças nas mesmas lagoas, entre os anos (2019 e 2020) e entre elas. No grupo das lagoas salino-alcálinas houve maior significância entre os anos em todos os locais de coleta em relação as lagoas de água doce (Tabela 2). Demonstrando que o grupo das lagoas salino-alcálinas tiveram maior variação ambiental e quando comparadas com o grupo das lagoas de água doce em decorrência do

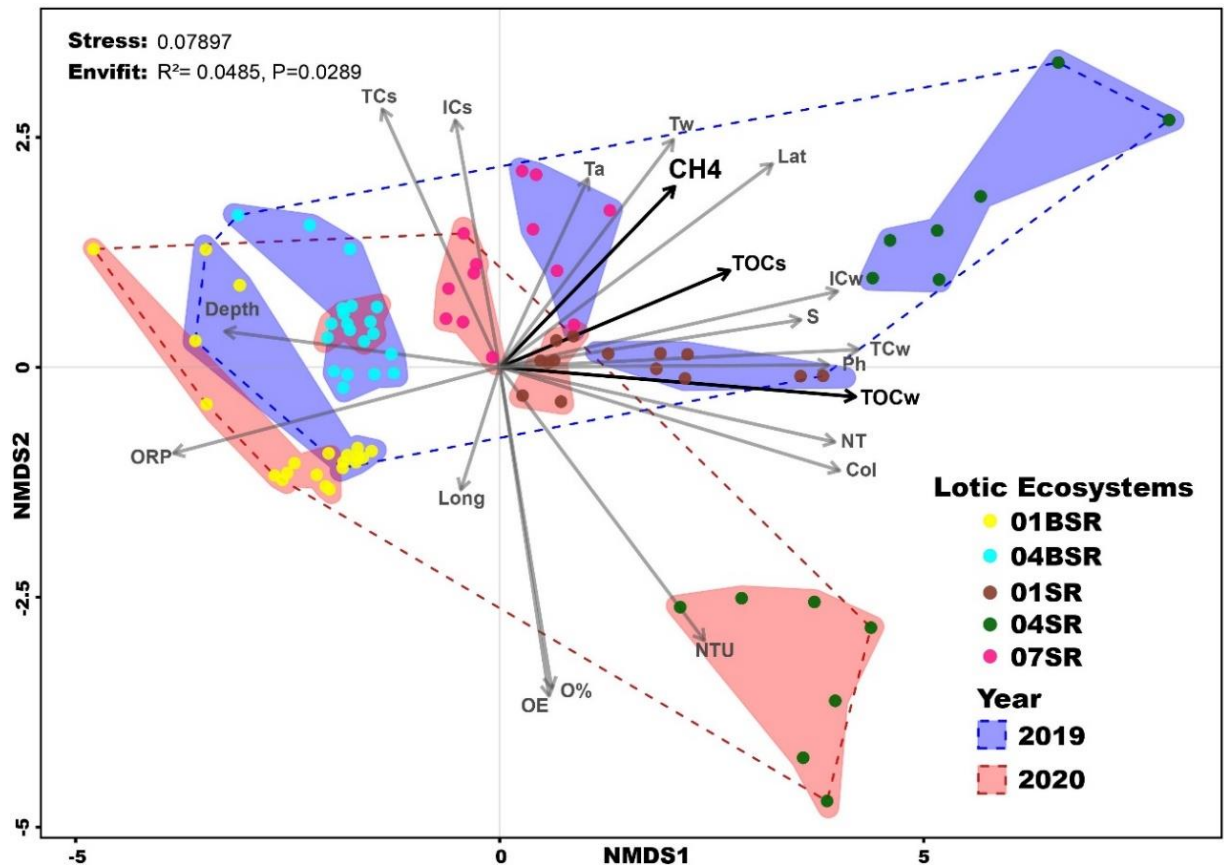
passar do ano, ou seja de 2019 para 2020. Logo, as lagoas salino-alcálinas foram as mais susceptíveis as mudanças ambientais, concentração de TOC e emissão de CH₄, enquanto as lagoas de água doce ocorreram poucas mudanças.

Tabela 2 – Resultados dos testes de permutação em pares através da MANOVA ($p < 0,05$ e permutações=9999). Comparando o conjunto de dados ambientais com as campanhas, observa-se significância em todos os grupos, porém o grupo das lagoas salino-alcálinas foram que tiveram maior valor de significância. Os valores de p estão destacados em roxo para as lagoas de água doce e em laranja para as lagoas salino-alcálinas em anos diferentes.

| | 01BSR.19 | 01BSR.20 | 04BSR.19 | 04BSR.20 | 01SR.19 | 01SR.20 | 04SR.19 | 04SR.20 | 07SR.19 |
|----------|----------------|----------|---------------|----------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|
| 01BSR.20 | 0,04766 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 04BSR.19 | 0,00032 | 0,00032 | - | - | - | - | - | - | - |
| 04BSR.20 | 0,00032 | 0,00032 | 0,0497 | - | - | - | - | - | - |
| 01SR.19 | 0,00033 | 0,00032 | 0,00053 | 0,00045 | - | - | - | - | - |
| 01SR.20 | 0,00032 | 0,00032 | 0,00032 | 0,00033 | 0,00092 | - | - | - | - |
| 04SR.19 | 0,00033 | 0,00032 | 0,00033 | 0,00032 | 0,00073 | 0,00033 | - | - | - |
| 04SR.20 | 0,00032 | 0,00032 | 0,00033 | 0,00033 | 0,00083 | 0,00099 | 0,00053 | - | - |
| 07SR.19 | 0,00033 | 0,00033 | 0,00032 | 0,00033 | 0,00147 | 0,00064 | 0,00045 | 0,00073 | - |
| 07SR.20 | 0,00033 | 0,00032 | 0,00053 | 0,00033 | 0,00033 | 0,00118 | 0,00053 | 0,00045 | 0,00099 |

Para testar a hipótese que ocorreram mudanças temporais, espaciais e ambientais nos diferentes grupos de ecossistemas lênticos, foi aplicado a análise de NMDS, que reordenou o conjunto de dados ambientais em relação aos ecossistemas lênticos nos anos distintos. Foi observado diferença (stress=0,078) na formação de dois grupos diferentes de lagoas frente às diferenças temporais e ambientais entre as campanhas de 2019 e 2020 (ENVIFT: $R^2=0,0485$ e $p=0,0289$). Com essas análises foram possíveis identificar que as lagoas salino-alcálinas foram mais impactadas com as mudanças ambientais, concentrações de TOC e emissões de CH₄ quando comparadas as lagoas de água doce que pouco mudaram no decorrer do ano (Figura 23).

Figura 23 – Resultados Análise de Escalonamento Multidimensional Não Métrico (NMDS) e ENVFIT. Estrutura espacial, temporal e ambiental de cada lagoa baseadas nas matrizes de distância do NMDS (stress=<2). Os pontos significam as diferentes amostras das lagoas. As linhas tracejadas e as sombras são os agrupamentos de 2019 (azul) e 2020 (vermelho) das lagoas com o conjunto das variáveis ambientais com destaque para o CH₄, TOCs e TOCw (ENVFIT R²=0,0485 e p=0,0289). Abreviações: CH₄ (metano), Col (cor), Depth (profundidade), ICs (carbono inorgânico sedimento e solo), ICw (carbono inorgânico água), Lat (latitude), Long (longitude), NT (nitrogênio total), NTU (turbidez), O% (oxigênio dissolvido %), OE (oxigênio dissolvido mg/), ORP (potencial de oxirredução), pH, S (salinidade), TCs (carbono total sedimento e solo), TCw (carbono total água), TOCs (carbono orgânico total sedimento e solo), TOCw (carbono orgânico total água), Ts (temperatura sedimento e solo), Tw (temperatura água).

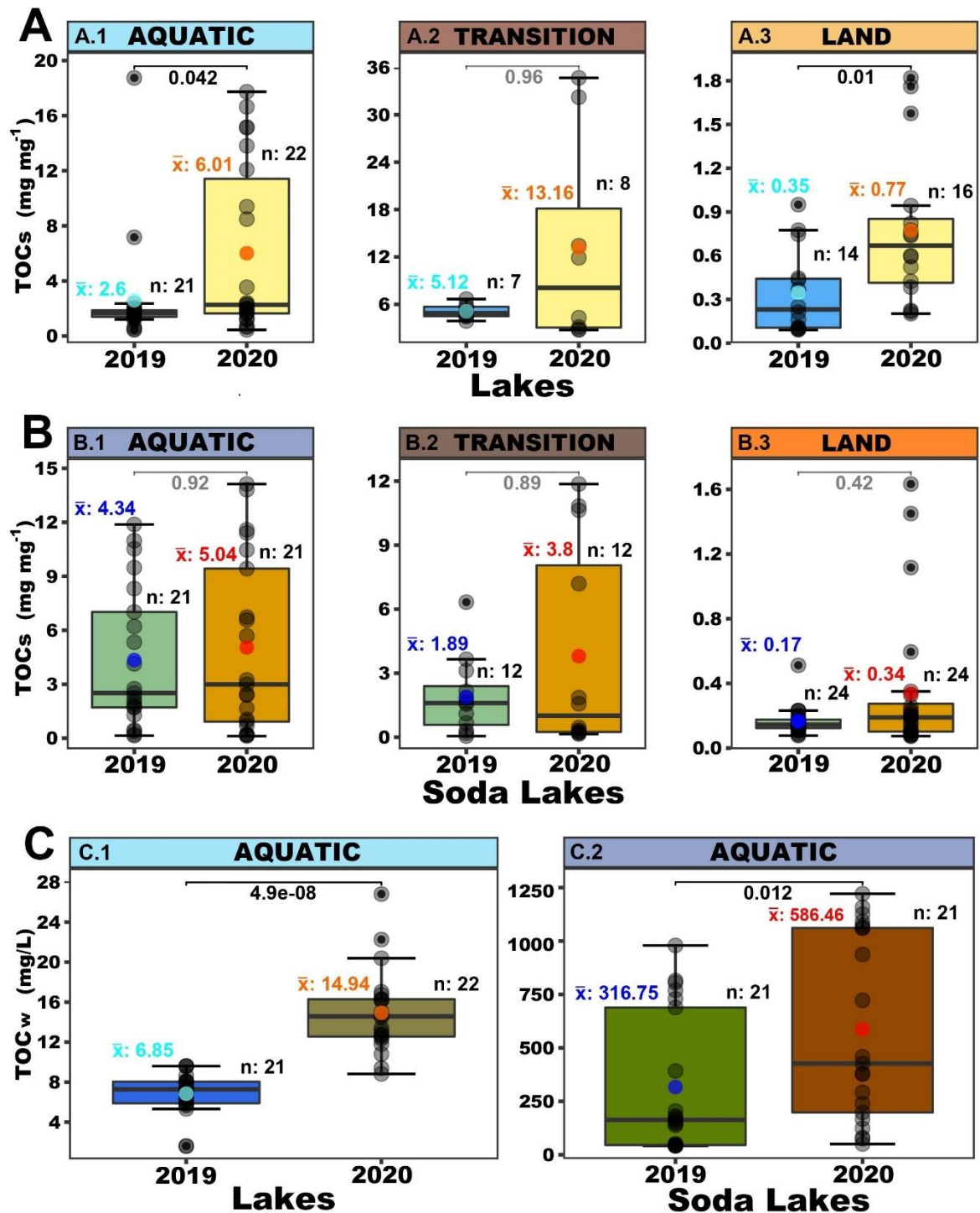


4.3.2 Variabilidade Espacial e Temporal do TOC

No período de coleta foram obtidos 82 resultados de TOCw (mg/L) dissolvido na água. No sedimento e no solo em todos os ecossistemas lênticos e seus *compartimentos* associados foram obtidos 201 resultados de TOCs (mg mg⁻¹). Devido os resultados exploratórios obtidos anteriormente, esses dados foram separados em dois grupos: lagoas de águas doce (01BSR e 04BSR) com 41 (TOCw) e 89 (TOCs) resultados. Já as lagoas salino-alcálicas (01SR, 04SR e 07SR) com 41 e 113 resultados de TOCw e TOCs, respectivamente.

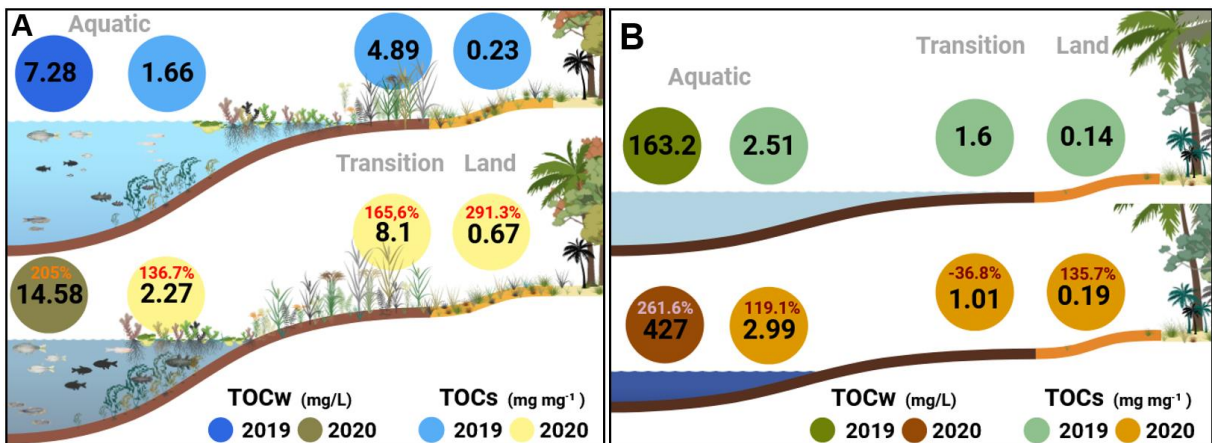
O teste *Wilcoxon Matched-Pairs* ($p < 0,05$) demonstrou que há diferenças nas concentrações de TOCs em *aquatic* e *land* no grupo das lagoas de água doce (Figura 24 - A). Já no grupo das lagoas salino-alcálicas não foram encontradas diferenças (Figura 24 - B). A maior concentração de TOCs foi encontrada em *transition* em 2020 (Figura 24 - A.2) com 8,1 (13,16±13,22) mg mg⁻¹ no grupo das lagoas de água doce, já no grupo das lagoas salino-alcálicas foi em *aquatic* em 2020 com 6,1 (6,01±6,18) mg mg⁻¹ (Figura 24 - B.1).

Figura 24 – Gráficos de *boxplot* (medianas, quartis, amplitudes de variação, média e número de amostras) para as concentrações anuais de TOC (TOC mg mg^{-1}) no sedimento (A.1; A.2; B.1 e B.2) e no solo (A.3 e B.3) e as concentrações anuais de TOC (TOC_w mg/L) dissolvido na água (C) nas lagoas de água doce (C.1) e lagoas salino-alcálinas (C.2). As barras horizontais acima dos *boxplot* são os resultados do *Test Wilcoxon Matched-Pairs* ($p < 0,05$) que comparou as concentrações anuais nos compartimentos dos ecossistemas lênticos.



Embora em alguns *compartimentos* não foram observadas diferenças, todos os *compartimentos* dos ecossistemas lênticos aumentaram a concentração de TOCs em 2020, exceto em *transition*, que diminuiu (Figura 24 – B.2 e 8 – B). Já o maior aumento foi observado em *land* (Figura 25 – B.3 e 23 - A), em 2019 nesse *compartimento* a concentração era de 0,23 ($0,35\pm 0,29$) mg mg^{-1} e em 2020 foi para 0,67 ($0,77\pm 0,52$) mg mg^{-1} , ocorrendo aumento de 2,91 vezes (291%) (Figura 25 – A).

Figura 25 – Representação esquemática da comparação entre as medianas encontradas nas concentrações anuais de TOC no sedimento/solo (TOCs mg mg^{-1}) e TOC dissolvido na água (TOCw mg/L) nas lagoas de água doce (A) e lagoas salino-alcálinas (B). Os valores em porcentagem são as comparações anuais entre os valores encontrados nos mesmos *compartimentos* de coleta.



Fonte: Elaborado pelo autor.

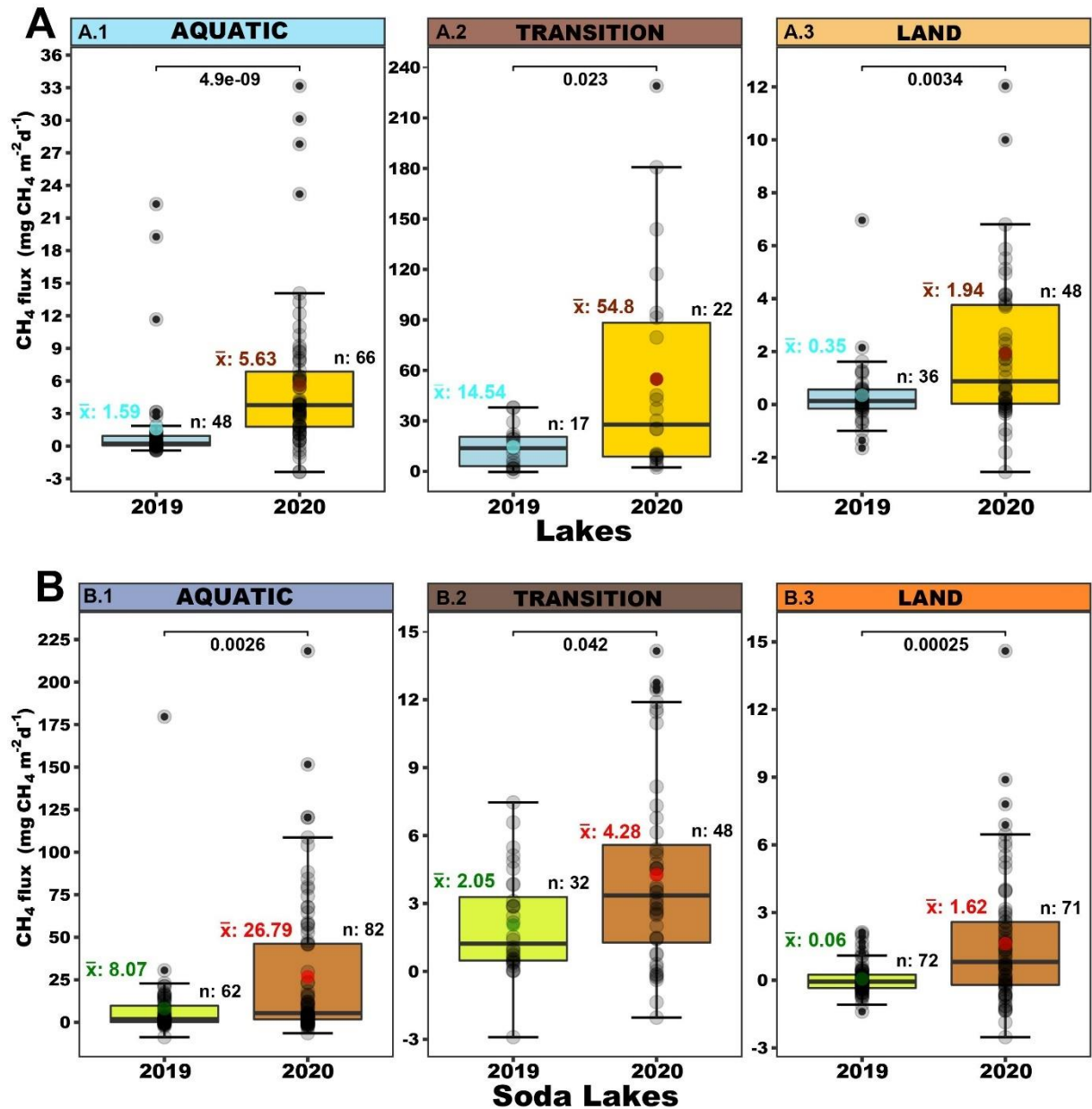
As variações das concentrações de TOC_w (mg/L) na água nos grupos das lagoas, foram todas significativas (Figura 24 – C.1 e C.2). A maior concentração foi encontrada nas lagoas salino-alcálicas (Figura 24 – C.2), com valores de 163,2 (316,75±326,75) mg/L em 2019 e em 2020 foi para 427 (586,46±434,97) mg/L, aumentando cerca de 2,6 vezes (261,6%) (Figura 25 – C.2 e 23 – B).

O mesmo padrão de aumento foi observado nas lagoas de águas doces, cujo os valores em 2019 estavam em 7,28 (6,85±2,17) mg/L e no ano seguinte foi para 14,58 (14,94±4,14) mg/L, ocorrendo aumento de 1,96 vezes (196%) (Figura 24 – C.1 Figura 25 – A).

4.3.3 Variabilidade Espacial e Temporal do CH₄

Nos períodos de 2019 e 2020, foram calculados 604 dados de fluxos de CH₄ em todos os ecossistemas lênticos e seus *compartimentos* associados (*aquatic, transition, land*). Esses resultados, também foram separados em dois grupos: as lagoas de água doce (01BSR e 04BSR) com 237 medidas de fluxos e as lagoas salino-alcálicas (01SR, 04SR e 07SR) com 367 medidas de fluxos (Figura 26).

Figura 26 – Gráficos de *boxplot* (medianas, quartis, amplitudes de variação, média e número de amostras) para os fluxos anuais de CH_4 ($\text{mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) nos ecossistemas lânticos, separados em grupos das lagoas de água doce (A) e grupos das lagoas salino-alcálinas (B). As barras horizontais acima dos *boxplot* são os resultados do *Test Wilcoxon Matched-Pairs* ($p = < 0,05$) que comparou as concentrações anuais nos *compartimentos* dos ecossistemas lânticos.

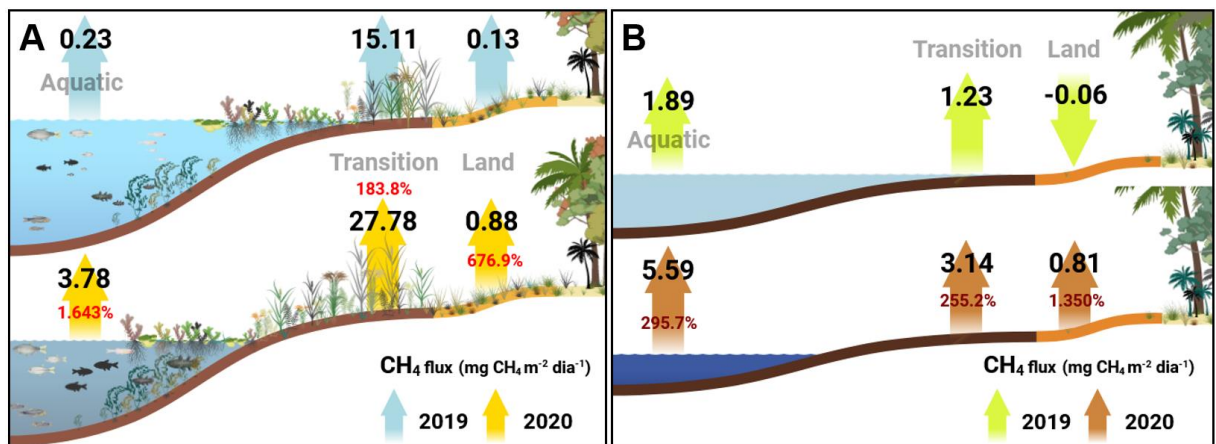


Quando comparados os fluxos de CH₄ entre os anos de 2019 e 2020 nos ecossistemas lênticos e seus *compartimentos* associados, foi observado que houve aumento nas emissões do ano de 2019 para 2020 nos dois grupos (*Test Wilcoxon Matched-Pairs*, com $p = <0,05$) (Figura 26 – A e B).

As maiores diferenças foram observadas no *compartimento aquatic* no grupo das lagoas de água doce. Nesse *compartimento*, em 2019 foi observado fluxo de 0,23 (1,59±4,44) mg CH₄ m⁻² dia⁻¹ em 2019 e no ano seguinte atingiu 3,78 (5,63±6,92) mg CH₄ m⁻² dia⁻¹, aumentando as emissões cerca de 16,43 vezes (1.643%) em 2020 (Figura 26 – A.1). Também, nesse grupo de lagoas foi registrado fluxo de 27,78 (54,8±63,61) mg CH₄ m⁻² dia⁻¹ no *compartimento transition* (Figura 26 – A.2 e 27 – A), sendo o maior valor de emissão quando comparados com todos outros *compartimentos* dos ecossistemas lênticos.

No grupo das lagoas salino-alcálicas, as maiores diferenças de emissões foram encontradas em *land*. Esse *compartimento* encontrava-se consumindo CH₄, cujo fluxos estavam em -0,06 (1,94±2,87) mg CH₄ m⁻² dia⁻¹ em 2019 e no ano seguinte atingiu 0,88 (54,8±63,61) mg CH₄ m⁻² dia⁻¹, aumentando as emissões cerca de 13,5 vezes (1.350%) (Figura 26 – B.3 e 27 – A). Nesse grupo, as maiores emissões ocorreram no *compartimento aquatic* com os fluxos de 5,59 (27,06±41,55) mg CH₄ m⁻² dia⁻¹ (Figura 26 – B.1 e 27 - A).

Figura 27 – Representação esquemática da comparação entre as medianas encontradas nas concentrações anuais de CH₄ na água, sedimento e solo (mg CH₄ m⁻² dia⁻¹) nas lagoas de água doce (A) e lagoas salino-alcálinas (B). Os valores em porcentagem são as comparações anuais entre os valores encontrados nos mesmos *compartimentos* de coleta.



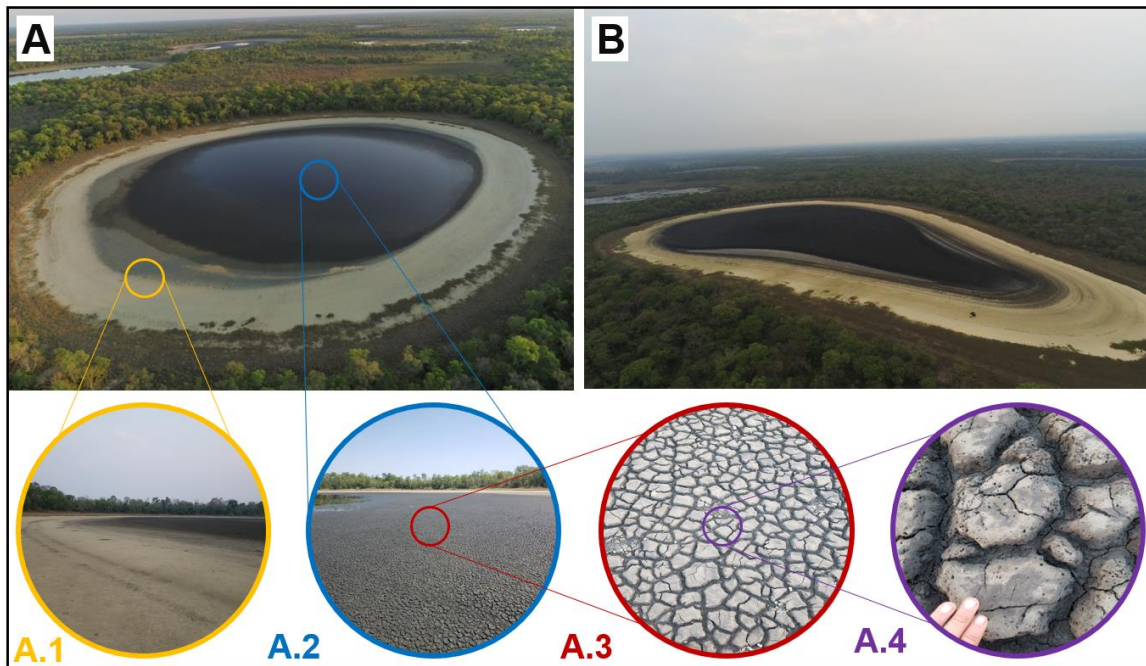
Fonte: Elaborado pelo autor.

De maneira geral, todos os *compartimentos* dos ecossistemas lânticos aumentaram suas emissões em 2020. As emissões no grupo das lagoas de água doce apresentaram valor médio das medianas de 8,34 vezes (834%) e o grupo das lagoas salino-alcálinas emitiram valor médio das medianas de 6,31 vezes (631%), quando comparado com o ano de 2019 (Figura 27).

4.3.4 Variabilidade Espacial e Temporal do CH₄ em uma lagoa secando

No início da campanha de 2020, foram calculados mais 24 fluxos em 01SR nos *compartimentos* de *aquatic* e *transition*, pois ela estava secando quando se iniciou as coletas de campo em 2020 (Figura 28). Passados dois dias, outra coleta foi realizada nos mesmos locais dos *compartimentos* após chuva de aproximadamente 80 mm. Após essa precipitação a lâmina de água dessa lagoa atingiu cerca de 0,35 m de altura (Figura 28 - A).

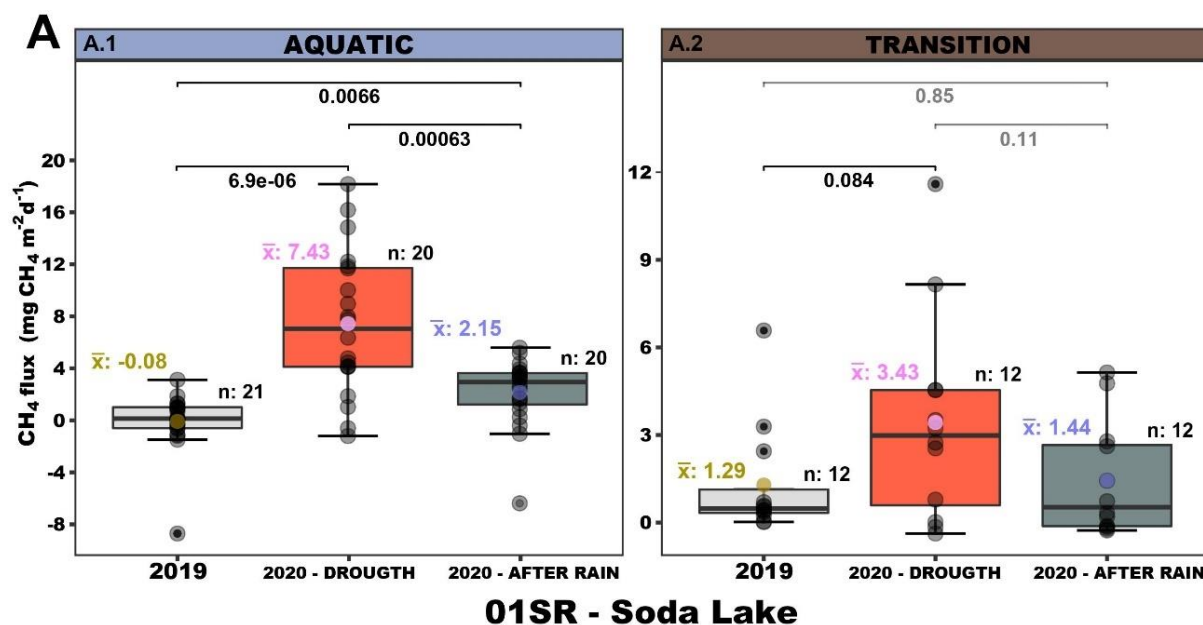
Figura 28 - Imagens aéreas das lagoas 01SR depois da chuva (A) e 04SR antes da chuva (B). Nas fotos A.1 até A.4 são imagens da 01SR no momento que ela se encontrava secando. Em A.1 é o solo marginal (*land*), adjacente à *transition*, sedimento exposto nas margens. De A.2 até A.4 é o centro da lagoa, onde é possível observar o sedimento rico em matéria orgânica exposto diretamente à atmosfera. Na foto A.4, observam-se inúmeros orifícios (1 mm a 4 mm) no sedimento exposto diretamente à atmosfera.



Fonte: Elaborado pelo autor.

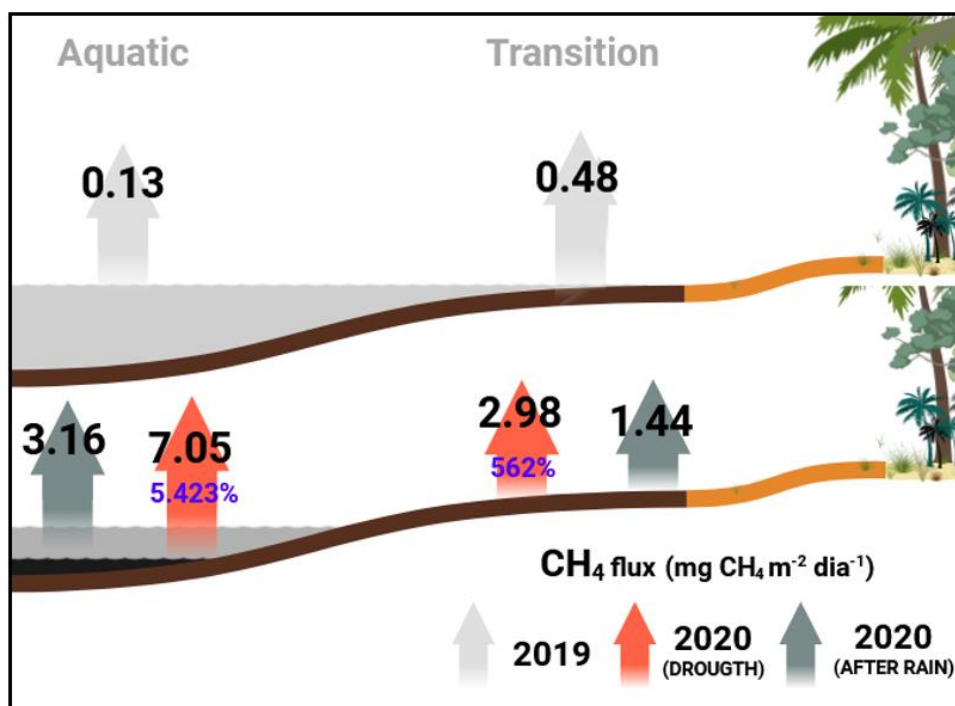
Quando comparadas as emissões de CH_4 entre os anos de 2019, 2020 (*drought*) e 2020 (*after rain*), foi observado diferença nas emissões em *aquatic* em todos os períodos (*Test Wilcoxon Matched-Pairs*, com $p = <0,05$) (Figura 29 – A.1). Já em *transition*, a significância foi observada entre os anos de 2019 e 2020 (*Test Wilcoxon Matched-Pairs*, com $p = <0,05$) (Figura 29 – A.2).

Figura 29 – Gráficos de *boxplot* (medianas, quartis, amplitudes de variação, média e número de amostras) dos dados obtidos em 01SR. Os resultados são os fluxos de CH₄ (mg CH₄ m⁻² dia⁻¹) nos anos de 2019, 2020 (*drought*) e 2020 (*after rain*) em 01SR no *compartmento aquatic* (A.1) e *transition* (A.2). As barras horizontais acima dos *boxplot* são os resultados do *Test Wilcoxon Matched-Pairs* ($p < 0,05$) que comparou as concentrações de CH₄ entre os anos e entre os diferentes estados de 01SR.



No momento que 01SR estava secando, os fluxos atingiram 7,05 ($7,43 \pm 5,51$) mg CH₄ m⁻² dia⁻¹ em *aquatic* e 2,98 ($3,43 \pm 3,55$) mg CH₄ m⁻² dia⁻¹ em *transition*. Após a chuva de 80mm, os fluxos nesses *compartmentos* baixaram para 3,16 ($2,26 \pm 2,66$) e 0,53 ($1,44 \pm 1,95$) mg CH₄ m⁻² dia⁻¹, assim reduzindo em 2,23 vezes (223%) e em 5,62 (562%) as emissões de CH₄ quando a lagoa aumentou seu nível de água, respectivamente, em *aquatic* e *transition* (Figura 29 e 30).

Figura 30 – Representação esquemática da comparação entre as medianas encontradas nas concentrações anuais de CH₄ na água, sedimento e solo (mg CH₄ m⁻² dia⁻¹) nas lagoas salino-alcálicas 01SR. Os valores em porcentagem são as comparações entre os valores encontrados nos mesmos *compartimentos* antes da chuva e depois da chuva.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 DISCUSSÃO

A análise dos fluxos de CH₄ nos ecossistemas lênticos identificou diferenças entre dois grupos de ecossistemas: lagoas de água doce (01BSR e 04BSR) e lagoas salino-alcálicas (01SR, 04SR e 07SR), com variação espacial, temporal e ambiental notável nos anos de 2019 e 2020. A diferença entre os grupos foi estatisticamente confirmada (PERMANOVA: R²=0,64; p<0,0001; permutações=9999), indicando distinção clara das lagoas de água doce (01BSR e 04BSR) e outro de lagoas salino-alcálicas (01SR, 04SR e 07SR).

Especificamente, as lagoas de água doce são caracterizadas por associação maior com profundidade e potencial oxi-redutivo (ORP), enquanto as lagoas salino-alcálinas mostraram maior relação com o carbono orgânico dissolvido na água (TOC_w), salinidade (S), nitrogênio total (NT) e pH. Análises adicionais revelaram diferenças ambientais e temporais entre as campanhas (ENVIFIT $R^2=0,0485$; $p=0,0289$), principalmente no grupo das lagoas salino-alcálinas (MANOVA - Tabela 1), sugerindo maior amplitude ambiental e susceptibilidade a alterações na composição da água.

As análises indicaram que, apesar das condições climáticas semelhantes, as lagoas de água doce exibem menor amplitude ambiental com condições mais estáveis. No entanto, foram nestas lagoas que se observaram as maiores concentrações de TOCs e emissões de CH₄ (Figura 24 - A e 25 - A), potencialmente devido à decomposição de macrófitas aquáticas, algas e matéria orgânica de áreas adjacentes. Este achado é reforçado pela hipótese de que o enriquecimento de C nas lagoas de água doce está ligado à biomassa das macrófitas (Aichner *et al.*, 2010), ao aumento da temperatura (Ofiti *et al.*, 2021; Laanbroek, 2009) e à dinâmica de pulso de inundação do Pantanal, que transporta matéria orgânica para dentro das lagoas.

Entretanto, essa relação não explica as quantidades observadas de TOC_w dissolvido nas águas das lagoas salino-alcálinas, já que as macrófitas não são abundantes ou até inexistem (01SR e 04SR). Provavelmente, a alta alcalinidade reduza a decomposição e a dinâmica do C (Khan *et al.*, 2020), fazendo com as concentrações de TOC_w (mg/L) encontradas em 2020 nesses ecossistemas superam as concentrações encontradas em distintos ecossistemas aquáticos do *permafrost* em diferentes lugares do mundo (Qiang *et al.*, 2019). Em ambos períodos, as concentrações atingiram picos de mais de 1000 mg/L, talvez essas concentrações, também podem estar relacionadas com TOC dissolvido na água do lençol freático que são susceptíveis ao aumento da temperatura (Chen *et al.*, 2021). Pois, além das chuvas, essas lagoas são abastecidas por essas vias subterrâneas (Almeida *et al.*, 2009; Parizotto, 2012), entretanto essas origens permanecem desconhecidas.

Embora, inexistam estudos semelhantes como aqui apresentados, os resultados médios das emissões de CH₄ nos ecossistemas lênticos no Pantanal estão na faixa média dos valores (0,2 a 143 mg CH₄ m⁻² dia⁻¹) encontrados em outras sub-regiões no Pantanal com base nas medições da câmara de fluxo (Bastviken *et al.*, 2008; Barbiero *et al.*, 2018; Bergier *et al.*, 2016; Marani; Alvalá, 2007).

As maiores emissões de CH₄ estão diretamente relacionadas as concentrações de TOC do *compartimento*. Como observado no grupo das lagoas doces em *transition*, onde ocorreu a maior emissão (27,78 mg CH₄ m⁻² dia⁻¹) (Figura 26 - A.2) e a maior concentração de TOCs (8.1 mg m⁻² mg⁻¹) em relação aos outros *compartimentos* (Figura 24 – A.2). O mesmo foi observado no grupo das lagoas salino-alcálicas, a maior emissão (5,59 mg CH₄ m⁻² dia⁻¹) (Figura 26 – B.1) foi observada em *aquatic*, mesmo *compartimento* em que a concentração de TOC_w foi mais alta (586 mg/L) (Figura 24 – C.2). Provavelmente, a origem das emissões de CH₄ seja distinta para cada grupo de lagoas. Logo, emissões ebulitivas podem ser a principal fonte CH₄ das lagoas de água doce e as emissões difusivas podem ser a principal fonte de CH₄ nas lagoas salino-alcálicas.

Mesmo existindo diferentes emissões de CH₄ nos grupos de ecossistemas lânticos, assim como as diferentes emissões espaciais em seus *compartimentos*, todas as lagoas aumentaram as emissões de CH₄ em 2020, período em que o Pantanal estava no período do evento climático que causou grande seca e aumento de temperatura (Mataveli *et al.*, 2021; Marengo *et al.*, 2021a; Marengo *et al.*, 2021). O grupo das lagoas de água doce foi mais impactada por esse evento, com aumento de emissões em média 8,34 vezes (834%) (Figura 27 – A), enquanto as lagoas salino-alcálicas aumentaram em 6,31 (631%) (Figura 27 – B).

A seca e a onda de calor de outubro de 2020 (Marengo *et al.*, 2021a; Marengo *et al.*, 2021b) foram a combinação perfeita para o elevado aumento das emissões de CH₄ nesses ecossistemas lânticos. A falta de precipitação fez com que as lagoas não fossem reabastecidas. Assim, os sedimentos ricos em C do fundo do leito que estavam armazenados há décadas ficaram expostos diretamente a atmosfera e a alta temperatura. A combinação desses fatores enriqueceu o *compartimento* com as concentrações elevadas de TOCs e TOC_w que em partes, ficaram no sedimento (Figura 24– A e B) e dissolvido na água (Figura 24 – C). Explicando assim, a correlação dos maiores fluxos de CH₄ com a correlação negativa de TOCs e ICs (Figura 26), ou seja, quanto maior os fluxos, menor os teores de C no sedimento.

Esse *compartimento* enriqueceu a fonte de recurso para os microrganismos que intensificou a atividade metanogênica dessas lagoas, degradando o TOC abundante no *compartimento*, liberando rapidamente CH₄ para a atmosfera. Logo, esse consumo pode ser mais evidente em *transition* no grupo das lagoas salino-alcálicas (Figura 24 – B.2 e 25 – B), único *compartimento* que diminuiu a concentração de TOC em 2020, porque de certa forma, o

CH₄ já poderia ter escapado mais rapidamente na atmosfera, meses antes da coleta. Além disso, numa escala temporal de dias, esse padrão também é observado pela não significância das emissões de *transition* na lagoa 01SR, demonstrando que atividade metanogênica desse *compartimento* é mais homogênea.

Organismos metanogênicos, tradicionalmente considerados estritamente anaeróbios, tem demonstrado capacidade de tolerância ao oxigênio até certo limite, permitindo-lhes resistir à dessecação em ambientes de solo inundado de maneira notável (Conrad, 2020). Evidências apontam para a relevante função dos compostos de C orgânico do solo e a regulação das taxas e vias de produção de CH₄. É importante destacar que processos de drenagem e aeração podem converter solos anteriormente inundados em sumidouros para CH₄, um fenômeno que se atribui às características específicas das bactérias metanotróficas residentes (Tardy *et al.*, 2022), podendo explicar a diminuição de TCs e ICs em *transition* das lagoas salino-alcálicas (Figura 24 – B.2 e 26),

O que se observou em 01SR representa todo o processo do aumento considerável de emissão de CH₄ quando há retração da lâmina d'água nos ecossistemas lênticos tropicais. Assim que a lâmina de água diminui, as concentrações de TOC_w dissolvido na água aumentam consideravelmente (Figura 24 – C.1/C.2 e 25 – B), precipitando o C no sedimento e enriquecendo a matéria orgânica no fundo do leito. Reforçando a relação encontrada na PCA (Figura 26), aonde se observa a correlação positiva; CH₄ e TOCs com correlação negativa, ou seja, quando aumenta as emissões de CH₄, diminui o TOCs e e ICs presente no sedimento.

Logo, por processos anaeróbios (metanogênese) o CH₄ é formado e aprisionado no sedimento, já que possui relativa insolubilidade na água (Blount; Leigh, 1977; Clever *et al.*, 1987), onde partes é consumido por organismos, também por processos anaeróbios (metanotrofia).

À medida que a retração da coluna de água aumenta naturalmente, o sedimento rico em C é exposto nas margens, onde se decompõe rapidamente em um processo constante nos ecossistemas lênticos tropicais. Por isso não se observa a significância das diferenças entre as concentrações de TOCs em *transition* nos diferentes anos em ambos grupos de lagoas (Figura 22 – A.2 e B.2), inclusive ocorrendo diminuição (Figura 7 – B.2), e sim, aumento elevado nas emissões de CH₄ (Figura 26 – A.2 /B.2 e 27).

Possivelmente, o contato direto do sedimento com a atmosfera, a metanotrofia é diminuída e/ou cessada e o CH₄ que estava preso no sedimento devido a pressão da coluna de água é liberado rapidamente, formando orifícios no sedimento (Figura 28 – A.4). Logo, quando a lâmina de água retorna à normalidade, o CH₄ fica novamente retido no sedimento e os organismos metanotróficos retornam à atividade. Daí as emissões de CH₄ são desaceleradas como observadas em OISR depois da chuva, confirmando os resultados observados antes e após ao aumento da lâmina de água (Figura 29).

As lagoas de águas doces são exemplos evidentes desse processo, na qual a maior concentração de TOC está correlacionada com o “*hotspots*” de emissões de CH₄. As plantas aquáticas habitantes nas margens desses ecossistemas fornecerem elevada matéria orgânica rica em C. Quando há rebaixamento de nível de água, aumentam a morte dessas plantas. Esse material acumula nas margens (*transition*), cuja maior concentração de TOCs é encontrada (Figura 24 – A.2 e 25 – A), mesmo *compartimento* onde são encontradas as maiores emissões de CH₄ (Figura 26 - A.2) e em poucos metros, em *land*, são encontradas as menores concentrações de TOCs (Figura 22 - A.3) e as menores emissões de CH₄, inclusive ocorrendo consumo (Figura 26 - A.3).

A análise apresentada indica que esses diferentes ecossistemas lênticos, quando expostos à dessecação parcial ou completa, participam de processos universais de ciclagem do C observados globalmente, atuando como pontos críticos de emissões de C para a atmosfera. Fontes notáveis de CO₂ (120 Tg ano⁻¹) e CH₄ (2,7 Tg C-CH₄ ano⁻¹) foram documentadas em 196 (Keller *et al.*, 2020) e 89 ecossistemas (Paraíba *et al.*, 2022), respectivamente, sob tais condições.

Os ecossistemas lênticos do Pantanal mudaram seu papel de sumidouro de C (dissolvido nas águas, sedimento e solo) para grandes emissores de CH₄ em 2020. Provavelmente, essa emissão de CH₄ do Pantanal nesse período de atividade climática atípica contribuiu os aumentos do crescimento global de CH₄ atmosférico (Feng *et al.*, 2022; Nisbet, 2023; Peng *et al.*, 2022), principalmente nos anos de 2020 e 2021 que foi observado considerável crescimento (Zang *et al.*, 2023).

Se eventos climáticos extremos, como secas e ondas de calor, se tornarem mais frequentes no Pantanal, é provável que a capacidade dos ecossistemas lênticos de sequestrar C seja comprometida, levando aumento natural nas emissões de CH₄ e exacerbando seu impacto no aquecimento global. Essa dinâmica sugere que as lagoas do Pantanal podem contribuir ainda mais para as emissões de CH₄ sob cenário de maior incidência de ondas de calor (Woolway *et al.*, 2022) e aumento global de temperatura em 2°C (Koffi *et al.*, 2020).

Em outra escala, recentemente estudos na troposfera da América do Sul, tem demonstrado clara sazonalidade das emissões de CH₄ no Pantanal, cujas emissões alcançam valores ~3,3 Tg C ano⁻¹. Esse estudo observou que ocorrem dois picos de emissões de CH₄ no Pantanal, um quando o nível de água começa a subir e outro após o nível baixar (Gloor *et al.*, 2021).

Como já é conhecido o conceito de “pulso de inundação” (Junk *et al.*, 1989) que molda toda paisagem do Pantanal, aparentemente exista “*pulso de emissão de CH₄*”, causado naturalmente quando a expansão e retração das águas estão diretamente relacionados à exposição de sedimentos orgânicos nos ecossistemas aquáticos do Pantanal. Dessa forma, as variações das emissões de CH₄, principalmente nas margens das lagoas, não podem ser ignoradas, e são, sim parte fundamental da dinâmica natural da emissão de CH₄ para a atmosfera. Logo, caso as mudanças climáticas, e as alterações antrópicas no Pantanal de acentuem a dinâmica do ciclo do CH₄ será modificada com tendências para que as emissões aumentem.

4.5 CONCLUSÃO

Foi observada dinâmica complexa e o aumento de CH_4 na atmosfera advinda dos ecossistemas lênticos do Pantanal no período em que altas temperaturas e seca intensificaram-se em 2020. O aumento notável das emissões de CH_4 é impulsionado quando sedimentos ricos em C foram expostos diretamente à atmosfera, representando grande preocupação para o agravamento das mudanças climáticas, pois à medida que os ecossistemas aquáticos semelhantes secam com maior frequência, é provável que ocorra aumento na emissão natural de CH_4 nos próximos anos.

A distinção entre os fluxos das lagoas de água doce e lagoas salino-alcálinas ilustra a complexidade das emissões de CH_4 , demonstrando que a determinação da origem e estimativa precisa dos fluxos de CH_4 a partir desses ecossistemas é um desafio complexo, devido à variedade de fatores envolvidos e à falta de estudos abrangentes. O aumento substancial de mais de 5.400% é mais que um alerta do potencial desses ecossistemas tropicais em emitir CH_4 durante eventos climáticos atípicos, sugerindo que a capacidade dos ecossistemas lênticos de sequestrar C seja comprometida, levando a aumento natural nas emissões de GEE e exacerbando seu impacto no aquecimento global, agravando os efeitos das mudanças climáticas.

Além disso, esse estudo sugere o "*pulso de emissão de CH_4* " associado às variações hidrológicas naturais do Pantanal, devido a expansão e retração natural das lagoas tropicais, enfatizando a necessidade de biomonitoramento contínuo e ações de gestão e conservação adaptativas para mitigar os impactos negativos das mudanças climáticas e antropogênicas nesses ecossistemas críticos.

Portanto, a análise conjunta destaca a urgência de ampliar o conhecimento sobre a dinâmica dos fluxos CH_4 em ecossistemas lênticos tropicais e sua resposta a alterações climáticas. É imperativo que esforços de pesquisa e biomonitoramento sejam intensificados para avaliar e mitigar o impacto dessas emissões no clima global, enfatizando a necessidade de abordagens multidisciplinares para compreender as interações complexas entre os ecossistemas aquáticos e o clima. A colaboração entre cientistas, gestores de políticas ambientais e comunidades locais será crucial para desenvolver estratégias efetivas de conservação e gestão desses ecossistemas vitais frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

Adrian, R. *et al.* Lakes as sentinels of climate change. **Limnology and Oceanography**, v. 54 p. 2283-2297, 01. nov. 2009.

Alho, C. J. R. The Pantanal. In: Fraser, L. H., Keddy, P. A., (Eds.) **The World's Largest Wetlands - Ecology and Conservation**. New York: Cambridge University Press. 2005. p. 203-271.

Almeida, T. I. R. *et al.* Um estudo sobre as diferenças de altimetria do nível da água de lagoas salinas e hipossalinas no Pantanal da Nhecolândia: um indicativo de funcionamento do mega sistema lacustre. **Geociências**, v. 28, p. 401-415, 01 out. 2009.

Amora-Nogueira, L. *et al.* Tropical forests as drivers of lake carbon burial. **Nature Communications**, v. 13, p. 1-7, 13 jul. 2022.

Anthony, K. W. *et al.* 21st-century modeled permafrost carbon emissions accelerated by abrupt thaw beneath lakes. **Nature Communications**. v. 9, p. 1-11, 15 ago. 2018.

Barbiero, L. *et al.* Biogeochemical diversity, O₂-supersaturation and hot moments of GHG emissions from shallow alkaline lakes in the Pantanal of Nhecolândia, Brazil. **Sci. Total Environ**, v. 619, p. 1420-1430, 1 abr. 2018.

Barbosa, P. M. *et al.* Diffusive methane fluxes from Negro, Solimoes and Madeira rivers and fringing lakes in the Amazon basin. **Limnology and Oceanography**, v. 16, p. 221-237, 21 jul. 2016.

Barbosa, P. M. *et al.* Large Seasonal and Habitat Differences in Methane Ebullition on the Amazon Floodplain. **JGR: Atmospheres**, p. 1-18, v. 126, 12 jul. 2021.

Bastviken, D. *et al.* Freshwater methane emissions offset the continental carbon sink. **Science**. v. 331, p. 50-62, 7 jan. 2011.

Bastviken, D. *et al.*, Fates of methane from different lake habitats: Connecting whole-lake budgets and CH₄ emissions. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 113, p. 1-13, 24 maio 2008.

Bastviken, D. *et al.*, Fates of methane from different lake habitats: Connecting whole-lake budgets and CH₄ emissions. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 113, p. 1-13, 24 maio 2008.

Benoy, G., K. Carbon dynamics in lakes of the boreal forest under a changing climate. **Environ. Rev.**, v. 15, p. 175-189, 21 nov. 2007.

Bergier, I.; Assine, M. L. Functional fluvial landforms of the Pantanal: Hydrologic trends and responses to climate changes. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 119, p. 1-12, 01 nov. 2022.

Blount, C. W; Leigh, P. Solubility of Methane in water under natural conditions a laboratory study. Final Reporty. **Department of Geology Ioaho State University**, 1977, 161 p.

Camacho A. *et al.* Methane emissions in spanish saline lakes: Current rates, temperature and salinity responses, and evolution under different climate change scenarios. **Water**, v. 9, p. 1-20, 1 set. 2017.

Conrad, R. Methane Production in Soil Environments—Anaerobic Biogeochemistry and Microbial Life between Flooding and Desiccation. *Microorganisms*, v. 6, n. 8, 01 jun. 2020.

Cheng C. H; Redfern S. A. T. Impact of interannual and multidecadal trends on methane-climate feedbacks and sensitivity. **Nature Communications**, v. 13, 23 jun. 2022.

Chen, H *et al.* Differences in the temperature dependence of wetland CO₂ and CH₄ emissions vary with water table depth. **Nature Climate Change**, v. 11, p. 766–771, 09 ago. 2021.

Clever, H. L. *et al.* **Solubility data series. Vol. 1 - Oxford**; New York: Pergamon, 1979, 801 p.

Crill, P. M. *et al.* Tropospheric methane from an Amazonian floodplain lake. **JGR: Atmospheres**, v. 93, p. 1564-1570, 20 fev.1988.

Cunha, A. P. M. A.; Buermann, W.; Marengo, J. A. Changes in compound drought-heat events over Brazil's Pantanal wetland: an assessment using remote sensing data and multiple drought indicators. **Climate Dynamics**, v. 62, p. 739–757, jan. 2024.

Delsontro T.; Beaulieu J. J.; Downing J. A. Greenhouse gas emissions from lakes and impoundments: Upscaling in the face of global change. **Limnology and Oceanography Letters**, v. 3, p. 64-75, 2019.

Feng, L. *et al.* Tropical methane emissions explain large fraction of recent changes in global atmospheric methane growth rate. **Nature Communications**, v. 13, 16 mar. 2022.

Fletcher, S. E. M.; Schaefer, H. Rising methane: A new climate challenge. **Science**. v. 364. p. 932-933, 7 jun. 2019.

Gloor, M. *et al.* Large Methane Emissions From the Pantanal During Rising Water-Levels Revealed by Regularly Measured Lower Troposphere CH₄ Profiles. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 35, p. 1-14, 21 st. 2021.

Guerreiro, R. L. *et al.* The soda lakes of Nhecolândia: A conservation opportunity for the Pantanal wetlands. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 17, p. 9-18, 01 jan. 2019.

Hamilton, S. K; Sippel, S. J.; Melack, J. M. Oxygen depletion and carbon dioxide and methane production in waters of the Pantanal wetland of Brazil. **Biogeochemistry**, v. 30, p. 115-141, 1 ago. 1995.

Heslop, J. K., *et al.* A synthesis of methane dynamics in thermokarst lake environments. **Earth-Science Reviews**, v. 210, 01 nov. 2020.

INMET. **Tabela de dados da Estação AQUIDAUANA A719**. Disponível em: <https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A719>. Acesso: em 01/01/2023.

IPCC. **Climate Change 2021**. Synthesis Report, Cambridge University Press, London.

Johnson, M. S. *et al.* Methane Emission From Global Lakes: New Spatiotemporal Data and Observation-Driven Modeling of Methane Dynamics Indicates Lower Emissions. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 127, p. 1-22, 27 jul. 2022.

Junk, W. J *et al.* The flood-pulse concept in river-floodplain systems. In: Dodge, D.P., Ed., **Proceedings of the International Large River Symposium (LARS)**, Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences Special Publication 106, NRC research press, Ottawa, 1989, p. 110-127.

Laanbroek, H. J. Methane emission from natural wetlands: interplay between emergent macrophytes and soil microbial processes. A mini-review. **Annals of Botany**, v. 105, n. 1, p. 141–153, 01. jan. 2010.

Lan, X.; Thoning, K. W.; Dlugokencky, E. J. **Trends in globally-averaged CH₄, N₂O, and SF₆ determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements**. Disponível em: https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4/. Acessado em 01 jan. 2024.

Lo, E. *et al.* Sediment Infill of Tropical Floodplain Lakes: Rates, Controls, and Implications for Ecosystem Services. **Front. Earth Sci.**, v. 10, p. 1-14, 19 mai. 2022.

Mar, K. A, *et al.* Beyond CO₂ equivalence: The impacts of methane on climate, ecosystems, and health. **Environmental Science & Policy**, v. 134, p. 127-136, 29 abr. 2022.

Marani, L.; Alvalá, P. C. Methane emissions from lakes and floodplains in Pantanal, Brazil. **Atmos. Environ.** v.41, p. 1627-1633, 8 mar. 2007.

Marengo, J. A. *et al.* The heat wave of October 2020 in central South America. **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 4, p. 2281-2298, 23 ago. 2021a.

Marengo, J. A. *et al.* Extreme Drought in the Brazilian Pantanal in 2019-2020: Characterization, Causes, and Impact. **Front. Water**, v. 3, p. 1-20, 23 fev. 2021b.

Mataveli *et al.* 2020 Pantanal's widespread fire: short- and long-term implications for biodiversity and conservation. **Biodiversity and Conservation.**, v. 30, n. 11, p. 3299–3303, 2 jun. 2021.

Matthews E., *et al.* Methane emission from high latitude lakes: methane-centric lake classification and satellite-driven annual cycle of emissions. **Scientific Reports**, v. 10, p 1-10, 27 jul. 2020.

Mega, E. R. Apocalyptic' fires are ravaging the world's largest tropical wetland. **Nature**, v. 586, p. 20-21, 01. set. 2020.

Melack, J. M. *et al.* Regionalization of methane emissions in the Amazon Basin with microwave remote sensing. **Global Change Biology**, v. 10, p. 530-544, 21 abr. 2004.

Myhre, G. D. *et al.* Anthropogenic and natural radiative forcing. In **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, p. 659-740, 2013.

Naiyer, S.; Abbas, S. S. Effect of Greenhouse Gases on Human Health. **Greenhouse Gases: Sources, Sinks and Mitigation**, p. 85–106, 2022.

Naumann, G. *et al.* **Extreme and long-term drought in the La Plata Basin: event evolution and impact assessment until September 2022.** Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023, 60 p.

Nisbet, E. G. *et al.* Atmospheric Methane: Comparison Between Methane's Record in 2006-2022 and During Glacial Terminations. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 37. p. 1-33, 14 jul. 2023.

Nisbet, E. G. *et al.* Methane on the Rise—Again. **Science**. v. 343, p. 493-495, 31 jan. 2014.

Nisbet, E. G. Climate feedback on methane from wetlands. **Nature Climate Change**, v. 13, p. 421–422, 20 mar. 2023.

Parizotto, T. M. **Estudo morfológico e hidroquímico de pequenas depressões na Nhecolândia, Pantanal, MS.** Universidade de São Paulo, 2012, 111 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Ciências). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

Pellegrinetti, T. A. *et al.*, 2023 Bacterial Communities Along Environmental Gradients in Tropical Soda Lakes. **Microb Ecol.**, v. 85, p. 892-903. 2 ago. 2023.

Pellegrinetti, T. A. **Microbial communities and functional genes involved in nutrient cycling of Pantanal of Nhecolândia - MS.** 2022. 128 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2022.

Koffi, E. *et al.*, An observation-constrained assessment of the climate sensitivity and future trajectories of wetland methane emissions. **Science Advances**, v. 6, n. 15, 10 abr. 2020.

Pi, X. *et al.* Mapping global lake dynamics reveals the emerging roles of small lakes. **Nature Communications**, v. 13, p. 1-12, 1 out. 2022.

Ofiti, N. O. E. *et al.*, Warming promotes loss of subsoil carbon through accelerated degradation of plant-derived organic matter. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 156, p. 1-10, 20 fev. 2021.

Qiang, M.A *et al.* Dissolved organic carbon in permafrost regions: A review. **Science China Earth Sciences**, v. 62, p. 349–364, 11 jan. 2019.

Rasbold, G. G. *et al.* Enhanced middle Holocene organic carbon burial in tropical floodplain lakes of the Pantanal (South America). **Journal of Paleolimnology**, v. 65, p. 181-199, 01 fev. 2021.

Rosentreter, J. A. *et al.* Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources. **Nature Geosciences**. v. 14, p. 225-230, 5 apr. 2021.

Woolway, R. I. *et al.* Severe Lake Heatwaves Attributable to Human-Induced Global Warming. **Geophysical Research Letters**, v. 49, n. 4, p. 1-10, 24 fev. 2022.

Saunio, M. *et at.* The Global Methane Budget 2000–2017. **Earth System Science Data**, v. 12, n. 3, p. 1561-1623, 15 jul. 2020.

Schaefer, H. On the Causes and Consequences of Recent Trends in Atmospheric Methane. **Current Climate Change Reports**. v. 5, p. 259–274, 22 ago. 2019.

Soriano, B. M. A.; Galdino, S. **Análise das condições climáticas em 2000 na sub-região da Nhecolândia, Pantanal, Mato Grosso do Sul, Brasil**. Corumbá: Embrapa Pantanal, 2002, 34 p.

Tollefson, J. Climate change is hitting the planet faster than scientists originally thought. **Nature**, 28 fev. 2022.

Tranvik, L. J. *et al.* Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. **Limnol. Oceanogr.**, v. 54, p. 2298-2314, 16 nov. 2009.

Tardy, V. *et al.* Lake Sediments From Littoral and Profundal Zones are Heterogeneous but Equivalent Sources of Methane Produced by Distinct Methanogenic Communities—A Case Study From Lake Remoray. **JGR Biogeosciences**, v. 127, 03 nov. 2022.

Yakimovich, K. M. *et al.* Lake characteristics influence how methanogens in littoral sediments respond to terrestrial litter inputs. **The ISME Journal**, v. 14, p. 2153–2163, 18 mai. 2020.

Zang, Z. Recent intensification of wetland methane feedback. **Nature Climate Change**, v. 13, p. 430–433, 20 mar. 2023.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nas conclusões apresentadas para cada *capítulo* da *tese*, é possível afirmar que as hipóteses propostas foram amplamente alcançadas. A análise dos fluxos de CH₄ nos ecossistemas lênticos do Pantanal, considerando a variabilidade espacial e temporal, bem como a influência de fatores ambientais e ecológicos locais, confirmou a hipótese principal. As observações evidenciaram como as condições físico-químicas, a composição dos teores de C nos sedimentos, na água e solos adjacentes, além de eventos climáticos atípicos, regula significativamente os fluxos de CH₄, corroborando a hipótese de que a variabilidade nos fluxos de CH₄ é fortemente influenciada por esses fatores. Dessa forma, as hipóteses e os objetivos propostos são respondidos, abaixo:

Hipótese Geral:

"A variabilidade espacial e temporal nos fluxos totais de CH₄ em lagoas de água doce e salino-alkalina no Pantanal é regulada por fatores ambientais e ecológicos locais."

Respondida nos Capítulos 2 e 3: Todos os *capítulos* contribuíram para a confirmação desta hipótese principal. O *Capítulo 2*, através da caracterização e quantificação dos fluxos de CH₄, revelou a complexa dinâmica dessas emissões, influenciada pela composição do sedimento e presença de altas concentrações de C. O *Capítulo 3* reforçou esses achados, evidenciando o impacto de eventos climáticos extremos sobre as emissões de CH₄, sugerindo sensibilidade acentuada desses ecossistemas às mudanças climáticas.

Hipóteses Secundárias:

Hipótese da Variação Espacial: Respondida no *Capítulo 2*, onde foi demonstrada a variação das emissões de CH₄ entre diferentes compartimentos ambientais das lagoas e entre elas, destacando a importância da variação espacial no estudo desses ecossistemas.

Hipótese da Variação Temporal: Respondida no *Capítulo 2*, que analisou a flutuação dos fluxos de CH₄ de um ano para outro, correlacionando estas variações com eventos climáticos atípicos e mudanças ambientais.

Hipótese Ambiental do Carbono: Respondida no *Capítulo 3*, através da investigação sobre como os teores de C na água, nos sedimentos e solos adjacentes influenciam as emissões e o consumo de CH₄, destacando a correlação entre maiores concentrações de C e maiores emissões de CH₄.

Hipótese de Sensibilidade Climática: Respondida no *Capítulo 3*, que avaliou o impacto de eventos climáticos atípicos sobre as emissões de CH₄, confirmando a alta sensibilidade dos ecossistemas lênticos do Pantanal às mudanças climáticas.

Objetivos Propostos:

Objetivo Principal: Respondido de forma integrada pelos *Capítulos 1, 2, e 3*, com cada *capítulo* contribuindo para identificar os padrões espaciais e temporais e os fatores ambientais reguladores dos fluxos de CH₄, culminando na compreensão detalhada de como os fatores ambientais e eventos climáticos extremos influenciam esses fluxos.

Objetivos Específicos: Foram abordados detalhadamente nos dois *capítulos*, com o *Capítulo 2* focando na caracterização e quantificação dos fluxos de CH₄ e na análise da variabilidade espacial e temporal, confirmados através do índice IMGEE, enquanto o *Capítulo 3* aprofundou-se no impacto das mudanças climáticas sobre essas emissões.

Em resumo, a estrutura da *tese* e os achados de cada *capítulo* forneceram evidências robustas que confirmam as hipóteses propostas, oferecendo compreensão abrangente e detalhada sobre a dinâmica de emissões de CH₄ em ecossistemas lênticos do Pantanal e sua sensibilidade a fatores ambientais, ecológicos e climáticos.

6 CONCLUSÃO GERAL

A *tese* demonstrou que os fluxos de CH₄ nos ecossistemas lênticos do Pantanal são influenciados por complexa interação de fatores ambientais, ecológicos e climáticos. Evidenciou-se que a variabilidade espacial e temporal dessas emissões é determinada pela composição de matéria orgânica e condições físico-químicas, com eventos climáticos extremos, como secas e elevações de temperatura em 2020, exacerbando notavelmente as emissões. Os achados confirmam a hipótese principal de que fatores locais regulam os fluxos de CH₄, enquanto as hipóteses secundárias sobre variações espaciais, temporais, ambientais de C e sensibilidade climática foram igualmente validadas. Este estudo sublinha a necessidade urgente de biomonitoramento contínuo e investigação aprofundada para mitigar os impactos das mudanças climáticas sobre esses ecossistemas vitais. Os resultados reforçam o papel crítico dos ecossistemas lênticos no ciclo global do C e destacam a importância de incorporá-los nas estratégias de gestão ambiental e mitigação das mudanças climáticas.

7 ESTUDOS FUTUROS

Com base nos resultados e conclusões desta *tese*, é possível sugerir várias direções para estudos futuros que podem expandir nosso entendimento sobre as emissões de CH₄ em ecossistemas lênticos, particularmente em contextos tropicais como o Pantanal. Estas recomendações são direcionadas a preencher lacunas no conhecimento existente e a abordar novas questões emergentes:

Análise de Longo Prazo de Fluxos de CH₄: Estudos de longa duração para monitorar as emissões de CH₄ e os fatores ambientais associados em ecossistemas lênticos, proporcionando dados mais abrangentes sobre variações sazonais e anuais e sua correlação com eventos climáticos extremos e aplicação os índices: IVE, IVT e IMGEE com maior confiança.

Modelagem de Impactos Climáticos: Desenvolvimento de modelos preditivos para avaliar o impacto futuro das mudanças climáticas nas emissões de CH₄ de ecossistemas lênticos, considerando cenários de mudança global e regional.

Estudos de Metanogênese e Metanotrofia: Pesquisas focadas nos processos biológicos, ecológicos e químicos que controlam a produção e o consumo de CH₄, incluindo o papel das comunidades microbianas e a influência de diferentes tipos de matéria orgânica.

Gestão de Áreas Protegidas: Investigar como práticas de uso e gestão da terra influenciam as emissões de CH₄ em ecossistemas lênticos, incluindo a conversão de terras, a agricultura e a restauração de habitats naturais.

Estudos Comparativos em Diferentes Regiões Tropicais: Realizar estudos metodológicos comparativos de emissões de CH₄ em ecossistemas lênticos em diferentes regiões tropicais para entender as variações regionais e globais e identificar padrões comuns ou diferenças significativas.

Avaliação de Estratégias de Mitigação: Explorar estratégias eficazes de mitigação para reduzir as emissões de CH₄ de ecossistemas lênticos, incluindo gestão de água, restauração ecológica e outras práticas de manejo sustentável.

Sensibilidade dos Ecossistemas Lênticos a Outros GEE: Expandir a pesquisa para incluir a dinâmica de outros gases de efeito estufa, como CO₂ e N₂O, para compreensão mais holística do papel dos ecossistemas lênticos tropicais no ciclo global de gases de efeito estufa.

Papel dos Eventos Extremos: Aprofundar a compreensão do impacto de eventos climáticos extremos, como secas e inundações, nas emissões de CH₄, analisando a resiliência e a recuperação dos ecossistemas lênticos após tais eventos.

Estas áreas de estudo não apenas aprofundarão nossa compreensão sobre as complexas dinâmicas de emissões de CH₄ em ecossistemas lênticos, mas também contribuirão para o desenvolvimento de políticas e práticas de gestão mais eficazes para mitigar os impactos das mudanças climáticas.