

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

YAGO SCHMITT KOVARA

EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM RESERVATÓRIOS E SUAS  
RELAÇÕES COM ECORREGIÕES

CURITIBA

2018

YAGO SCHMITT KOVARA

EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM RESERVATÓRIOS E SUAS  
RELAÇÕES COM ECORREGIÕES

Trabalho apresentado como requisito parcial para  
a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia  
Ambiental , Setor de Tecnologia da Universidade  
Federal do Paraná.  
Orientador: Dr. Michael Mannich

CURITIBA

2018



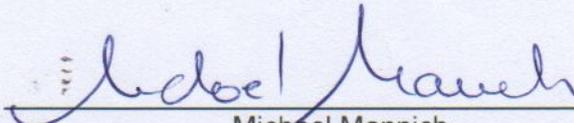
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE TECNOLOGIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

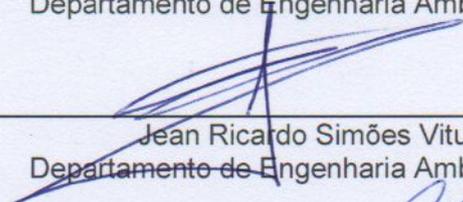
## TERMO DE APROVAÇÃO DE PROJETO FINAL

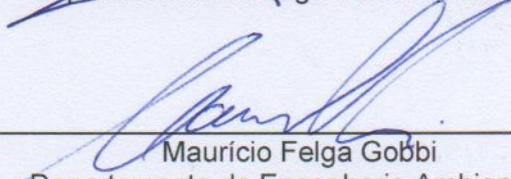
YAGO SCHMITT KOVARA

### EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM RESERVATÓRIOS E SUAS RELAÇÕES COM ECORREGIÕES

Projeto Final de Curso, aprovado como requisito parcial para a obtenção do Diploma de Bacharel em Engenharia Ambiental no Curso de Graduação em Engenharia Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, com nota 80, pela seguinte banca examinadora:

Orientador(a):   
Michael Mannich  
Departamento de Engenharia Ambiental / UFPR

Membro(a) 1:   
Jean Ricardo Simões Vitule  
Departamento de Engenharia Ambiental / UFPR

Membro(a) 2:   
Maurício Felga Gobbi  
Departamento de Engenharia Ambiental / UFPR

Curitiba, 28 de junho de 2018

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Balanço Radioativo Solar na Atmosfera . . . . .	14
Figura 2 – Processos de Geração de GEE em um reservatório . . . . .	21
Figura 3 – Distribuição espacial do reservatórios (pontos em vermelhos) junto com a delimitação das ecorregiões 846 estabelecidas por (DINERSTEIN et al., 2017) . . . . .	23
Figura 4 – Taxas de emissão de $CO_2$ equivalente em relação a latitude que o reservatório se encontra . . . . .	24
Figura 5 – Taxas de emissões de (A) $CO_2$ em relação a latitude do reservatório e (B) taxas de $CH_4$ totais em relação a latitude do reservatório . . . . .	25
Figura 6 – Taxas de emissão de $CH_4$ (A) difusivo e (B) ebulitivo em relação com latitude do reservatório . . . . .	25
Figura 7 – Taxas de emissão de $CO_2$ equivalente em relação a Idade do reservatório se encontra . . . . .	26
Figura 8 – Taxas de emissões de (A) $CO_2$ e (B) taxas de $CH_4$ totais em relação a idade do reservatório . . . . .	27
Figura 9 – Taxas de emissão de $CH_4$ (A) difusivo e (B) ebulitivo em relação com idade do reservatório . . . . .	27
Figura 10 – Taxas de emissão de $CO_2$ equivalente em relação ao tamanho da bacia hidrográfica que o reservatório se encontra . . . . .	28
Figura 11 – Taxas de emissões de (A) $CO_2$ e (B) taxas de $CH_4$ totais em relação ao tamanho da bacia hidrográfica do reservatório se encontra . . . . .	29
Figura 12 – Taxas de emissão de $CH_4$ (A) difusivo e (B) ebulitivo em relação ao tamanho da bacia hidrográfica que o reservatório se encontra . . . . .	29
Figura 13 – Taxas de emissão de $CO_2$ equivalente em relação ao tamanho da área superficial do reservatório . . . . .	30
Figura 14 – Taxas de emissões de (A) $CO_2$ e (B) taxas de $CH_4$ totais em relação ao tamanho da área superficial do reservatório . . . . .	31
Figura 15 – Taxas de emissão de $CH_4$ (A) difusivo e (B) ebulitivo em relação ao tamanho da área superficial do reservatório . . . . .	32
Figura 16 – Taxas de emissão de $CO_2$ equivalente em relação a quantidade média anual de precipitação estimada no reservatório . . . . .	33
Figura 17 – Taxas de emissões de (A) $CO_2$ e (B) taxas de $CH_4$ totais em relação a quantidade média anual de precipitação estimada no reservatório . . . . .	33
Figura 18 – Taxas de emissão de $CH_4$ (A) difusivo e (B) ebulitivo em relação com a quantidade média anual de precipitação estimada no reservatório . . . . .	34

Figura 19 – Taxas de emissão de $CO_2$ equivalente em relação a temperatura média anual do ar estimada no reservatório . . . . .	35
Figura 20 – Taxas de emissões de (A) $CO_2$ e (B) taxas totais de $CH_4$ em relação a temperatura média anual do ar estimada no reservatório . . . . .	35
Figura 21 – Taxas de emissão de $CH_4$ (A) difusivo e (B) ebulitivo em relação com temperatura média anual do ar estimada no reservatório . . . . .	36
Figura 22 – Taxas de emissão $CO_2$ equivalente em relação a carga anual de FID que o reservatório recebe . . . . .	37
Figura 23 – Taxas de emissões de (A) $CO_2$ e (B) taxas totais de $CH_4$ em relação a carga anual de FID que o reservatório recebe . . . . .	37
Figura 24 – Taxas de emissão de $CH_4$ (A) difusivo e (B) ebulitivo em relação com a carga anual de FID que o reservatório recebe . . . . .	38
Figura 25 – Taxas de emissão $CO_2$ equivalente em relação ao estado trófico que o reservatório se encontra . . . . .	38
Figura 26 – Taxas de emissão $CO_2$ equivalente em relação a ecozona que o reservatório se encontra . . . . .	39
Figura 27 – Taxas de emissão $CO_2$ equivalente em relação ao bioma que o reservatório se encontra . . . . .	40
Figura 28 – Taxas de emissão $CO_2$ equivalente em relação a ecorregião que o reservatório se encontra . . . . .	41

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Emissões médias, máximas e mínimas nas 15 ecorregiões com mais de 5 reservatórios contidos . . . . .	42
---	----

## LISTA DE SÍMBOLOS

$CO_2$	Dióxido de carbono
$CH_4$	Metano
$NO_3^-$	Óxido nitroso
$W/m^2$	Watts por metro quadrado
$O_2$	Oxigênio
$NO_3^-$	Nitrato
$Fe^{3+}$	Ferro (III)
$Mn^{4+}$	Manganês
$SO_4^{2-}$	Sulfato
$C$	Carbono
$h^{-1}$	Hectare
$mg$	Miligramas
$^{\circ}C$	Graus Celcius

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
1.1	Objetivos	11
1.1.1	Objetivo Geral	11
1.1.2	Objetivos Específicos	12
<b>2</b>	<b>REVISÃO</b>	<b>13</b>
2.1	Efeito Estufa e sua dinâmica	13
2.1.1	Reservatório e sua parcela no efeito estufa	15
2.2	ECOREGIÕES	15
2.3	GEE nos Reservatórios	16
2.3.1	Medição de GEE nos Reservatórios	18
2.3.2	Processos de transporte e geração	19
<b>3</b>	<b>MÉTODOS</b>	<b>22</b>
3.1	OBTENÇÃO DA BASE DE DADOS	22
3.2	ESTRATÉGIA DE ANÁLISE	22
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>24</b>
4.1	LATITUDE COMO INDICADOR	24
4.2	IDADE COMO INDICADOR	25
4.3	BACIA HIDROGRÁFICA COMO INDICADOR	27
4.4	ÁREA DE SUPERFÍCIE COMO INDICADOR	29
4.5	PRECIPITAÇÃO MÉDIA ESTIMADA ANUAL COMO INDICADOR	32
4.6	TEMPERATURA MÉDIA ANUAL DO AR ESTIMADA COMO INDICADOR	34
4.7	FÓSFORO INORGÂNICO DISSOLVIDO COMO INDICADOR	36
4.8	ECOREGIÕES COMO INDICADOR	39
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>43</b>
	<b>Referências</b>	<b>45</b>

## RESUMO

O presente trabalho apresenta um estudo sobre a relação das ecorregiões e características do reservatório com as emissões de gases de efeito estufa (GEE) do mesmo. Este estudo teve o principal objetivo de analisar a relação entre características dos reservatórios, principalmente ecorregiões, suas emissões e avaliar a possibilidade de usa-las como parâmetros e indicadores de locais de baixa ou alta emissão de GEE. A lista de 267 reservatórios e suas emissões coletados na literatura, foi utilizada para relacionar com características e ecorregião. Foi analisado então emissões equivalentes GWP (Global warming potencial), emissões de  $CO_2$  e  $CH_4$  ebulitivo e difusivo com variáveis que influem no processo de geração de GEE no reservatório. A divergência de técnicas e métodos de amostragem nos dados, a falta de dados para algumas características e tipo de emissão traz pouca confiabilidade para algumas análises. Para ecorregião foram encontrados reservatórios em 84 ecorregiões de 867, sendo que 15 delas possuem mais de 5 reservatórios contidos em sua área. A grande variação de emissões em reservatórios presentes na mesma ecorregião somado a poucas amostras para cada se demonstrou como um não acurado para classificar reservatórios como baixos ou altos emissores de gases de efeito estufa.

**Palavras-chave:** Reservatórios, Gases de Efeito Estufa, Ecorregiões.

## ABSTRACT

The present work is a study related to ecoregions and characteristics of the reservoir and its relation with green house gas (GHG) emissions. This study had the main objective of analyzing the relationship between reservoir characteristics, mainly ecoregions, their emissions and to evaluate the possibility of using them as parameters and indicators of low or high GHG emission sites. Using the list of 267 reservoirs and their emissions collected on the literature, these related to the characteristics of the reservoir itself, then equivalent emissions are analyzed GWP (Global warming potential),  $CO_2$  and  $CH_4$  emissions boiling and diffusing with variables that influence the GHG generation process in the reservoir. The divergence and lack of data for some characteristics and type of emission brings little reliability for some analyzes Characteristics as Latitude, the mean annual temperature estimated and the hydrographic basin were shown to have characteristics that influence the emissions with increasing or descending patterns in the emissions according to the variation of the characteristic. the reservoirs in 84 ecoregions, with 15 of them having more than 5 reservoirs contained in their area, the great variation of emissions in reservoirs present in the same ecoregion added to few samples for each ecoregion was not demonstrated as one good geographic indicator to classify reservoirs as low or high emitters of greenhouse gases.

**Key-words:** Reservoirs, Greenhouse gas, Ecoregions.

## 1 INTRODUÇÃO

### 1 INTRODUÇÃO

Atualmente são muito discutidos os efeitos da emissão de gases do efeito estufa gerados por ações antropogênicas no ambiente. Determinados gases presentes na atmosfera são fundamentais para a manutenção da temperatura na terra, são eles: vapor d'água  $H_2O$ , dióxido de carbono  $CO_2$ , metano  $CH_4$ , óxido nitroso  $N_2O$ , ozônio e compostos cloro, hidrocarbonetos e flúor carbonetos (KIEHL; TRENBERTH, 1997). Esses gases possuem a capacidade de absorver radiações solares e provenientes da superfície terrestre, garantindo a conservação da energia térmica na atmosfera e conseqüentemente a temperatura (BRAGA, 2005). Com o aumento dos gases listados anteriormente, espera-se que a média global das temperaturas devido maior quantidade de calor retida

Acredita-se que o aquecimento global está ocorrendo desde 1860 e que a temperatura do ar elevou-se  $0,66\text{ }^\circ C$  (BAIRD; CANN, 2011). Muitas atividades humanas são fontes de emissão dos Gases do Efeito Estufa (GEE), dentre elas a utilização de máquinas e motores à combustão, termoelétricas, desmatamento com queimadas, processos industriais, construção de reservatórios, entre outros. Os reservatórios como fonte de emissão de gases do efeito estufa são pouco estudados ainda hoje devido à complexibilidade de interação dos processos químicos, físicos e biológicos (MANNICH et al., 2013b).

Existem mais de 1 milhão de barragens no mundo (LEHNER et al., 2011), o que forneceu uma variedade de serviços importantes para uma população em crescimento como, por exemplo, estações hidroelétricas, controle de inundações, navegação e abastecimento de água, e outros. A construção de um reservatório tem importância notável para uma população, e a implementação de novos reservatórios ao redor do globo é inevitável, observando que ao longo do tempo a demanda e necessidade por esse tipo de recurso aumentam. Segundo Pircher (1993) somente 17% do potencial hídrico mundial foi explorado, e o Brasil, sendo um país privilegiado com a maior rede hidrográfica do mundo devido sua extensão geográfica, tende a ser um país com grande quantidade de projetos hídricos. Hoje, o Brasil possui uma das maiores hidroelétricas do mundo, a Itaipu, e conta com mais de 400 grandes e médias barragens para produção de energia, totalizando 93% da geração de eletricidade no país (ROSA et al., 2004). Entretanto a construção de uma barragem provoca alterações significativas no curso d'água, nos ecossistemas dos ambientes aquático e terrestre que o rodeia, na dinâmica da água e do fluxo de nutrientes e contribuição nas redes fluviais.

O acúmulo de uma grande quantidade de água em uma área geram impactos como: alagamento de uma área com potencial uso de cultivo e criação de espécies, perda de fauna

e flora terrestre na região coberta, impedimento de migração das espécies aquáticas, maior acúmulo de sedimentos, aumento no tempo de residência, redução de oxigênio dissolvido em sua base, maior taxa de evaporação na superfície, temperatura e estratificação do corpo d'água (FONSECA, 2002). Assim, a preocupação com a qualidade da água e o controle da poluição em lagos e reservatórios têm gerado um interesse em determinar as variações temporais e espaciais de constituintes físicos, químicos e biológicos em um sistema aquático. Nesse contexto, é importante conhecer o regime hidrobiológico, limnológico e outros do corpo d'água, pois características como temperatura, regime de chuva, composição e concentrações químicas podem alterar a velocidade das reações químicas e biológicas e as propriedades físicas das substâncias.

Sabe-se que a quantidade de Gases do Efeito Estufa (GEE) emitidas por reservatórios podem ser influenciados pelas características locais como paisagem do entorno, geologia, clima e biota, o presente trabalho visa estudar os diversos reservatórios espalhados no globo, relacionando as quantidades de GEE's emitidas e as condições em que estão inseridos. Para a obtenção mais precisa das características comuns do ambiente em que os reservatórios se encontram, optou-se pela distribuição de ecorregiões ao redor do globo.

O mapa, elaborado por Olson et al. (2001) e revisado por Dinerstein et al. (2017), apresenta um mapa dividido em 846 ecorregiões terrestres. Segundo Olson et al. (2001), o mapa foi elaborado com a contribuição de mais de 1000 biogeógrafos, taxonomistas, biólogos e ecólogos, e portanto, a divisão em ecorregiões apresenta com maior precisão a distribuição de espécies e comunidades no globo. Esses pesquisadores apresentam este mapa com a intenção de facilitar o mapeamento de comunidades em perigo e assim atuar de forma mais agressiva para a conservação e recuperação do ecossistema. Dinerstein et al. (2017) afirma que o mapa também já foi utilizado para descrever distribuições de espécies, para modelar os impactos ecológicos da mudança climática, para desenvolver planos de conservação e outros.

Com base no mapa Ecoregions2017<sup>©Resolve</sup> (DINERSTEIN et al., 2017) e nos dados de emissão de gases do efeito estufa em reservatórios espalhados pelo globo apresentados no artigo de Deemer et al. (2016), avaliando as ecorregiões e características que possam influenciar nas taxas de emissões de GEE nos reservatórios.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é investigar as emissões de GEE em reservatórios explorando seus aspectos e tentar conectar os mesmos com a ecorregião em que estão localizados. A análise quantitativa desse aspecto foi realizada por meio de resultados publicados sobre as emissões em reservatórios, analisando as condições climáticas, físicas,

químicas e biológicas de cada um e relacionando as diferenças de dados de emissões com o bioma que o reservatório se encontra.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar interação entre indicadores que definem ecoregião e os resultados obtidos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O efeito estufa no planeta é dado pela retenção de calor absorvido por certos gases constituintes da nossa atmosfera provida pela radiação solar e não por uma barreira física que impede a convecção termodinâmica como de uma estufa normal. Este é um fenômeno natural responsável pela manutenção das temperaturas na terra e esse efeito pode ser intensificado por certas atividades antropológicas que liberam uma quantidade excessiva dos gases que absorvem a radiação solar. Responsável também por criar uma condição que permite a concepção de formas de vida, este mesmo efeito intensificado pode gerar sérias consequências como um desequilíbrio térmico propício para alterações em seu sistema o que traz um impacto nas mais diversas formas biológicas. Sem deixar de lado derretimento de gelo nos polos, o que aumentaria o nível do mar e nos traria grandes mudanças geográficas como submersão de ilhas e avanço do mar sobre continentes (IPCC, 2001).

Apesar de serem necessários aperfeiçoamentos na identificação dos compostos que estão sendo lançados, na tecnologia dos sensores de medição e nos processos e mecanismos de liberação dos mesmos compostos, o aquecimento global, consequência do efeito estufa, é dado por alguns indicadores explícitos como, por exemplo, aumento da temperatura média global e o aumento das concentrações dos GEE devido às diversas atividades antropológicas, que direta ou indiretamente liberam esses gases à atmosfera. Assim, são elaboradas hipóteses de mudanças climáticas que nos fazem repensar sobre as consequências das atividades que praticamos e como o próprio planeta responde a essas ações para estabelecer um equilíbrio (IPCC, 2007).

### 2.1 EFEITO ESTUFA E SUA DINÂMICA

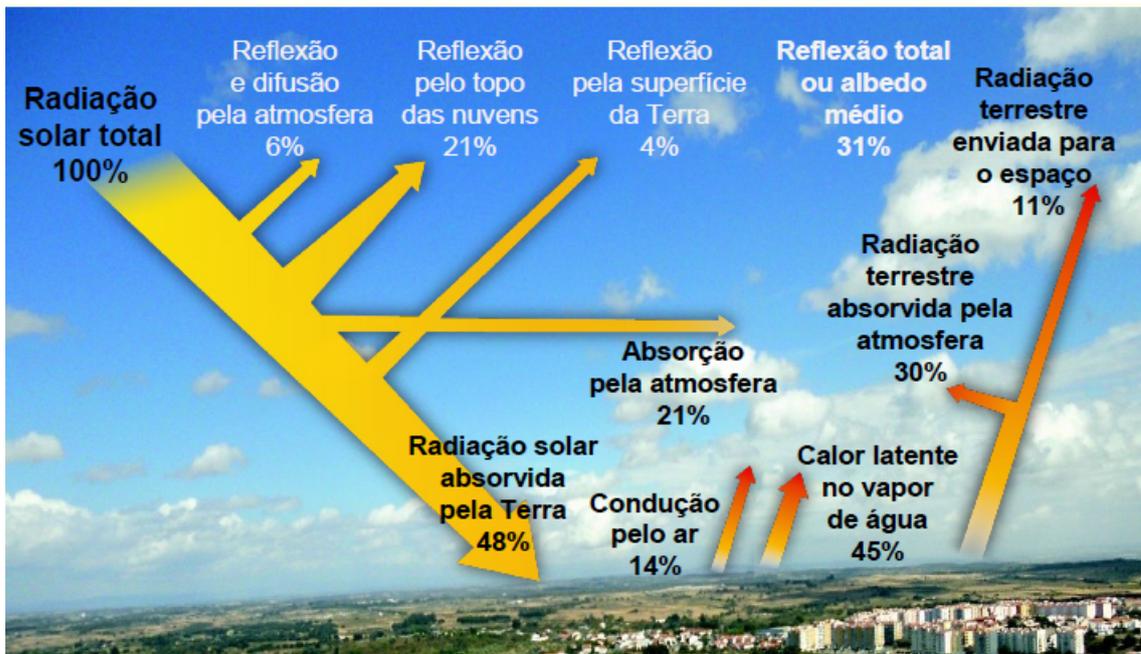
O sol como fonte de energia primária do planeta, transmite sua energia em forma de radiação em vários comprimentos de onda, incluindo luz visível e comprimentos não observáveis pelo olho humano como infravermelho e ultravioleta. Cerca de um terço dessa radiação é refletida pela própria atmosfera, enquanto a outra parte da fração penetra na atmosfera e chega na superfície (XAVIER; KERR, 2004). Dessa parcela não refletida sabemos que parte é absorvida pela atmosfera e parte é absorvida pela superfície, porém a superfície como um corpo aquecido emite em forma de radiação térmica esse calor em faixas de comprimento de ondas infravermelhas. Não é toda energia emitida pela superfície que atravessa a atmosfera, alguns gases como metano e dióxido de carbono entre outros compõem um conjunto denominado Gases do Efeito Estufa (GEE) que absorvem essa radiação infravermelho. É estimado que sem essa fonte de radiação a temperatura média da terra seria de  $-6^{\circ}\text{C}$  em vez de  $15^{\circ}\text{C}$  (STEINFELD et al., 2006) e (BRAGA, 2005). Este processo é conhecido como efeito estufa e segundo (KIEHL; TRENBERTH, 1997) os

GEE retêm anualmente uma média global de  $324 \text{ W/m}^2$  para superfície, parcela adicional resultante do efeito estufa.

Dos principais gases que compõem a atmosfera apenas alguns de pequena proporção, denominados traços, são os indutores do efeito estufa como : vapor d'água ( $H_2O$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), metano ( $CH_4$ ), óxido nitroso ( $N_2O$ ), ozônio e compostos cloro,hidro e flúor carbonetos. Desses gases o vapor d'água e o  $CO_2$  são os maiores responsáveis pelos efeitos estufa, com participação de 60% e 26% do fenômeno respectivamente (KIEHL; TRENBERTH, 1997). Segundo o IPCC (2007) o  $CO_2$  é o gás GEE mais importante e o que mais tem intensificado sua emissão por atividade antropogênicas. O segundo mais portante é o gás  $CH_4$ , tendo um potencial de efeito estufa 25 vezes maior que o  $CO_2$  como GEE, é gerado e emitido em menor quantia.

A absorção de energia em forma de radiação solar desses gases é convertida em movimento vibratório dos átomos. Cada tipo de ligação química, absorve um determinado comprimento de onda, por isso alguns gases contribuem mais que outros devido sua estrutura molecular (LENZI; FAVERO, 2009). Assim com a influência antropogênica nas emissões de gases na atmosfera, é necessário abordar também, sobre os principais gases responsáveis pelo mecanismo de efeito estufa seu potencial, tempo de residência, eficiência radiativa, concentrações e prognóstico. A figura 1 a seguir mostra o balanço energético e parcela de energias direcionadas para cada fator.

Figura 1 – Balanço Radioativo Solar na Atmosfera



Fonte: :

(Adaptado de Physical Geography, A Strahler,1996)

### 2.1.1 Reservatório e sua parcela no efeito estufa

Contribuinte representativo para o aumento de GEE na atmosfera, os reservatórios são ambientes formados a partir do barramento do rio e conseqüente inundação de grandes áreas vegetadas, acabam intensificando a degradação da matéria orgânica na água e a partir da respiração das bactérias são produzidas quantidades mesuráveis de monóxido de carbono e metano.

Em um cenário que o impacto sobre fauna e flora devido a área de alagamento se destaca como principal conseqüência dos reservatórios, outro agravante tem se destacado entre os pesquisadores, que são os gases de efeito estufa (GEE). Considerados por sua grande utilidade, principalmente para geração de energia esses ambientes começaram a ser estudados a partir do trabalho publicado por RUDD et al., 1993 abordando o tema.

A vegetação inundada, a matéria orgânica disponível do solo como também aquela transportada de toda bacia hidrográfica até o reservatório, juntamente com o alto tempo de retenção no corpo d'água e nutrientes disponíveis, formam condições propícias para degradação da conseqüente produção de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) e metano (CH<sub>4</sub>).

Entre estimativas sobre a contribuição global dos reservatórios nas emissões de gases estufa, a primeira síntese dimensionada com dados de apenas de 21 reservatórios por [Louis et al. \(2000\)](#) foi calculada uma participação de 4% de GEE convertidos em equivalente de dióxido de carbono das emissões antropogênicas, porém [Deemer et al. \(2016\)](#) com uma base de dados muito maior, e conseqüente menor incerteza em seus cálculos e estimativas, chegou a 1,5%. Esses números somados ao fato de que somente 17% do potencial hidráulico mundial foi explorado segundo [Pircher \(1993\)](#), a quantidade de reservatórios 847 grandes projetos de hidroelétricas e mais 2853 projetos de pequena centrais hidroelétricas sendo construídos ou planejados [Zarfl et al. \(2015\)](#). [coutho2018global](#) com dados mais recentes mostra há 82.921 pequena hidroelétrica funcionando, sendo que podem ser construídas mais 181.976 se todo potencial for explorado. Isso é um indicativo que se deve olhar mais atentamente para essa questão e analisar profundamente quais são os aspectos que influenciam essas emissões.

## 2.2 ECOREGIÕES

Em 1962, o termo Ecorregião é proposto por [Orie Loucks \(apud bailey2004identifying\)](#), e tem como objetivo delimitar geograficamente áreas relativamente grande de água ou terra que contenham um conjunto de características de comunidades naturais que compartilham a grande maioria de suas espécies, dinâmicas ecológicas e condições ambientais, e em que as suas interações ecológicas são críticas para a sobrevivência ([DINERSTEIN et al., 1995](#)). Assim, [Dinertein et al \(1995\)](#) acredita que a degradação de uma grande porção de uma ecorregião, alteraria os processos ecológicos e a dinâmica populacional das espécies

nas áreas restantes, sendo necessário, portanto, medidas de conservação para controle da degradação. [olson2001terrestrial](#) elaboram um mapa das ecorregiões com o intuito de auxiliar na proteção dos ecossistemas terrestres e aquáticos. [Brunckhorst \(2013\)](#) define ecorregião como um padrão de ecossistemas que são associados com determinado solo, fenômenos geográficos e tipo de relevo que caracterize a área.

O mapa de ecorregiões ([OLSON et al., 2001](#)) vai além das unidades de conservação baseadas em modelos globais e regionais provenientes de características biofísicas macroscópicas, como precipitação, temperatura, estrutura de vegetação ou assinatura espectral a partir de dados de sensoriamento remoto. O mapa foi desenvolvido com uma base de mapas biogeográficos regionais e globais de diversos autores, e em seguida foi identificado sistemas de classificação regionais para a definição dos limites de ecorregiões. Para regiões onde não existiam mapas biogeográficos, [Olson et al. \(2001\)](#) identificou primeiramente o relevo e em seguida a vegetação, para determinar a divisão biótica. [Dinerstein et al. \(2017\)](#) revisou o mapa de 2001 e em 2017 publicou o mapa *Ecoregions2017<sup>©Resolve</sup>*, com 846 ecorregiões distribuídas em 14 biomas e 6 ecozonas.

Com a delimitação de ecorregiões é possível classificá-las de acordo com a sua biodiversidade, endemismo de espécies, raridade de taxons superiores, riqueza de espécies, fenômenos ecológicos ou evolutivos incomuns e raridade global do seu tipo de habitat ([olson et al., 2001](#)). Além disso, por ser definida por tipo de solo, relevo e fenômenos geográficos, a ecorregião pode ser útil para planejamento geográfico de reservatórios pois envolve características que são parâmetros e até indicativos para emissões de GEE em reservatórios.

### 2.3 GEE NOS RESERVATÓRIOS

Existem vários ciclos biogeoquímicos amplamente estudados que desempenham papéis importantes para os organismos e condições ambientais, como por exemplo, os ciclos da água, carbono, fósforo e nitrogênio são os mais importantes.

O ciclo do carbono pode ser distinguido em dois ciclos segundo [Braga \(2005\)](#): (i) o principal, onde produtores, consumidores e decompositores participam respectivamente de processos de fotossíntese e respiração; (ii) o secundário, mais lento, de animais e plantas que com o tempo foram incorporados por processos geológicos na crosta terrestre, nesse ciclo é importante ressaltar a interação carbono atmosférico e o aquático.

Todo esse ciclo interage de forma natural nos corpos d'água com suas contribuições, seja o ciclo primário que chega das mais diversas formas de transporte, ou interação da superfície do corpo da d'água com a atmosfera. Porém para entender melhor o ciclo do carbono em lagos e reservatório, como ele é composto e seu papel em escala global nas emissões de GEE é necessário entender a dinâmica interna desses sistemas.

Rudd et al. (1993) questionou pela primeira vez se os reservatórios poderiam ser um emissores significativos de GEE, seus cálculos e estimativas de fluxos de  $CH_4$  e  $CO_2$  apontaram ser equivalentes ao de uma usina termelétrica de carvão. Ao mesmo tempo que Rudd levantava essa estimativa Bartlett e Harriss (1993) fez medições de  $CH_4$  em três locais diferentes: florestas inundadas, corpos d'água sem vegetação e em corpos d'água com cobertura vegetal, observando que o fluxo médio nos corpos d'água variou entre 7,5-967  $mg CH_4/m^2/d$  enquanto nas áreas inundadas o valor médio foi de 200  $mg CH_4/m^2/d$ . Questionado por sua metodologia para estimar os fluxos, Rosa e Schaeffer (1994) produziram sua estimativa resultando em menor valor de emissão de GEE, mas ainda notáveis de atenção. Um ano após Duchemin et al. (1995) publicam dados de emissões de  $CO_2$  e  $CH_4$  observando a influência de fatores físicos como variação de emissão entre diferente estações e regime de ventos.

Louis et al. (2000) com dados de 22 reservatórios fez uma síntese global sobre as emissões de GEE na superfície dos reservatórios e sugeriu incluí-las nos inventários de emissões antropogênicas. Na bacia da Amazônia central foi conduzido um estudo por Richey et al. (2002) para verificar emissões de GEE. Na pesquisa foi observado que a bacia da Amazônia em suas áreas inundadas constitui um processo de perda de carbono de aproximadamente 1,2  $mg C.h^{-1}.nno^{-1}$  o que sugere uma reflexão sobre reservatório serem emissores ou depósitos de carbono. Rosa et al. (2003) em sua publicação mostra a profundidade do reservatório como indicativo de variação na taxa de emissão e o decaimento da mesma com o aumento da idade do reservatório que se interpreta no esgotamento da biomassa e MO presente no solo a ser degradada antes do alagamento da área em observação.

Guérin et al. (2006) publicou o primeiro trabalho com dados incluindo as emissões a jusante de barragens. Análises de medições feitas em três reservatórios tropicais na América do Sul com diferentes idades, área de superfície e tempo de residência observaram que 26% do total das emissões de  $CH_4$  e 20% das emissões de  $CO_2$  são liberados a jusante da barragem, porém a quantidade de gás liberado nas turbinas ou logo após a barragem não foi incluída.

Fearnside (2006) notou em sua pesquisa no reservatório de Balbina situado no Amazonas que 40% do  $CH_4$  contido na água que passa pelas turbinas poderia ser liberado em sua passagem. Porém no estudo de Guérin et al. (2006) a quantidade liberada foi de aproximadamente 60% do total de  $CH_4$ . Ainda no reservatório da Balbina foi calculado por (KEMENES; FORSBERG; MELACK, 2011) nas turbinas num total de 51% de  $CO_2$ , demonstrando que medições somente na superfície do reservatório para mensurar emissões de GEE dos reservatórios é inadequada.

Barros et al. (2011) publica um trabalho sugerindo que emissões estão ligadas a latitude e idade dos reservatórios, aspecto já observado por Rosa et al. (2003). Demarty e

Bastien (2011) mostram que nos primeiros 10 anos, é comum ter altas taxas de emissão de GEE nos reservatórios, contudo após esse período alguns reservatórios podem continuar com emissões elevadas até 20 anos após o alagamento (KEMENES; FORSBERG; MELACK, 2011).

Apesar do grande número de pesquisas já feitas na área o benefício da energia energia hidrelétrica é ainda mal compreendido devido ao papel das emissões biogênicas de GEE, alterações do albedo e mudanças nas taxa de evaporação afetando o fluxo térmico latente para atmosfera (HERTWICH, 2013).

Após a primeira síntese global sobre a contribuição dos reservatórios nas emissões dos GEE em reservatórios feita por St. Louis Deemer et al. (2016) nos traz mais uma porém discutindo um conjunto mais abrangente das estimativas de fluxo de GEE para ter uma nova perspectiva sobre estes fluxos destacando a dominante emissão de metano em relação a emissão total de carbono nos reservatórios e a importância de incluir o fluxo ebulitivo de metano nas estimativas, identificando uma relação entre eutrofização do reservatório com emissões de GEE.

Contudo ainda há uma parte nebulosa sobre reservatórios e suas emissões, especificamente sobre a questão de seus indicadores e fatores que os levam a ter uma alta ou baixa taxa de emissão. Estudos como o balanço de GEE da área antes do alagamento, as taxas de fixação e armazenamento do reservatório e o destino a longo prazo do carbono enterrado. A maior parte das medições nos reservatórios têm menos de cinco pontos de medição, sejam elas espaciais ou temporais.

### 2.3.1 Medição de GEE nos Reservatórios

Para medir e acompanhar adequadamente emissões GEEs em reservatórios é necessário conhecer as características do corpo d'água e sua área antes e após a construção da barragem. Parâmetros relevantes para medição antes do alagamento na parte terrestre são qualidade da água, parâmetros físicos, cargas de carbono da bacia hidrográfica em questão de : concentração de matéria orgânica, escoamento e vegetação morta que entra no fluxo da água. Para parte aquática temos o armazenamento de carbono em sedimentos, emissões de GEE, transporte de carbono orgânico total e dissolvido, concentração de MO e relações  $C/N$ ,  $C/P$ ,  $N/P$  e seus parâmetros físicos como: velocidade do rio, temperatura na superfície, estratificação, profundidade e seu tempo de residência. Medições de captura consideradas necessárias após o barramento são: armazenamento de carbono incluindo os sedimentos e coluna d'água, emissão de GEE e parâmetros dos aspectos hidrológicos e hidrográficos (IHA, 2010).

Para medições espaço temporais é necessário ter um cuidado para usar um método que traga um resultado preciso e correto. Geralmente são recomendados, no mínimo, em três locais estratégicos para as medições, primeiro na entrada principal do reservatório,

segundo na parte principal do reservatório (centro) e por terceiro nas condições de jusante do reservatório. Há de se ter um cuidado com resultados incertos devidos a um número reduzido de locais de medições no corpo d'água.

Em geral, para fluxos de GEE entre superfície d'água e atmosfera são estimadas ou mensuradas por três técnicas: por covariância turbulenta, por medição de concentração dos gases e estimados por equações empíricas e finalmente por medição de fluxo através da interface d'água (LAMBERT; FRÉCHETTE, 2005).

Para os fluxos de  $CO_2$  e  $CH_4$  entre a interface água-ar podem ser usadas câmaras flutuantes, que em suma são câmaras fechadas que prendem os gases em seu volume interno e sua estimativa de concentração é dada por amostras de sua atmosfera interna onde a variação dessas concentrações ao longo do tempo se deduz o fluxo de emissões. Outro método é por correlações de turbulência que necessitam de dados de entrada que são monitorado por uma torre como velocidade do vento (vetorial) e concentrações dos gases (escalar) (MANNICH, 2013). Podem também ser calculados por métodos semi-empíricos baseado no gradiente de pressão parcial da interface água-ar e num coeficiente de troca de gases que depende da velocidade do vento, velocidade da corrente d'água, precipitação e temperatura (IHA, 2010).

Em particular, o fluxo ebulitivo é determinado usando-se funis invertidos uma vez que, embora as câmaras flutuantes também capturem o metano ebulitivo (RAMOS et al., 2006) comparando medições entre câmaras e funis, concluiu-se que os funis são mais precisos kelle1994methane. Há ainda um outro método para se medir o fluxo ebulitivo de  $CH_4$  por meio de técnicas acústicas porém para o  $CO_2$  é ineficaz pois é muito solúvel e maior parte de seu transporte é difusivo (OSTROVSKY et al., 2008).

Cada técnica apresenta sua vantagem e desvantagem, a estimativa dos fluxos baseados é a mais simples e barata porém, apresenta grande variabilidade uma vez que nem todas variáveis são utilizadas (LAMBERT; FRÉCHETTE, 2005). A câmara flutuante, exige coleta e armazenamento em recipiente e posterior análise onde seu transporte entre local de coleta e análise laboratorial pode ser dispendioso porém, é o mais comumente usados. E por fim, técnicas de covariância possuem um custo muito alto devido a instalação de torre com sensores com custo elevado entretanto fornecem dados com intervalo de tempo pequeno e informação contínua.

### 2.3.2 Processos de transporte e geração

Tranvik et al. (2009) afirma que águas continentais, apesar de representar uma pequena parcela da superfície do globo, tem um papel bastante ativo no transporte, transformação e estoque de carbono terrestre, assim, a construção de reservatórios pode influenciar diretamente no balanço de carbono.

As principais fontes de carbono nesses sistemas é carbono inorgânico dissolvido (CID) e carbono orgânico dissolvido (COD), seguido de carbono orgânico particulado (COP) e carbono inorgânico particulado (CIP), e a influência destas variáveis no sistema de lagos e reservatórios depende da latitude em que se encontram, do clima local, do tipo de uso do solo e características geoquímicas (TRANVIK et al., 2009).

De acordo com IHA (2008) a introdução do carbono nos corpos hídricos é dada seja por poluição pontual de MO, dissolução do carbono atmosférico, escoamento superficial e morte de plantas e organismos aquáticos. Essa matéria orgânica nos reservatórios é dividida em três segmentos, primeiro temos a MO presente no solo ou como biomassa antes da implantação da barragem e alagamento da área, segundo a MO autóctone, produzida através de processos como a fotossíntese dentro do próprio reservatório e por terceiro a alóctone originária da área de drenagem da bacia que advém de processo como escoamentos subsuperficial e superficial.

Reservatórios têm características de ambientes lênticos, onde os processos bio-geoquímicos assim como a distribuição vertical das substâncias e componentes bióticos se diferem das características de ambientes lóticos. A carga de matéria orgânica pode se depositar no reservatório bem como pode ficar suspensa na coluna d'água, para os dois casos e para a matéria orgânica inundada presente no leito do reservatório serão futuramente decompostas por bactérias (MARCON, 2017).

Os processos de geração de  $CH_4$  e  $CO_2$  ocorrem em condições anaeróbicas e aeróbicas respectivamente. Sua produção depende então, do oxigênio dissolvido, nutrientes e temperatura. Esse processo é afetado por fatores internos: concentração de OD, relação  $C/N/P$  na água e biomassa presente. Outros parâmetros, mas que regulam a troca entre lâmina d'água e atmosfera são: vento, precipitação, drenagem da bacia hidrográfica, contribuições do rio e estratificação d'água (MENDONÇA et al., 2012).

Após formado o metano pode se acumular no sedimento, se dissolver na coluna d'água ou se transferir para atmosfera. Há três tipos de maneiras para o metano chegar a atmosfera: por fluxo difusivo, ebulitivo e por plantas enraizadas. O fluxo ebulitivo não é constante e seu transporte até a atmosfera é rápido tendo pequenas perdas por oxidação sendo responsável entre 40-60% das emissões de um lago enquanto o fluxo difusivo tem até 50% de contribuição (BASTVIKEN et al., 2004). O  $CH_4$  pode ser oxidado por bactérias metanotróficas quando difundindo da parte anóxica para óxica. Quatro processos representam a formação de metano em sistemas naturais: biogênese, termogênese, ignigênese e geogênese. Todos os processos de biogênese, também chamado de metanogênese, que resultam do metabolismo microbiano, podem ocorrer a temperaturas de 0 a 100° C e representam mais de 85% do metano produzido.

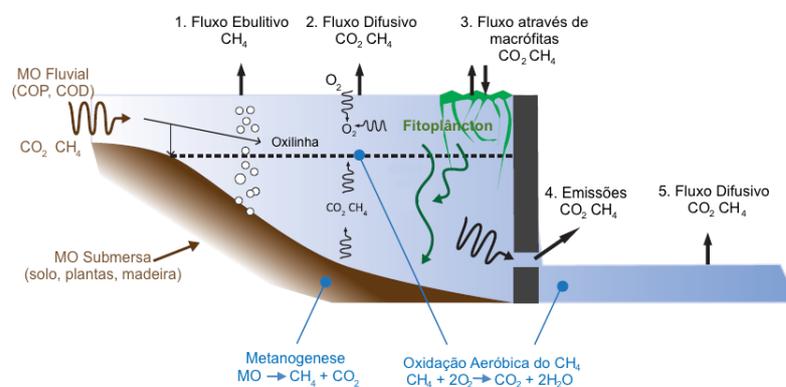
De acordo com Smith et al. (2003) a formação de metano a partir da decomposição de matéria orgânica começa após a conclusão redução de  $O_2$ ,  $NO_3^-$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Mn^{4+}$  e  $SO_4^{2-}$ .

Condições similares são encontradas no fundo de reservatórios em sedimentos, onde o  $\text{CH}_4$  onde o processos de ebulição normalmente ocorrem quando a água já se encontra supersaturada e os processos de bolha devido a pressão hidrostática da coluna d'água.

Um estudo feito em lagos sobre oxidação do metano observa que a porcentagem do metano oxidado antes de sua emissão para atmosfera varia entre 57-100% o que nos indica que a difusão não é o meio mais eficiente de transporte pela coluna da água (BASTVIKEN; EJLERTSSON; TRANVIK, 2002). Deemer et al. (2016) conduziu um estudo parecido mostrando que a contribuição de emissão ebulitiva em reservatórios podem variar de 0-99% o que indica a importância de ter medições dos dois tipos de fluxo para estimativas de emissões totais, difusivo e ebulitivo, e que é importante conhecer as características de cada corpo d'água, tamanho, profundidade, cadeia trófica e aspectos que tragam melhor compreensão em sua dinâmica.

Em corpos hídricos lóticos, a oxidação do metano geralmente ocorre, já em ambientes lênticos as condições anóxicas e a produção de metano devem prevalecer maiores que sua oxidação, assim ambientes lênticos agem como emissores de  $\text{CH}_4$  (UNESCO/IHA, 2008). Podemos observar melhor os processos de transporte e geração de gás na figura 2.

Figura 2 – Processos de Geração de GEE em um reservatório



Fonte: :  
 (IHA, 2008)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta pesquisa foram utilizados os resultados de duas publicações como fontes principais de informações. Primeiramente a publicação de [Deemer et al. \(2016\)](#) e seu material suplementar e segundo [Dinerstein et al. \(2017\)](#) com seu mapa.

#### 3.1 OBTENÇÃO DA BASE DE DADOS

Os reservatórios analisados neste estudo foram selecionados e organizados a partir de [Deemer et al. \(2016\)](#) que apresentou. Ao todo os reservatórios cobrem uma área em conjunto de  $77.287 \text{ km}^2$  o que representa somente 25% da área superficial total estimada de  $305.732 \text{ km}^2$ . Dos 267 reservatórios listados 195 possuem dados de emissão de  $\text{CO}_2$ , 138 emissões de  $\text{CH}_4$  difusivo, 49 de  $\text{CH}_4$  ebulitivo e 159 de  $\text{CH}_4$  ebulitivo e difusivo selecionados pelo método de obtenção do dado e por terem pelo menos 2 pontos de monitoramento e ou medir 2 vezes dados no mesmo ponto com variação temporal. A distribuição espacial dessas medidas hoje se encontram mais presentes na América do Norte e América do Sul.

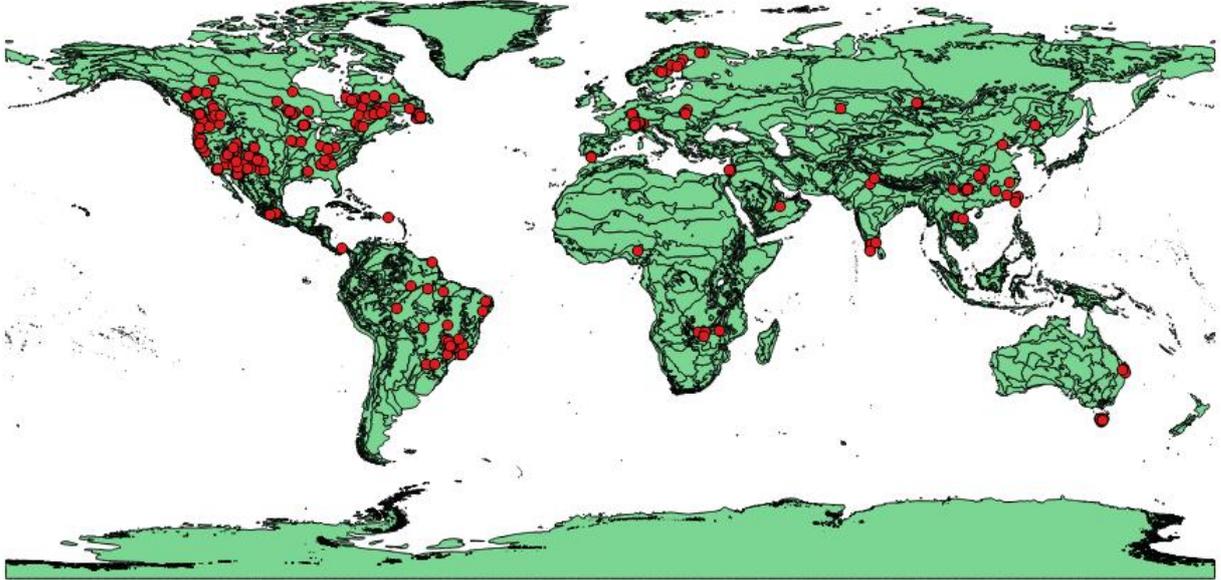
Juntamente aos dados de emissões de GEE, o material suplementar de [Deemer et al. \(2016\)](#) fornece dados geográficos da localização de cada reservatório, que foi usado para relacionar o reservatório e sua respectiva ecorregião e aspectos, que possam influenciar as emissões de GEE em um reservatório como: medição sob variação espaço temporal e a produtividade do ecossistema. Na figura ?? podemos observar a distribuição dos reservatórios, pontos em vermelho, junto com a delimitação das ecorregiões.

#### 3.2 ESTRATÉGIA DE ANÁLISE

O escopo do trabalho consiste em analisar dados de emissões em torno do globo. A intenção é comparar o máximo de dados disponíveis na literatura para obter uma percepção geral sobre a influência ou relação de uma ecorregião e características dos reservatórios nas emissões de GEE de um reservatório. Pesquisas anteriores que avaliaram a relação das emissões com latitude ([BARROS et al., 2011](#)), idade ([ABRIL et al., 2005](#)), e diferença de região (amazônica ou não) ([BARROS et al., 2011](#)) e precipitação ([MIETTINEN et al., 2015](#)) como indicadores para emissões de GEE foram base para analisar não só a relação de emissões em cada ecorregião, que engloba tais definições, mas também as características do reservatório em relação a sua emissão.

Para tanto foram selecionadas latitude, idade, tamanho da bacia hidrográfica do reservatório, tamanho da área de superfície do reservatório, precipitação média anual

Figura 3 – Distribuição espacial do reservatórios (pontos em vermelhos) junto com a delimitação das ecorregiões 846 estabelecidas por (DINERSTEIN et al., 2017)



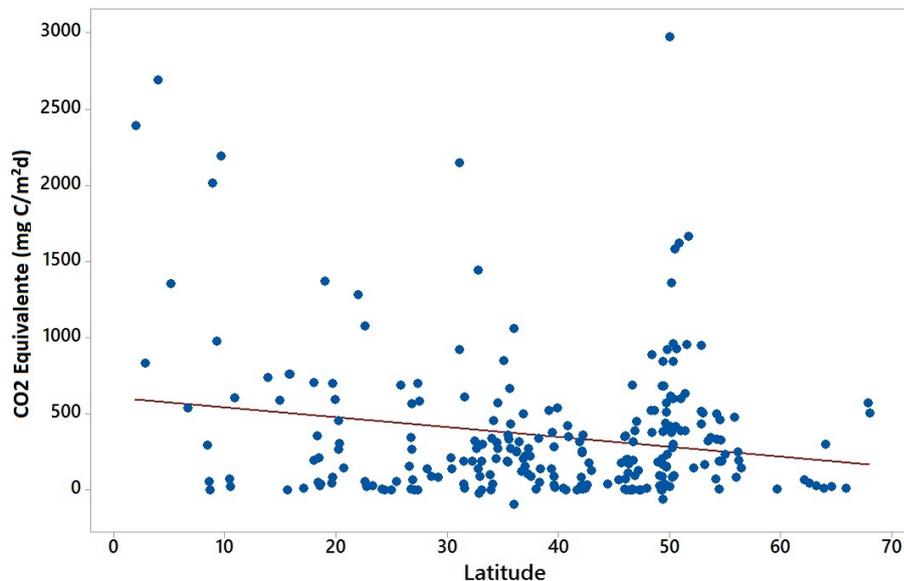
estimada, temperatura anual média estimada, carga de fósforo inorgânico dissolvido e ecorregiões como indicadores para cruzar com suas respectivas taxas de emissões.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 LATITUDE COMO INDICADOR

De acordo com a figura 4, que demonstra as emissões equivalentes de  $CO_2$ , pode-se observar que há elevados registros de emissões que estão entre os paralelos  $0^\circ$  a  $10^\circ$  e que de acordo com o aumento da latitude as emissões tendem a diminuir com excessão entre os pararelos de  $50^\circ$  e  $60^\circ$  de onde há um aumento novamente. Nota-se ainda que a maioria de nossos registros se encontram em reservatórios com latitudes de  $30^\circ$  a  $50^\circ$  graus.

Figura 4 – Taxas de emissão de  $CO_2$  equivalente em relação a latitude que o reservatório se encontra



Na figura 5 pode-se analisar que as emissões de  $CO_2$  tem uma queda continua com registros mais elevados entre os paralelos  $0^\circ$  a  $10^\circ$  enquanto o metano apresenta traços diferentes, tendo registros mais elevados de emissão entre os paralelos  $10^\circ$  a  $20^\circ$  apresentando ocorrências de taxas menores até a faixa de  $50^\circ$  a  $60^\circ$  graus onde há um novo aumento nas emissões registradas entre os paralelos  $60^\circ$  a  $70^\circ$ . Barros et al. (2011) obteve resultados parecidos com amostra de 85 reservatórios hidroelétricos onde observa a queda de emissões de GEE ao passo que a latitude aumenta e que é provável que esse padrão latitudinal de emissões se deve ao gradiente de temperatura da água e ar, índice pluviométrico, conseqüente característica de vegetação. As emissões de metano difusivas apresentara registros mais elevados na faixa de  $0^\circ$  a  $10^\circ$  equanto para o  $CH_4$  seus registros mais elevados se encontram na faixa de  $40^\circ$  a  $50^\circ$  graus como observado na figura 6.

Figura 5 – Taxas de emissões de (A)  $CO_2$  em relação a latitude do reservatório e (B) taxas de  $CH_4$  totais em relação a latitude do reservatório

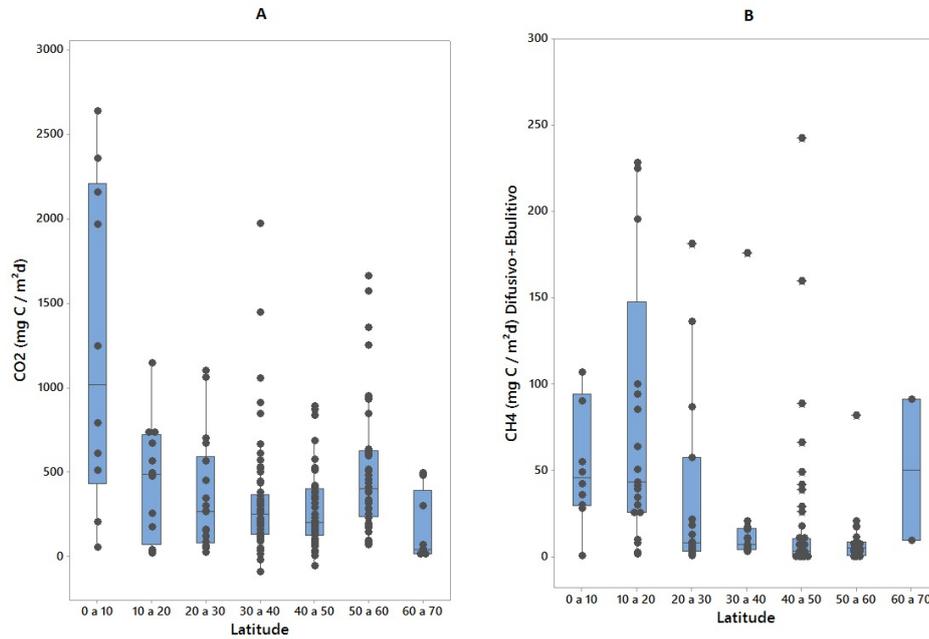
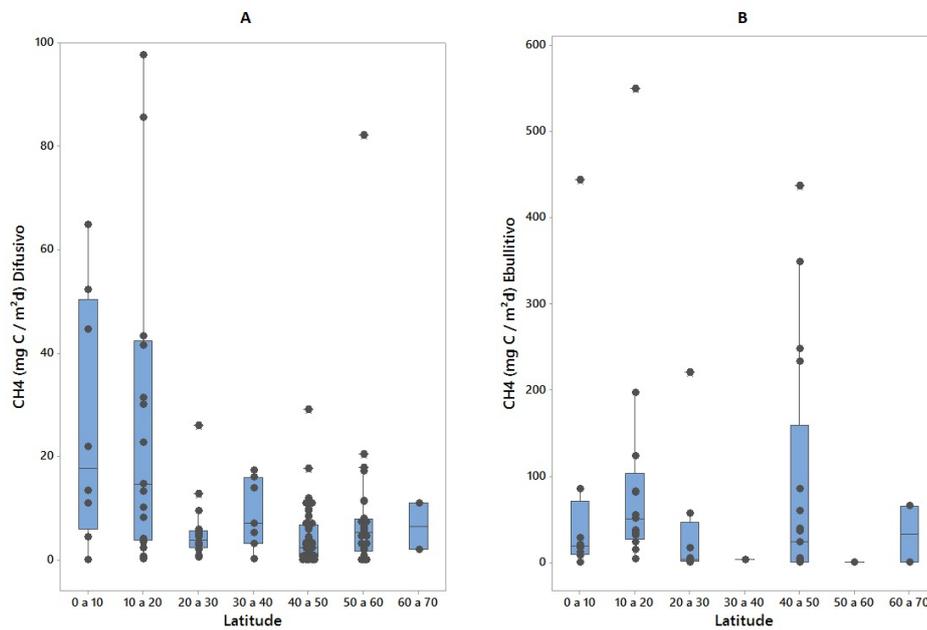


Figura 6 – Taxas de emissão de  $CH_4$  (A) difusivo e (B) ebulitivo em relação com latitude do reservatório

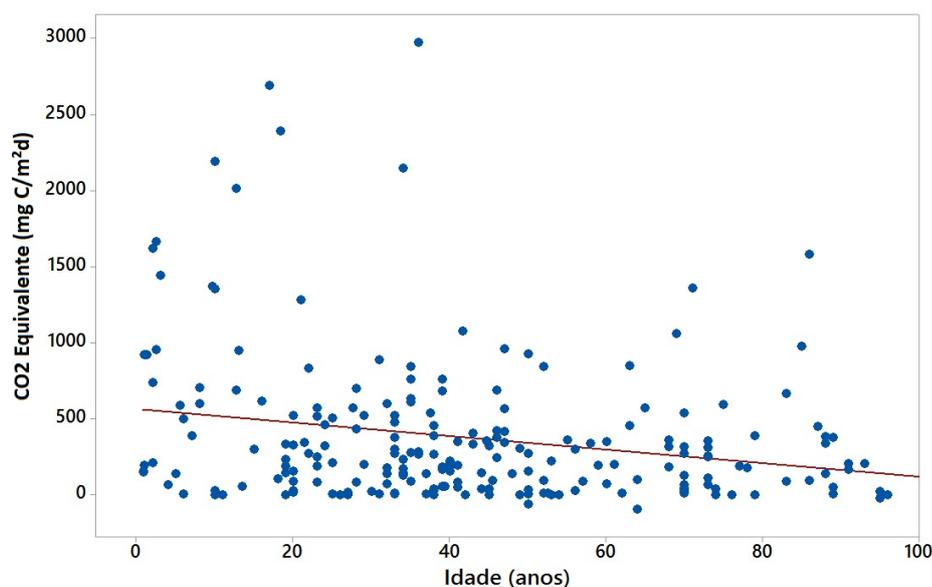


## 4.2 IDADE COMO INDICADOR

Na figura 7 encontra-se para as emissões equivalente um aumento médio das taxas para reservatórios entre 20 e 30 anos e posteriormente um declínio conforme o reservatório envelhece. No início da vida de um reservatório, emissões elevadas podem ser justificadas devido a área alagada, anteriormente coberta por vegetação, que possui mais matéria orgânica e maior taxa de degradação e posteriormente as emissões são reduzidas com o

tempo. Barros et al. (2011) encontrou um declínio de emissões mais expressivo conforme idade do reservatório em sua pesquisa, porém sua amostra de 85 dados continha somente dados de reservatórios de hidroelétricas, enquanto esta pesquisa considera 159 dados de  $CO_2$  equivalente, não só de reservatórios de hidroelétricas mas também de uso recreacional, de controle de enchentes e abastecimento de água.

Figura 7 – Taxas de emissão de  $CO_2$  equivalente em relação a Idade do reservatório se encontra



Pode-se observar um comportamento semelhante com as emissões de  $CO_2$  com as emissões totais, porém ao analisar as emissões de metano notou-se um aumento expressivo nos reservatórios com 80 anos a mais conforme demonstra a figura 8, talvez por terem acumulado muito sedimento ao longo de sua vida.

Observa-se para as emissões de metano difusivo e ebulitivo que o responsável por esse grande aumento é o metano ebulitivo como representado graficamente na figura 9. Abril et al. (2005) observou no reservatório de Petit Saut, após 10 anos as contribuições de carbono fluviais foram equilibradas pelas emissões de carbono para o oceano e foram cerca de 3 vezes inferiores ao fluxo atmosférico, o que sugere as terras inundadas como contribuinte predominante para as emissões gasosas, o que tange nosso resultado nesta parte.

DelSontro et al. (2010) verificou em um reservatório de 90 anos de uma hidroelétrica altas taxas emissões de metano ebulitivo, em média  $1.376 \text{ mgC}/\text{m}^2\text{d}$ , o que para um reservatório de latitude média é expressivo, ultrapassando as emissões de alguns reservatório localizado em climas tropicais, boreais e temperados. Os autores do mesmo artigo ainda demonstram uma correlação forte entre emissões de metano dissolvido e a temperatura d'água.

Figura 8 – Taxas de emissões de (A)  $CO_2$  e (B) taxas de  $CH_4$  totais em relação a idade do reservatório

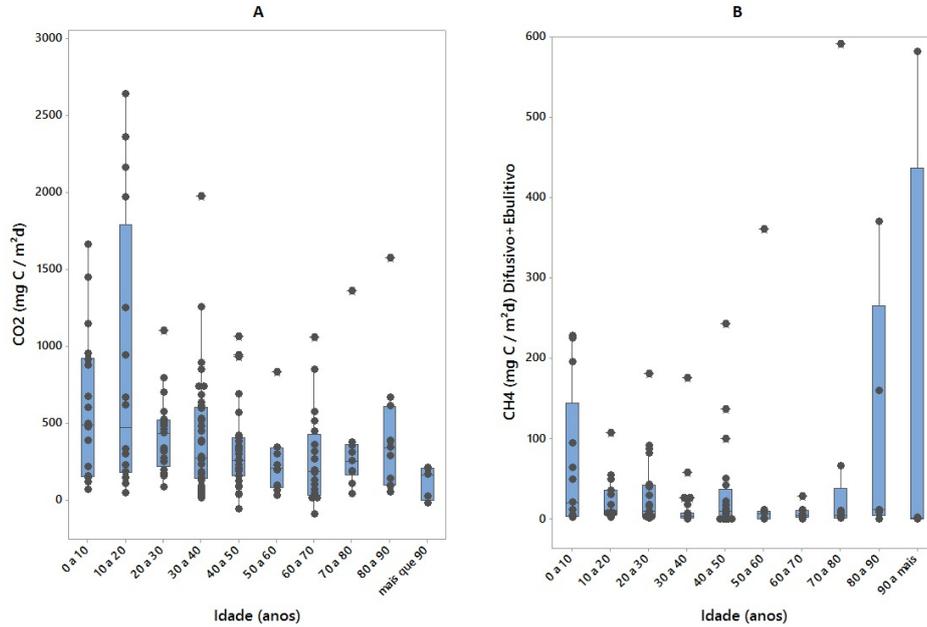
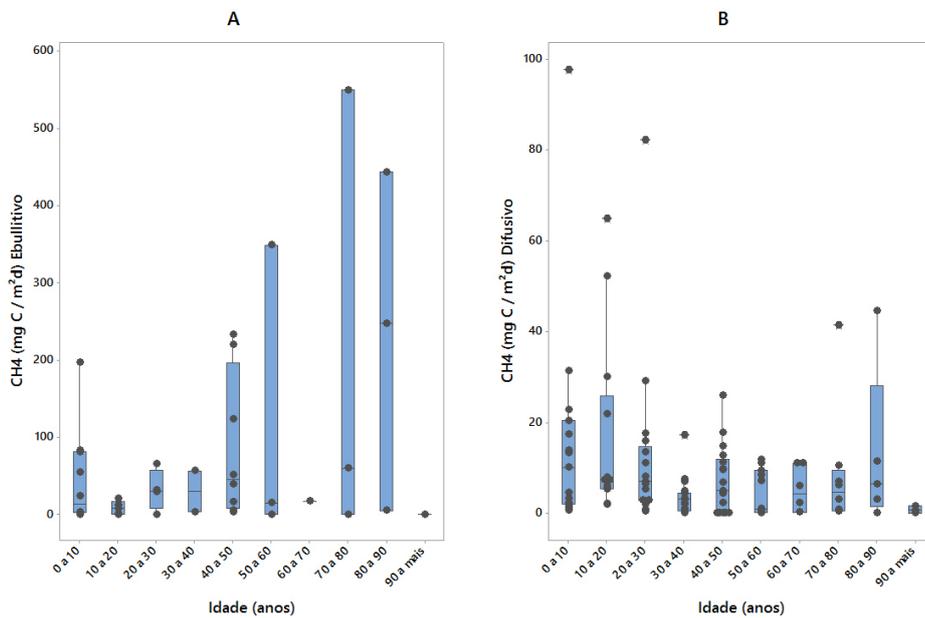


Figura 9 – Taxas de emissão de  $CH_4$  (A) difusivo e (B) ebulitivo em relação com idade do reservatório

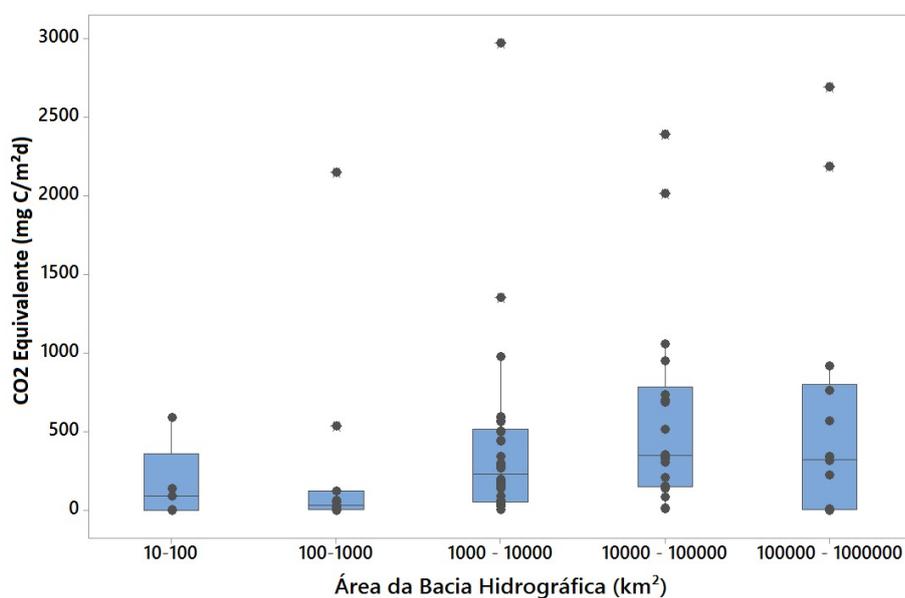


#### 4.3 BACIA HIDROGRÁFICA COMO INDICADOR

Pode-se observar na figura 10 que a taxa de emissões totais de carbono nos reservatórios aumentam conforme o tamanho da bacia hidrográfica, com exceção no intervalo de bacias área entre  $100$  e  $1000 km^2$  em que as taxas de emissões se encontram abaixo de  $123 mgC/m^2d$ , porém as amplitudes das caixas aumentam indicando uma grande dispersão nas amostras e ocorrência de taxas emissões baixas em bacias hidrográficas

grandes.

Figura 10 – Taxas de emissão de  $CO_2$  equivalente em relação ao tamanho da bacia hidrográfica que o reservatório se encontra



Para as emissões de  $CO_2$  e  $CH_4$  difusivo e ebulitivo observa-se nas emissões de  $CO_2$  um crescimento conforme tamanho e poucas ocorrências de valores baixos conforme posição do primeiro quartil. Diferente do  $CO_2$  as emissões médias de  $CH_4$  decrescem com valor máximo apresentado de  $591,34 \text{ mgC}/\text{m}^2\text{d}$  conforme ilustrado na fig 11. Analiza-se então as emissões de  $CH_4$  separadas e se observa as emissões ebulitivas contribuem com maior parte, com pico nas bacias de 0 a  $10 \text{ km}^2$ , mas não possuem um comportamento crescente ou decrescente por variar bastante enquanto as emissões difuvisas possui uma dispersão menor de valores mas sem apresentar um comportaento específico como representado na figura 12.

Figura 11 – Taxas de emissões de (A)  $CO_2$  e (B) taxas de  $CH_4$  totais em relação ao tamanho da bacia hidrográfica do reservatório se encontra

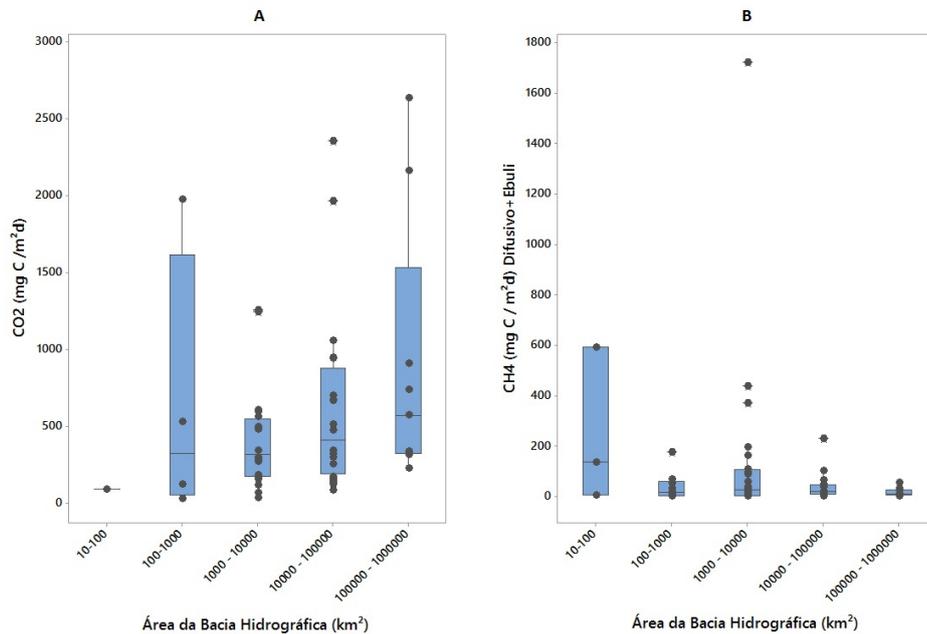
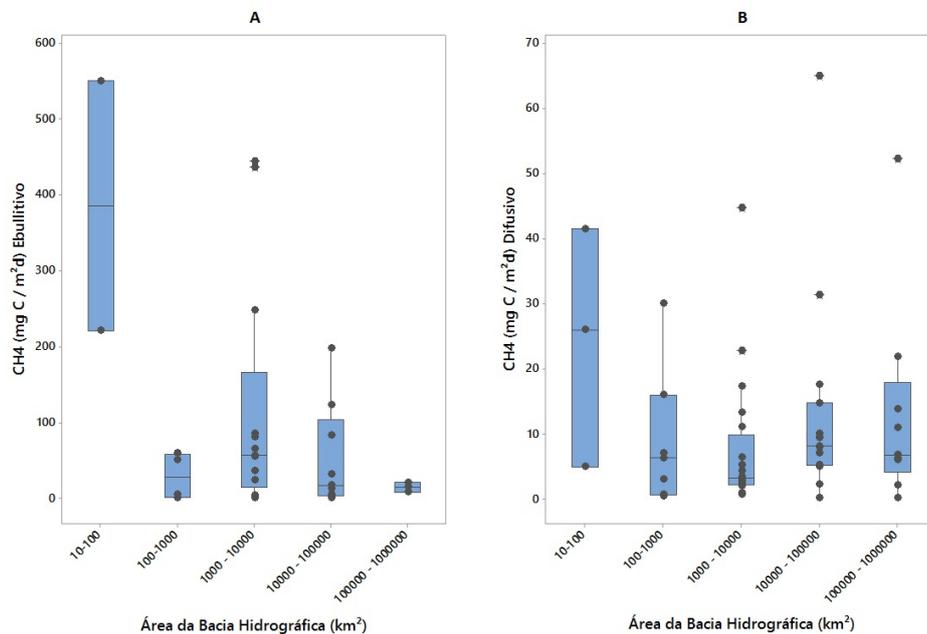


Figura 12 – Taxas de emissão de  $CH_4$  (A) difusivo e (B) ebulitivo em relação ao tamanho da bacia hidrográfica que o reservatório se encontra



#### 4.4 ÁREA DE SUPERFÍCIE COMO INDICADOR

As emissões de carbono total em relação à área de superfície apresentam um crescimento. Há um aumento das medianas e primeiros quartis, porém pouco expressivas para dizer que há variação das emissões conforme variação da área de superfície de um reservatório, como ilustrado na figura 13. A dispersão de emissões são semelhantes com

pequenas diferenças em seus valores de quartis. Ao analisar emissões de  $CO_2$  e  $CH_4$  observa-se o mesmo comportamento estável de emissões de  $CO_2$  em relação a área de superfície do reservatório, enquanto o  $CH_4$  apresenta uma queda conforme aumentamos a area de superfície apresentada na fig 14. Essa queda não é perceptível nas emissões totais de carbono devido o  $CO_2$  ser o maior contribuinte. Na figura 15 podemos observar as emissões de  $CH_4$  sendo as emissões ebulivas dominantes em relação as difusivas.

Figura 13 – Taxas de emissão de  $CO_2$  equivalente em relação ao tamanho da área superficial do reservatório

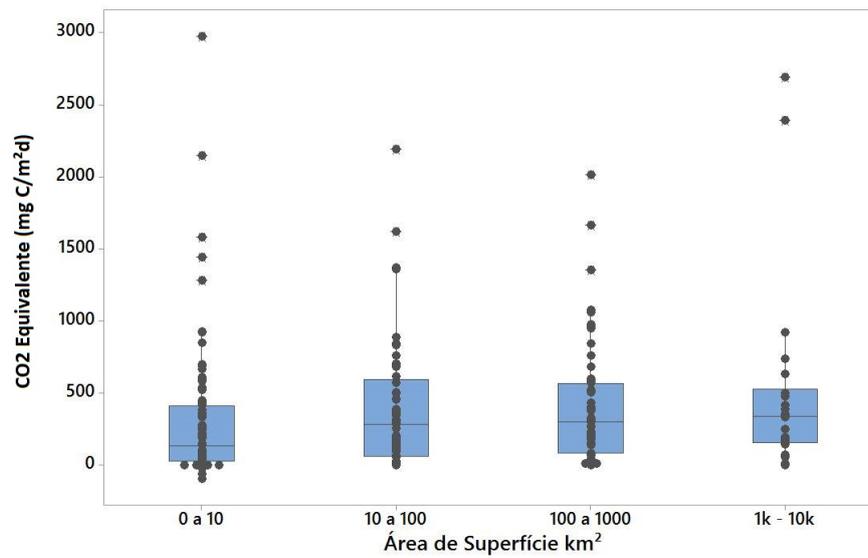


Figura 14 – Taxas de emissões de (A)  $CO_2$  e (B) taxas de  $CH_4$  totais em relação ao tamanho da área superficial do reservatório

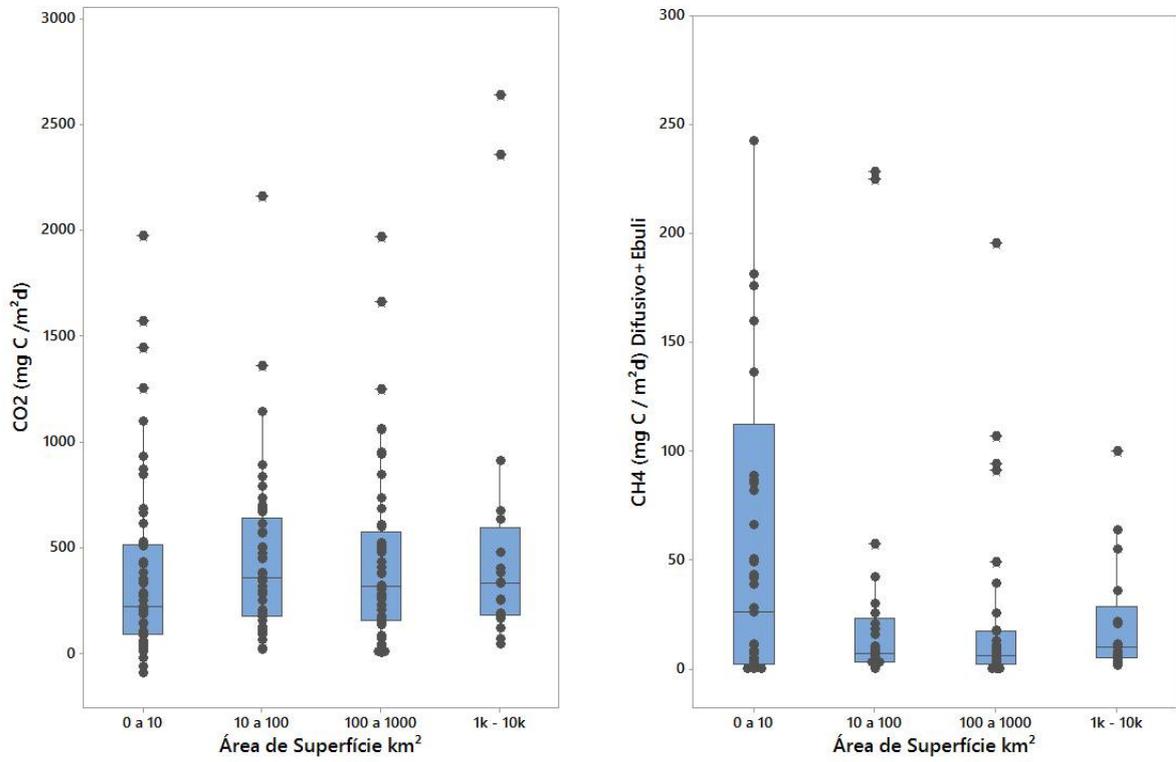
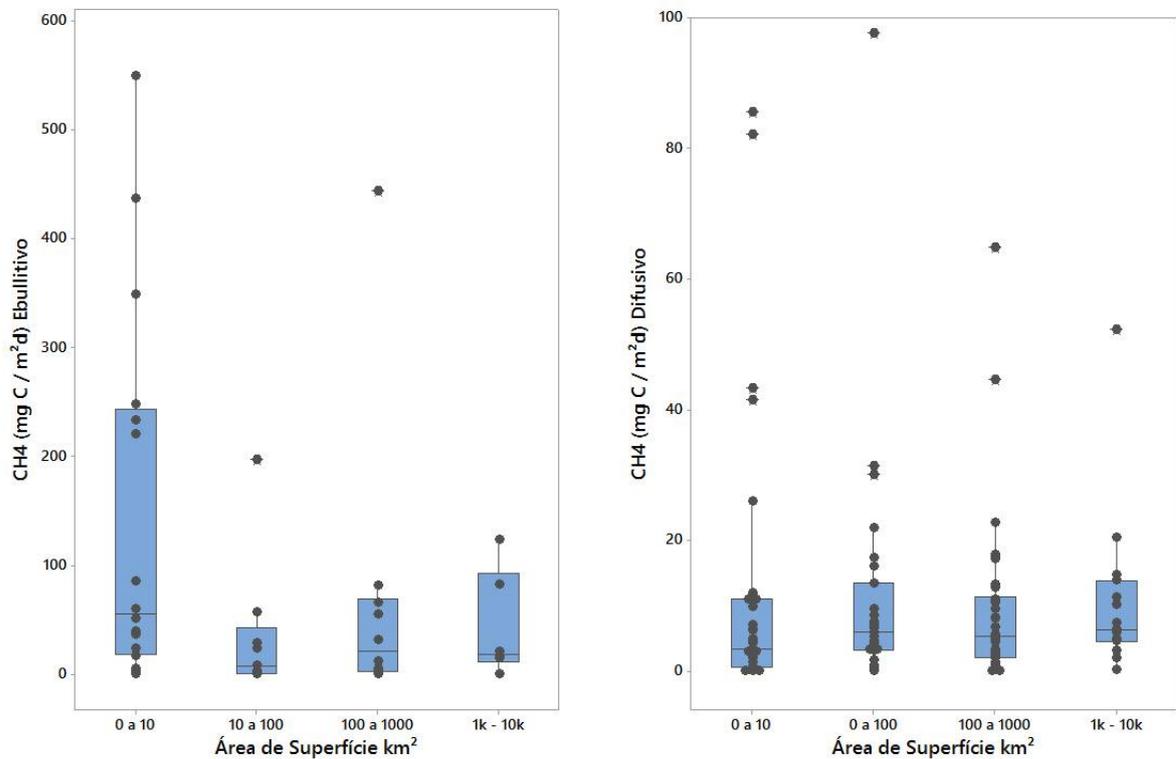


Figura 15 – Taxas de emissão de  $CH_4$  (A) difusivo e (B) ebulitivo em relação ao tamanho da área superficial do reservatório



#### 4.5 PRECIPITAÇÃO MÉDIA ESTIMADA ANUAL COMO INDICADOR

Ao analisar as precipitações anuais observa-se que as emissões totais de carbono apresentam uma pequena variação, em que não é explícito um comportamento crescente ou decrescente em relação à quantidade de chuva no reservatório, como ilustrado na figura 16. As emissões de  $CO_2$  apresentam mesmo comportamento estável, enquanto o  $CH_4$  possui maiores taxas de emissões em locais com pouca e muita precipitação, sendo que o intervalo entre 300 a 1200  $mm/ano$  apresentam baixas emissões, como apresentado na figura 17. A emissão ebulitiva de  $CH_4$  possui um mínimo em locais de 900 e 1200  $mm/ano$  de precipitação, enquanto as emissões difusivas possuem pouca dispersão variando somente entre 0 a 20  $mgC/m^2d$  podendo ser observado na figura 18.

Figura 16 – Taxas de emissão de  $CO_2$  equivalente em relação a quantidade média anual de precipitação estimada no reservatório

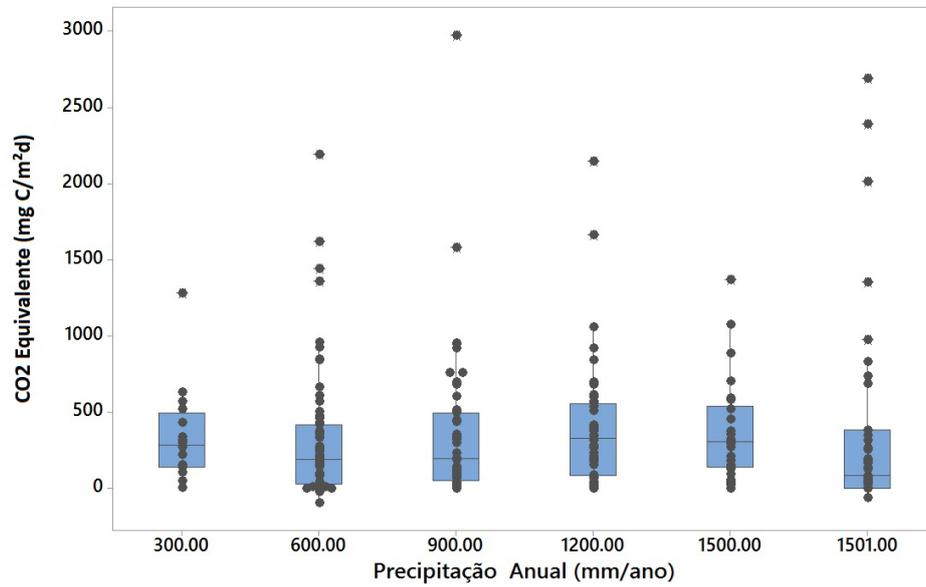


Figura 17 – Taxas de emissões de (A)  $CO_2$  e (B) taxas de  $CH_4$  totais em relação a quantidade média anual de precipitação estimada no reservatório

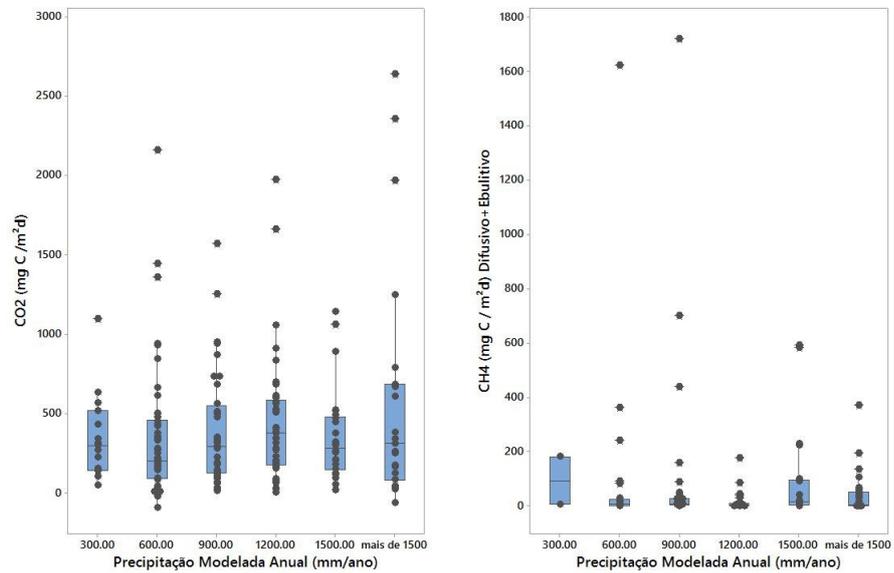
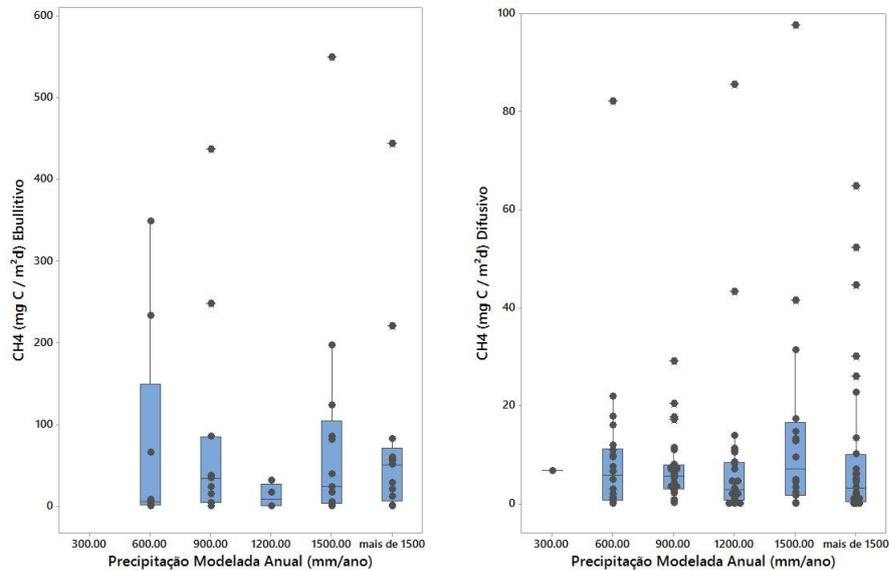


Figura 18 – Taxas de emissão de  $CH_4$  (A) difusivo e (B) ebulitivo em relação com a quantidade média anual de precipitação estimada no reservatório



#### 4.6 TEMPERATURA MÉDIA ANUAL DO AR ESTIMADA COMO INDICADOR

Na figura 19 os maiores valores de emissão equivalente de carbono são obtidos em temperaturas antagônicas, ou seja, em locais abaixo de zero graus ou em locais com temperatura maior que 20 graus. Há um declínio gradual dessas emissões onde o mínimo se encontra entre temperaturas de 10° a 15°C. Ao analisar as emissões de  $CO_2$  pode-se observar comportamento semelhante, já para as emissões de  $CH_4$  temos um padrão crescente conforme a temperatura aumenta, observado na figura 20. Na 21 verifica-se que, para as emissões de  $CH_4$  difusivas há um aumento gradual conforme a temperatura aumenta, e o mesmo comportamento não é notado nas emissões ebulitivas que não apresenta um padrão de comportamento com a variação da temperatura. A menor média encontra-se entre 10° e 15°C, com 22,23  $mgC/m^2d$ , e a maior média encontra-se para as temperaturas logo em sequência, entre 15° e 20°C, com 110,92  $mgC/m^2d$ .

Figura 19 – Taxas de emissão de  $CO_2$  equivalente em relação a temperatura média anual do ar estimada no reservatório

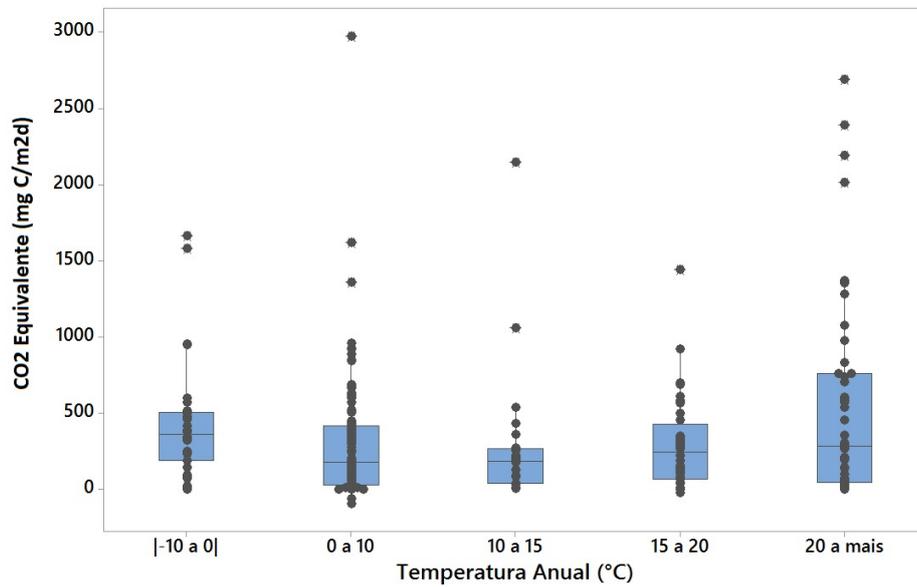


Figura 20 – Taxas de emissões de (A)  $CO_2$  e (B) taxas totais de  $CH_4$  em relação a temperatura média anual do ar estimada no reservatório

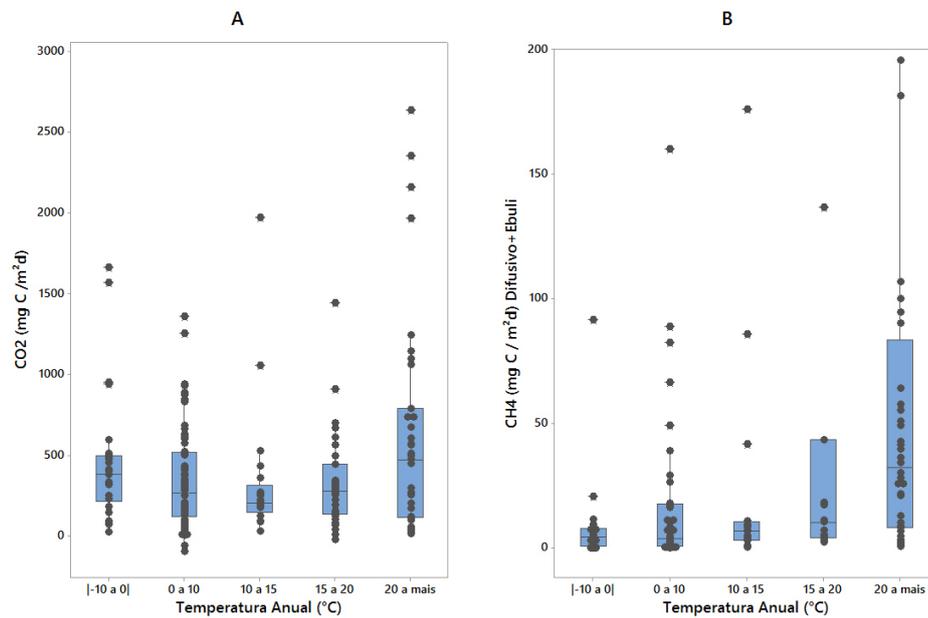
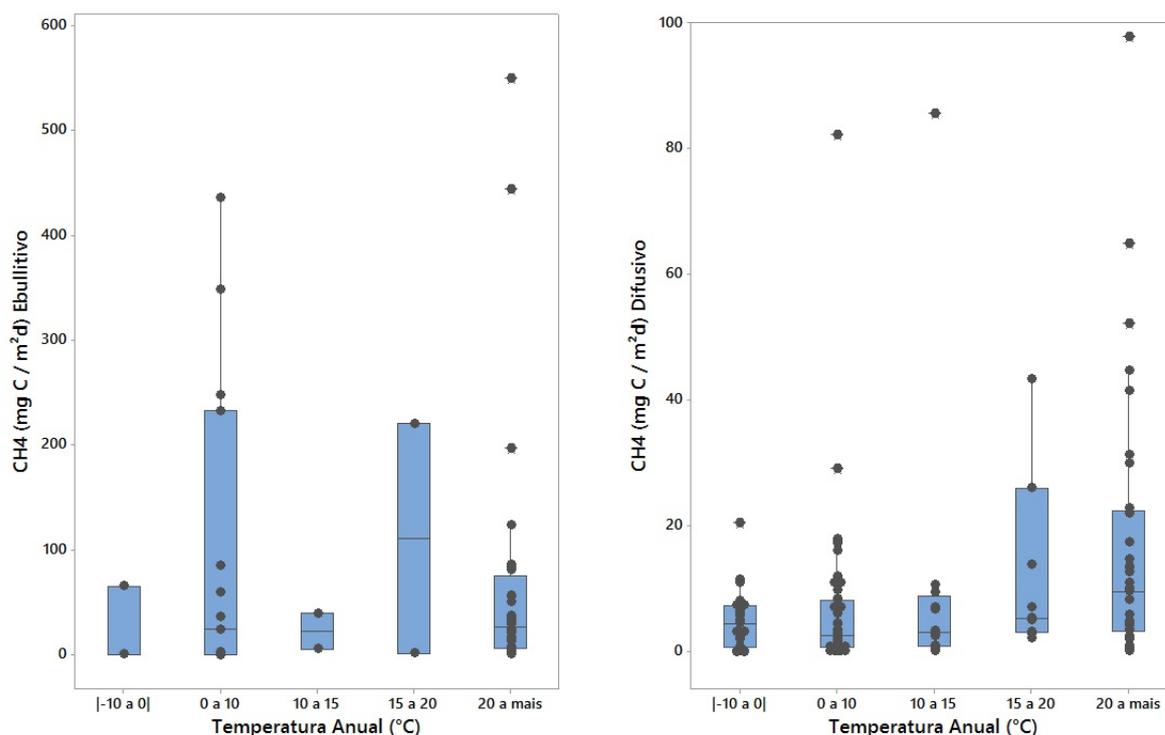


Figura 21 – Taxas de emissão de  $CH_4$  (A) difusivo e (B) ebulitivo em relação com temperatura média anual do ar estimada no reservatório



#### 4.7 FÓSFORO INORGÂNICO DISSOLVIDO COMO INDICADOR

Ao analisar as medidas de fósforo inorgânico dissolvido (FID) é possível observar um comportamento estável nas emissões equivalente de carbono, a maioria encontra-se no intervalo entre 0 e  $500 \text{ mgC}/\text{m}^2\text{d}$ , o que demonstra que apesar do fósforo ser um elemento químico limitante para o crescimento de células e consequente eutrofização do sistema, não há uma influência direta em suas emissões de GEE, como mostra a figura 22. Porém, somente o  $CO_2$ , contribuinte dominante, possui pouca dispersão de valores de emissões conforme variação do fósforo, enquanto que para emissões de  $CH_4$  observa-se a ocorrência de valores mais elevados conforme o aumento de fósforo (Figura 23). Tanto para as emissões ebulitivas e difusivas pode ser observado comportamento semelhante, em que há aumento nas taxa de emissões em relação à quantidade de fósforo fornecida ao sistema. Para quantidades superiores a  $50 \text{ mgC}/\text{m}^2\text{d}$ , nota-se uma discrepância entre as emissões de  $CH_4$  Ebulitivo e Difusivo, porém apresentam as maiores médias de  $193,76 \text{ mgC}/\text{m}^2\text{d}$  e  $59,38 \text{ mgC}/\text{m}^2\text{d}$ , respectivamente.

Figura 22 – Taxas de emissão  $CO_2$  equivalente em relação a carga anual de FID que o reservatório recebe

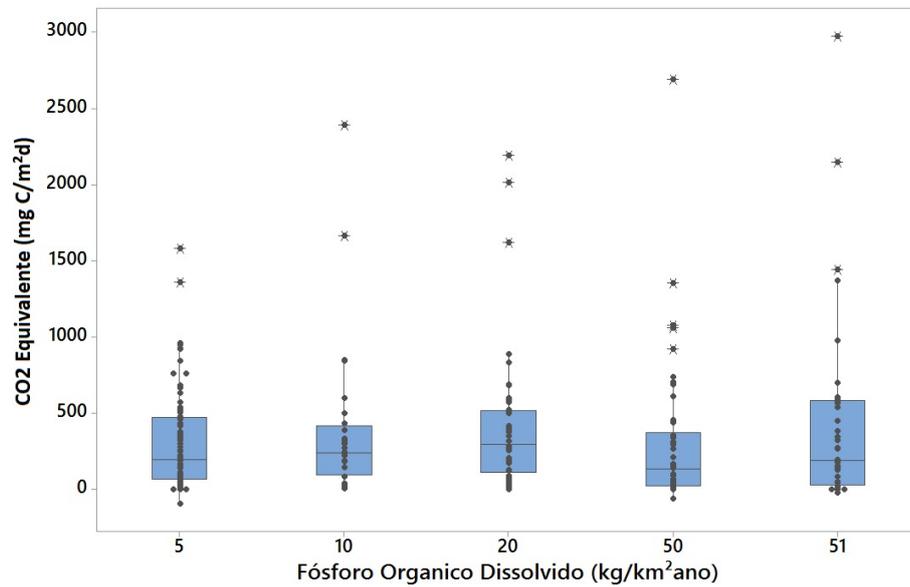


Figura 23 – Taxas de emissões de (A)  $CO_2$  e (B) taxas totais de  $CH_4$  em relação a carga anual de FID que o reservatório recebe

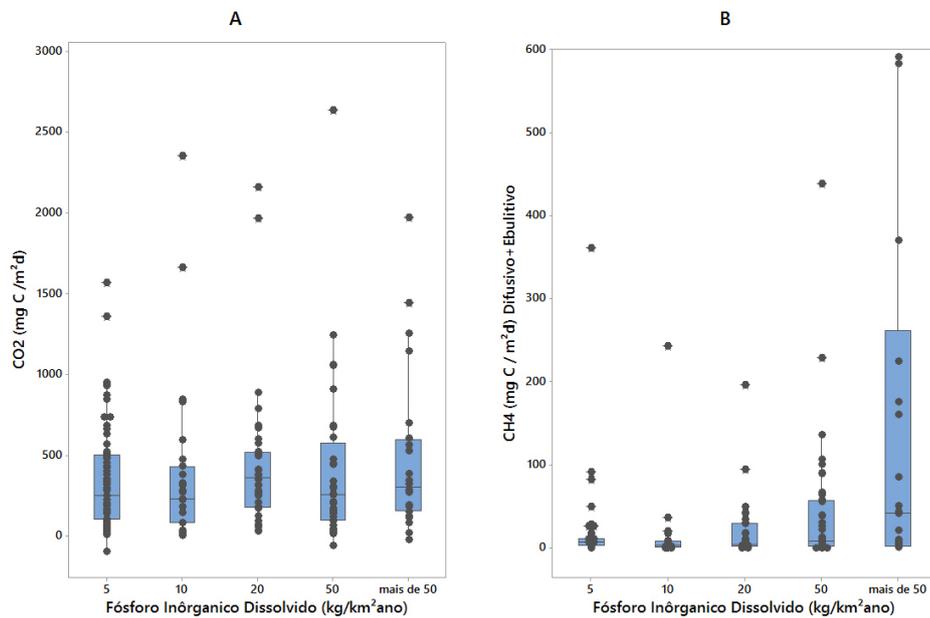
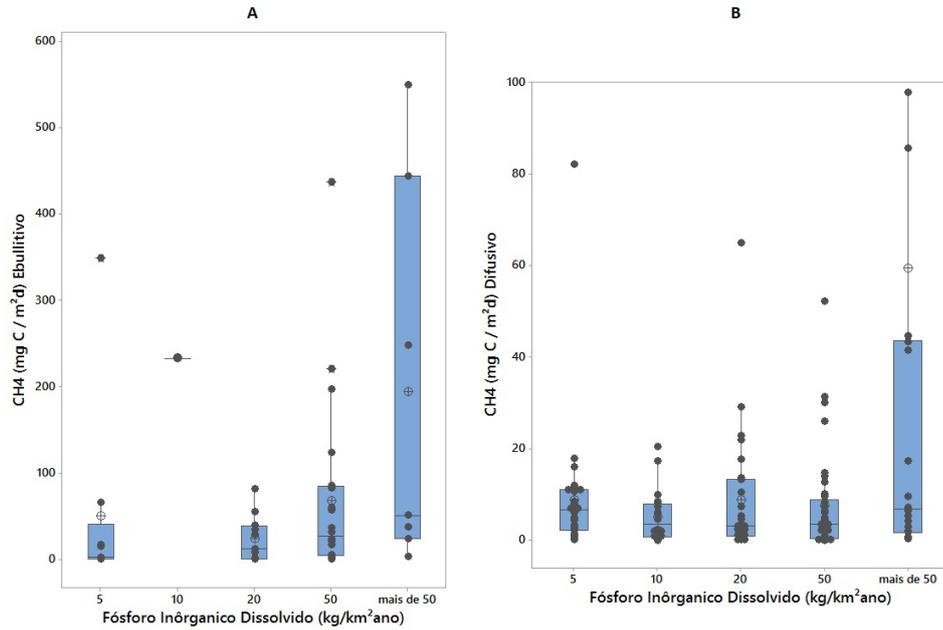
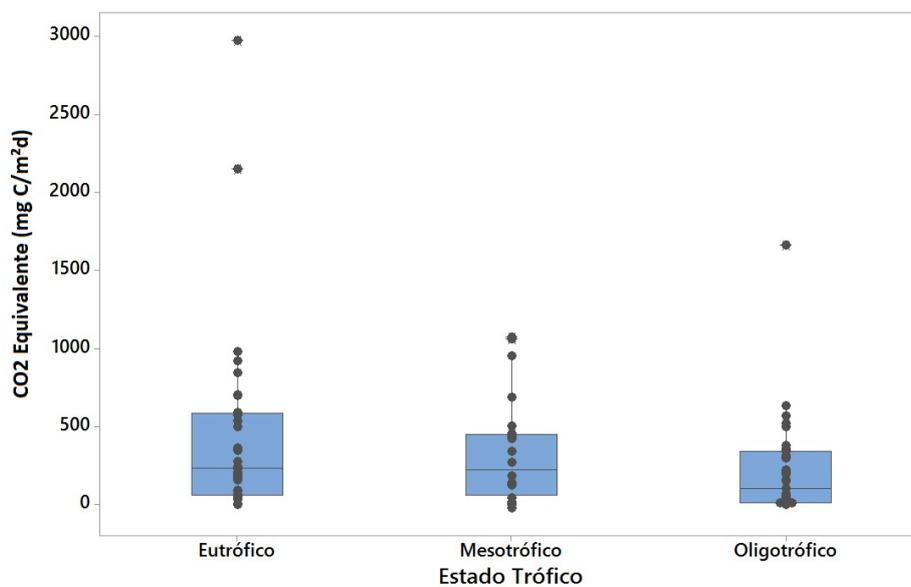


Figura 24 – Taxas de emissão de  $CH_4$  (A) difusivo e (B) ebulitivo em relação com a carga anual de FID que o reservatório recebe



Entretanto, quando classificado os reservatórios quanto ao estado trófico dos mesmos, observa-se que as emissões equivalentes apresentam um padrão, em que as maiores emissões são encontrados em locais mais eutrofizados e menores emissões são encontradas em locais menos eutrofizados, como mostra a figura 25.

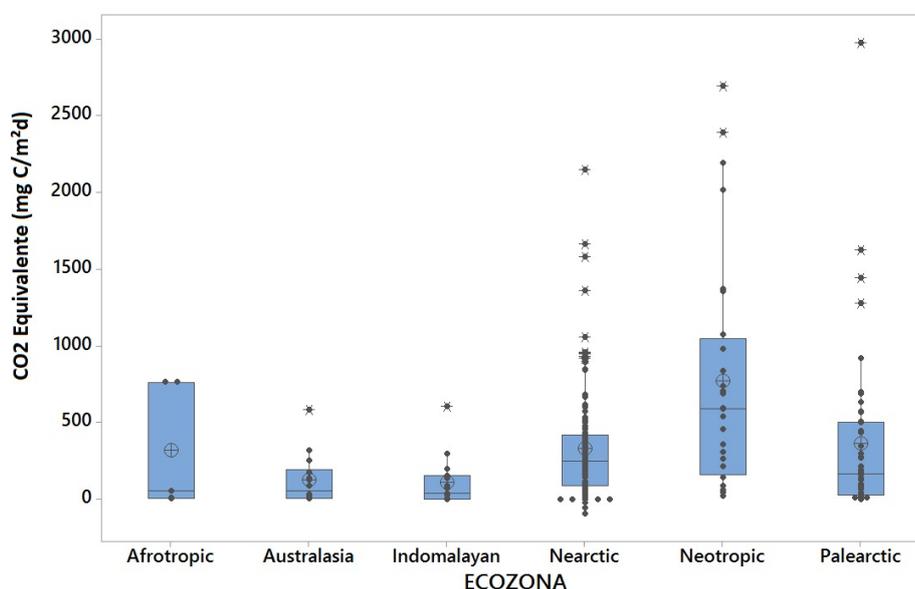
Figura 25 – Taxas de emissão  $CO_2$  equivalente em relação ao estado trófico que o reservatório se encontra



#### 4.8 ECOREGIÕES COMO INDICADOR

Observa-se na figura 26 mostra que mais da metade dos reservatórios está localizado na ecozona Neártica e que apresenta média de emissões equivalentes de  $327,48 \text{ mgC}/\text{m}^2\text{d}$ , enquanto que na região Neotropical, que contém 28 reservatórios, é a que possui as maiores taxas de emissões das ecozonas com média de  $767,58 \text{ mgC}/\text{m}^2\text{d}$ . A ecozona Afro-tropical apresentou média de  $318,33 \text{ mgC}/\text{m}^2\text{d}$ , porém possui apenas 5 amostras de reservatórios, e a Neotropical apresentou a menor média entre as ecozonas com  $111,35 \text{ mgC}/\text{m}^2\text{d}$  e 15 amostras.

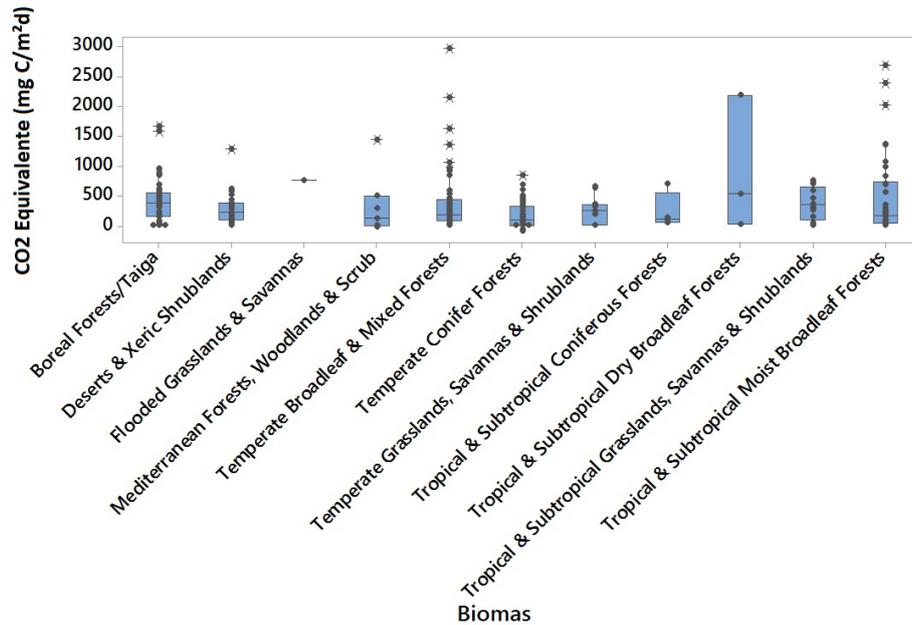
Figura 26 – Taxas de emissão  $\text{CO}_2$  equivalente em relação a ecozona que o reservatório se encontra



Para biomas, a maior concentração de reservatórios é encontrada nas *Boreal Forest/Taiga* (N=49), *Temperate Broadleaf and Mixed Forests* (N=57), *Temperate Conifer Forests* (N=45) e *Tropical and Subtropical Moist Broadleaf Forests* (N= 34), somando mais da metade dos reservatórios. O bioma *Tropical and Subtropical Moist Broadleaf Forests* apresentou emissões equivalentes médias de  $500,34 \text{ mgC}/\text{m}^2\text{d}$ , *Boreal Forest/Taiga* apresentou média de  $415,52 \text{ mgC}/\text{m}^2\text{d}$ , *Temperate Broadleaf and Mixed Forests* com  $391,58 \text{ mgC}/\text{m}^2\text{d}$  e *Temperate Conifer Forests* apresentou a menor média, dentre os quatro biomas mais representativos, com  $171,31 \text{ mgC}/\text{m}^2\text{d}$ . Apesar de *Tropical and Subtropical Dry Broadleaf Forests* apresentar a maior média de  $917,38 \text{ mgC}/\text{m}^2\text{d}$  possui apenas 3 amostras com grande dispersão.

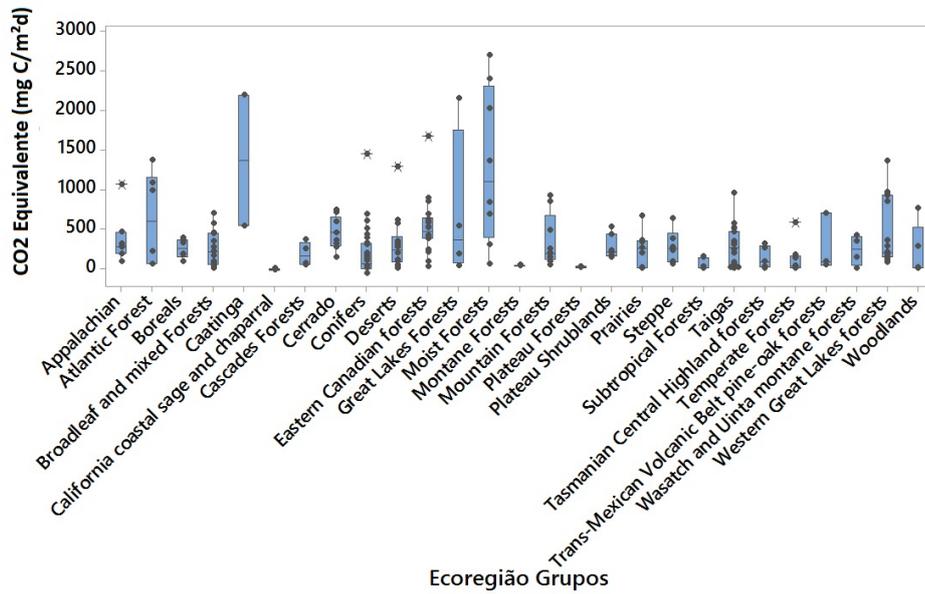
Dos 265 reservatórios que foram associados corretamente com suas ecorregiões, é observado que estes estão distribuídos em 84 das 864 ecorregiões uma distribuição menor de 10%, além disso 15 dessas ecorregiões contêm mais de 5 reservatórios em sua extensão, com isto podemos sugerir que a análise de regiões macrogeográficas teria mais valor. Por

Figura 27 – Taxas de emissão  $CO_2$  equivalente em relação ao bioma que o reservatório se encontra



isso para possibilitar uma análise gráfica mais abrangente foram agrupadas as ecorregiões por termos da nomenclatura que apresentavam maior ocorrência. Assim obteve-se uma redução de 85 ecorregiões para 27 grupos. Observa-se na figura 28 que há uma alta amplitude nesses grupos, em que o grupo *Moist Forests* apresenta valores entre  $50,83 \text{ mgC/m}^2\text{d}$  a  $2691,48 \text{ mgC/m}^2\text{d}$  e *Great Lakes Forests*  $31,8 \text{ mgC/m}^2\text{d}$  e  $2150,0 \text{ mgC/m}^2\text{d}$ . Essa amplitude pode ser explicada pelas baixas quantidades de amostras ainda encontrados no agrupamento. O grupo *Conifers, Eastern Canadian Forests, Taigas* apresentam 28,22 e 22 amostras, respectivamente, e amplitudes pequenas de no máximo  $430,19 \text{ mgC/m}^2\text{d}$ .

Figura 28 – Taxas de emissão  $CO_2$  equivalente em relação a ecoregião que o reservatório se encontra



A tabela 1 apresenta as relação das 15 ecoregiões que em sua extensão possuem pelo menos 5 reservatórios, observa-se também que maior parte das ecoregiões tem média de emissões equivalentes menor que a metade de sua média geral, com exceção de *Western shortgrass prairie*, *Northern Rockies conifer forests*, *Cerrado*, *Colorado Plateau shrublands* e *Great Basin shrub steppe*

Tabela 1 – Emissões médias, máximas e mínimas nas 15 ecorregiões com mais de 5 reservatórios contidos

Emissões				
Ecorregião	Max	Min	Média	Reservatórios
Alps conifer and mixed forests	686	0,4	122,5	9
Alto Paraná Atlantic forests	1368,7	54,53	553,6	5
Cerrado	735,77	142,3	460,68	9
Chihuahuan desert	612,1	11,46	288,4	5
Colorado Plateau shrublands	520,7	140	269,25	7
Eastern Canadian forests	1663,83	23,28	519,25	22
Eastern Canadian Shield taiga	948,9	73,44	369,6	12
Great Basin shrub steppe	344,06	3,03	216,72	6
Guizhou Plateau broadleaf and mixed forests	600	17,63	176,65	7
Northern Rockies conifer forests	700,48	29,1	396,28	6
Scandinavian and Russian taiga	571	12,3	195,96	9
Tasmanian Central Highland forests	315,78	4,15	136,51	5
Western European broadleaf forests	447,17	2,52	173,52	6
Western Great Lakes forests	1357,4	71	452,3	15
Western shortgrass prairie	664,8	191,3	410,35	6

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo principal analisar as possíveis relações entre reservatórios e ecoregiões, seus comportamentos e se é possível classificar as ecoregiões como locais de grande ou baixa emissões como Barros et al. (2011) previamente questionou em sua publicação. Observou-se nesse trabalho a falta de análises estatísticas para comprovar a influência destas características nas emissões de GEE em reservatórios.

A associação de somente 84 ecoregiões das 864 com os reservatórios listados por Deemer et al. (2016) demonstra que ecoregiões podem ser um conceito não acurado quanto ecozonas. Pode-se observar que para ecozonas, mais de 50% dos reservatórios estão presentes Neártico, região da América do Norte, e ocorrências com maior taxa de emissão no Neotropical, basicamente região da América do Sul e Central. Quando analisado os biomas observa-se maiores médias de emissão para o bioma *Boreal Forest/Taiga*, porém a variação nas taxas de emissões é muito grande, que podem ser explicados por suas características próprias de biodiversidade.

Para latitude é observado que as médias de taxas de emissões mais elevadas se encontram próximas ao equador, o que pode ser explicado pelo clima. Em relação a idade é visto que reservatórios jovens possuem médias emissões maiores, e que reservatórios mais antigos possuem maiores taxas de metano ebulitivo, características que podem ser especuladas por vegetação inundada e acúmulo de sedimentos, porém é necessário entender melhor sobre suas interações biológicas.

Observa-se na Bacia Hidrográfica uma média nas taxas emissões elevada nos reservatórios com bacias de dimensões maiores, podendo ser explicada por maior contribuição de matéria orgânica dos afluentes.

Para precipitação não há diferença expressiva em suas médias de emissões nem em dispersão dos dados. Para temperatura ar é observado médias de emissões elevadas para locais de extremo calor ou frio, que pode ser melhor explicado entendendo as interações biológicas do reservatórios.

Para o fósforo orgânico dissolvido observa-se pouca variação nas médias de emissões equivalentes, com pequeno aumento nas emissões em locais mais ricos em fósforo que pode ser melhor observado ao olhar para as emissões *CH<sub>4</sub>* onde o aumento é significativo.

Ao analisar as características dos reservatórios, pode-se observar variações expressivas nas médias emissões de acordo com faixa de uma característica, algumas apresentam dispersão de dados maiores, outras dispersão aleatória e também comportamento estático, praticamente sem variação na taxa de emissões conforme mudança na característica.

Para aprimorar pesquisas futuras uma alternativa é padronizar métodos e técnicas de amostragem, obtendo menor variabilidade e incerteza nos dados, outra alternativa é analisar estatisticamente os dados em cada característica tratada como indicador, por fim há a possibilidade também de relacionar os dados coletados com ecoregiões de água doce que por serem limitadas, mais especificamente, pelas espécies aquáticas e bacia hidrográfica pode apresentar uma relação mais específica.

## REFERÊNCIAS

- ABRIL, G. et al. Carbon dioxide and methane emissions and the carbon budget of a 10-year old tropical reservoir (petit saut, french guiana). *Global biogeochemical cycles*, Wiley Online Library, v. 19, n. 4, 2005.
- BAIRD, C.; CANN, M. *Química ambiental. Tradução de Marco Tadeu Grassi*. [S.l.]: Porto Alegre. Bookman, 2011.
- BARROS, N. et al. Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. *Nature Geoscience*, Nature Research, v. 4, n. 9, p. 593–596, 2011.
- BARTLETT, K. B.; HARRISS, R. C. Review and assessment of methane emissions from wetlands. *Chemosphere*, Elsevier, v. 26, n. 1-4, p. 261–320, 1993.
- BASTVIKEN, D. et al. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate. *Global biogeochemical cycles*, Wiley Online Library, v. 18, n. 4, 2004.
- BASTVIKEN, D.; EJLERTSSON, J.; TRANVIK, L. Measurement of methane oxidation in lakes: a comparison of methods. *Environmental science & technology*, ACS Publications, v. 36, n. 15, p. 3354–3361, 2002.
- BRAGA, B. *Introdução à engenharia ambiental*. [S.l.]: 2ª edição. São Paulo: Person Prentice Hall, 2005.
- BRUNCKHORST, D. J. *Bioregional planning: resource management beyond the new millennium*. [S.l.]: Routledge, 2013.
- DEEMER, B. R. et al. Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: a new global synthesis. *BioScience*, Oxford University Press, v. 66, n. 11, p. 949–964, 2016.
- DELSONTRO, T. et al. Extreme methane emissions from a swiss hydropower reservoir: contribution from bubbling sediments. *Environmental science & technology*, ACS Publications, v. 44, n. 7, p. 2419–2425, 2010.
- DEMARTY, M.; BASTIEN, J. Ghg emissions from hydroelectric reservoirs in tropical and equatorial regions: Review of 20 years of ch 4 emission measurements. *Energy Policy*, Elsevier, v. 39, n. 7, p. 4197–4206, 2011.
- DINERSTEIN, E. et al. An ecoregion-based approach to protecting half the terrestrial realm. *BioScience*, Oxford University Press, v. 67, n. 6, p. 534–545, 2017.
- DINERSTEIN, E. et al. *A conservation assessment of the terrestrial ecoregions of Latin America and the Caribbean*. [S.l.]: World Bank, 1995.
- DUCHEMIN, E. et al. Production of the greenhouse gases ch4 and co2 by hydroelectric reservoirs of the boreal region. *Global Biogeochemical Cycles*, Wiley Online Library, v. 9, n. 4, p. 529–540, 1995.
- FEARNSIDE, P. M. Greenhouse gas emissions from hydroelectric dams: Reply to rosa et al. *Climatic Change*, Springer, v. 75, n. 1, p. 103–109, 2006.

- FONSECA, R. M. F. D. Impactos ambientais associados a barragens e a albufeiras. estratégia de re-aproveitamento dos sedimentos depositados. *DAMS: Impacts and Hazards*, p. 17, 2002.
- GUÉRIN, F. et al. Methane and carbon dioxide emissions from tropical reservoirs: significance of downstream rivers. *Geophysical Research Letters*, Wiley Online Library, v. 33, n. 21, 2006.
- HERTWICH, E. G. Addressing biogenic greenhouse gas emissions from hydropower in Ica. *Environmental science & technology*, ACS Publications, v. 47, n. 17, p. 9604–9611, 2013.
- IHA. Assessment of the ghg status of freshwater reservoirs. *IHA*, 2008.
- IHA. Assessment of the ghg status of freshwater reservoirs. *IHA*, 2010.
- IPCC. The ar3 synthesis report. *IPCC, Geneva, Switzerland*, 2001.
- IPCC. The ar4 synthesis report. *IPCC, Geneva, Switzerland*, 2007.
- KEMENES, A.; FORSBERG, B. R.; MELACK, J. M. Co2 emissions from a tropical hydroelectric reservoir (balbina, brazil). *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, Wiley Online Library, v. 116, n. G3, 2011.
- KIEHL, J. T.; TRENBERTH, K. E. Earth's annual global mean energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 78, n. 2, p. 197–208, 1997.
- LAMBERT, M.; FRÉCHETTE, J.-L. Analytical techniques for measuring fluxes of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> from hydroelectric reservoirs and natural water bodies. *Greenhouse Gas Emissions—Fluxes and Processes*, Springer, p. 37–60, 2005.
- LEHNER, B. et al. High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management. *Frontiers in Ecology and the Environment*, Wiley Online Library, v. 9, n. 9, p. 494–502, 2011.
- LENZI, E.; FAVERO, L. Introdução a química da atmosfera: Ciência. *Vida e Sobrevivência, LTC, Rio de Janeiro*, 2009.
- LOUIS, V. L. S. et al. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: A global estimate: Reservoirs are sources of greenhouse gases to the atmosphere, and their surface areas have increased to the point where they should be included in global inventories of anthropogenic emissions of greenhouse gases. *AIBS Bulletin*, American Institute of Biological Sciences, v. 50, n. 9, p. 766–775, 2000.
- MANNICH, M. *Estimativa de emissões de gases do efeito estufa em reservatórios e lagos - contribuições para o monitoramento e modelagem 1D - vertical*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Paraná, 2013.
- MANNICH, M. et al. Análise da estratificação térmica no reservatório vossoroça através de Índices físicos. In: *XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Rio Grande do Sul: [s.n.], 2013b.
- MARCON, L. Continuous measurement of ebullition in a subtropical reservoir and investigation of its temporal variability Curitiba. *Dissertação*, 2017.

- MENDONÇA, R. et al. Greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs: what knowledge do we have and what is lacking? In: *Greenhouse Gases-Emission, Measurement and Management*. [S.l.]: InTech, 2012.
- MIETTINEN, H. et al. Towards a more comprehensive understanding of lacustrine greenhouse gas dynamics—two-year measurements of concentrations and fluxes of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O in a typical boreal lake surrounded by managed forests. Boreal Environment Publishing Board, 2015.
- OLSON, D. M. et al. Terrestrial ecoregions of the world: A new map of life on earth: A new global map of terrestrial ecoregions provides an innovative tool for conserving biodiversity. *BioScience*, BioOne, v. 51, n. 11, p. 933–938, 2001.
- OSTROVSKY, I. et al. Quantifying gas ebullition with echosounder: the role of methane transport by bubbles in a medium-sized lake. *Limnology and Oceanography: Methods*, Wiley Online Library, v. 6, n. 2, p. 105–118, 2008.
- PIRCHER, W. 36,000 large dams—and still more needed. *Irrigation and Power Journal*, Central Board of Irrigation and Power, v. 50, n. 2, p. 63–80, 1993.
- RAMOS, F. M. et al. Extreme event dynamics in methane ebullition fluxes from tropical reservoirs. *Geophysical Research Letters*, Wiley Online Library, v. 33, n. 21, 2006.
- RICHEY, J. E. et al. Outgassing from amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO<sub>2</sub>. *Nature*, Nature Publishing Group, v. 416, n. 6881, p. 617–620, 2002.
- ROSA, L. P. et al. Biogenic gas production from major amazon reservoirs, brazil. *Hydrological Processes*, Wiley Online Library, v. 17, n. 7, p. 1443–1450, 2003.
- ROSA, L. P. et al. Greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs in tropical regions. *Climatic Change*, Springer, v. 66, n. 1, p. 9–21, 2004.
- ROSA, L. P.; SCHAEFFER, R. Greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs. *Ambio*, v. 23, n. 2, p. 164–165, 1994.
- RUDD, J. W. et al. Are hydroelectric reservoirs significant sources of greenhouse gases. *Ambio*, v. 22, n. 4, p. 246–248, 1993.
- SMITH, K. et al. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes. *European Journal of Soil Science*, Wiley Online Library, v. 54, n. 4, p. 779–791, 2003.
- STEINFELD, H. et al. *Livestock's long shadow: environmental issues and options*. [S.l.]: Food & Agriculture Org., 2006.
- TRANVIK, L. J. et al. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. *Limnology and Oceanography*, Wiley Online Library, v. 54, n. 6part2, p. 2298–2314, 2009.
- XAVIER, M. E. R.; KERR, A. S. A análise do efeito estufa em textos paradidáticos e periódicos jornalísticos. *Caderno Brasileiro de ensino de Física*, v. 21, n. 3, p. 325–349, 2004.
- ZARFL, C. et al. A global boom in hydropower dam construction. *Aquatic Sciences*, Springer, v. 77, n. 1, p. 161–170, 2015.